# ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

# Титов Александр Иванович

# РАЗВИТИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ИЯИ РАН

1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

> Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук Гаврилов Сергей Александрович

Москва, 2025 г.

# оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ	HA 11
1.1 EPICS	11
1.2 TANGO	13
1.3 LSA	15
1.4 DOOCS и TINE	16
1.5 Самостоятельно разработанные системы управления	17
1.6 Коммерческие системы управления	18
1.7 Выводы главы 1	19
ГЛАВА 2 АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕН	ІИЯ
СИЛЬНОТОЧНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ ВОДОРОДА ИЯИ РАН	H 20
2.1 Устройство ввода-вывода	25
2.2 Шкаф связи с пультом	26
2.3 Шкаф синхронизации	28
2.4 Устройство связи с объектом	29
2.5 Ядро автоматизированной системы управления	32
2.6 Серверы контроля и современное оборудование	37
2.7 Система сбора данных	38
2.8 Прочее программное обеспечение	41
2.9 Выводы главы 2	43
ГЛАВА З МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕН	ІИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН	44

3.1 Общая модернизация автоматизированной системы управления	
3.2 Система сбора данных	
3.3 Система контроля потерь пучка	
3.4 Выводы главы 3	
ГЛАВА 4 МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ	СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПУЧН	ζA51
4.1 Датчики профиля пучка, использующие оптические методы	
4.1.1. Флуоресцентный монитор	53
4.1.2. Ионизационный монитор поперечного сечения	
4.1.3. Люминесцентные экраны	
4.2 Особенности реализации программного обеспечения	
4.3 Опыт и результаты использования	
4.4 Выводы главы 4	72
ГЛАВА 5 ПРОЦЕДУРА ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ РЕКОН	ІСТРУКЦИИ
ПОПЕРЕЧНОГО ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ПУЧКА	73
5.1.Соглашение о фазовом эллипсе	75
5.2.Датчики профиля пучка	
5.3.Особенности реализации	77
5.4.Результаты томографии	
5.5.Обсуждение результатов	
5.6.Выводы главы 5	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	

#### введение

#### Актуальность и степень разработанности темы исследования

Контроль и управление параметрами первых ускорителей заряженных частиц производился простейшими выключателями, измерителями тока и напряжения. Вместе с увеличением размеров и мощности ускорителей, увеличивались и масштабы защитных сооружений, окружающих установки. До 60-х годов XX века данная проблема решалась увеличением длины кабелей от каждого прибора.

Первым ускорительным комплексом, на котором данное решение стало неприменимо ввиду размера установки, был Стэнфордский линейный ускоритель (SLAC) [1]. С этого момента крупные ускорительные комплексы получили новую систему, которая отвечала за управление и контроль параметров остальных систем – систему управления (СУ).

Дальнейшая эволюция ускорительных комплексов влекла за собой и развитие их СУ. Появление компьютеров позволило начать автоматизацию процессов управления на основе специализированного программного обеспечения (ПО), а СУ превратились в автоматизированные системы управления (АСУ).

АСУ любого современного ускорительного комплекса является сложной многоуровневой системой, состоящей из множества различных аппаратных и программных элементов [2; 3].

Непрерывная модернизация различных систем линейного ускорителя (ЛУ) ИЯИ РАН приводит к следующей актуальной задаче: в АСУ необходимо модернизировать существующие узлы и реализовывать новые элементы контроля и управления. Результаты всех этих работ позволят улучшить управляемость элементами ЛУ, расширить возможности по настройке и измерению параметров пучков, упростить работу операторов пучка.

# Цели работы

Целью данной работы являлась модернизация АСУ и диагностики пучка ускорительного комплекса ИЯИ РАН. В рамках данной работы были поставлены следующие задачи:

- 1. Разработать программное обеспечение для автоматизации сбора оптических изображений с датчиков поперечного профиля пучка.
- 2. Исследовать основные параметры пучков ионов водорода с использованием оптических методов диагностики.
- 3. Разработать процедуру томографической реконструкции плотности распределения частиц пучка в поперечных фазовых плоскостях (далее – поперечных фазовых портретов) в линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН для расширения возможностей настройки и проводки пучков вдоль ЛУ.
- 4. Исследовать поперечные фазовые портреты пучков протонов на ЛУ ИЯИ РАН с использованием томографической реконструкции.

#### Научная новизна

При помощи процедуры томографии проведено восстановление плотности распределения частиц в поперечных фазовых плоскостях для пучков протонов с энергиями в диапазоне от десятков до сотен МэВ. Предложен и реализован математический алгоритм устранения артефактов томографической реконструкции поперечных фазовых портретов пучков.

Предложена процедура измерения заряда макроимпульса пучка протонов, выведенного в атмосферу, на основе измерения интенсивности свечения люминесцентных экранов под воздействием пучка.

### Практическая значимость работы

Проведенная модернизация отдельных узлов АСУ позволила упростить настройку линейного ускорителя и обеспечить работоспособность ускорительного комплекса в рамках работ по подготовке к получению пучков протонов с энергией до 423 МэВ.

Датчики профиля пучка, которые используют оптические методы в своей работе, установлены в каналах транспортировки ускорительного комплекса ИЯИ РАН. Они позволяют измерять различные параметры пучка и используются для настройки ускорителя во время сеансов работы.

Разработанная процедура томографической реконструкции применяется для проведения измерений параметров пучка в фазовом пространстве, результаты которых используются для оптимизации процессов настройки и проводки пучков протонов.

#### Личный вклад автора

- Разработано универсальное ПО для обработки оптических изображений с датчиков профиля пучка. Данное ПО используется на четырех диагностических приборах, установленных в ускорительном комплексе.
- Разработано ПО для процедуры томографии распределения частиц в поперечных фазовых плоскостях для пучков протонов. Получено распределение плотности частиц в поперечных фазовых плоскостях для протонных пучков средних энергий.
- 3. Разработано ПО управления и контроля за параметрами технологических систем ускорительного комплекса ИЯИ РАН.

При непосредственном участии автора:

- Введена в эксплуатацию система диагностики пучка на основе люминесцентных экранов на исследовательских установках ускорительного комплекса. Данная система используется для измерения положения, размера и количества частиц в каждом импульсе пучка.
- 5. Введен в эксплуатацию датчик измерения профилей пучка на основе свечения остаточного газа на канале транспортировки протонного пучка.
- Обеспечено штатное функционирование ПО АСУ ускорительного комплекса. Проведена унификация версий используемого ПО для решения проблемы конфликта разных версий.

- Обеспечена работа оборудования АСУ на участке ускорения 247 МэВ – 423 МэВ ЛУ ИЯИ РАН.
- 8. Проведена модернизация аппаратной части АСУ ускорительного комплекса ИЯИ РАН.

#### Методология и методы исследования

Разработанные в рамках данной работы алгоритмы и методы предоставляют ряд решений в обработке и анализе данных различных датчиков диагностики параметров пучков заряженных частиц. Программная реализация разработанных методов выполнена с использованием среды разработки LabVIEW [4] и языка программирования Python. Моделирование динамики пучка проводилось с использованием матричного формализма представления ускоряюще-фокусирующего канала ускорителя [5].

# Положения, выносимые на защиту

- 1. Разработано многофункциональное программное обеспечение для оптических методов диагностики поперечного профиля пучка.
- 2. Проведены измерения параметров пучков ионов водорода с использованием оптических методов диагностики в различных точках ускорительного комплекса ИЯИ РАН.
- Разработано программное обеспечение для проведения томографической реконструкции поперечного фазового пучка протонов, в том числе с возможностью автоматизированных измерений.
- 4. Предложен и реализован математический алгоритм коррекции артефактов томографической реконструкции.
- Проведена томографическая реконструкция распределений частиц пучков протонов в поперечных фазовых плоскостях с энергиями в диапазоне от десятков до сотен МэВ.

## Степень достоверности

Все результаты получены на основе проведенных экспериментальных исследований. Достоверность данных, полученных с использованием оптических

методов диагностики, подтверждается сравнением с другими измерителями параметров пучка. Достоверность результатов, полученных с использованием процедуры томографической реконструкции, подтверждается сравнением с апробированным методом поперечных профилей, а также результатами моделирования динамики пучка.

### Связь с научными программами

Отдельные части данной работы выполнены в рамках и при поддержке Научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика» (НЦФМ-6-2325-113).

## Апробация работы и публикации

Всего по теме диссертации опубликовано 9 работ. Результаты работы опубликованы в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК [6; 7; 8], журналах, индексируемых международными базами цитирования Scopus и Web of Science [9] и трудах конференций [10; 11; 12; 13; 14], а также докладывались на следующих российских и международных конференциях:

- 1. VII межинститутская молодежная конференция «Физика элементарных частиц и космология 2018», 2018 (Москва, РФ).
- 2. International Beam Instrumentation Conference (IBIC 18), 2018 (Шанхай, КНР).
- 3. Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 18), 2018 (Протвино, РФ).
- 4. 62-я научная конференция МФТИ, 2019 (Долгопрудный, РФ).
- 5. International Beam Instrumentation Conference (IBIC 20), 2020 (Дистанционно).
- 6. 63-я научная конференция МФТИ, 2020 (Дистанционно).
- 7. Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 21), 2021 (Алушта, РФ).
- 8. Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 23), 2023 (Новосибирск, РФ).

## Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Общий объем диссертации 113 страниц, включая 63 рисунка и 9 таблиц. Список цитируемой литературы включает 101 наименование.

## Содержание работы.

Во **Введении** излагаются актуальность и степень разработанности темы исследования, цель, научная новизна и практическая ценность работы; раскрывается личный вклад автора, методология и методы исследования, степень достоверности, перечисляются положения, выносимые на защиту, и указываются данные о публикациях и апробации работы.

В первой главе приведен обзор современных систем управления, которые используются в различных ускорительных комплексах по всему миру. Рассмотрена программная составляющая таких систем. Предложена классификация основных типов систем управления, разобраны их основные характеристики и особенности использования.

Вторая глава посвящена описанию АСУ ЛУ ИЯИ РАН. В разделах 2.1-2.4 описываются основные элементы проектного оборудования, а именно устройство ввода-вывода (УВВ), шкаф связи с пультом (ШСП), шкаф синхронизации (ШС) и устройство связи с объектом (УСО). Раздел 2.5 посвящен ядру АСУ. Также в этом разделе приводятся основные характеристики существующей системы синхронизации ЛУ. Особое внимание уделяется причинам создания специальных серий синхроимпульсов для инжекторов ионов. В разделе 2.6 речь идёт о современном оборудовании, которые используется в АСУ ЛУ ИЯИ РАН. В разделе 2.7 описана программная часть АСУ и её основа, система сбора данных (ССД) – собственное клиент-серверное ПО. Приводится информация об особенностях используемого протокола обмена данных и об особенностях хранения параметров ЛУ. Раздел 2.8 посвящен программному обеспечению, которое не входит в ССД. В разделе 2.9 представлены выводы главы.

В третьей главе описана проведенная модернизация отдельных узлов АСУ ЛУ ИЯИ РАН. В разделе 3.1 приведены общие изменения, проведенные при

модернизации АСУ. Описаны характеристики и особенности работы АСУ, которые повлияли на решения о модернизации той или иной части. Раздел 3.2 посвящен описанию результатов модернизации системы сбора данных. Описаны изменения части АСУ высокочастотных (ВЧ)-систем, произведенные в системы магнитооптики и аварийных систем экспериментального комплекса. Также упоминается реализация контроля фаз электропитания АСУ. В разделе 3.3 речь идет о модернизации программного обеспечения части АСУ, которая связана с системой контроля потерь пучка. В разделе 3.4 представлены выводы главы. Четвертая разработке глава посвяшена универсального программного обеспечения для датчиков пучка, использующих оптические методы в своей работе. В разделе 4.1 описаны все датчики, для которых разрабатывалось данное ПО. В разделе 4.2 разобраны особенности реализации базовой программной части и дополнительных модулей. Раздел 4.3 посвящен экспериментальным результатам и опыту использования ПО. В разделе 4.4 представлены выводы главы.

В пятой главе описана реализация процедуры томографической реконструкции фазовых портретов пучка в поперечных фазовых плоскостях. В разделе 5.1 речь идет о соглашении о фазовом эллипсе, принятом в ИЯИ РАН. В разделе 5.2 описаны характеристики датчиков профиля пучка (профилометров) и системы магнитооптики, которые используются для реконструкции. Раздел 5.3 посвящен описанию программного обеспечения для процедуры томографии. Особое внимание уделено анализу метода одновременной алгебраической реконструкции и погрешностей томографической реконструкции в целом. В разделе 5.4 приведены результаты томографии для различных профилометров. Раздел 5.5 посвящен обсуждению полученных результатов, в нём проведено сравнение с уже использующимся методом поперечных профилей. В разделе 5.6 представлены выводы главы.

В Заключении приводятся основные результаты и выводы работы, а также выражаются благодарности тем, кто оказывал помощь и содействие в реализации работы.

# ГЛАВА 1

# ОБЗОР СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ НА УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Для ускорительных комплексов можно выделить четыре основных типа систем управления:

• СУ, реализованные с использованием инструментов, разработанных большими коллаборациями, которые специально создавались для этой цели. Наиболее известные системы этого типа – EPICS и TANGO.

• СУ, основанные на разработках какого-либо конкретного института или коллаборации (речь о коллаборациях, связанных с крупными научными экспериментами), но впоследствии распространившиеся внутри института и других институтах/коллаборациях. Представители данного типа – LSA, DOOCS и TINE.

• СУ, основанные на собственных разработках отдельных институтов для конкретных машин. На начальных этапах представители СУ первых двух типов тоже относились к этому пункту.

• СУ, реализованные на коммерческом ПО.

# 1.1 EPICS

EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) – клиент-серверная среда разработки систем управления, которая на данный момент широко используется на больших установках, ускорителях и телескопах. Её разработка началась в 1990-х гг. в Лос-Аламосе [15].

Как следует из описания СУ EPICS, в её состав входят серверы и клиенты, которые производят обмен информацией по специальному протоколу Channel Access. Серверы (оригинальное название: IOC – Input-Output Controllers) передают клиентам информацию посредством основной единицы данных EPICS – Process Variable, которая содержит определенную информацию с реальных устройств, а

также временную метку, информацию о проблемах, единицы измерения и диапазон значений величины [16].

ЕРІСЅ используется во многих ускорительных комплексах. На линейном резонансном ускорителе электронов Ускорительного центра Айдахо (IAC) на основе EPICS реализовано управление источниками питания магнитов и ПЗС-видеокамерами [17]. Для источников питания также реализована система сохранения установленных токов и их повторная установка при начале работы ускорителя с использованием программы BURT – Back Up and Restore Tool.

На сверхпроводящем ускорителе электронов Дармштадтского технического университета (S-DALINAC) EPICS был выбран через двадцать лет после ввода ускорителя в эксплуатацию как среда, на основе которой будет создана обновленная система управления ускорителем [18]. EPICS был выбран во многом из-за его адаптивности, масштабируемости, совместимости с Linux и наличия активного сообщества разработчиков и пользователей.

Из-за хорошей масштабируемости EPICS, наряду с вышеприведенными примерами небольших ускорителей, на основе этой системы созданы системы управления крупных ускорительных комплексов. На электрон-позитронном коллайдере Института физики высоких энергий Китайской академии наук (BEPC-II) EPICS используется как основная среда для создания СУ [19]. За время эксплуатации данная СУ отмечена как надежная и удобная в работе, в том числе и благодаря выбранной основе.

В установке лазера на свободных электронах Пхоханской ускорительной лаборатории (PAL-XFEL) EPICS используется как основной инструмент для разработки СУ. С использованием EPICS реализовано управление системой питания магнитооптики, системой синхронизации, управление системами ВЧ низкого уровня, ВЧ-питания и т.д. [20].

На источнике нейтронов Окриджской национальной лаборатории (SNS) система управления основана на EPICS. Благодаря масштабируемости и гибкости EPICS ускорительный комплекс может регулярно обновлять и модернизировать

СУ в соответствии с требованиями и даже кардинально менять топологию сети и подход к созданию ПО [21].

В многоцелевом ускорительном комплексе Корейского института исследований ядерной энергии (КОМАС) на основе EPICS реализована система управления ЛУ протонов и отрицательных ионов водорода с несколькими экспериментальными станциями [22].

Гибкость EPICS позволяет использовать эту систему для интеграции систем, созданных при помощи других средств. На сверхпроводящем линейном ускорителе тяжелых ионов Института физико-химических исследований Японии (SRILAC) в EPICS выполнена интеграция уже существующих систем на базе ПО LabVIEW для расширения функционала данных систем и создания приложений более высокого уровня с использованием протокола ChannelAccess [23].

Помимо уже описанных ускорительных комплексов EPICS используется на источниках синхротронного излучения [24; 25], импульсных источниках нейтронов [26; 27; 28], циклотронах [29; 30], ускорительном комплексе J-PARC [31], электрон-позитронном коллайдере SuperKEKB [32] и т.д.

К недостаткам EPICS можно отнести не всегда стабильную работу. В [32] описывается самопроизвольное отключение системы без каких-либо предупреждений и ошибок.

# 1.2 TANGO

ТАNGO (TAco Next Generation Objects) второе поколение систем управления, разработка которых началась в ESRF в конце 1990-х годов [33; 34; 35]. Первым поколением являлась система TAco, присутствующая в названии TANGO.

Так же, как и EPICS, TANGO – это клиент-серверная среда с открытым исходным кодом для разработки систем управления. Исторически сложилось так, что TANGO в основном используется на синхротронах и лазерах на свободных электронах. Для работы с серверной частью TANGO полностью поддерживает

языки программирования C++, Java и Python. Есть поддержка LabVIEW и Matlab для написания клиентских приложений [35].

ТАNGO – это объектно-ориентированный комплекс инструментов, где объектом (оригинальное название: device) является любая единица оборудования или ПО. Управление объектами реализовано с помощью серверов устройств (оригинальное название: device server). ТАNGO поддерживает следующие типы взаимодействия между клиентом и сервером: синхронный, асинхронный и на основе событий. Также среди инструментов имеется ПО для администрирования, тестирования, и т.д. [36]. Данный комплекс инструментов регулярно обновляется и пополняется новыми функциями [37].

На источнике синхротронного излучения MAX-IV TANGO используется как основной инструмент при разработке системы управления [38]. Гибкость TANGO позволяет работать с такими приборами, как Libera Single Pass E и Brilliance+ без необходимости разрабатывать отдельные драйверы. Возможность работы с несколькими языками программирования позволила реализовать отдельный пользовательский интерфейс на Python/PyQt. Также TANGO используется и на других источниках синхротронного излучения [39; 40] и лазерах на свободных электронах [41].

TANGO используется в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) на коллайдере NICA. В целом система управления NICA рассчитана на быструю разработку, простое развертывание и интеграцию систем сторонних производителей с упором на масштабируемость, виртуализацию, мониторинг и контроль доступа для обеспечения эффективной работы ускорительного комплекса. TANGO, как основа данной СУ, позволит удовлетворить всем Помимо коллайдера NICA, в ОИЯИ требованиям [42]. TANGO также используется на ускорителе электронов ЛИНАК-200 И прототипе фотоинжектора [43].

# 1.3 LSA

Большой Адронный Коллайдер и весь остальной комплекс ускорителей ЦЕРН используют свою систему управления. Данная СУ состоит из трёх уровней: уровень непосредственного взаимодействия с оборудованием (Front End Layer), сервисный уровень (Service Layer) и уровень операторских интерфейсов (Presentation Layer) [44]. Данная архитектура имеет название LSA (LHC Software Architecture).

Front End Layer управляет источниками питания магнитов, вакуумным оборудованием, приборами диагностики пучка и т.д. Управление ведется посредством использования WorldFIP, крейтов стандарта VME и программируемых логических контроллеров Schneider и Siemens.

К Service Layer можно, например, отнести системы обратной связи реального времени, которые отвечают в том числе за коллимацию пучков и блокировку источников питания магнитооптики ускорителей, что важно для обеспечения безопасности всего ускорительного комплекса.

