

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Научный руководитель:

Гаврилов Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел ускорительного комплекса, заведующий лабораторией пучка.

Официальные оппоненты:

Кулевоу Тимур Вячеславович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, заместитель руководителя Комплекса по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам.

Юров Дмитрий Сергеевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, отдел электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна.

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте по адресу: <http://www.inr.ru>.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физ.-мат. наук

Демидов Сергей Владимирович

Общая характеристика работы

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) [А.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 [А.2; А.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 ускоре-

тельного 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

1. Разработано универсальное ПО для обработки оптических изображений с датчиков профиля пучка. Данное ПО используется на четырех диагностических приборах, установленных в ускорительном комплексе.
2. 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:
4. 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.
6. Обеспечено штатное функционирование ПО АСУ ускорительного комплекса. Проведена унификация версий используемого ПО для решения проблемы конфликта разных версий.
7. 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 [A.4] и языка программирования Python. Моделирование динамики пучка проводилось с использованием матричного формализма представления ускоряюще-фокусирующего канала ускорителя [A.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.
3. 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.
5. 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.

Апробация работы и публикации

Всего по теме диссертации опубликовано 9 работ. Результаты работы опубликованы в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК [1; 2; 3], журналах, индексируемых международными базами цитирования Scopus и Web of Science [4] и трудах конференций [5; 6; 7; 8; 9], 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. Схема автоматизированной системы управления ЛУ ИЯИ РАН представлена на Рисунке 1. 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. На Рисунке 2 представлена схема всех синхроимпульсов, которые формируются в АСУ.

В **разделе 2.6** речь идёт о современном оборудовании, которое 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. На Рисунке 3 представлена схема ССД. **Раздел 2.8** посвящен программному обеспечению, которое не входит в ССД. В **разделе 2.9** представлены выводы главы.

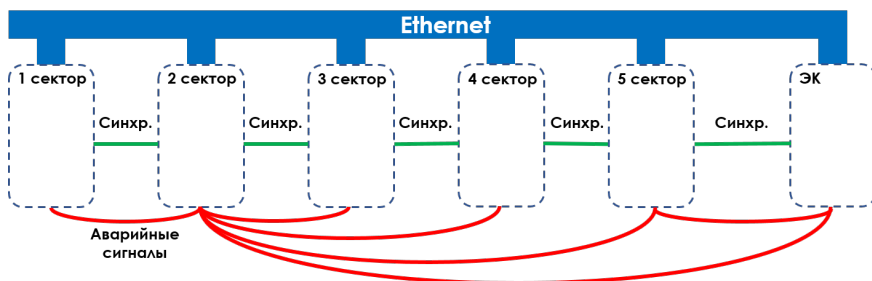


Рисунок 1 – Структура автоматизированной системы управления ЛУ ИЯИ РАН. Зеленые линии – сигналы синхронизации, красные линии – аварийные сигналы

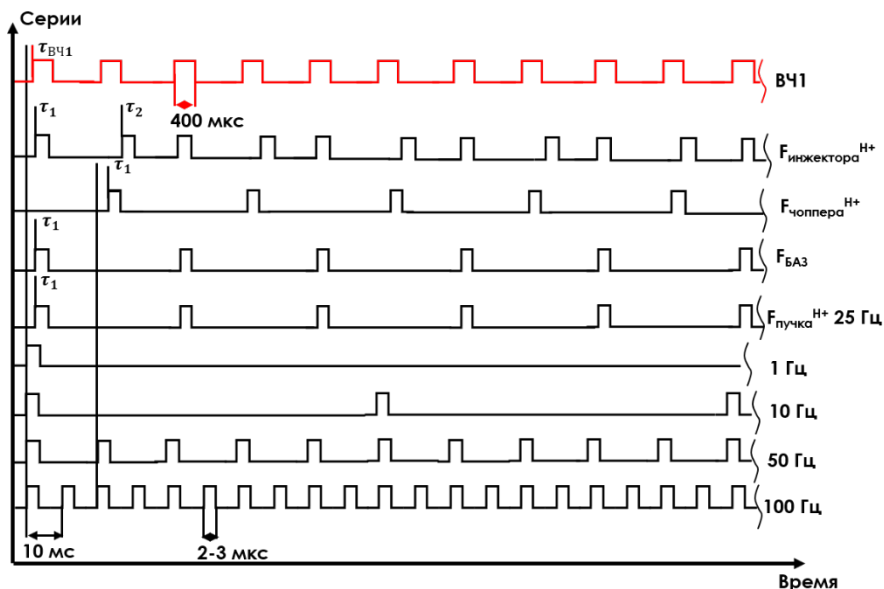


Рисунок 2 – Серии синхроимпульсов, которые формирует АСУ

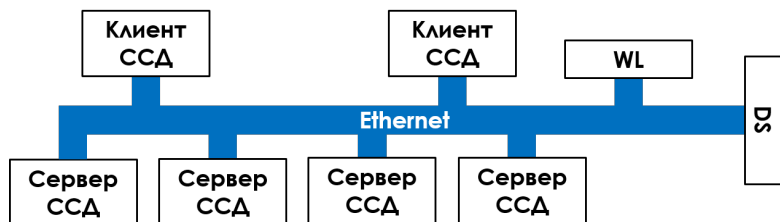


Рисунок 3 – Структура ССД. WL – веб-сервер, DS – сервер хранения данных ССД

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 произведенные в части АСУ высокочастотных (ВЧ)-систем, системы магнитооптики и аварийных систем экспериментального комплекса. Также упоминается реализация контроля фаз электро-

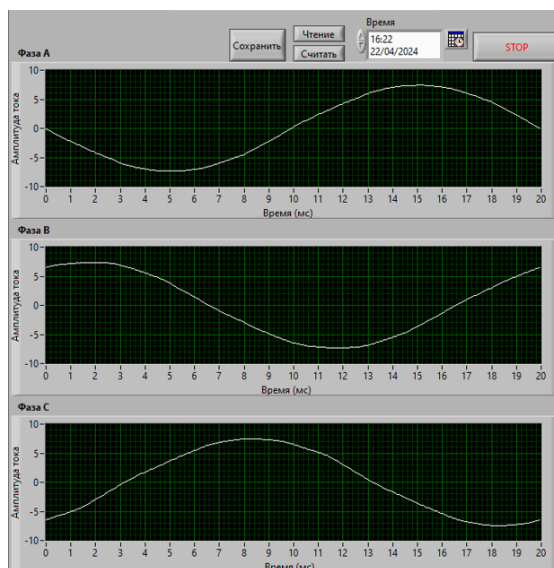


Рисунок 4 – Окно программы контроля электросети

питания АСУ. На Рисунке 4 представлено окно клиентской программы контроля электросети. В **разделе 3.3** речь идет о модернизации программного обеспечения части АСУ, которая связана с системой контроля потерь пучка. На Рисунке 5 представлено окно одной из разработанных программ в рамках модернизации. В **разделе 3.4** представлены выводы главы.

Четвертая глава посвящена разработке 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. На Рисунках 6-8 представлены окна разработанного ПО с различными дополнительными модулями.

Раздел 4.3 посвящен экспериментальным результатам и опыту использования ПО. На Рисунке 9 представлены изображения пучка, полученные во время облучения различных объектов на стенде протонного облучения (СПО). В **разделе 4.4** представлены выводы главы.