Presentation Layer отвечает за своевременное предоставление информации операторам пучка в максимально удобном для них формате. Имеющаяся в ЦЕРН система Post Mortem помогает интерпретировать данные о прерываниях пучка и мощности для улучшения понимания работы.

Основу данной системы составляет FESA (Front End Software Architecture) – среда для разработки ПО для непосредственного управления оборудованием. В качестве коммуникационного протокола используется ZeroMQ, пришедший на замену протоколу COBRA.

Поскольку управление ускорителем осуществляется сразу несколькими операторами, которые могут находиться в разных пультовых, то особую важность приобретает работа с распределенным управлением. Для решения потенциальных проблем с одновременным изменением параметров ускорителей разработан протокол распределенных транзакций реального времени [45]. В данном протоколе

используется процесс фиксации всех изменений параметров ускорителя с возможностью мгновенного восстановления тех или иных изменений, а также система, которая уведомляет оператора обо всех изменениях, произведенных кем-то другим.

В ускорительном комплексе FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) в Центре по изучению тяжелых ионов имени Гельмгольца (GSI) в Дармштадте LSA взята за основу системы управления [46; 47]. Данная СУ по сути является развитием LSA, в том числе и в аппаратном плане, так как в качестве внешнего контроллера планируется использовать универсальный масштабируемый блок управления (SCU). SCU объединяет коммерческий компьютер и мощную ПЛИС для обеспечения вычислительных и аппаратно-логических ресурсов для управления оборудованием.

## 1.4 DOOCS и TINE

На Европейском рентгеновском лазере на свободных электронах (European XFEL) и других ускорителях исследовательского центра DESY используется набор собственных систем управления. Для управления используется DOOCS (Distributed Object-Oriented Control System), которая была разработана для FLASH в 1993 году [48; 49]. Объектно-ориентированный подход и использование протокола ZMQ делает DOOCS схожей с системой TANGO. DOOCS используется для высокоскоростных действий, синхронизированных с пучком.

За контроль медленных систем, таких как источники питания магнитооптики ускорителей и вакуумную систему, отвечает система TINE (Three-fold Integrated Networking Environment), которая создавалась для источника синхротронного излучения PETRA III [50].

16

# 1.5 Самостоятельно разработанные системы управления

Многие ускорительные комплексы используют собственные системы управления, созданные для конкретных ускорителей. На данный момент число таких установок уменьшается, поскольку большинство новых ускорительных комплексов сразу используют EPICS или TANGO в связи с их активным развитием и общирной базой успешных примеров применения.

Самостоятельные СУ в большинстве случаев используются на установках, где переход на вышеописанные примеры является нецелесообразным или попросту невозможным в связи с особенностями оборудования или сложностью перехода.

Система управления коллайдером ВЭПП-2000 – это пример самостоятельно разработанной СУ для электронно-позитронного коллайдера в Институте ядерной физики имени Будкера (ИЯФ) в Новосибирске [51; 52].

Аппаратная часть системы управления построена на базе протокола CANBus, CAMAC и специализированных блоках производства ИЯФ.

Программный комплекс основан на взаимодействующих частях, которые соответствуют различным системам ускорительного комплекса. СУ работает на подключенных по TCP/IP компьютерах под управлением ОС Linux и использует технологию клиент-сервер. Архитектура программного обеспечения разработана таким образом, чтобы пользовательские приложения могли управлять и контролировать различные аппаратные блоки, такие как импульсные источники питания магнитов, ВЧ системы и т.д.

ПО позволяет операторам управлять и контролировать различные аппаратные подсистемы через пользовательские приложения с графическим интерфейсом. Система является модульной, что позволяет включать новые функции и аппаратные средства без существенной реконструкции ПО. Архитектура программного обеспечения разработана таким образом, чтобы скрыть от операторов детали конфигурации оборудования, а вся информация хранится в специальных базах данных. Ещё одним примером является CXv4 – модульная система управления, также разработанная в ИЯФ [53].

Система разработана на основе модульного подхода, где такие компоненты, как плагины доступа к данным и драйверы, реализованы в виде плагинов для легкой интеграции. Модульная конструкция позволяет использовать различные комбинации модулей, объединяя графический интерфейс и серверные части в единое приложение. СХv4 предоставляет возможность доступа к данным с различных серверов и систем управления с помощью унифицированного интерфейса программирования приложения, что упрощает процесс интеграции.

Гибкость данной системы демонстрируется на примере различных сценариев развертывания, таких как объединение графического интерфейса и сервера с драйверами в единое приложение без взаимодействия с сетью или добавление сетевого интерфейса для удаленного доступа на небольших объектах.

Успешный переход на CXv4 был осуществлен на ВЭПП-5. Данная система вполне может в будущем перейти в разряд таких СУ как LSA или DOOCS. Однако разработчики CXv4 делают ставку на интеграцию с EPICS и переход на уже существующие решения.

Помимо вышеописанных примеров собственные СУ используются на таких ускорителях как SACLA [54] и UVSOR-II [55], комплексе ионно-лучевой терапии НІТ [56; 57]. Собственную СУ планируется использовать на ускорителе гибридного исследовательского реактора MYRRHA [58].

# 1.6 Коммерческие системы управления

Коммерческие системы управления являются крайне редкими решениями в случае ускорителей частиц. Их гибкость и применимость уступает специализированным СУ, также минусом является высокая стоимость подобных систем. Тем не менее и здесь имеются успешные примеры применения.

В ускорительном комплексе КАRТ (Kumatori Accelerator Driven Test) в Киото в качестве основы для системы управления 150-МэВным ускорителем протонов [59] выбрана среда LabVIEW от компании National Instruments. По итогам разработки данная система продемонстрировала достаточную надежность, гибкость и производительность для работы ускорителя. Обновленная система управления каналами вывода пучков из синхротрона У-70 НИЦ КИ-ИФВЭ в Протвино также основана на LabVIEW [60]. Также LabVIEW является основной средой, в которой разработана система управления ЛУ ИЯИ РАН.

## 1.7 Выводы главы 1

Проведенный обзор позволяет сделать вывод, что не существует универсального средства для любого ускорительного комплекса. В зависимости от поставленных задач, размера установки, кадровых, финансовых и временных возможностей оптимальным решением будет выбор конкретного продукта, либо разработка собственного.

# ГЛАВА 2

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ ВОДОРОДА ИЯИ РАН

Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН [61] функционирует на основе линейного ускорителя протонов и отрицательных ионов водорода, схема которого представляена на Рисунке 2.1. ЛУ представляет собой сильноточный резонансный ускоритель, с проектной энергией до 602 МэВ, проектным током пучка до 50 мА, проектной длительностью импульса тока до 200 мкс и частотой повторения импульсов до 50 Гц. В ускорительном центре расположено несколько экспериментальных установок: комплекс по производству радиоизотопов, стенд протонного облучения (СПО), импульсный источник эпитепловых нейтронов РАДЭКС, импульсный источник тепловых нейтронов ИН-06, спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100 и комплекс протонной терапии (КПТ).



Рисунок 2.1 – Схема ускорительного комплекса ИЯИ РАН. Н+ – инжектор протонов, Н- – инжектор отрицательных ионов водорода; RFQ – резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, Р – резонатор; СПО – стенд протонного облучения, КПТ – комплекс протонной терапии, CB3 – спектрометр по времени замедления в свинце

Автоматизированная система управления ЛУ ИЯИ РАН – это одна из систем ускорительного комплекса. Более точно было бы использовать название система контроля и управления (СКиУ), но первое название исторически укоренилось в ИЯИ РАН и в дальнейшем АСУ будет использоваться как основное название. АСУ взаимодействует и имеет связи с большинством других систем и оборудованием ускорительного комплекса, поэтому для ясности используется термин "объект" – любой элемент или объединенная группа элементов других систем ускорительного комплекса. Объектом может выступать отдельный источник питания магнитооптики ускорителя или оборудование, обеспечивающее работу отдельного генератора ВЧ-мощности для питания резонаторов.

АСУ ЛУ ИЯИ РАН отвечает за выполнение трех функций:

- 1. Синхронизация различных объектов. От АСУ требуется, чтобы любые два объекта запускались строго в определенное время с точностью в 1 мкс.
- 2. Сбор и обработка аварийных сигналов от объектов. АСУ регистрирует аварийные сигналы от различных объектов, и на основе полученных сигналов накладывает ограничения на работу собственных элементов.
- Контроль параметров и управление объектами. Данная функция отвечает за своевременный сбор данных со всех объектов и передачу их непосредственно персоналу, управляющему ускорителем, а также за передачу управляющих сигналов к объектам.

АСУ ЛУ ИЯИ РАН изначально спроектирована Московским радиотехническим институтом (МРТИ) РАН к 1974 году [62]. В дальнейшем система управления непрерывно модернизировалась и расширялась. На данный момент АСУ имеет следующую структуру (Рисунок 2.2):

- Имеется шесть крупных практически независимых групп оборудования АСУ (секторов), пять находятся соответственно на пяти секторах ЛУ, а шестой находится в экспериментальном комплексе (ЭК).
- Имеется один главный узел, он находится на втором секторе.
- Сигналы синхронизации (синхроимпульсы) передаются последовательно от сектора к сектору.
- Аварийные сигналы передаются от секторов на главный сектор напрямую.

21

• Все секторы связаны между собой при помощи локальной сети на основе протокола Ethernet. Локальная сеть связана с сетью интернет через межсетевой экран в одном месте.



Рисунок 2.2 – Структура АСУ ЛУ ИЯИ РАН. Зеленые линии – сигналы синхронизации, красные линии – аварийные сигналы

На отдельных секторах АСУ также имеет определенную структуру. Второй сектор является главным с точки зрения управления всем ускорительным комплексом. Именно в этом секторе находится центральная пультовая, из которой ведется управление ускорительным комплексом, а также центральные узлы синхронизации и сбора аварийных сигналов. АСУ на втором секторе имеет следующую структуру (Рисунок 2.3):

• По локальной сети связаны друг с другом различные серверы АСУ, а также некоторые современные объекты других систем, управление которыми можно вести напрямую.

• Часть серверов снабжено различным современным оборудованием компаний National Instruments и Advantech через которые ведется контроль параметров и управление различными объектами.

• Один сервер связывается с установленным при проектировании оборудованием АСУ (в дальнейшем для обозначения данного оборудования будет использоваться термин "шкафы АСУ"). Связь происходит через Устройство ввода-вывода.

• Сигналы синхронизации формируются в Шкафу синхронизации, УСО 13 и пульте управления ускорителем (в дальнейшем просто пульт). Через ШС все сигналы передаются на первый и третий секторы.

• Аварийные сигналы собираются в Шкаф связи с пультом и пульт.

• Непосредственное взаимодействие с объектом осуществляется через УСО 1–12, 14–20. Через УСО происходит передача синхроимпульсов к объекту, сбор аварийных сигналов с объекта, контроль параметров и управление объектом.

• Взаимодействие с УСО происходит по большей части через УВВ, но базовые параметры шкафа, такие как включение/выключение, управляются через ШСП.



Рисунок 2.3 – Структура АСУ на втором секторе. Синие линии – локальная сеть, желтые – сигналы управления шкафами АСУ, зеленые – сигналы синхронизации, красные – аварийные сигналы, черные – сигналы, которые идут к объектам или современному оборудованию АСУ. NI – оборудование компании National Instruments, ADAM – оборудование компании Advantech. УВВ – устройство вводавывода, ШС – шкаф синхронизации, ШСП – шкаф связи с пультом, УСО – устройство связи с объектом

На первом, третьем, четвертом и пятом секторах АСУ имеет одинаковую структуру, которая во многом похожа на структуру второго сектора и имеет незначительные отличия (Рисунок 2.4):

• Шкафы синхронизации на этих секторах принимают синхроимпульсы от других секторов и не формируют собственные. По этой причине на схеме отсутствует пульт.



• Аварии от ШСП передаются на центральный узел на втором секторе.

Рисунок 2.4 – Структура АСУ на секторах 1, 3–5. Обозначения и аббревиатуры полностью совпадают со схемой второго сектора

В экспериментальном комплексе структура АСУ кардинально отличается от остальных секторов, поскольку ЭК проектировался и строился позже самого ускорителя. По сравнению с другими секторами структура АСУ в ЭК гораздо более простая (Рисунок 2.5):

• Всё управление объектами ведется либо напрямую по локальной сети, либо через оборудование National Instruments и Advantech. Шкафы АСУ отсутствуют.



Рисунок 2.5 – Структура АСУ в экспериментальном комплексе. Обозначения и аббревиатуры полностью совпадают со схемой второго сектора

По своей структуре АСУ ЛУ ИЯИ РАН похожа на структуру СУ линейного ускорителя Лос-Аламосской национальной лаборатории (LANSCE). Там также система разбита на секторы, имеется старое оборудование, схожее по функционалу с оборудованием ЛУ ИЯИ РАН (например, шкаф УСО является аналогом системы RICE в LANSCE), и современное оборудование [63].

Далее приведено более подробное описание функций отдельных аппаратных элементов АСУ, а также описание программной части.

# 2.1 Устройство ввода-вывода

Устройство ввода-вывода или шкаф МЭО.В1 [64] – одно из главных устройств на каждом секторе ЛУ. Данный шкаф имеет одну функцию – управление и обмен информации между сервером и другими шкафами сектора. По сути, УВВ является связующим звеном между старым (различные шкафы, разработанные МРТИ) и новым (серверы, локальная сеть) оборудованием. На каждом секторе, кроме ЭК, установлено по одному УВВ. Внешний вид УВВ и его ячейки, которые выполняют функцию связи с сервером и другими шкафами, приведены на Рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Устройство ввода-вывода (слева) и его ячейки, выполняющие основную функцию (справа).

# 2.2 Шкаф связи с пультом

Шкаф связи с пультом или шкаф МЭО.Э1 [65] сравним по своей важности с УВВ. ШСП (Рисунок 2.7) отвечает за централизованное управление базовыми функциями всех шкафов на секторе (например, включение и выключение), сбор и передачу аварийных сигналов со всех шкафов сектора и установку шкафов на дежурство.



Рисунок 2.7 – Шкаф связи с пультом

Назначение первых двух функций вытекает из их описания, а установка на дежурство требует дополнительных пояснений. Дежурство – это особое бинарное состояние конкретного шкафа (шкаф либо установлен на дежурство, либо нет). При установке на дежурство шкаф может начать выполнять дополнительные функции (шкафы АСУ, отвечающие за управление основной частью ВЧ-питания, при установке на дежурство могут выполнять алгоритм повторного включения ВЧ-канала после аварийной остановки), либо информация от шкафа будет особым образом обрабатываться (аварийные сигналы со шкафов второго сектора будут обрабатываться только если соответствующий шкаф установлен на дежурство).

Помимо уже упомянутых функций включения и выключения шкафов ШСП также отвечает за управление следующими функциями:

• Сброс. Производится завершение всех процессов, которые выполняет шкаф.

• Начало. Шкаф начинает выполнять свои функции.

• Снять запрет. Производится удаленное снятие запретов на работу шкафа.

• Запрет местного управления. При включении данной функции шкафом невозможно управлять вручную, только через ШСП или УВВ.

За сбор и обработку аварий также отвечают соответствующие блоки. Во время первичного сбора аварии классифицируются на три категории:

• Аварии ФС (функциональных систем). К данным авариям относятся неисправности оборудования других подразделений, которые нарушают работу ускорителя и влекут за собой нарушения режимов ускорения и транспортировки пучка. К таким авариям относятся нарушения работы ВЧ-каналов или элементов питания магнитооптики ускорителя.

• Внимание ФС. Данные аварии сигнализируют о неисправностях оборудования других подразделений, которые не влияют на работу основных систем ускорителя. Примером таких аварий является отключение какого-либо шкафа опроса состояния ВЧ-канала.

• Аварии АСУ. Это аварии оборудования АСУ, например отключение какого-нибудь шкафа.

После классификации Аварии ФС и Аварии АСУ передаются в специальный блок, который выдает объединенный аварийный сигнал с сектора на центральный узел. Данный узел имеет несколько видов исполнения на разных секторах. На первом и пятом секторе аварии от всех шкафов всегда учитываются при формировании аварийного сигнала сектора. На третьем и четвертом секторах есть физическая возможность (при помощи специальных тумблеров) перестать

учитывать аварийные сигналы от определенных шкафов (Рисунок 2.8). На втором секторе учет аварийных сигналов регулируется установкой того или иного шкафа на дежурство. Возможность переставать учитывать определенные шкафы необходима для возможности работы ускорителя с разными энергиями пучка. При том или ином режиме ускорения ВЧ-каналы, которые не используются, выводятся из процесса формирования аварийного сигнала с сервера.



Рисунок 2.8 – Блок обработки аварийных сигналов в ШСП третьего сектора. Слева расположены тумблеры, отвечающие за учет аварийных сигналов от шкафов при формировании общего сигнала

# 2.3 Шкаф синхронизации

Шкаф синхронизации или МЭО.С1 [66] является одним из ключевых элементов АСУ для выполнения функции синхронизации различных объектов. ШС (Рисунок 2.9 слева) отвечает за передачу синхроимпульсов между секторами и раздачу синхроимпульсов на различные шкафы АСУ и другие объекты на секторе.

За выполнение этих функций отвечает блок главных магистральных усилителей (Рисунок 2.9 справа). В данном блоке используются ячейки, которые могут передавать по три серии синхроимпульсов на два объекта. У данных усилителей есть один существенный недостаток: выходы усилителей не имеют гальванической развязки, что уменьшает помехоустойчивость всей системы синхронизации.



Рисунок 2.9 – Шкаф синхронизации (слева) и блок главных магистральных усилителей (справа)

# 2.4 Устройство связи с объектом

Устройство связи с объектом является наиболее распространенным элементом АСУ. Данный шкаф существует в двух исполнениях: с отдельным блоком вентиляторов, расположенных наверху шкафа (МЭО.Т1а) и без вентиляторов (МЭО.Т1б) [67]. Вторая версия шкафа используется на каналах ВЧ-питания, где для охлаждения используется общая система вентиляции.

Обе версии УСО являются оборудованием АСУ, которое непосредственно взаимодействует с другими объектами. Под объектом в дальнейшем будет пониматься любое оборудование других систем ЛУ. Данный шкаф (Рисунок 2.10) имеет четыре основные функции:

- Прием и обработка аварийных сигналов от объекта.
- Передача синхроимпульсов с нужными временными задержками объекту.
- Аналоговый и дискретный опрос объекта.
- Аналоговое и дискретный управление объектом.



Рисунок 2.10 – Устройство связи с объектом

Обработка аварий в УСО ведется при помощи такого же блока, каким ведется первичная обработка аварий в ШСП. Приходящие аварийные сигналы от объекта и собираются в общий аварийный сигнал, который передается в ШСП.

Для синхронизации объекта в каждом УСО существует три специальных блока – один блок ручного управления (БРУ) и два блока каналов таймера (КТ). БРУ и КТ представлены на Рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 – Блок ручного управления (слева) и блок каналов таймера (справа)

БРУ используется для приема и усиления синхроимпульсов, приходящих от одного из магистральных усилителей ШС и для ручной установки временных задержек. В один блок ручного управления можно передать только две серии синхроимпульсов и опорный тактовый сигнал. Также БРУ может формировать внутренние серии синхроимпульсов для автономной работы. КТ используется для передачи конкретных синхроимпульсов с установленной временной задержкой объекту. В одном блоке КТ установлено восемь ячеек, каждая из которой может передавать одну из двух серий синхроимпульсов два выхода. В каждую ячейку можно установить свою временную задержку. Существует четыре диапазона установки задержек:

1. Т1. Задержка от 0 мкс до 4095 мкс с шагом регулировки 1 мкс.

2. Т2. Задержка от 0 мкс до 40950 мкс с шагом регулировки 10 мкс.

3. Т3. Задержка от 0 мс до 409,5 мс с шагом регулировки 0,1 мс.

4. Т4. Задержка от 0 мс до 4095 мс с шагом регулировки 1 мс.

За аналоговый и дискретный опрос отвечают блоки аналогового опроса (АОП) и дискретного опроса (ДОП). Блок АОП (Рисунок 2.12 слева) содержит программно-управляемый релейный коммутатор на 48 входов и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Диапазон работы АЦП ±10 В, его разрядность – 10 бит без учета знака измеряемой величины. Блок ДОП (Рисунок 2.12 справа) осуществляет опрос 128 дискретных сигналов. Прием дискретной информации осуществляется двумя типами ячеек: ячеек приема релейных сигналов типа "сухой контакт" и ячейками потенциальных сигналов (3–5 В соответствует логической единице, 0–0,4 В – логическому нулю).



Рисунок 2.12 – Блоки аналогового опроса (слева) и дискретного опроса (справа) Аналоговое и дискретное управление выполняется блоками аналогового (АУП) и дискретного (ДУП) управления. Блок АУП (Рисунок 2.13 слева) на 64 канала предназначен для управления шаговыми двигателями при помощи последовательности импульсов, идущих с частотой 100 Гц. Блок ДУП (Рисунок 2.13 справа) на 64 канала выдает по команде сигналы в виде замыкания "сухих контактов". Имеется два режима замыкания реле: импульсный на время ~100 мс, либо постоянный до прихода команды на размыкание.



Рисунок 2.13 – Блок аналогового (слева) и блок дискретного (справа) управления

Шкаф УСО может работать в местном и автономном режиме. В местном режиме управление и опрос ведется вручную. Для этого все блоки оборудованы ячейками управления. В автономном режиме шкаф управляется удаленно при помощи сервера через УВВ. Для работы в автономном режиме каждый шкаф УСО оборудован блоком управления (блок УСО).

### 2.5 Ядро автоматизированной системы управления

Как отмечено ранее, второй сектор является главным и основным с точки зрения системы управления. Именно на втором секторе находятся центральные узлы системы синхронизации и сбора аварийных сигналов. Данное оборудование можно обобщенно назвать ядром АСУ. Ядро выполняет три основные функции:

1. Формирование всех серий синхроимпульсов.

2. Сбор и обработка аварий со всех секторов.

3. Управление чопперами – электростатическими дефлекторами, которые участвуют в формировании макроструктуры импульсов пучка и управляют подачей пучка в ускоряющие структуры.

Схема ядра представлена на Рисунке 2.14. В ядро входят ШС и ШСП второго сектора, УСО 13 и пульт ускорителя. Также на схеме отмечены чопперы и система быстрой аварийной защиты (БАЗ), которые не входят в состав АСУ, но напрямую взаимодействуют с ядром.



Рисунок 2.14 – Схема ядра АСУ. Желтые линии – сигналы управления чопперами, зеленые – сигналы синхронизации, красные – аварийные сигналы

Шкаф синхронизации второго сектора формирует часть серии синхроимпульсов, передает все серии по второму сектору на другие сектора, а также осуществляет привязку синхроимпульсов к электросети 220 В/50 Гц. Во время привязки серии синхроимпульсов, которые формируются в ШС, совпадают по времени с нулем синусоиды одной из фаз электросети. Привязка является необходимой для корректной работы каналов ВЧ-питания ускорителя. Помимо ШС, в формировании серий синхроимпульсов участвует УСО 13 и пульт.

Шкаф связи с пультом осуществляет сбор аварий со всех других секторов. Обобщенный аварийный сигнал передается на пульт.

Пульт (или центральный пульт) – это отдельное устройство, разработанное специально для ЛУ ИЯИ РАН. Центральный пульт состоит из нескольких ячеек, установленных в крейт формата 7-ТШ. Через центральный пульт производится управление чопперами, итоговая обработка аварийных сигналов и формирование части синхроимпульсов. На Рисунке 2.15 изображен пульт и центральная пультовая, в которой он установлен.



Рисунок 2.15 – Центральный пульт (слева) и центральная пультовая ускорителя (справа). Стрелкой отмечено место, где установлен пульт

Аварийные сигналы от ШСП и системы БАЗ поступают на ячейку формирования аварийных сигналов, которая выдает запрет на работу ускорителя в штатном режиме (возможна подача пучка в ускоритель только с частотой следования импульсов 1 Гц).

Отдельно следует отметить систему формирования синхроимпульсов. ШС формирует базовые серии, которые передаются на оборудование и в центральный пульт через УСО 13:

1.1 МГц. Тактовая частота всей системы синхронизации, необходима для формирования временных задержек. Передается на все ШС и УСО.

2. 100 Гц. Необходима для работы шаговых двигателей систем авторегулирования и системы диагностики пучка. Положение одного из синхроимпульсов данной серии принимается за точку отсчета временных задержек (ноль) системы синхронизации.

3. 50 Гц. Самая распространенная по используемости серия. Используется для работы систем ВЧ-питания, системы фокусировки, диагностики и т.д. Также передается в центральный пульт.

4. 10 Гц. Используется для наладочной работы ВЧ-систем.

5. 1 Гц. Используется в системе диагностики и в центральном пульте.

Центральный пульт формирует следующие серии синхроимпульсов:

1.  $F_{пучка}$  H<sup>+</sup>. Частота следования импульсов пучка протонов. Может принимать значения 0 Гц, 1 Гц, 5 Гц, 10 Гц, 25 Гц, 40 Гц, 50 Гц. По умолчанию эта частота имеет задержку  $\tau_1 \approx 790$ –820 мкс относительно ноля синхронизации.

2. F<sub>пучка</sub> H<sup>-</sup>. Аналогично F<sub>пучка</sub> H<sup>+</sup>, но для пучка отрицательных ионов водорода. В систему синхронизации поступает только одна из частот пучка. Выбор осуществляется при помощи специального тумблера в центральном пульте.

3. F<sub>БАЗ</sub>. Частота системы БАЗ. Равняется выбранной F<sub>пучка</sub>, если F<sub>пучка</sub> ≠ 0, и
50 Гц, если F<sub>пучка</sub> = 0.

4.  $F_{чоппера}$  H<sup>+</sup>. Частота работы чоппера протонного пучка. Равняется 50 Гц минус  $F_{пучка}$  H<sup>+</sup>.

5.  $F_{инжектора} H^+$ . Частота работы инжектора протонов. Данная серия – это сумма частот 50 Гц минус  $F_{пучка} H^+$  с временной задержкой  $\tau_2 \approx 1030-1100$  мкс относительно ноля синхронизации и  $F_{пучка} H^+$ .

6. F<sub>инжектора</sub> H<sup>-</sup>. Аналогично F<sub>инжектора</sub> H<sup>+</sup>, но для инжектора отрицательных ионов водорода.

На Рисунке 2.16 изображены все частоты для протонного пучка для F<sub>пучка</sub> H<sup>+</sup> = 25 Гц. Также на рисунке схематически изображены ВЧ-импульсы начальной части ЛУ (красная линия). Эти импульсы изображены для понимания причин существования специальных серий синхроимпульсов для инжекторов частиц.



Рисунок 2.16 – Серии синхроимпульсов, которые формирует АСУ

Для стабильной и долговечной работы инжекторов ЛУ ИЯИ РАН, они должны формировать пучки с одной и той же частотой в независимости от выбранной F<sub>пучка</sub>. С другой стороны, попадание пучка в ускоритель регулируется чоппером, который потенциально может выйти из строя. Если бы инжектор запускался от серии 50 Гц, то при отключении чоппера в ускоритель непрерывно бы подавался и захватывался пучок с частотой повторения 50 Гц. Данная ситуация является аварийной. Для минимизации последствий подобных ситуаций формируется специальная серия синхроимпульсов F<sub>инжектора</sub>. В данной серии пучка, импульсам которые синхроимпульсы, соответствующие должны отклоняться чоппером в поглотитель пучка, формируются таким образом, чтобы пучок из инжектора вылетал в момент времени, когда в ВЧ-резонаторах нет поля. При неисправном чоппере такой пучок останется с энергией инжекции 400 кэВ, что не приведет к повреждению и радиационному загрязнению элементов ускорителя.
## 2.6 Серверы контроля и современное оборудование

Все вышеописанные элементы оборудования АСУ способны выполнять свои функции без какого-либо компьютерного управления. Однако с момента проектирования оборудования АСУ прошло уже пятьдесят лет, за которые существенно развились компьютерные технологии. С 2003 года в АСУ ЛУ ИЯИ РАН непрерывно внедряются новые технологии и оборудование. Также с того же момента программная часть АСУ переведена в систему LabVIEW.

LabVIEW в качестве основного программного средства было выбрано по причине возможности быстрого (несколько недель) освоения данного ПО для написания собственных программ [68]. Таким образом, весь персонал Отдела ускорительного комплекса (ОУК) мог оперативно перевести все алгоритмы управления на новое ПО, а в дальнейшем и модернизировать его.

Так как LabVIEW является основной средой программирования, то основное современное оборудование в основном представлено различными платами АЦП, цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) и плат цифрового ввода-вывода (ЦВВ) компании National Instruments. На данный момент именно через эти устройства происходит взаимодействие современных промышленных серверов с УВВ и контроль за параметрами пучка, полученных с диагностических устройств.

Еще одним основным производителем современного оборудования стала компания Advantech. На основе оборудования этой компании выполнено обновление контроля и управления источниками постоянного тока системы фокусировки ЛУ на основе протоколов RS485 и Modbus.

На данный момент к АСУ относятся 52 сервера и клиентских персональных компьютеров (ПК) для осуществления контроля и управлением всем ускорительным комплексом, а также 63 устройства компаний NI и Advantech. Помимо этого, к АСУ относятся серверы электронного журнала ЛУ и сайт с отображением основных параметров ЛУ.

### 2.7 Система сбора данных

Программная часть АСУ развивалась параллельно с развитием и обновлением аппаратной части. Как отмечено ранее, с 2003 года вся программная часть АСУ основана на LabVIEW.

Изначально программное обеспечение разрабатывалось для сбора данных и управления старым оборудованием – УСО, ШС и т.д. Для этого была реализована клиент-серверная система, в которой клиенты отправляют на сервер определенные запросы и команды, которые необходимо передать дальше. На каждом из секторов расположен отдельный сервер, который через модуль ЦВВ NI USB-6509 связан с УВВ сектора. На данном сервере формируется очередь из запросов от отдельных клиентов, которые последовательно передаются в УВВ. Клиент и сервер взаимодействуют по протоколу TCP/IP.

По мере модернизации АСУ ЛУ все больше функций по взаимодействию с объектами передавалось от УСО к отдельным серверам и новому оборудованию. В связи с этим возникла потребность в каком-то универсальном решении для разных систем ЛУ. В 2006 году была разработана и запущена система сбора данных.

ССД – это самостоятельно разработанная сотрудниками ОУК клиент-серверная среда [69]. Обмен между клиентами и серверами ведется по протоколам UDP и TCP/IP. Схема ССД приведена на Рисунке 2.17.



Рисунок 2.17 – Структура ССД. WL – веб-сервер, DS – сервер данных ССД

Вся информация передается в виде XML-файлов в структурированном виде. По своей сути, внутренняя структура XML-файлов является собственным информацией. Типичный протоколом обмена вид данной структуры: Сектор/Система/Подсистема/Параметр/Значение. Например, значение тока 270 А в ИПТ4-5. питающем элементы магнитооптики источнике питания ЛУ, установленного на четвертом секторе, будет записано следующим образом: Сектор 4/Фокусировка/ИПТ4-5/Ток/270.0. Такой формат очень удобен для расширения функционала, поскольку для кодирования И расшифровки информации всегда требуется один и тот же инструментарий, в то время как внутреннее содержание может быть любым. На Рисунке 2.18 представлены окна программ отображения информации о состоянии ВЧ-каналов ЛУ и токов всех источников питания магнитооптики ускорительного комплекса.

Для минимизации пиковой нагрузки на локальную сеть передача данных ведется в случайно выбранное время в заданном диапазоне. Например, параметры состояния ВЧ-каналов передаются в произвольный момент в течение трех секунд. При одновременной передаче данных может возникать эффект "бутылочного горлышка" из-за ограниченной пропускной способности локальной сети.

Fecus-SSD_IP1	T-IST 1.vi		-	Fecus-SSD_JP1	1-15T 2.M	-		🗧 🛃 Focus-SSD_P	1-(513.vi			Fecus-SSD_P	T-IST 4 vi	E Fecus-SSD_IP	T-15T 5.M	- 🗆 X	( Procus-SSD_IPT-	-15T 6.ui	-	
Fie Lat Yere	Project C	gerate Jook	Window 1	Ele Edit View	Project :	Querate Jooh	Window	Ble Edit Yiew	Breject g	perate Jools	Window	Ble Edit Yew	Project g	pe file fait Ven	Project Operate	Icoh Window	Ein feht View	Broject Q	perste Jooh	Mindow
٠			1	• @			<b>(</b>	• @			2			٠ الله الله		1	🔹 🔶 🔮 🔮			1
АДАМ-УСО Нагрузка-Источни Секторк 1 2	Acry K Masepa 3 4 5	entine ytta 12 12 13 12 15 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12	20 E	ADAM-YCO Harpysca-Victouria Ceanopi 1 2	<u>Ar</u> * <mark>Mang</mark> 3 4 5	onLine 00.54 18.12.2 Komp	F24 12 120 200	ADAM-JCO Harpytes-Ucrows Cexrop: 1 2	Manager 3 4 5	ycca J 15 JK Kow	and Read	Harpytea-Mentrese Concept 1 2	April Managar 3 4 5	Harpyska-Victoven	Допуска « Измарания 3 4 5 ж	Incine-Fix Incine-Fix Incine I	HHI V Harpysko-Victowner Centopi 1 2 3	Anny Marapa	cea	
	1.1		_	2112202010121	7 1	18:34:01	1	21.12.2020 18:43:50	1	18:32:39	1	1040-50	Ter	104347	Tor	_	1043.51	1		1
HelCle	0.075	H-/Khr		CC02-1	266.5	CCR2-14	301.0	AC1a1	195,20	MM1-160	000,05	842-845	271.1	CCT3-1w1	0.000		HCT2-2	204.9	MULT>-10	301.0
H+/Khr	0.108	H-/Khy		CCR2-2	298,5	CCR2-15	267,5	AC1A2	180,24	FIM2-160	000,0	A46-A49	270.1	CCT5-1w2	-0.323		MULD-5	333.5	NULT-11	285.6
H+/08-2	200.0	H-/ICh	_	CUP2-1/UP1	-2.0	MULT5-32	263.0	Ка-ДС1	NaN	<b>Д1-ИК</b>	65,87	Kr-Dill	0.000	WCTS-1	279.4		UTTG-1	+01.0	ИСТЭ-8	256.0
H-A2r	0.052	H-RO-		CUIP2-1/UIP3	0.0	CC02-18	249.0	Ку-ДС1	NaN	Kin-MK	000	Key Add	0.007	WITS-2	280.1		WITTO-2	+00.0	<b>ИСТЭ-35</b>	248/
HallOr	0.127	H-STIA1	_	CC02-3	314.5	CCR2-19	243.0	A1-A2	253,40	К10у-ИК	0,000	14.00	0.000	CCT5-1w1	0.000		UTTG-3	-06.5	ИПТЭ-22	327.8
H-408.3	200.0	H-RTI+2		CUP2-1/UP5	-4.0	CUIP2-17/UIP1	-13.0	Кк-Д1	NaN	Д2-ИК+1	000,0	Ke M2	0,000	CCT3-1e4	0.017		WTTo-4	+07.0	<b>ИСТЭ-81</b>	NaN
H <sub>4</sub> /OM1	3.045	H-STIAL		CCR2-4	246.0	CUIP2-17/UIP4	-13.0	Ку-Д1	NaN	Д2-ИК+2	\$7,07	450.453	260.8	MIL2-1	280.1		WITT3-2	333.5	ИСТЭ-59	254.1
Ma (VAta)	0.356	H-RT2+1		CUP2-2/UP5	-45	CUIP2-18/UIP1	-12.5	Д3-Д4	261,93	БДф-Х		414.417	270.1	W(15-2	279.0	_	WCD-4	348.1	10773-27	0.0
He/Kåte?	0,211	H-/8T2a2	-	ccn2-5	175.0	CCR2-20	180.5	A5-A6	263,53	БДф-Ү		Ke-202	0.015	W(15-1	280.1		WCD-5	372.8	INCT2-56	214.7
H-008.4	260.1	H-ST2s3	-	CC02-6	215.5	CUP2-18/UP4	-45	Д7-Д8	263,60			Ke-052	0.015	WITS-4	280.1	_	MULD-8	348.7	MULT-17	00.00
H-008-5	200,1	H-CM		6602.7	270.5	M012-36		A9-A10	262,07	<b>Д19</b>	250,52	858.861	270.3	WTS-4	05		P-CTTN	121.6	MULT-18	00.94
H- 408.6	260.0	H // 32 -1		((1)2.8	455.0	M0T2-37		Д11-Д12	256,53	Кх-Д19	+0,0000	463.465	274.5	WITS-S	280.1		WTT2-10	210.0	MCT2-78	-05
H-408.7	430.2	H ACT -		CUR2-64085	-6.5	0002-21	239.5	Д13-Д14	260,00	Ку-Д19	-0,5000	Ane-Ano	0.018	CCT5-241	-0.406		MIT2-11	185.2	WCT3-74	111.7
H- 02-	400,4	H (KTI-1		CUR2.10/UR1	-15	CIUP2-19/UP1	-140	Д15-Д16	267,80	<u>д20</u>	270,0	K- 200	0,010	(CTB-34)	0,004		MILCO-5	+01.0	METT/2-19	00.00
H+/62k		H-(CT4+)		CCD2.9	400.0	((112.22	217.5	Кж-Д15	0,010	Кж-Д20	+0,0000	A44 848	278.0	CCTP-3v1	-0.700		MILLO-6	+00.0	MITTA-20	01.00
H . (14)		M. (RTA)		CUR2.10/UR7	-4.5	((02.2)	271.5	Ky-A15	0,010	Ку-Д20	-0,0000	436 433	2/0,0	CCB-3d	0,000		1011(2-7	-01.0	MULT 3-24	257.0
No Mar	-	M. Willes		Cup2-11/UP1	-55	CC02-24	242.5	Kx-,Д16	0,000	<b>Д21</b>	250,0	Ke (2)	0.045	((1))	275		A-COLLIN	-01.5	MITTO-21	01.00
Hall Martin	0337	H-M-Master	-	CCT2-10	452.0	CC02-25	236.5	Ку-Д16	0,005	A22-A23	257,80	Ke-173	0.015	((1))-2	241		111121	10	MITTI-0-22	00.00
M- (K-32+2	0.110	H.Ch.		M012-38	489.5	6602-28	1115	A17	337,64	<b>Д24-Д25</b>	260,40	874.877	260.0	((05-)	161				INCT2-61	222.5
HADAD	3 515	Hall		CC02-12	346.5	CC02-29	323.0	Кх-Д17	+0,0000	Д26-Д27	260,13	A78-881	270.0	CCT5-3w1	-0.219				WCT3-60	NaN
HAD & R	274.1	H-/KJy		Cup2.12/UP5	-15	0002-30	202.5	Ку-Д17	+0,1999	Д28-Д29	259,00	Ke 174	0.005	CCT5-347	0.017			-	MITTA-13	-02 7
H/828	270.0	H-KA-		((1)2.13	377.5	CC02-31	169.0	Д18	249,53	Д30-Д31	268,40	Ke-074	0,024	WITS-1	0,017				MULTING-14	-04.0
H/021	260.1	H-/My		CUR2.13/UR4	0.0	0002-32	156.0	Кж-Д18	-0,004	Д32-Д33	250,20	Ny-424	0,000	((115-4	30				MITTA-15	+010
14/033	300.0	M. M.M.C.		CUR2.13/UR5	0.0	((02.1)	110.5	Ку-Д18	+0,014	Д34-Д37	270,2	K-475	0,000	((1))	0.000				METT-2-16	100.0
NUM2	304,4	Ph/Nyging	-	6(1)2.16	319.5	CC02-34	97.0			Д38-Д41	270,2	17-475	0,012	CCTD-Jud	0.007					
	_		_	CUP2-14/UP5	-45							Ke-DN	0,000	0017-000	0,000					
-					44	-						1944								
RF-SSD_max 7	Zui					🛃 RF-SSD_m	w Bui						×	RF-SSD_new SVI					- u	<u> </u>
Elle Edit Yew	Project S	Operate Jooks	Window He	skp		Ele Edt W	tw Broject	Querate Jook W	ndow <u>H</u> elp	p			100	le Edit Yeaw Broy	ect Operate Io	ols <u>Window</u> Help				
	• •					• 4						•	2 🔂	→ 중 ● II	1				1	- <b>P</b>
									KADA	Контрол	- Canadara	Terrar I	~			Клон	Kourports // and	101		^
			K/spec	Контроль		1			<b>Donyce</b>	BKA/Onc	C. C. S. MA	HO	_			Annyce	BENOTEN DIALUNE	ALC 1		- 1
			<b>Donyck</b>	BRACOTKA		84.1 842	Centrop	14.2.4 corres	Unreparen	• 1 (la	Прачити	STOP		PH-1 84-23 (00000	8424 centrop	Manaperine	file Operas	1216	STOP	
84-1 84-23 08	acrop 84	24 савтор	Manapasa	re i file	Прочити										in the second second		a a later a later a			
1						21.12.20 18.3	3.08	K93-1 K93-2 K	13-3 K93-4	K93-5 K93-6	K93-7 K93-8	KY3-9 KY3-10 KY3	-11	21.12.20 18/32/48	K94-1 K9	74-2 1.74-3 K54-4 K5	6.3 104-0 K34-1			
21.12.20 18:32:50	3	REQ (P1 (	P2 K92-1 K92	-2 K92-3 K92-4 K9	2-5 M39	AP9AWpes		280 237	290 281	167 NoN	232 293	286 290 238		APPANDes.	1/0 1	52N -1 N	an non nan			
AP#A\Upes		399	261 35	2 298 350 2	45	APOAUHose	АРФ-элект	poes 107 264 ·	85 314	302 NaN	385 284	110 -3 202		APOAUMan APP	ekopok 301 N	101 IN	and high high			
AP\$A\Uoeopui -2 00 174 253 322 309 340 260 322 AP\$A\Uio			APOAUHose	APP							ADDAULAR ADD M	262 1	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	and Note Nati						
AP\$A/Hom_AP\$_OCH 196 65 67 251 164 292 323 206 315 AP\$A			APOAUHose	APP-MP	0 78	445	151 N/N	345 6	64 409 58		Manager and Art Ma		1 1 18	and bland Make						
APPA Hom, N	Ф.ДОП1	179 251	5 17	9 295 324 2	N	Модулятор	Ганода	-0 -0	4 -3	0 NoN	0 0	7 4 6		Monopolitanoga	400 1	10 PK	and Note Nate			
APPA Hone, AP	re dous	199 -11	0 0	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	21	Модультор	daexoga	424 416	400 Ø	290 NaN	406 374	420 0 387		fannen an	400 10		and high Right			
APPA Home A	г <del>ф</del> -Мі,		38 20	354 -799 5	32	[enepatop]	Лек	273 171	-4 344	479 NaN	720 373	270 392 398		Chickensy/Uax	495 1	tere O Pe	and norm really			
Модулятор\Uл			477 61	0 396 671 4	20	[fenepatop]	Ann	108 263	231 296	391 NaN	283 1	284 319 255		A PLAT A	0 N	tane O N	and nore NaN			
Texepanop\/kat	04		74 8	© 295	1	AP4T\Page	ная дасстро	Rea 0 0	0 2	0 NoN	0 0	0 0 2		APRIL TO	poons 0 N	ngre U Pi	and representation			
I AP(T) Basenes	a manufacture data	al 575	2 I M		18 1	A REAL PROPERTY.		24 24	24 2 24		100 100	24 24 24		0011110003	0 0	120 N	ATR   DATE   NAM			

Рисунок 2.18 – Окна программ, передающих данные о токах источников питания элементов магнитооптики (наверху) и о состоянии ВЧ-систем ЛУ (внизу)

На сегодняшний день через ССД передаются не все существующие параметры ЛУ. В Таблице 2.1 приведены системы, данные которых передаются или не передаются через ССД.

Таблица 2.1 – Классификация систе	ем ЛУ по формату	обмена информацией
-----------------------------------	------------------	--------------------

	Обмен через ССД	Обмен не через ССД				
Системы ЛУ	Аварийные сигналы комплекса	Контроль потерь пучка				
	Вакуумная система комплекса	Диагностика пучка				
	Система водоохлаждения ЛУ					
	ВЧ начальной части ЛУ					
	ВЧ основной части ЛУ					
	Инжекторы ЛУ					
	Состояние дверей туннеля комплекса					
	Магнитооптическая система комплекса					

Данная ситуация возникла в связи с тем, что ССД реализовывалась параллельно с развитием остальной АСУ, поэтому часть программ до сих пор осуществляют обмен информацией отдельно от ССД. Одной из актуальных задач, которая непрерывно решается, является полный переход на обмен информацией через ССД.

Помимо обмена данными в ССД также заложена функция сохранения значений всех параметров ЛУ, которые передаются через ССД. Для записи и хранения всех данных существует отдельный сервер DS – data server, который одновременно выступает и в роли клиента, и в роли сервера. Его клиентская функция – собрать все параметры, переданные в локальную сеть, и сохранить их. Серверная функция – выдать сохраненные данные по требованию какого-либо клиента. Сохранение происходит раз в минуту. Таким образом можно посмотреть все сохраненные параметры ЛУ, начиная с 2006 года в любую минуту работы ускорительного комплекса.

# 2.8 Прочее программное обеспечение

Несмотря на то, что через ССД не передаются данные всего двух систем ускорительного комплекса, количество информации, передающейся по собственным протоколам от этих систем, сопоставимо по объему с данными всех остальных систем в сумме, и стоит отдельно рассмотреть ПО, которое отвечает за контроль потерь пучка и диагностику. Системы контроля потерь и диагностики пучка имеют в своем составе несколько сотен разнообразных датчиков, а частота генерации новой информации совпадает с частотой следования макроимпульсов пучка (1–50 Гц).

Архитектура ПО данных систем такая же, как и у ССД – клиент-серверная. Обмен информацией ведется только по протоколу TCP/IP. На каждом секторе ЛУ установлено по два сервера: один для сбора информации с датчиков системы контроля потерь пучка, второй для сбора данных с датчиков системы диагностики пучка.

На Рисунке 2.19 изображено окно одной из клиентских программ, которая отображает параметры пучка, полученные с различных индукционных датчиков тока. Некоторое ПО, относящееся в системе диагностики пучка, имеет только серверные элементы. В таком случае во время работы управление ведется через удаленный рабочий стол напрямую с сервера. Примером может служить ПО СПО (Рисунок 2.20).



Рисунок 2.19 — Окно клиентской программы для сбора информации и индукционных датчиков тока, установленных вдоль ускорителя



Рисунок 2.20 – Окна серверных программ с отображением информации и управлением с цилиндра Фарадея (наверху) и многопроволочного профилометра (внизу) СПО

#### 2.9 Выводы главы 2

Данная глава является наиболее полным описанием существующей АСУ ЛУ ИЯИ РАН – многокомпонентной системы, где одновременно работают как единый комплекс современные промышленные серверы и оборудование, установленное еще при строительстве ускорительного комплекса. Опираясь на проведенный анализ, проведена масштабная модернизация АСУ для обеспечения работы и расширения возможностей ускорительного комплекса.

# ГЛАВА З МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН

За последние несколько лет проведено множество различных работ по модернизации аппаратной и программной частей АСУ ЛУ ИЯИ РАН. Данная глава посвящена описанию результатов данных работ.

# 3.1 Общая модернизация автоматизированной системы управления

Одним из недостатков LabVIEW является обратная несовместимость версий. Любая программа, сохраненная в более новой версии LabVIEW, перестает открываться в более старых версиях, даже при условии отсутствия каких-либо изменений. Существует специальная функция в новых версиях LabVIEW, которая может сохранить программу для старых версий, однако эта функция работает только для предыдущих пары поколений.

В ускорительном комплексе ИЯИ РАН с 2003 года использовались различные версии LabVIEW: в основном 6.1, 7.1, 8.2 и 8.5.1 на серверах, 2009 и 2010 на клиентских ПК. В LabVIEW нет полноценной обратной совместимости версий, поэтому всё ПО для серверов должно было писаться непосредственно на серверах, либо специальным образом сохраняться для предыдущих версий, в случае использования старших версий LabVIEW. Данная особенность среды разработки существенно затрудняет модернизацию ПО, поэтому было принято решение об унификации версий LabVIEW на всех серверах и ПК.

Унификация версий LabVIEW в итоге заняла четыре года и завершилась лишь в 2023 году. Такой долгий срок связан с несколькими причинами:

1. Все работы по модернизации требовалось проводить строго между сеансами работы ускорителя, чтобы не нарушать его работу. По этой же причине

унификацию версий требовалось проводить постепенно, чтобы была возможность оперативно (менее, чем за 12 часов) вернуть АСУ в исходное состояние.

2. Количество оборудования. В предыдущей главе указано, что в ускорительном комплексе используется 52 серверных и клиентских ПК. Обновление версий требовали более сорока из них.

3. Почти всё оборудование, где требовалось заменить версию LabVIEW, требовало также своей физической замены. Средний возраст серверного оборудования на момент начала модернизации составлял 15 лет.

На текущий момент в ускорительном комплексе используется единая версия LabVIEW 2010, а средний возраст оборудования составляет три года.

#### 3.2 Система сбора данных

В системе сбора данных модернизация затронула те части ССД, которые взаимодействуют с ВЧ-системами, системой магнитооптики и аварийными сигналами комплекса. В основном модернизация ССД проводится вслед за модернизацией оборудования других служб комплекса.

В части АСУ ВЧ-систем обновлено программное обеспечение для обеспечения передачи данных от ВЧ-каналов 3-10 – 4-11 основной части ЛУ. Данные ВЧ-каналы вводятся в эксплуатацию в рамках государственного задания по получению пучков с энергиями до 423 МэВ.

В АСУ системы магнитооптики ускорительного комплекса изменения проведены в связи с обновлением источников питания постоянного тока для фокусирующих элементов. На канале транспортировки отрицательных ионов водорода полностью заменены источники питания. Новые источники могут получать и передавать информацию напрямую в локальную сеть по протоколу UDP. Для управления и контролем за новыми источниками обновлено программное обеспечение серверов, отвечающих за взаимодействие с оборудованием системы магнитооптики. Помимо канала транспортировки ионов H-, на начальной и основной части ЛУ также заменены источники питания на новые, поддерживающие управление через Ethernet. Поскольку источники такого типа уже использовались ранее, то изменения в ПО потребовались минимальные, так как протоколы и команды для взаимодействия уже были интегрированы в ACУ.

Для повышения информативности о состоянии систем экспериментального комплекса проведена работа по модернизации аварийных сигналов ЭК. Ранее на центральный пульт приходил объединенный аварийный сигнал, который включал в себя аварии по системе контроля разности токов на установках РАДЭКС и ИН-06. После модернизации эти аварийные сигналы приходят на центральный пульт по отдельности, что позволяет локализовать проблему. Также в систему аварий был заведен сигнал превышении порогового уровня потерь пучка 0 В экспериментальном комплексе, а также сигнал готовности комплекса протонной терапии. Все эти сигналы также добавлены в ССД и отображаются в окне программы состояния всех систем ускорительного комплекса (Рисунок 3.1).

Работа на Экспериментальный					
Авария ФС					
1 сектор 2 сектор 3 с	ектор 4 сектор 5 сектор				
Коллиматор Чоппер Н+	Поглотитель 160МэВ				
Выведен Включен	Выведен				
Авария ИК	ДЭКС Готовность КПТ				
Дозиметрия					
(сектор 2) Сектор	Блокировка по вакууму				
1 2 3 Люки 3 4 5/ЭК Запрет БАЗ Э Запрет БАЗ ЭК	<b>Гпучка 50 Гц</b>				

Рисунок 3.1 – Окно программы, отображающей состояние систем ускорительного комплекса. В верхнем ряду отображается состояние секторов ЛУ, во втором ряду – состояние систем формирования пучка, в третьем – аварийные сигналы от экспериментальных установок, в четвертом ряду слева – аварийные сигналы по дозиметрии, справа – состояние вакуумной системы комплекса и текущая частота повторения пучка

Помимо изменений, связанных с модернизацией других систем, в АСУ вносятся новые функции. В предыдущей главе указано, что система синхронизации ЛУ привязана к электросети 200 В/50 Гц. Ускорительный комплекс не имеет собственной электроподстанции, а получает электроэнергию от общей электросети. Данный факт приводит к тому, что сторонние потребители электроэнергии влияют на электросеть. В некоторых случаях это влияние приводит к появлению искажений в синусоиде электропитания, что в свою очередь нарушает работу механизма привязки к электросети. Нарушение привязки влечет за собой сбои в работе и выход из строя ВЧ-оборудования.

Поскольку возможность повлиять на электросеть отсутствует, было принято решение добавить в АСУ функцию контроля синусоиды 50 Гц. Такая возможность позволит выбрать наилучшую фазу электросети для привязки, либо превентивно штатно отключить оборудование ЛУ при возникновении серьезных нарушений в качестве электропитания. Аппаратная часть этой системы состоит из трех понижающих трансформаторов для каждой фазы и АЦП для оцифровки сигнала. Программная часть отображает синусоиду по каждой из фаз, а также сохраняет полученные результаты раз в минуту в общую базу данных ССД. На Рисунке 3.2 представлено окно клиентской программы контроля электросети.



Рисунок. 3.2 – Окно программы контроля электросети

## 3.3 Система контроля потерь пучка

В части автоматизированной системы контроля, связанной с датчиками контроля потерь пучка, проведены работы по модернизации программного обеспечения.

Всё серверное ПО полностью перепроектировано, поскольку в исходном состоянии отсутствовала возможность внесения оперативных изменений в параметры сбора данных и какой-либо дальнейшей модернизации.

Клиентские программы полностью обновлены и переделаны, минимальным изменениям подверглось только визуальное оформление графиков и диаграмм. В исходном ПО при потере связи с серверной частью программы просто выключались, при этом, никак не сообщая пользователю о нештатной ситуации. Помимо этого, для получения данных с конкретного ионизационного датчика потерь было необходимо запустить отдельную программу, которая связывалась с сервером для обновления информации.

В обновленном клиентском ПО, которое отображает данные с датчиков потерь пучка и датчиков нейтронов, установленных вдоль ЛУ, все вышеописанные проблемы решены. Для контроля связи с серверами реализована световая индикация статуса соединения, всё управление и отображение информации производится посредством одной единственной программы. Также добавлена схема ЛУ с расположением всех датчиков нейтронов и ионизационных камер. Окно обновленной клиентской программы представлено на Рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Окно клиентской программы с отображением информации с индукционных датчиков тока в начале и конце секторов основной части ЛУ, ионизационных камер и датчиков нейтронов, установленных вдоль ЛУ. Также представлена динамика показаний с датчиков нейтронов и ионизационных камер. В нижней части окна программы расположена схема ЛУ с указанием расположения всех датчиков нейтронов и ионизационных камер

Для датчиков контроля потерь пучка, установленных в экспериментальном комплексе, создана схожая клиентская программа (Рисунок 3.4). Основная разница с программой для ЛУ заключается в отсутствии отображения информации с датчиков тока и отсутствии схемы. Показания с датчиков тока решено оставить в другой программе, а схему каналов транспортировки ЭК невозможно отобразить в удобном для понимания виде в заданных размерах окна программы.



Рисунок 3.4 — Окно клиентской программы с отображением информации с датчиков нейтронов и ионизационных камер, установленных вдоль каналов транспортировки пучка в экспериментальной комплексе. Помимо текущих данных с датчиков, представлена динамика изменения показаний

#### 3.4 Выводы главы 3

Проведенная модернизация различных частей АСУ ЛУ ИЯИ РАН позволила оптимизировать управляемость различных элементов и систем комплекса.

Модернизация АСУ, связанная с диагностикой параметров пучка, заключается в разработке программного обеспечения для обработки оптических изображений с различных датчиков профиля пучка и во внедрении процедуры томографической реконструкции плотности распределения частиц в поперечных фазовых плоскостях.

#### ГЛАВА 4

# МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА

Исторически, одним из первых приборов для диагностики параметров пучка был экран с нанесенным на него люминофором, который светился под воздействием частиц пучка [70]. По прошествии десятилетий развития методов диагностики на ускорителях заряженных частиц использование веществ, светящихся под воздействием пучка, остается актуальным. В самом общем виде такое устройство состоит из вещества, которое излучает фотоны в оптическом диапазоне, и устройства снятия и обработки сигнала, которое находится вдали от ионопровода ускорителя для минимизации радиационного воздействия от потерь пучка (Рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Общая схема прибора диагностики пучка при помощи люминесцентного экрана

В роли источника излучения могут выступать различные вещества в различных агрегатных состояниях. В случае использования газа, то тогда речь идет о мониторах свечения остаточных газов [71] или ионизационных мониторах [72]. Если используется твердый экран, то тогда прибор будет измерителем профиля с люминесцентным экраном [73] или экраном переходного излучения [74], в зависимости от физической природы излучения. Наконец, излучателем может выступать сам пучок частиц, тогда диагностические устройством будет датчик синхротронного излучения [75]. Диагностические устройства, использующие оптические методы, применяются как на линейных, так и циклических ускорителях электронов и ионов [76; 77; 78].

Любой вышеописанный прибор в современном ускорительном комплексе не может функционировать без программного обеспечения. Именно ПО отвечает за настройки видеокамеры, обработку полученных изображений и анализ измеряемых параметров пучка. Многие ускорительные комплексы разрабатывают ПО этих приборов под свои нужды, в итоге получается невероятное разнообразие программ часто со схожими базовыми функциями. В некоторых случаях различные диагностические приборы, работающие с оптическими изображениями, но установленные в одном ускорительном комплексе, имеют различное ПО [79].

В данной главе демонстрируется иной подход к созданию программного обеспечения для диагностического оборудования, использующего оптические сигналы – создание единой программной основы для всего многообразия приборов оптической диагностики профиля пучка, которая используется внутри одного ускорительного комплекса, и добавление уникальных функций, требующихся в конкретном случае.

# 4.1 Датчики профиля пучка, использующие оптические методы

В данном разделе будут описаны все датчик профиля пучка, использующие в основе своей работы оптические методы, установленные в ускорительном

52

комплексе ИЯИ РАН. В случае описываемого ускорителя речь идёт о флуоресцентном мониторе свечения остаточного газа (ФЛУМ), ионизационном мониторе поперечного сечения (ИМПС) и люминесцентной диагностики (ЛД), установленной на СПО и КПТ. На Рисунке 4.2 представлена схема ускорительного комплекса ИЯИ РАН с указанием мест установки датчиков профиля пучка, которые используют оптические методы в своей работе. Отдельно на этом рисунке отмечены датчики, которые введены в эксплуатацию во время выполнения данной работы.



Рисунок 4.2 – Схема ускорительного комплекса ИЯИ РАН с датчиками профиля пучка, использующими оптические методы в своей работе. ФЛУМ – флуоресцентный монитор; ИМПС – ионизационный монитор поперечного сечения; ЛД СПО – люминесцентная диагностика стенда протонного облучения; ЛД КПТ – люминесцентная диагностика комплекса протонной терапии. Датчики, отмеченные красным текстом, установлены во время выполнения данной работы. Прочие обозначения такие же, как на Рисунке 2.1

#### 4.1.1. Флуоресцентный монитор

Принцип работы ФЛУМ основан на свечении остаточного газа в вакуумной камере под воздействием проходящего пучка частиц. Часть образовавшихся фотонов регистрируется видеокамерой. На ЛУ ИЯИ РАН такой датчик установлен на низкоэнергетическом канале транспортировки пучка протонов (Рисунок 4.3). Измерения профиля проводятся по обеим осям при помощи камер Basler acA780-75gm [80] и LEO 1200H-30gm [81]. Для защиты от гамма-фона расположенного рядом инжектора протонов на камеры устанавливаются защитные кожухи из свинцовых листов. Для подавления паразитной засветки видеокамер

пространство между камерами и вакуумными окнами оборачивается светозащитным экраном из плотной фольги, покрытой черной матовой краской.



Рисунок 4.3 – 1 – 3D-модель ФЛУМ, установленного на канале инжекции, 2 – установленный ФЛУМ без защитных кожухов и светозащитного экрана

# 4.1.2. Ионизационный монитор поперечного сечения

Принцип работы ИМПС, расположенного на выходе ускорителя (Р32 на Рисунке 4.2), основан на ионизации остаточного газа в ионопроводе. Источником оптического излучения является люминофор, нанесенный на стекло, которое прикреплено к микроканальной пластине, на которую вытягиваются продукты ионизации остаточного газа из ионопровода. Изображение с люминесцентного экрана передается через зеркально-линзовую систему и регистрируется камерой Basler acA780-75gm, которая установлена за бетонной защитой ускорителя и подключена к компьютеру в пультовой по локальной сети. ИМПС и схема его работы приведены на Рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – 1 – внешний вид ИМПС, 2 – схема прибора

# 4.1.3. Люминесцентные экраны

На ЛУ ИЯИ РАН люминесцентная диагностика используется в двух точках – на стенде протонного облучения и в комплексе протонной терапии. Оба экрана находятся на воздухе и используются для диагностики пучка после выхода из ионопровода. В качестве экрана для формирования оптического изображения используется тонкий слой излучающего материала на основе порошкового сцинтиллятора Р43, который сплавлен с полиимидной пленкой. На оба экрана нанесена координатная сетка, что позволяет определять координаты и размер пучка. Люминесцентный экран на СПО, прикреплен к мультианодному газовому счетчику (МГС), который зафиксирован и отъюстирован относительно оси пучка. Люминесцентный экран на КПТ крепится отдельно к подставке и юстируется при помощи лазерного нивелира перед каждым сеансом. Изображение с обоих экранов регистрируется Basler асА780-75gm, такими же как на ИМПС. Оба экрана



Рисунок 4.5 – 1 – экран на СПО, приклееный к газовому счетчику, 2 – экран на КПТ, установлен на подставку

# 4.2 Особенности реализации программного обеспечения

Разработанное программное обеспечение для всех приборов основано на одной базе, отвечающей за выполнение основных функций. Далее для каждого конкретного случая реализованы дополнительные модули. Всё программное обеспечение реализовано на LabVIEW, вычислительное ядро одного из модулей написано на Python.

#### 4.2.1. Базовое программное обеспечение сбора и обработки изображений

Общая для всех диагностических устройств часть программного обеспечения отвечает за сбор, коррекцию и сохранение изображений, полученных от видеокамеры. Также базовое ПО отвечает за управление настройками самой видеокамеры: выдержкой, усилением и типом синхронизации.

В большинстве случаев для защиты от радиационного воздействия камеры расположены на некотором отдалении от ионопровода ускорителя и под некоторым углом к источнику излучения. Это приводит к тому, что изображение, получаемое камерой, является искаженным – искажены линейные и угловые размеры. Для получения достоверной информации об одномерных профилях пучка необходима коррекция полученного изображения. Основная процедура коррекции заключается в геометрическом преобразовании изображения путем задания системы координат на изображении и преобразовании выбранной системы к требуемому виду. Алгоритм работает одинаково для всех диагностических устройств, за исключением выбора точек, по которым производится коррекция изображения. Дальнейшее описание приведено для люминесцентного экрана, установленного на СПО. Алгоритм коррекции описывается при помощи следующих формул:

$$D = wh ((x_{\Pi B} - x_{\Lambda B})(y_{\Pi B} - y_{\Pi H}) - (x_{\Pi B} - x_{\Pi H})(y_{\Pi B} - y_{\Lambda B})), \qquad (4.1)$$

$$S = \begin{pmatrix} \frac{n(y_{\Pi B} - y_{\Pi H})}{(x_{\Pi B} - x_{\Pi H})^2 + (y_{\Pi B} - y_{\Pi H})^2} & \frac{n(x_{\Pi H} - x_{\Pi B})}{(x_{\Pi B} - x_{\Pi H})^2 + (y_{\Pi B} - y_{\Pi H})^2} \\ \frac{w(y_{\Pi B} - y_{\Pi B})}{(x_{\Pi B} - x_{\Pi B})^2 + (y_{B} - y_{\Pi B})^2} & \frac{w(x_{\Pi B} - x_{\Pi})}{(x_{\Pi B} - x_{\Pi B})^2 + (y_{\Pi B} - y_{\Pi B})^2} \end{pmatrix},$$
(4.2)

$$\begin{pmatrix} x_{\scriptscriptstyle H} \\ y_{\scriptscriptstyle H} \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \times S \times \begin{pmatrix} x_{\scriptscriptstyle K} - x_{\scriptscriptstyle II} \\ y_{\scriptscriptstyle K} - y_{\scriptscriptstyle II} \end{pmatrix}, \tag{4.3}$$

где w – ширина экрана, h – высота экрана,  $x_{_{ЛВ,ПВ,ПН}}, y_{_{ЛВ,ПВ,ПН}}$  – соответственно координаты левого верхнего, правого верхнего и правого нижнего углов экрана в прямоугольной системе координат (СК), связанной с изображением,  $x_u, y_u$  – истинные координаты точек, то есть координаты, которые имеет точка в (СК) экрана,  $x_k, y_k$  – координаты точек в СК, связанной с изображением,  $x_u, y_u$  – координаты центра экрана в СК, связанной с изображением. Как видно из формул, для проведения коррекции изображения необходимо выбрать 4 точки, одна из которых является центром экрана. Однако на практике удобнее выбрать в качестве всех четырех точек углы экрана, это связано с тем, что углы проще найти, чем центр. В этом случае координаты центра экрана выразятся через координаты его углов следующим образом:

$$k_1 = \frac{y_{\Pi H} - y_{\Lambda B}}{x_{\Pi H} - x_{\Lambda B}}, k_2 = \frac{y_{\Pi B} - y_{\Lambda H}}{x_{\Pi B} - x_{\Lambda H}},$$
(4.4)

$$b_{1} = \frac{x_{\Pi H} y_{\Lambda B} - x_{\Lambda B} y_{\Pi H}}{x_{\Pi H} - x_{\Lambda B}}, b_{2} = \frac{x_{\Pi B} y_{\Lambda H} - x_{\Lambda H} y_{\Pi B}}{x_{\Pi B} - x_{\Lambda H}},$$
(4.5)

$$x_{\rm II} = \frac{b_2 - b_1}{k_1 - k_2}, \ y_{\rm II} = \frac{k_1 b_2 - k_2 b_1}{k_1 - k_2},\tag{4.6}$$

где *х*<sub>лн</sub>, *у*<sub>лн</sub> – координаты левого нижнего угла в СК, связанной с изображением.

Процедура коррекции проводится до измерений (пример коррекции приведен на Рисунке 4.6), после чего создается специальный файл, на основе которого программа проводит коррекцию всех последующих изображений. Такой метод является основным при какой-либо коррекции изображений [82].



Рисунок 4.6 – Процедура коррекции изображения. Цифрами показано изображение экрана на различных этапах корректировки

Вся дальнейшая работа проводится с откорректированными изображениями. Для того, чтобы исключить паразитные засветки при работе, базовая программа включает в себя функцию вычитания фонового кадра. Для этого в момент, когда пучок отсутствует, по команде пользователя программа фиксирует фоновый кадр, после чего данный кадр вычитается из всех последующих изображений. На Рисунке 4.7 представлено изображение экрана без вычитания фонового кадра и с вычитанием.



Рисунок 4.7 – 1 – изображение до вычитания фонового кадра, 2 – после

После вычитания темнового кадра изображение подвергается анализу. При помощи встроенных в LabVIEW алгоритмов производится создание графика интенсивности поперечного сечения пучка, и графики с изображением его одномерных профилей. На основе одномерных графиков рассчитывается положение центра масс и среднеквадратичный размер пучка. Также одномерные профили могут быть приближены гауссовым распределением. Аппроксимация используется при работе с пучками, вышедшими из ионопровода. При расчете распределения интенсивности пучка в программе TRIM [83], оказалось, что после пролета пучка через алюминиевую фольгу на выходе из ионопровода и воздух, пучок приобретает гауссово распределение интенсивности (Рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Поперечное распределение частиц на выходе из ионопровода (1) и на люминофоре (2) после пролета через 1 мм Al фольги и 1 м воздуха

Подобное поведение связано с тем, что при движении в среде частица испытывает многократное кулоновское рассеяние, которое приводит к тому, что распределение частиц по координате становится распределением Гаусса [84].

Интерфейс программы практически полностью определяется базовым модулем и выполнен в виде трех вкладок с различными функциями. На первой вкладке отображается исходное изначальное изображение, на второй – изображение после процедуры коррекции.

На третьей вкладке находятся результаты анализа откорректированного изображения: график интенсивности поперечного сечения пучка, одномерные графики профилей пучка с аппроксимациями, информация о положении центра тяжести и среднеквадратичном размере пучка, дополнительные модули, разработанные для конкретного устройства. Дополнительно к этому на этой вкладке можно управлять настройками видеокамеры и суммированием кадров, сделанных камерой.

Программа имеет возможность сохранять отдельные изображения и произвольные по размеру серии кадров, размер серии определяется пользователем, путем включения и выключения опции записи кадров. ПО сохраняет изображения в формате PNG, текстовый аналог изображения, скриншот третьей вкладки

программы и текстовые аналоги профилей пучка. Также при сохранении одного изображения производится сохранение текстового файла с информацией о размере профилей пучка. На Рисунке 4.9 представлена третья вкладка окна программы люминесцентной диагностики КПТ. На этой вкладке представлены: двумерное поперечное сечение пучка, одномерные поперечные профили, центры тяжести и среднеквадратичные размеры пучка по обеим осям; настройки видеокамеры, управление вычитанием фонового изображения и сохранения полученных изображений.



Рисунок 4.9 – Третья вкладка окна программы обработки изображения с ЛД КПТ

# 4.2.2. Модуль расчета заряда

Как показано в [85], многие сцинтилляторы имеют линейную зависимость световыхода в зависимости от числа частиц, попавших в сцинтиллятор (Рисунок 4.10). Данный эффект позволяет использовать люминесцентный экран не только как измеритель профиля пучка, но и суммарного заряда (или числа частиц) в пучке.



Рисунок 4.10 – Зависимость световыхода от числа частиц в импульсе для разных люминофоров

На СПО для люминесцентной диагностики реализован модуль расчета числа частиц в импульсе пучка на основе интенсивности свечения люминофора. Чтобы не привязываться к свойствам конкретного люминофора и его качеству, в реализованном ПО необходимо предварительно провести калибровку при помощи какого-либо эталонного измерителя тока, например, индукционного датчика тока. Таким образом, программа использует только факт линейности световыхода люминофора. В программу передается отношение числа частиц к интенсивности свечения люминофора передается, после чего ПО в дальнейшем вычисляет на основе переданного отношения число частиц в импульсе. Также в программу предварительно измеренная калибровочная вносится кривая зависимости измеренной интенсивности от значения усиления видеокамеры. Использование данной кривой позволяет не проводить заново калибровку при изменении усиления камеры. В случае СПО особый интерес представляет измерение числа частиц в конкретной области, поэтому в программе имеется возможность настроить данную область. На Рисунке 4.11 представлена вкладка с модулем измерения заряда для СПО.



Рисунок 4.11 – Окно программы обработки изображений для СПО с модулем расчета заряда. Представлены настройки калибровки, результаты расчета заряда и числа частиц в импульсе, а также поля для расчета заряда в заданной области

# 4.2.3. Модуль обработки области интереса

В случае ИМПС минимальные потери пучка в ускорителе приводят к образованию паразитной засветки, связанной с особенностями работы устройства (Рисунок 4.12). При учете свечения всего изображения данные о размере, положении и форме профиля пучка становятся некорректными. Особенно остро данный вопрос стоит при проведении измерений эмиттанса и плотности распределения частиц в фазовом объеме, поскольку во время измерений вносятся необходимые изменения в магнитооптику ускорителя, что приводит к незначительным потерям пучка на время проведения измерений.



Рисунок 4.12 – Изображение с ИМПС во время настройки ускорителя. Из-за потерь пучка в нижней части изображения присутствует паразитная засветка, искажающая показания прибора

Для решения данной проблемы для ИМПС написан модуль обработки области интереса. Данный модуль учитывает при создании одномерных профилей пучка только заданную пользователем область, что позволяет минимизировать влияние паразитной засветки. Также в данном модуле настраивается уровень отсечки интенсивности для ликвидации влияния однородной паразитной засветки по всей области. Такая же функция используется в ПО ФЛУМ (Рисунок 4.13), поскольку там могут присутствовать отражения света от стенок камеры и смотрового окна.



Рисунок 4.13 – Изображение с ФЛУМ, полученное с использованием модуля обработки области интереса. Выбранные границы интересующей зоны и значения уровня отсечки позволяют исследовать профиль пучка по оси X с минимальными искажениями от паразитных засветок

# 4.2.4. Модуль онлайн-томографии

Модуль онлайн-томографии является отдельной процедурой по измерению плотности распределения частиц в поперечных фазовых плоскостях. Ее вычислительное ядро основано на методе одновременной алгебраической реконструкции [86]. Реализация в виде дополнительного модуля включает в себя управление магнитооптикой ускорителя, томографическую реконструкцию и пост-обработку полученных данных. Подробное описание работы данного модуля представлено в следующей главе. Поскольку данный модуль имеет большое количество настроек и выдаваемых результатов, то в отличие от остальных модулей, этот выполнен в виде дополнительной вкладки основной программы (Рисунок 4.14).



# Управление томографом

Рисунок 4.14 – Окно программы с настройками и данными онлайн-томографии. В "Управлении томографом" вводятся данные для проведения, запуска и экстренной остановки измерений. В "Результатах томографии" отображаются фазовые портреты, эллипсы и параметры Твисса

# 4.2.5. Модуль ранговой фильтрации

Для флуоресцентного монитора разработан модуль ранговой фильтрации изображения. Небольшая яркость свечения газа приводит к тому, что видеокамеры ФЛУМ работают на пределе чувствительности или с максимальными значениями выдержки и усиления сигнала. Ранговая фильтрация введена для подавления возникающих шумов и улучшения качества изображения.

Для подбора оптимальных параметров реализована возможность проводить фильтрацию отдельных кадров и изображения, просуммированного базовым модулем. По желанию оператора фильтрацию можно полностью выключить. Во время работы оператор может настраивать размер окна фильтрации и ранг, а также переключить модуль в режим медианной фильтрации. На Рисунке 4.15 представлено окно ПО обработки изображений с ФЛУМ с использованием данного модуля.



Рисунок 4.15 – Окно программы с данными ФЛУМ и настройками модуля ранговой фильтрации

#### 4.3 Опыт и результаты использования

Данная глава посвящена обсуждению результатов использования разработанного базового ПО и отдельных модулей при работе с разными датчиками профиля пучка. В Таблице 4.1 приведены данные по использованию конкретных модулей на различных профилометрах.

Название модуля	ФЛУМ	ИМПС	ЛД СПО	ЛД КПТ
Базовый модуль	+	+	+	+
Модуль расчета заряда	-	-	+	-
Модуль обработки области интереса	+	+	-	-
Модуль онлайн-томографии	-	+	-	-
Модуль ранговой фильтрации	+	-	-	-

Таблица 4.1 – Данные об использовании модулей на различных профилометрах

# 4.3.1. Результаты ФЛУМ

Флуоресцентный монитор в текущем исполнении установлен с целью проверки работоспособности подобного устройства, поскольку обычно для пучков с энергией выше 80 кэВ используют дополнительный напуск газа или усилители изображения. Поэтому основные результаты, полученные на ФЛУМ, относятся не к измерениям параметров пучка, а к подбору оптимальных параметров прибора и программы обработки.

На Рисунке 4.16 представлены изображения пучка, полученных при различных настройках модуля ранговой фильтрации. Параметры пучка не менялись при проведении измерений: энергия – 400 кэВ, импульсный ток 52 мА, длительность на полувысоте – 300 нс, частота следования импульсов – 50 Гц. Сравнение изображений показывает, что при низкоранговой фильтрации измеренный профиль соответствует только ядру пучка, информация об ореоле пучка теряется, а с увеличением ранга фильтрации происходит уширение профиля за счет горячих пикселей. Оптимальным фильтром был выбран медианный фильтр. С размером окна фильтра наблюдается похожая ситуация – при небольших значениях модуль плохо убирает шумы, а при больших значения ухудшается эффективное разрешение. По итогу измерений выбрано среднее значение размера окна фильтрации.



Рисунок 4.16 – Изображения пучка при различных параметрах модуля ранговой фильтрации

ФЛУМ обеспечил неразрушающий контроль за размером и положением пучка на канале транспортировки, что позволило провести оптимизацию динамики пучка на данном участке и отслеживать изменение параметров работы инжектора протонов и элементов магнитооптики канала.

### 4.3.2. Результаты ИМПС

Обновление программного обеспечения для системы сбора данных с ИМПС позволило упростить настройку перед сеансами работы ускорителя, поскольку наличие процедуры коррекции в базовом модуле снизило требования к точности установки видеокамеры. Возможность суммировать отдельные кадры позволяет использовать меньшую выдержку видеокамеры, чем до обновления ПО, что уменьшает шумы матрицы видеокамеры, что особенно важно при работе с пучками низких интенсивностей (десятки микроампер импульсного тока). В целом, ПО позволяет использовать ИМПС для диагностики пучков протонов и отрицательных ионов водорода с разными параметрами (Рисунок 4.17).



Рисунок 4.17 – Изображения пучков с разными параметрами с ИМПС. 1 – протонный пучок с импульсным током 12 мкА, длительностью 20 мкс, энергией 158 МэВ; 2 – пучок отрицательных ионов водорода с импульсным током 1,5 мА, длительностью 47 мкс, энергией 100 МэВ; 3 – протонный пучок с импульсным током 7 мА, длительностью 100 мкс, энергией 267 МэВ; 4 – протонный пучок с импульсным током 10 мА, длительностью 0,25 мкс, энергией 267 МэВ

#### 4.3.3. Опыт использования ЛД СПО

Люминесцентный экран, установленный на СПО, выступает не только как датчик профиля, но и измеритель заряда пучка, благодаря использованию модуля расчета заряда [7; 9]. Во время первых сеансов работы стенда способность измерять заряд позволила провести исследования во всем заявленном диапазоне работы стенда, поскольку количество частиц от 10<sup>9</sup> до 10<sup>11</sup> частиц в импульсе могло быть точно измерено только люминесцентным экраном. В Таблице 4.2 представлены диапазоны измерения интенсивности пучка у установленных тогда приборов. Таблица 4.2 – Рабочий диапазон диагностических устройств по измерению интенсивности пучка, установленных на СПО во время первых сеансов работы

Прибор	Диапазон, частиц/импульс
Индукционный датчик тока	10 <sup>11</sup> -10 <sup>13</sup>
Люминесцентный экран	$10^9 - 10^{11}$
Мультианодный газовый счетчик	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>

Ha данный индукционного момент диапазоны датчика тока И мультианодного газового счетчика пересекаются, поэтому нет необходимости в промежуточном измерителе интенсивности. Также за время эксплуатации под воздействием интенсивностей, необратимая пучков высоких произошла люминофора, дает гарантий сохранения линейности деградация что не световыхода. По этим причинам люминесцентный экран на данный момент используется по своему основному предназначению – как профилометр. Показания модуля расчета заряда совпадают с показаниями других приборов с точностью до порядка, что позволяет использовать экран только как качественный измеритель интенсивности, но не количественный. На Рисунке 4.18 показаны изображения пучка с ЛД СПО, полученные во время облучения различных объектов.



Рисунок 4.18 – Изображения пучка, прошедшего через облучаемые объекты на СПО

# 4.3.4. Результаты ЛД КПТ

Люминесцентный экран на выходе ионопровода у комплекса протонной терапии установлен для улучшения качества проводки пучка в процедурную КПТ и увеличения точности измерений положения и размера пучка. Данная задача возникла после начала исследований в области флэш-терапии сотрудниками КПТ. На Рисунке 4.19 представлены вкладки программ ЛД КПТ и МГС КПТ, на которых отображается положение и размеры пучка.



Рисунок 4.19 – Изображения пучка на ЛД КПТ (1) и МГС КПТ (2). Контроль положения пучка на обоих датчиках позволяет определить угол, под которым пучок входит в процедурную КПТ

Для данного люминесцентного экрана используется только базовый модуль программного обеспечения, поскольку экран используется только как профилометр. Использование люминесцентной диагностики в паре с МГС, установленном по оси пучка на расстоянии метра от экрана, позволяет провести пучок в процедурную строго в соответствии с запросами комплекса.

#### 4.4 Выводы главы 4

Программное обеспечение для обработки данных с оптических измерителей профиля пучка разработано таким образом, что может быть использовано для любого типа оптического измерителя в независимости от принципов его работы. Это подтверждается тем, что описанное в данной главе ПО успешно используется на протяжении нескольких лет на четырех профилометрах трех разных типов.

Используемый в разработке подход позволяет использовать успешные наработки, реализованные для одного прибора, на всех остальных устройствах. При необходимости установки дополнительных профилометров, работающий по принципу излучения оптических изображений, разработанное базовое ПО и дополнительные модули могут быть в кратчайшие сроки адаптированы для использования с новым прибором.

Результаты, полученные с помощью уже установленных приборов и данного ПО, позволили провести физический пуск стенда протонного облучения и его успешную эксплуатацию в течение нескольких лет. На основе данных с ИМПС проводится настройка и контроль за параметрами пучка в непрерывном режиме во время сеансов. Установка ФЛУМ позволила провести оптимизацию динамики пучка протонов по каналу транспортировки. Люминесцентная диагностика на КПТ успешно используется для оптимизации прохождения пучка в процедурную КПТ, что особенно важно для новых исследований в области флэш-терапии.
## ГЛАВА 5

# ПРОЦЕДУРА ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ПУЧКА

Измерения параметров поперечного фазового портрета пучка необходимы для моделирования динамики пучка и последующей оптимизации магнитооптики ускорителя. Для пучков ионов водорода низких энергий (менее 10 МэВ) можно проводить прямые измерения эмиттанса пучка при помощи различных контактных измерителей эмиттанса на основе тонких щелей или диафрагм. Однако в случае более высоких энергий прямые измерения, как правило, становятся некорректными из-за принципиальной неприменимости приближения "тонкой" щели. Кроме того, в случае высокоинтенсивных пучков в ускорителях высокоинтенсивных пучков тепловые нагрузки на такие контактные измерители еще больше ограничивают допустимый диапазон энергий. В этой ситуации на первый план выходят методы математической реконструкции, наиболее распространенными из которых являются методы квадрупольной вариации (МКВ). Типичное расположение оборудования, необходимого для измерений с помощью МКВ, представлено на Рисунке 5.1. Для измерений используются установленные профилометры, элементы магнитооптики ускорителя и компоненты систем управления, сбора и обработки данных. Установка дополнительных устройств не требуется.



Рисунок 5.1 – Типичное расположение оборудования, необходимого для проведения измерений при помощи метода квадрупольной вариации

МКВ – это группа методов, которая обычно применяется, как описано в [79]. Измерения при помощи МКВ позволяют получить информацию об эквивалентном фазовом эллипсе (далее – "фазовый эллипс"). Фазовый эллипс является удобной моделью описания распределения частиц пучка в фазовой плоскости. При линеаризации уравнений движения частиц в ускорителе все частицы оказываются на фазовой плоскости внутри кривой второго порядка, описываемой следующим уравнением:

$$\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = \varepsilon, \qquad (5.1)$$

где x, x' – координаты в фазовой плоскости,  $\alpha, \beta, \gamma$  – параметры Твисса,  $\varepsilon$  – эмиттанс пучка [5].

Одним из методов измерения параметров поперечного фазового портрета пучка, который можно отнести к МКВ, является хорошо известная в медицине и промышленности томографическая реконструкция. Это процесс реконструкции двумерного, иногда трехмерного, объекта на основе одномерных проекций этого объекта, полученных под разными углами.

Томографическая реконструкция может дать информацию не только об огибающей фазового портрета пучка и полученном из неё фазовом эллипсе, но и о плотности распределения частиц пучка в фазовом пространстве, что делает данную разновидность МКВ столь же информативной, как и методы прямых измерений поперечного эмиттанса. Но разработка алгоритмов томографической обработки является более сложной задачей по сравнению с типичными алгоритмами МКВ.

Применимость томографии к измерениям параметров пучка основана на свойствах преобразования Радона. Впервые данный метод был реализован на ускорителях в 70-х годах XX века [87]. Впоследствии он был успешно использован для измерений поперечных фазовых портретов пучков электронов [88; 89] и протонов [90]. В ЛУ ИЯИ РАН такая процедура внедрена на выходе ускорителя на основе ИМПС для проведения оперативных автоматизированных измерений эмиттанса пучка, транспортируемого далее на установки экспериментального комплекса по каналам сложной конфигурации длиной до 200 м. Также разработана программа для постобработки измеренных профилей пучка (офлайн-томография) с использованием данных как с ИМПС, так и с любых других профилометров, установленных на ускорителе.

В данной главе исследуется применимость томографического метода только для восстановления плотности распределения частиц в поперечных фазовых плоскостях и не рассматриваются вопросы измерения продольного эмиттанса [91; 92; 93] или многомерного распределения частиц в фазовом пространстве [94; 95; 96].

#### 5.1. Соглашение о фазовом эллипсе

Моделирование динамики пучка в ЛУ ИЯИ РАН выполняется с помощью матричного кода TRACE-3D [97], требующего параметры Твисса и эмиттанс фазового эллипса в качестве начальных данных, при этом основным используемым методом измерений является типичная реализация МКВ – метод поперечных профилей (МПП) [98].

Томографическая реконструкция, реализованная как альтернатива МПП, также должна восстанавливать значения параметров Твисса. С учетом того, что для восстановления фазового эллипса МПП использует среднеквадратичный размер пучка, а томографическая реконструкция – полный размер пучка, сравнение результатов этих методов следует проводить с учетом принятого в ускорительном комплексе ИЯИ РАН соглашения о том, что «полный» размер пучка равен 5 среднеквадратичным размерам, таким образом, эмиттанс «полного» пучка  $\varepsilon = \varepsilon_{2.5 rms} = 6.25 \times \varepsilon_{rms}$ .

Обычно для моделирования динамики пучка в ускорителях берут соотношение среднеквадратичного размера пучка к полному 1:4. Соотношение 1:5, завышенное по сравнению с обычным, принято в ускорительном комплексе ИЯИ РАН для того, чтобы на основе результатов моделирования динамики можно было проводить радиационно-чистую проводку пучка.

# 5.2. Датчики профиля пучка

Для измерения профилей и положения пучка используются профилометры нескольких типов: многопроволочные профилометры (МП), проволочные сканеры (ПС) и ИМПС. Для профилометра каждого типа осуществляется обрезка измеренных профилей на величину отсечки, которая будет представлена в разделе о результатах томографической реконструкции. На Рисунке 5.2 представлена схема ускорительного комплекса ИЯИ РАН с указанием мест установки профилометров.



Рисунок 5.2 – Схема ускорительного комплекса ИЯИ РАН с датчиками профиля пучка, которые использовались для томографии в данной работе. МП – многопроволочный профилометр; ИМПС – ионизационный монитор поперечного сечения; ПС – проволочный сканер. Прочие обозначения такие же, как на Рисунке 2.1

### 5.2.1. Проволочные профилометры

Для томографии фазового портрета используется многопроволочный профилометр, расположенный на выходе первого резонатора типа Альвареца (Р1 на Рисунке 5.2). Профилометр состоит из пятнадцати проволочек в каждой плоскости. Толщина проволочек равна 100 мкм, они размещены с шагом 2 мм по осям Х и Ү, ввод профилометра в ионопровод осуществляется шаговым Для преобразования фазового объема двигателем. пучка используются трубках дрейфа, девятнадцать квадрупольных ЛИНЗ В питаемых тремя независимыми источниками тока. Первый и второй источники питают по девять линз каждый, третий источник питает последнюю линзу в резонаторе.

Также для проведения измерений использовались два проволочных сканера, расположенные в области согласующего резонатора (РС на Рисунке 5.2). Для преобразования фазового объема пучка используются восемь квадрупольных дублетов с питанием от четырех независимых источников тока, каждый источник тока питает два дублета. Сбор данных с этих профилометров осуществляется с помощью плат National Instruments PCI 6259 [99].

#### 5.2.2. Ионизационный монитор поперечного сечения

Принцип работы ИМПС, расположенного на выходе ускорителя (Р32 на Рисунке 5.2), описан в предыдущей главе. Для преобразования фазового объема пучка используются восемь квадрупольных дублетов, питаемых двумя независимыми источниками тока, каждый источник тока питает четыре дублета.

# 5.3. Особенности реализации

Разработанное программное обеспечение для томографии поперечного фазового портрета пучка имеет две версии. Первая версия представляет собой онлайн-программу для оперативной процедуры томографии на основе данных ИМПС. Другая версия – это офлайн-томография, используемая для постобработки данных с любых профилометров. Обе версии созданы на LabVIEW, вычислительное ядро томографии написано на Python.

#### 5.3.1. Вычислительное ядро томографии

Вычислительное ядро основано на методе одновременной алгебраической реконструкции (SART – Simultaneous algebraic reconstruction technique) [86], который считается быстро сходящимся алгоритмом [100]. Помимо SART, рассматривались также метод фильтрованных обратных проекций (FBP – Filtered

back projection), метод алгебраической реконструкции (ART – Algebraic reconstruction technique) и метод максимальной энтропии (MENT – Maximum entropy). Для достижения одинакового уровня среднеквадратичной ошибки алгоритму SART требуется меньшее количество проекций, чем методам FBP и ART [86]. Метод MENT сравним по точности с методом SART, но его реализация представляет собой более сложную задачу [89]. Вариант алгоритма SART взят из пакета с открытым исходным кодом "scikit image" [101].

Представленные далее характеристики алгоритма SART основаны на реконструкции фантома Шеппа-Логана (Рисунок 5.3), который в основном используется в медицине и представляет собой модель человеческой головы. Большинство алгоритмов томографической реконструкции тестируется на этом фантоме. Данная модель подходит для испытаний SART в нашем случае, поскольку она похожа на эллиптическое распределение частиц пучка в фазовой плоскости со сложной внутренней структурой.



Рисунок 5.3 – Фантом Шеппа-Логана

На Рисунке 5.4 показано изменение среднеквадратичной ошибки в зависимости от числа итераций для различного количества проекций, равномерно распределенных по углам. Для получения среднеквадратичной ошибки фантом Шеппа-Логана преобразовывался в синограмму – двумерное изображение всех одномерных проекций объекта как функция проекционного угла в соответствии с требуемым количеством проекций. Полученная синограмма передавалась вычислительному ядру, которое восстанавливало двумерное изображение. Интенсивность восстановленного и исходного изображений сравнивалась попиксельно, и вычислялась среднеквадратичная ошибка восстановления изображения.



Рисунок 5.4 – Среднеквадратичная ошибка SART в зависимости от количества итераций для различного числа проекций. Черная линия (2 проекции), красная (10 проекций), синяя (20 проекций), розовая (100 проекций), зеленая (200 проекций)

Обычно для восстановления эмиттанса пучка на ЛУ ИЯИ РАН используются менее десяти проекций фазового объема. Как видно из Рисунка 5.4, в этом случае ошибка SART перестает уменьшаться на пятой итерации, поэтому вычислительное ядро выполняет пять итераций.

# 5.3.2. Онлайн томография

Программа для онлайн-томографии состоит из модулей управления и сбора данных с ИМПС, основанных на программном обеспечении, которое описано в предыдущем разделе, и модуля томографии. На этапе измерений программа изменяет токи в источниках питания линз в соответствии с планом, затем измеряет профили. Выполнив все запланированные измерения, программа возвращает исходные токи в источниках и запускает томографическую реконструкцию на основе измеренных профилей.

Этап восстановления начинается с создания матриц преобразования фазового объема пучка для каждого измеренного профиля. В общем случае эта матрица является матрицей аффинного преобразования, которое может быть представлено как комбинация поворота, сдвига и сжатия. В процедуре томографии измеряемый преобразованию объект лолжен подвергаться только поворота, поэтому преобразования сдвига и сжатия необходимо обратить с использованием аффинного преобразования. дискретного Скорректированные профили преобразуются в синограмму. Углы поворота в фазовом пространстве получаются из соответствующих матриц. После всех преобразований синограмма и углы поворота передаются в вычислительное ядро.

Результаты реконструкции, полученные с помощью вычислительного ядра, подвергаются постобработке. Каждый фазовый портрет разбивается на 20 подпортретов. Подпортреты формируются следующим образом: точки исходного портрета сортируются в порядке убывания соответствующих значений плотности распределения частиц в фазовом пространстве, затем отсортированные точки по очереди включаются в подпортрет, пока суммарная плотность распределения частиц подпортрета. На этом формирование первого подпортрета завершается. Второй подпортрет формируется таким же образом, но его суммарная плотность распределения исходного портрета, у третьего – 15% и т.д. Для каждого подпортрета вычисляется огибающая и фазовый эллипс, который аппроксимирует эту огибающую, рассчитываются параметры Твисса, эмиттанс и центр каждого фазового эллипса. Все эти данные отображаются для пользователя. Одно из окон программы с настройками томографии и результатами измерений представлена на Рисунке 5.5.



# Управление томографом

Рисунок 5.5 – Окно программы с настройками и данными онлайн-томографии. В окне "Управление томографом" вводятся данные для создания плана измерений и находятся кнопки запуска и экстренной остановки томографа. В окне "Результаты томографии" отображаются выбранные подпортреты, фазовые эллипсы и параметры Твисса для обеих фазовых плоскостей

# 5.3.3. Офлайн томография

Программа для офлайн-томографии использует то же ядро, что и онлайн-версия, однако в качестве входных данных офлайн-программе требуется массив профилей, которые были ранее измерены, и массив матриц преобразования фазового объема пучка для каждого измеренного профиля. Постобработка аналогична онлайн-томографии. Отличительной особенностью программы офлайн томографии является функция устранения артефактов реконструкции, возникающих во время томографии: наличие матрицы преобразования для каждого профиля дает возможность смоделировать динамику восстановленного фазового сравнить измеренные и восстановленные профили пучка с портрета и использованием определенной весовой функции, вычисляемой в два этапа. На первом шаге вычисляется средняя относительная разность между восстановленными и измеренными профилями. Если интенсивности обоих профилей в каких-то координатах равны нулю, то эта точка не учитывается. На втором шаге значения, рассчитанные для каждого профиля, усредняются. Эта функция применяется ко всем двадцати подпортретам, которые получаются после постобработки. наименьшим значением Подпортрет весовой функции c рассматривается как итоговый результат томографии. На Рисунке 5.6 представлен график весовой функции с изображениями фазовых портретов, соответствующих разным точкам. Рабочее окно программы офлайн-томографии представлено на Рисунке 5.7.



Рисунок 5.6 – Вверху – изображения подпортретов. Обведенный рамкой портрет – итоговый результат томографической реконструкции. Внизу – график зависимости значений весовой функции от суммарной интенсивности подпортрета, цифрами обозначены соответствующие подпортреты. На вставке к графику – вид сбоку на первичный результат работы вычислительного ядра



Рисунок 5.7 – Окно программы офлайн-томографии. В окне "Управление томографом" вводятся данные настройки томографа, здесь же график, где отображаются измеренный (белый) и восстановленный (красный) профили. В окне "Результаты томографии" на графиках слева: вверху – фазовый портрет, внизу – его огибающая (красная линия) и фазовый эллипс (синяя линия); в числовом формате представлены координаты фазового эллипса и параметры Твисса; на графиках справа: вверху – промежуточные расчеты огибающей портрета, внизу – интерактивная 3D-диаграмма распределения плотности пучка на фазовой плоскости

## 5.3.4. Погрешности измерений

Погрешности измерений при помощи томографии можно разделить на две группы: погрешности профилометра и погрешности томографического метода. К погрешностям профилометра относятся погрешность измерения положения  $\sigma_c$  и погрешность измерения полного размера  $\sigma_s$ . Эти погрешности различаются для каждого профилометра и представлены в Таблице 5.1.

Профилометр		$\sigma_s$ , mm
Многопроволочный профилометр	0,25	0,58
Проволочный сканер	0,1	0,06
Ионизационный монитор поперечного сечения	0,2	0,3

Таблица 5.1 – Значения погрешностей для различных профилометров

Погрешность томографии  $\sigma_t$  также состоит из нескольких частей. Первая часть относится к ошибкам матричного метода. Его применимость основывается на приближении малых углов, поэтому значение относительной погрешности матричного метода  $\sigma_m$  принимается равным точности выполнения условия малости углов. В резонаторах начальной части ускорителях ИЯИ РАН расстояние между трубками дрейфа составляет в среднем 200 мм, а апертура трубок – до 15 мм. Следовательно, максимальный угол наклона, который может иметь пучок, составляет 0,1 рад. В таком случае приближение малых углов ( $tg\alpha \approx \alpha$ ) выполняется с точностью 0,3 %. В основной части ускорителя расстояние между квадрупольными дублетами составляет 3000 мм, апертура – 40 мм, максимальный угол составляет 0,01 рад, а приближение малых углов выполнено с точностью < 0,1 %. Таким образом  $\sigma_m \leq 0,003$ .

Второй частью является процедура реконструкции, которая включает в себя погрешность алгоритма SART и погрешность преобразования измеренных для томографии профилей. На основе информации о количестве проекций и числе итераций из Рисунка 5.4 мы получаем, что относительная погрешность  $\sigma_{SART}$  ~11 %. Погрешность преобразования профиля возникает из-за использования дискретного аффинного преобразования, и может быть оценена следующим образом: заданный аналитически профиль преобразуется дискретным аффинным преобразованием, и результат сравнивается с аналитически преобразованным профилем (Рисунок 5.8). Погрешность преобразования профиля лочите с томография возникает из-за использованным на этой оценке, составляет ~12 %.



Рисунок 5.8 – Результат дискретного афинного преобразования профиля (белый) и аналитически преобразованный профиль пучка (красный)

Третьей составляющей является погрешность измерения параметров фазового эллипса, для которой необходимо учесть относительную погрешность аппроксимации огибающей восстановленного фазового портрета эллипсом  $\sigma_a$ . Она определяется встроенным алгоритмом аппроксимации в LabVIEW. Для оценки была измерена точность аппроксимации для квазиэллиптических пучков, как показано на Рисунке 5.9. В этом случае  $\sigma_a = 0,09$ . Однако эта погрешность может увеличиваться в зависимости от степени отличия огибающей фазового портрета от эллипса.



Рисунок 5.9 – Пример квазиэллиптического поперечного фазового портрета пучка

Таким образом, общая относительная погрешность процедуры томографии  $\sigma_t$  равна:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{SART}^2 + \sigma_{tr}^2 + \sigma_a^2} = 0,18.$$
 (5.2)

Однако значение  $\sigma_a$  оценивалось только для квази<br/>эллиптической огибающей. Для других огибающих погрешность аппроксимации может составлять более 9%, и для таких случаев мы предполагаем, что допустимое максимальное значение  $\sigma_t$ составляет 20%, так как при разработке процедуры томографии фазового портрета было наложено начальное условие на дальнейшее применение этой методики: восстановление значения полного размера пучка должно выполняться с погрешностью меньшей, чем его среднеквадратичный размер, т. е. исходя из соглашения о том, что полный размер пучка равен пяти среднеквадратичным процедуры размерам, можно считать, ЧТО относительная погрешность восстановления не должна превышать 20%.

С учетом всех оценок погрешности ( $\sigma_{ex}, \sigma_{ex'}$ ) для координат центра эллипса  $x_e$  и  $x'_e$  соответственно равны:

$$\sigma_{ex} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_s^2 + \sigma_t^2 \times x^2},\tag{5.3}$$

$$\sigma_{ex'} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_s^2 + \sigma_t^2 \times x'^2}.$$
(5.4)

Для вычисления  $\sigma_{ex}$ , значения  $\sigma_c$  и  $\sigma_s$  берутся в миллирадианах, потому что выбор размерностей осей координат определяется матрицами поворота, которые использует SART алгоритм, преобразующий одномерные проекции фазового портрета в двумерное изображение без какой-либо привязки к размерностям осей координат. В нашем случае матрицы поворота формируются из матриц преобразования фазового объема, а следовательно, размерности осей координат – это миллиметры и миллирадианы.

Для расчета погрешностей эмиттанса и параметров Твисса требуется относительная погрешность измерения размера пучка. Радиус или огибающая пучка оценивается как  $\sqrt{\epsilon\beta}$ . Погрешности параметров Твисса ( $\sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta}, \sigma_{\gamma}$ ) и эмиттанса ( $\sigma_{\varepsilon}$ ) с учетом всех составляющих равны

$$\sigma_{\varepsilon} = \varepsilon \times k, \sigma_{\alpha} = \alpha \times k, \sigma_{\beta} = \beta \times k, \sigma_{\gamma} = \gamma \times k, \tag{5.5}$$

где k – это

$$k = \sqrt{\frac{\sigma_s^2}{\varepsilon\beta} + \sigma_t^2}.$$
 (5.6)

Численные значения погрешностей получены после замены  $\sigma_c$  и  $\sigma_s$  их значениями из Таблицы 5.1 и представлены в Таблицах 5.2 – 5.4.

Для проверки точности результатов томографии рассчитывается динамика пучка на основе восстановленных фазовых эллипсов, после чего полученные расчетные значения положения центра тяжести и огибающей пучка сравниваются с измеренными. В качестве единицы сравнения используется среднеквадратичная Если погрешность восстановленного значения. огибающие пучка, восстановленные на основе моделирования динамики, отличаются от измеренных значений более чем на одно стандартное отклонение, то фазовый портрет не рассматривается как эллиптический и не может быть использован ДЛЯ моделирования динамики пучка в TRACE-3D. Разность между измеренным и восстановленным профилями обозначается как ve. В этих терминах этот критерий может быть сформулирован как  $v_e \leq 1$ .

## 5.4. Результаты томографии

В следующих подразделах представлены результаты, полученные во время двух последовательных сеансов работы ускорителя (Сеанс 1 и Сеанс 2), целью которых была оптимизация прохождения пучка вдоль всей машины. Все результаты обрабатывались в программе офлайн-томографии. В промежутках между этими сеансами были изменены параметры магнитооптики ускорителя. Результаты представлены в порядке расположения профилометров вдоль ускорителя. На всех рисунках XX' – горизонтальная фазовая плоскость, YY' – вертикальная фазовая плоскость. Для каждого измерения был вычислен параметр  $v_e$ , который рассматривается как индикатор достоверности измерений. Обсуждение результатов представлено в следующем разделе.

## 5.4.1. Результаты МП

Данные многопроволочного профилометра были собраны в обоих сеансах. Энергия пучка составляла 20,45 МэВ для обоих сеансов, длительность импульса составляла 100 мкс. Порог отсечки профилей составляет 1%. На Рисунке 5.10 показаны результаты томографии поперечного фазового портрета для обеих плоскостей на основе данных, полученных с помощью МП во время Ceanca 1. На Рисунке 5.11 показаны такие же результаты, полученные с помощью МП во время Сеанса 2. Значения параметров фазовых эллипсов для Ceanca 2 представлены в Таблице 5.2. В дальнейшем будет показано, что результаты Ceanca 1 являются некорректными, поэтому они не приводятся.



Рисунок 5.10 – Фазовые портреты (на верхних графиках), их огибающие (красные линии на нижних графиках) и фазовые эллипсы (синие линии на нижних графиках), реконструированные на основе данных МП, полученных в Ceance 1



Рисунок 5.11 – Фазовые портреты (на верхних графиках), их огибающие (красные линии на нижних графиках) и фазовые эллипсы (синие линии на нижних графиках), реконструированные на основе данных МП, полученных в Ceance 2

Таблица 5 2 –	Результаты	томографии	пеконструкции на	основе ланных с МП
1 аблица 3.2 –	гсзультаты	томографии	реконструкции на	основе данных с мп

Сеанс 2					
Плоскости	ь-XX′	Плоскость-ҮҮ′			
Параметр	Значение	Параметр	Значение		
$x_e$ , MM	$1,18\pm0,67$	<i>у</i> <sub>е</sub> , мм	$0,84{\pm}0,65$		
<i>x<sub>e</sub>′</i> , мрад	$0,45\pm0,64$	<i>y<sub>e</sub>′</i> , мрад	$0,95\pm0,66$		
α	$-0,05\pm0,01$	α	0,93±0,23		
<i>β</i> , мм/мрад	0,58±0,17	eta, мм/мрад	0,83±0,21		
γ, мрад/мм	1,73±0,49	γ, мрад/мм	2,24±0,55		
<i>є</i> , мм*мрад	14,02±4,00	<i>є</i> , мм*мрад	19,21±4,75		
$\varepsilon_{\text{норм}}$ , мм*мрад	2,48±0,71	<i>€</i> <sub>норм</sub> , мм*мрад	3,40±0,84		
v <sub>e</sub>	0,38	$v_e$	0,51		

# 5.4.2. Результаты ПС

Данные проволочных сканеров были собраны во время Сеанса 2. Энергия пучка составляла 158,56 МэВ для обоих сканеров, длительность импульса составляла 100 мкс. Порог отсечки профилей составляет 3%. На Рисунке 5.12 показаны результаты томографии поперечного фазового портрета для обеих плоскостей на основе данных, полученных с помощью первого проволочного сканера (ПС1). На Рисунке 5.13 показаны такие же результаты, полученные с помощью второго проволочного сканера (ПС2). Значения параметров фазовых эллипсов для обоих профилометров представлены в Таблице 5.3.



Рисунок 5.12 – Фазовые портреты (на верхних графиках), их огибающие (красные линии на нижних графиках) и фазовые эллипсы (синие линии на нижних графиках), реконструированные на основе данных с ПС1



Рисунок 5.13 – Фазовые портреты (на верхних графиках), их огибающие (красные линии на нижних графиках) и фазовые эллипсы (синие линии на нижних графиках), реконструированные на основе данных с ПС2

T C C 2 D		1 v		
1 and $1$ a	νπετατει τομογήα	тическои пеко	нструкции на о	снове ланных с ПС
тиолици 5.5 тоз	yndiaidi iomoipa	wn ieeron pero	потрукции на о	

ПС1			ПС2				
Плоско	сть-ХХ′	Плоско	сть-ҮҮ′	Плоско	сть-ХХ′	Плоско	сть-ҮҮ′
Пар.	Значение	Пар.	Значение	Пар.	Значение	Пар.	Значение
$x_e$ , MM	-1,75±0,37	<i>у</i> <sub>е</sub> , мм	2,23±0,46	$x_e$ , MM	-0,30±0,13	<i>у</i> <sub>е</sub> , мм	0,16±0,12
<i>x<sub>e</sub>′</i> , мрад	1,19±0,27	<i>у<sub>e</sub>′</i> , мрад	-1,64±0,35	<i>x<sub>e</sub>′</i> , мрад	0,03±0,12	<i>у<sub>e</sub>′</i> , мрад	0,00±0,12
α	0,02±0,01	α	1,72±0,34	α	-0,03±0,01	α	2,22±0,44
β, мм/мрад	1,47±0,30	β, мм/мрад	4,61±0,92	β, мм/мрад	1,53±0,31	β, мм/мрад	5,40±1,08
γ, мрад/мм	0,38±0,08	γ, мрад/мм	0,86±0,17	γ, мрад/мм	0,65±0,13	γ, мрад/мм	1,09±0,22
<i>є</i> , мм*мрад	4,50±0,91	<i>є</i> , мм*мрад	5,20±1,04	<i>є</i> , мм*мрад	4,81±0,97	<i>є</i> , мм*мрад	6,72±1,35
ε <sub>норм</sub> , мм*мрад	2,43±0,49	<i>Е<sub>норм</sub>,</i> мм*мрад	2,81±0,56	е <sub>норм</sub> , мм*мрад	2,60±0,52	<i>Е</i> <sub>норм</sub> , мм*мрад	3,63±0,73
v <sub>e</sub>	0,86	$v_e$	0,11	$v_e$	0,28	$v_e$	0,47

# 5.4.3. Результаты ИМПС

Данные ионизационного монитора были собраны дважды во время Сеанса 2, с разной длительностью импульса пучка (32 и 100 мкс). Энергия пучка составила 209,87 МэВ для обоих измерений. Порог отсечки профилей равен 1% при длительности пучка 32 мкс и 5% при длительности 100 мкс. На Рисунках 5.14 и 5.15 показаны результаты томографии поперечного фазового портрета для обеих плоскостей на основе данных, полученных с помощью ИМПС, с длительностью импульса 32 и 100 мкс соответственно. Значения параметров фазовых эллипсов для обоих профилометров представлены в Таблице 5.4.



Рисунок 5.14 – Фазовые портреты (на верхних графиках), их огибающие (красные линии на нижних графиках) и фазовые эллипсы (синие линии на нижних графиках), реконструированные на основе данных ИМПС (длительность пучка 32 мкс)



Рисунок 5.15 – Фазовые портреты (на верхних графиках), их огибающие (красные линии на нижних графиках) и фазовые эллипсы (синие линии на нижних графиках), реконструированные на основе данных ИМПС (длительность пучка 100 мкс)

Таблица 5.4 – Результаты томографии на основе данных с ИМПС

32 мкс			100 мкс					
Плоско	сть-ХХ′	Плоско	Плоскость-ҮҮ'		Плоскость-ХХ'		Плоскость-ҮҮ'	
Пар.	Значение	Пар.	Значение	Пар.	Значение	Пар.	Значение	
<i>х</i> <sub>е</sub> , мм	-2,92±0,69	<i>у</i> <sub>е</sub> , мм	-1,04±0,42	$x_e$ , MM	-1,98±0,54	<i>у</i> <sub>е</sub> , мм	-0,60±0,38	
<i>x<sub>e</sub>′</i> , мрад	1,92±0,53	<i>у<sub>e</sub>′</i> , мрад	-0,01±0,36	<i>x<sub>e</sub>′</i> , мрад	1,30±0,36	<i>y<sub>e</sub>′</i> , мрад	0,55±0,38	
α	-0,46±0,10	α	0,54±0,11	α	0,03±0,01	α	0,84±0,17	
β, мм/мрад	4,26±0,92	β, мм/мрад	5,48±1,14	β, мм/мрад	4,49±0,96	β, мм/мрад	5,13±1,06	
γ, мрад/мм	0,28±0,06	γ, мрад/мм	0,24±0,05	γ, мрад/мм	0,22±0,05	γ, мрад/мм	0,33±0,07	
<i>є</i> , мм*мрад	3,03±0,66	<i>є</i> , мм*мрад	4,54±0,95	<i>є</i> , мм*мрад	3,42±0,73	<i>є</i> , мм*мрад	5,90±1,22	
<ul> <li><i>є</i><sub>норм</sub>,</li> <li>мм*мрад</li> </ul>	2,14±0,46	<i>€</i> <sub>норм</sub> , мм*мрад	3,20±0,67	<i>є<sub>норм</sub>,</i> мм*мрад	2,41±0,52	<i>€</i> <sub>норм</sub> , мм*мрад	4,16±0,86	
v <sub>e</sub>	0,93	$v_e$	1,23	$v_e$	0,84	v <sub>e</sub>	1,37	

# 5.5. Обсуждение результатов

Для дальнейшего обсуждения, анализа и сравнения результатов томографической реконструкции фазового портрета используются данные из Таблиц 5.2–5.4 в качестве исходных параметров для моделирования динамики пучка.

#### 5.5.1. Ограничения на диапазон изменения угла поворота

В Таблице 5.5 представлены разности томографически между реконструированными измеренными параметрами пучка, полученные с И использованием многопроволочного профилометра, В данных единицах стандартных отклонений результатов метода томографической реконструкции. На основе данных МП на Рисунке 5.16 представлены результаты моделирования динамики положения центра тяжести и огибающей пучка в конце первого резонатора типа Альвареца (P1 на Pисунке 5.2). На рисунке на схеме розовые и голубые прямоугольники – фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные линзы (схема фокусировки FODO), оранжевые линии – ускоряющие промежутки, черные линии – промежутки дрейфа. На графиках синие линии – динамика по оси Х, красные – по оси Ү.

Таблица 5.5 – Разность между измеренными и томографически реконструированными параметрами пучка, измеренная в стандартных отклонениях томографического метода на основе данных с МП

Параметр, ст. отклонения	Сеанс 2
разница положений <sub>х</sub>	0,56
разница положений <sub>у</sub>	0,85
разница огибающей пучка <sub>х</sub>	0,38
разница огибающей пучка <sub>у</sub>	0,51



Рисунок 5.16 – Схема расположения элементов магнитооптики в конце первого резонатора типа Альвареца, расчетная динамика положения центра тяжести пучка и расчетная динамика огибающей пучка

Из-за нестабильности пучка во время Сеанса 1 не все измеренные профили были использованы для восстановления фазового портрета. Таким образом, угол поворота фазового портрета, полученный из матриц преобразования, для данных Сеанса 1 по обеим плоскостям менялся в диапазоне до 20°, в то время как для результатов Сеанса 2 – в диапазоне около 120°.

Bce погрешностей томографического оценки алгоритма сделаны В предположении об изменении углов поворота на 180 градусов при проведении измерений. На Рисунке 5.17 показано, что значение погрешности SART остается на уровне ~11 %, если диапазон углов превышает 100 градусов (угол α, превышающий 180 градусов, считается углом (α минус180) градусов из-за особенностей SART). В случае диапазона в 20 градусов погрешность SART увеличивается почти в два раза. Это накладывает ограничения на исходные данные, поскольку необходимо помнить о необходимости иметь большой диапазон угла поворота. Таким образом, результаты измерений в Сеансе 1 признаны некорректными, и во время Сеанса 2 все измерения проводились с диапазоном углов не менее 100 градусов.

96



Рисунок 5.17 – Среднеквадратичная ошибка SART в зависимости от диапазона изменения угла поворота

## 5.5.2. Сравнение с методом поперечных профилей

На основе данных ПС1 на Рисунках 5.18 и 5.19 соответственно показаны динамика положения центра тяжести и огибающей пучка вдоль ионопровода около согласующего резонатора (РС на Рисунке 5.2) для метода томографической реконструкции и метода поперечных профилей. На рисунках на схеме розовые и голубые прямоугольники – фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные линзы (схема фокусировки FDO), оранжевые линии – ускоряющие промежутки, черные линии – промежутки дрейфа. На графиках синии линии – динамика по оси Х, красные – по оси Ү. Разность между измеренными и восстановленными параметров пучка, выраженная значениями В стандартных отклонениях результатов методов, представлена в Таблице 5.6 для обоих методов. Погрешности измерений томографического метода приведены в Таблицах 5.2-5.4, погрешности МПП сравнимы с томографическими по величине. Все разности между измеренными и восстановленными огибающими пучка для обоих методов составляют стандартного отклонения, менее одного однако В случае положения центра тяжести пучка томографический восстановления метод показывает на порядок лучшую точность, чем метод поперечных профилей.



Рисунок 5.18 – Схема расположения элементов магнитооптики около согласующего резонатора и динамика положения центра тяжести пучка вдоль смоделированного канала по данным метода томографической реконструкции и МПП



Рисунок 5.19 – Схема расположения элементов магнитооптики около согласующего резонатора и динамика огибающей пучка вдоль смоделированного канала по данным метода томографической реконструкции и МПП

Таблица 5.6 – Разность между измеренными и восстановленными параметрами пучка для томографии и метода поперечных профилей, измеренная в стандартных отклонениях соответствующего метода на основе данных ПС1

Параметр, ст. отклонения	Томография	МПП
разница положений <sub>х</sub>	0,39	2,12
разница положений <sub>у</sub>	0,20	2,42
разница огибающих пучка <sub>х</sub>	0,86	0,15
разница огибающих пучка <sub>у</sub>	0,11	0,36

Различия в результатах реконструкции двух методов, основанных на одних и тех же данных, объясняются тем, как методы обрабатывают полученные данные. Томографическая реконструкция использует всю информацию, предоставляемую профилометром, и не накладывает никаких ограничений на параметры фазового портрета. Метод поперечных профилей использует только информацию о положении центра тяжести и численное значение среднеквадратичного размера пучка.

#### 5.5.3. Изменение нормализованного эмиттанса

Величины нормализованного эмиттанса, рассчитанные на основе реконструированных фазовых портретов в разных точках ускорителя, а также импульсный ток пучка, измеренный вблизи тех же точек, представлены на Рисунке 5.20. Расчет эмиттанса по фазовым портретам проведен с помощью встроенного алгоритма LabVIEW для вычисления площадей фигур сложной формы, потому что, согласно принятой интерпретации результатов томографии, не каждый фазовый портрет можно рассматривать как эллиптический.



Рисунок 5.20 – Величина нормализованного эмиттанса для реконструированных фазовых портретов (черная и красная линии) и тока пучка (синяя линия) в зависимости от места измерения. Черная линия – для импульсов длительностью пучка 100 мкс, красная линия – с длительностью пучка 32 мкс

Сначала величины нормализованного эмиттанса фазовых портретов уменьшаются вместе со значениями импульсного тока пучка, но со второго проволочного сканера нормализованный эмиттанс для YY'-плоскости начинает расти, в то время как импульсный ток продолжает уменьшаться. Однако при измерениях с длительностью импульса 32 мкс на ИМПС нет увеличения эмиттанса при тех же значениях импульсного тока, что и для пучка с длительностью 100 мкс. Для XX'-плоскости значения нормализованного эмиттанса стабильны.

Учитывая величины погрешностей измерений, можно предположить, что эти расхождения связаны с неточностями метода томографической реконструкции. Однако существует и другая интерпретация этих результатов, которая объясняет динамику нормализованного эмиттанса и разницу между измерениями ИМПС при разных длительностях импульса тока пучка.

Причиной мог быть сбой в системе компенсации ВЧ-мощности ускоряющих резонаторов при нагрузке током пучка, что привело к существенному увеличению разброса частиц по импульсам в ускоряемых сгустках пучка длительностью 100 мкс. После ПС1 положение пучка вдоль ускорителя корректируется преимущественно в вертикальной плоскости с помощью дипольных магнитных корректоров, что приводит к пространственному разделению энергетического спектра пучка и, как следствие, к неэллиптическим формам фазового портрета. При измерении пучка с длительностью импульса 32 мкс увеличения эмиттанса не происходит из-за равномерного ускорения частиц в сгустке с сохранением величины разброса по импульсам.

Описанные наблюдения показывают, что томографическая реконструкция является полезным инструментом не только для измерения поперечных параметров пучка, но также может быть использована в качестве индикатора некорректной настройки продольного движения пучка в резонансном ускорителе.

### 5.6. Выводы главы 5

Томография поперечного фазового портрета пучка, основанная на быстром SART-алгоритме, реализована на сильноточном ЛУ ионов водорода ИЯИ РАН для пучков средних и промежуточных энергий в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен мегаэлектронвольт. Несмотря на то, что данный алгоритм томографии редко используется на ускорителях заряженных частиц, полученные результаты показывают, что разработанная процедура диагностики нечувствительна к типу профилометра, а созданное программное обеспечение может работать с любыми матрицами преобразования.

Быстрые онлайн-измерения поперечных фазовых портретов пучка могут быть выполнены с использованием каких-либо неразрушающих измерителей, как, например, ионизационный монитор поперечного сечения в случае ускорителя ИЯИ РАН. Офлайн-процедура позволяет обрабатывать информацию из базы данных, полученную со всех остальных установленных профилометров, включая результаты предыдущих сеансов работы ускорителя, и обеспечивает более тщательную обработку данных для восстановления внутренней структуры поперечного фазового портрета пучка.

Сравнение томографического метода и метода поперечных профилей показало, что форма фазового портрета пучка может значительно отличаться от эллиптической, особенно во время процедур настройки пучка. Это означает, что фазовые эллипсы, восстановленные с помощью метода поперечных профилей, должны быть каким-то образом верифицированы перед моделированием динамики пучка на основе полученных параметров Твисса в стандартных программах, матричные методы трассировки пучка. В использующих этом случае альтернативный томографический метод с внутренней процедурой проверки результатов более предпочтителен для восстановления фазового портрета и получения достоверных огибающих пучка.

Реализованный метод не требует установки дополнительного оборудования на ионопровод ускорителя и использует только существующие элементы магнитооптики и профилометры, при этом основная сложность практической реализации заключается в интеграции вычислительного ядра в АСУ ускорителя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

#### Основные результаты и выводы

В диссертации изложены результаты работ по модернизации аппаратно-программных средств управления и диагностики пучка для ускорительного комплекса ИЯИ РАН:

1. Проведена масштабная модернизация аппаратной и программной частей автоматизированной системы управления ускорительного комплекса ИЯИ РАН.

2. Проведена модернизация АСУ технологических систем ускорительного комплекса, в частности, полностью перепроектировано ПО системы контроля потерь пучка в каналах транспортировки к импульсным источникам нейтронов. Реализовано измерение новых технологических параметров, таких как характеристики промышленной электросети.

3. Разработано программное обеспечение для обработки данных с датчиков профиля пучка, которые используют оптические изображения в своей работе.

4. На основе данных флуоресцентного монитора оптимизирована динамика пучка протонов вдоль канала транспортировки и налажен контроль за изменением параметров работы инжектора протонов и элементов магнитооптики канала.

5. Оптимизировано прохождение пучка в процедурную комплекса протонной терапии с использованием данных люминесцентной диагностики КПТ, что особенно важно для новых исследований в области ядерной медицины, таких как флэш-терапия.

6. Реализована процедура томографии поперечного фазового портрета пучка, основанная на методе одновременной алгебраической реконструкции для измерения параметров пучков с энергиями от десятков до сотен мегаэлектронвольт. Получены экспериментальные результаты томографии на основе данных нескольких профилометров, установленных вдоль ускорителя.

7. Проведено сравнение томографического метода и метода поперечных профилей, которое показало, что форма фазового портрета пучка может

значительно отличаться от эллиптической, особенно во время процедур настройки пучка. В этом случае альтернативный томографический метод с внутренней процедурой проверки результатов более предпочтителен для восстановления фазового портрета и получения достоверных огибающих пучка.

## Благодарности

Выражаю особую благодарность своему научному руководителю С. А. Гаврилову за многолетнюю поддержку во всех аспектах моей работы, и вклад в мое личное развитие. Искренне благодарен С. Е. Брагину, О. М. Володкевич, В. А. Гайдашу и В. А. Шаталову за активное участие во всех этапах данной работы и моей работы в ускорительном комплексе в целом. Благодарю А. В. Фещенко и В. Л. Серова общую поддержку полученный опыт. Благодарю за И В. В. Парамонова за обсуждение вопросов, рассматриваемых в диссертации. Также благодарю всех остальных сотрудников Отдела ускорительного комплекса за всю помощь и поддержку.

# СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АОП	аналоговый опрос
АСУ	автоматизированная система управления
АУП	аналоговое управление
АЦП	аналого-цифровой преобразователь
БАЗ	быстрая аварийная защита
БРУ	блок ручного управления
ВЧ	высокочастотный
ДОП	дискретный опрос
ДУП	дискретное управление
ИМПС	ионизационный монитор поперечного сечения
КПТ	комплекс протонной терапии
КТ	каналы таймера
ЛД	люминесцентная диагностика
ЛУ	линейный ускоритель
ΜΓC	мультианодный газовый счетчик
МКВ	метод квадрупольной вариации
МП	многопроволочный профилометр
МПП	метод поперечных профилей
ОУК	отдел ускорительного комплекса
ПК	персональный компьютер
профилометр	датчик профиля пучка
ПО	программное обеспечение
ПС	проволочный сканер
синхроимпульс	сигнал синхронизации
СК	система координат
СКиУ	система контроля и управления
СПО	стенд протонного облучения

ССД	система сбора данных
СУ	система управления
<b>YBB</b>	устройство ввода-вывода
УСО	устройство связи с объектом
фазовый портрет	распределение частиц на фазовой плоскости
ФЛУМ	флуоресцентный монитор
ΦC	функциональная система
ЦАП	цифро-аналоговый преобразователь
ЦВВ	цифровой ввод-вывод
ШС	шкаф синхронизации
ШСП	шкаф связи с пультом
ЭК	экспериментальный комплекс
ART	algebraic reconstruction technique
FBP	filtered back projection
MENT	maximum entropy
REO	резонатор с пространственно-однородной
кгу	квадрупольной фокусировкой
SART	simultaneous algebraic reconstruction technique

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Crowley-Milling M. C. Evolution of control systems for accelerators. // http://cds.cern.ch/record/155002

2. Verstovek I. et al. Recent trends in accelerator control systems. // Proceedings of IPAC2011, pp. 2844–2847, 2011.

3. Deghaye S., Fortesque E. Introduction to the Accelerator Control System. // http://cds.cern.ch/record/2915506

4. Labview. https://www.ni.com/en-us/shop/labview.html

5. Wiedemann H. Particle Accelerator Physics. Fourth Edition. / Springer, 2015. – 1029 p.

6. Titov A. I., Bragin S. E., Volodkevich O. M., Gavrilov S. A. Beam transverse phase space tomography at the high-intensity linear accelerator of hydrogen ions. // Instruments and Experimental Technuqiues, Vol. 66, № 1, pp. 1–18, 2023.

7. Titov A. I., Gavrilov S. A., Polonik I. I. Multipurpose software for acquisition and processing of optical signals from beam profile monitors at the INR linac. // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 67, Suppl. 1, pp. S70–S76, 2024.

8. Gavrilov S. A., Kalinin Yu. G., Polonik I. I., Titov A. I. A beam-induced fluorescence monitor at the low-energy beam transport line of the proton linac at the Institute for Nuclear Research. // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 67, Suppl. 2, pp. S167–S173, 2024.

9. Bragin S., Feschenko A., Gavrilov S., Grekhov O., Kalinin Y., Kiselev Y., Latysheva L., Lebedev S. G., Melnikov A., Serov V., Sobolevskiy N., Titov A., Volodkevich O., Arbuznikov D., Podgornaya O., Prokhorov E., Razinkov S., Tsedrik P. and Tsibryaev S. Development of Proton Irradiation Facility at the INR Linac. // Journal of Physics: Conference Series, V. 1238, Number 1, 2019.

10. Gavrilov S., Melnikov A., Titov A. Beam diagnostics and instrumentation for proton irradiation facility at INR RAS linac. // Proceedings of IBIC18, pp. 40–42, 2018.

11. Titov A., Gavrilov S. Luminescent diagnostics of low intensity proton beams at INR RAS linac. // Proceedings of RuPAC18, pp. 489–491, 2018.

12. Titov A., Gavrilov S. Transverse phase portrait tomography of proton beams at INR RAS linac. // Proceedings of IBIC20, pp. 193–196, 2020.

13. Titov A. I., Gavrilov S. A., Bragin S. E., Volodkevich O. M. Enhancement of transverse beam phase space analysis by tomography method at INR linac. // Proceedings of RuPAC 21, pp. 433–435, 2021.

14. Titov A. I., Gavrilov S. A. Concept of decision support system for INR RAS linac beam tuning. // Proceedings of RuPAC21, pp. 436–438, 2021.

15. Pieck M. et al. LANSCE control system's 50<sup>th</sup> anniversary. // Proceedings of NAPAC2022, pp. 482–485, 2022.

16. Korhonen T. et al. EPICS version 4 progress report. // Proceedings of ICALEPCS2013, pp. 956–959, 2013.

17. Andrews A. et al. Development of EPICS accelerator control system for the IAC44 MeV linac. // Proceedings of ICALEPCS2013, pp. 385–388, 2013.

18. Burandt C. et al. Status of the migration of the S-DALINAC accelerator control system to EPICS. // Proceedings of ICALEPCS2012, pp. 166–168, 2012.

19. Wang C. H. et al. Running maintenance of the BEPCII control system. // Proceedings of ICALEPCS09, pp. 269–271, 2009.

20. Kim C. et al. Status of the PAL-XFEL control system. // Proceedings of ICALEPCS2015, pp. 79–81, 2015.

21. White K. S. et al. Modernizing the SNS control system. // Proceedings of ICALEPCS2021, pp. 21–25, 2021.

22. Song Y. G., Cho S. Y., Kim J. H., Yun S. P. Development of Zynq SoC-based EPICS IOC for KOMAC remote control system. // Proceedings of IPAC2022, pp. 1330–1332, 2022.

23. Uchiyama A. et al. Control system of the SRILAC project at RIBF. // Proceedings of ICALEPCS2021, pp. 147–152, 2021.

24. Liao C. Y. et al. Commissioning of the TPS control system. // Proceedings of ICALEPCS2015, pp. 1173–1176, 2015.

25. Heron M. T. et al. DIAMOND control system outline design. // Proceedings of ICALEPCS01, pp. 122–124, 2001.

26. Mazkiaran I. et al. ESS MEBT control system integration. // Proceedings of ICaLEPCS2019, pp. 421–425, 2019.

27. Korhonen T. et al. Status of the European Spallation Source control system. // Proceedings of ICALEPCS2015, pp. 1177–1181, 2015.

28. Zhang Y.W. et al. Status of CSNS accelerator control system. // Proceedings of ICALEPCS2019, pp. 202–204, 2019.

29. Lee K. S. et al. TRIUMF secondary beam line control system upgrade using EPICS. // Proceedings of ICALEPCS03, pp. 199–201, 2003.

30. Zhang Y. W. et al. The control system dedicated for beam line of proton radiography test-stand on a 100 MeV cyclotron CYCIAE-100. // Proceedings of Cyclotrons2016, pp. 202–204, 2016.

31. Sato Y. et al. A control system of the slow-extraction beam lines in the J-PARC project. // Proceedings of ICALEPCS03, pp. 78–80, 2003.

32. Satoh M. at al. Control system upgrade for SuperKEKB injector linac. // Proceedings of IPAC2015, pp. 930–932, 2015.

Goetz A. et al. Future of TANGO. // Proceedings of ICALEPCS07, pp. 723–727,
 2007.

34. Goetz A. et al. TANGO v8 – another turbo charged major release. // Proceedings of ICALEPCS2013, pp. 978–981, 2013.

35. Goetz A. et al. Ubiquitous TANGO. // Proceedings of ICALEPCS07, pp. 374–376, 2007.

36. Taurel E. TANGO kernel status and evolution. // Proceedings of ICALEPCS2009, pp. 630–632, 2009.

37. Bourtembourg R. et al. TANGO kernel development status. // Proceedings of ICALEPCS2017, pp. 27–33, 2017.
38. Freitas A. et al. Control system suite for beam position monitors at MAX IV. // Proceedings of IBIC2022, pp. 496–499, 2022.

39. Goryl P. P. TANGO based control system at SOLARIS synchrotron. // Proceedings of IPAC2016, pp. 4101–4103, 2016.

40. Rubio-Manrique S. et al. Extending alarm handling in TANGO. // Proceedings of ICALEPCS2011, pp. 63–65, 2011.

41. Lonza M. et al. The control system of the FERMI@Elettra free electron laser. // Proceedings of ICALEPCS2009, pp. 322–324, 2009.

42. Gorbachev E. V. et al. Nuclotron and NICA control system development status. // Proceedings of ICALEPCS2015, pp. 437–440, 2015.

43. Nozdrin M., Kobets V., Minashkin V., Trifonov A. Linac-200 gun control system: status and plans. //Proceedings of ICALEPCS2021, pp. 161–163, 2021.

44. Frammery B. The LHC control system. // Proceedings of ICALEPCS05, 2005.

45. Hoguin F. et al. Distributed transaction in CERN's accelerator control system. // Proceedings of ICALEPCS2021, pp. 468–472, 2021.

46. Baer R. et al. Development of a new control system for the FAIR accelerator complex at GSI. // Proceedings of ICALEPCS2009, pp. 328–330, 2009.

47. Baer R. et al. News from the FAIR control system under development. // Proceedings of PCaPAC2014, pp. 37–39, 2014.

48. Froehlich L. et al. The evolution of the DOOCS C++ code base. // Proceedings of the ICALEPCS2021, pp. 188–192, 2021.

49. Hensler O. et al. Consolidating the FLASH LLRF system using DOOCS standard server and the FLASH DAQ. // Proceedings of PCaPAC2010, pp. 55–57, 2010.

50. Bacher R. et al. Towards a new control system for PETRA IV. // Proceedings of ICALEPCS2021, pp. 108–110, 2021.

51. Berkaev D. et al. Control system for injection channels of VEPP-2000 collider. // Proceedings of RuPAC2008, pp. 718–720, 2008.

52. Berkaev D. et al. VEPP-2000 collider control system. // Proceedings of ICALEPCS2009, pp. 724–726, 2009.

53. Bolkhovityanov D., Cheblakov P., Emanov F. CXv4, a modular control system. // Proceedings of ICALEPCS2015, pp. 915–918, 2015.

54. Kiyomichi A. et al. Construction of beam monitor control system for beam transport from SACLA to Spring-8. // Proceedings of ICALEPCS2019, pp. 1544–1548, 2019.

55. Zen H. et al. Present status of control system of UVSOR-II. // Proceedings of ICALEPCS2009, pp. 304–306, 2009.

56. Mosthaf J. M. et al. Status update for the HIT accelerator control system. // Proceedings of ICALEPCS2017, pp. 1409–1411, 2017.

57. Fleck T., Baer R., Mosthaf J. Status of the accelerator control system (ACS) for the therapy facility HIT. // Proceedings of PCaPAC08, pp. 215–217, 2008.

58. Modic R. et al. MYRRHA control system development. // Proceedings of IPAC2018, pp. 4823–4825, 2018.

59. Tanigaki M. et al. Development and current status of the control system for 150 MeV FFAG accelerator complex. // Proceedings of PCaPAC08, pp. 13–15, 2008.

60. Alferov V. et al. Upgrade of the U-70 proton synchrotron extracted beam lines control system: multiple access and data presentation. // Proceedings of RuPAC-2010, pp. 260–262, 2010.

61. Центр коллективного пользования. Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины. https://www.inr.ru/ckp-new/

62. Ускорительный комплекс для физики средних энергий (мезонная фабрика).

// Труды Радиотехнического института, 16, 1974.

63. Pieck M., Kay-Uwe K. Comparison between an in-house vs. a commercial control system for beam line control. // Proceedings of PAC01, pp. 800–802, 2001.

64. Федотов А. П. и др. Шкаф МЭО.В1. Техническое описание. / Московский радиотехнический институт АН СССР. ШБ3.622.018 ТО, 1980.

65. Уксусов Н. И. и др. Шкаф МЭО.Э1. Техническое описание. / Московский радиотехнический институт АН СССР. ДМЦЗ.622.000 ТО, 1981.

66. Уксусов Н. И. и др. Шкаф МЭО.С1. Техническое описание. / Московский радиотехнический институт АН СССР. ШБ3.622.019 ТО, 1980.

67. Уксусов Н. И. и др. Шкаф МЭО.Т1а. Техническое описание. / Московский радиотехнический институт АН СССР. ШБ3.622.020 ТО, 1981.

68. Грехов О. В., Другаков А. Н., Киселев Ю. В. Система управления линейным ускорителем ИЯИ РАН. // Вопросы атомной науки и техники 2008, серия "Ядерно-физические исследования", № 3, с. 64–67, 2008.

69. Васильев И. А., Грехов О. В. Использование системы сбора данных на линейном ускорителе ИЯИ РАН. // Вопросы атомной науки и техники 2012, серия "Ядерно-физические исследования", № 4, с. 61–63, 2012.

70. Koziol H. Beam diagnostics for accelerators. // http://cds.cern.ch/record/499098

71. Becker F., Andre C., Forck P., Hoffmann D. H. Beam induced fluorescence (BIF) monitor for transverse profile determination of 5 to 750 MeV/u heavy ion beams. // Proceedings of DIPAC 2007, pp. 33–35, 2007.

72. Gavrilov S., Feschenko A., Reinhardt-Nickoulin P. and Vasilyev I. Two-dimensional non-destructive diagnostics for accelerators by Beam Cross Section Monitor. // JINST 9 P01011, 2014.

73. Shea T. J. et al. Performance of the RHIC injection line instrumentation systems.// Proceedings of PAC97, pp. 2215–2217, 1997.

74. Iriso U., Benedetti G., Perez F. Experience with YAG and OTR screens at ALBA. // Proceedings of DIPAC09, pp. 200–202, 2009.

75. Yang B. X. et al. Status of the APS diagnostics undulator beamline. // Proceedings of PAC97, pp. 2207–2209, 1997.

76. Yan M. Suppression of COTR in electron beam imaging diagnostics at FLASH. iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\_Public/43/063/43063092.pdf

77. K. Manukyan et al. Beam diagnostics for AREAL RF photogun linac. // Proceedings of IBIC12, pp. 1–3, 2012.

78. Bolton P. R. et al. Instrumentation for diagnostics and control of laser-accelerated proton (ion) beams. // Physica Medica 30, pp. 255–270, 2014.

79. Forck P. Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics. / Joint University Accelerator School, January – March, 2017.

80. Видеокамера Basler acA780-75gm. https://www.baslerweb.com/en/products/ cameras/area-scan-cameras/ace/aca780-75gm/#

81. Видеокамера LEO 1200H-30gm. https://www.contrastech.com/productview/ 1086.html

82. Визильтер Ю. В. И др. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. / М.: ДМК Пресс, 2007. –233 с.

83. SRIM. http://www.srim.org/

84. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Свойства нуклонов, ядер и радиоактивных излучений. / М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с.

85. Forck P. et al. Scintillation screen investigations for high energy heavy ion beams at GSI. // Proceedings of DIPAC11, pp. 170–172, 2011.

86. Andersen A. H., Kak A. C. Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): a superior implementation of the ART algorithm. // Ultrasonic Imaging. V. 6, №1, pp. 81–94, 1984.

 Fraser J. S. Beam Analysis Tomography. // IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26, 1641, 1979.

88. McKee C. B., O'Shea P. G. and Madey J. Phase space tomography of relativistic electron beams. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 358, 1995.

89. Asova G. et al. First results with tomographic reconstruction of the transverse phase space at PITZ. // Proceedings of FEL 2011, pp. 543–546, 2011.

90. Reggiani D., Seidel M. and Allen C. K. Transverse phase-space beam tomography at PSI and SNS proton accelerators. // Proceedings of IPAC'10, pp. 1128–1130, 2010.
91. Malyutin D. et al. Longitudinal phase space tomography using a booster cavity at PITZ. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 871, pp. 105–112, 2017.

92. Lallement J. B. et al. LINAC4 transverse and longitudinal emittance reconstruction in the presence of space charge. // Proceedings of LINAC2014, pp. 913–915, 2014.

93. Tan J. LINAC4 diagnostics experience during commissioning. ARIES workshop on Experiences During Hadron LINAC Commissioning, 2021.

94. Cathey B., Cousineau S., Aleksandrov A. and Zhukov A. First Six Dimensional Phase Space Measurement of an Accelerator Beam. // Phys. Rev. Lett. 121, 064804, 2018.

95. Georgiev G. Z., Krasilnikov M. Virtual pepper-pot technique for 4D phase space measurements. // Proceedings of IBIC2019, pp. 586–590, 2019.

96. Hock K. M., Wolski A. Tomographic reconstruction of the full 4D transverse phase space. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 726, pp. 8–16, 2013.

97. Crandall K. R. TRACE 3-D Documentation. / LA--11054-MS, 1987.

98. Reinhardt-Nickoulin P. et al. Emittance Measurements at the Exit of INR Linac.// Proceedings of RuPAC'12, pp. 668–670, 2012.

99. Плата NI PCI-6259. https://www.ni.com/en-us/support/model.pci-6259.html

100. Jiang M. and Wang G. Convergence of the Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART). // IEEE Transactions on Image Processing. V. 12, № 8, pp. 957–961, 2003.

101. Van der Walt S. et al. scikit-image: Image processing in Python. // PeerJ 2:e453,2014.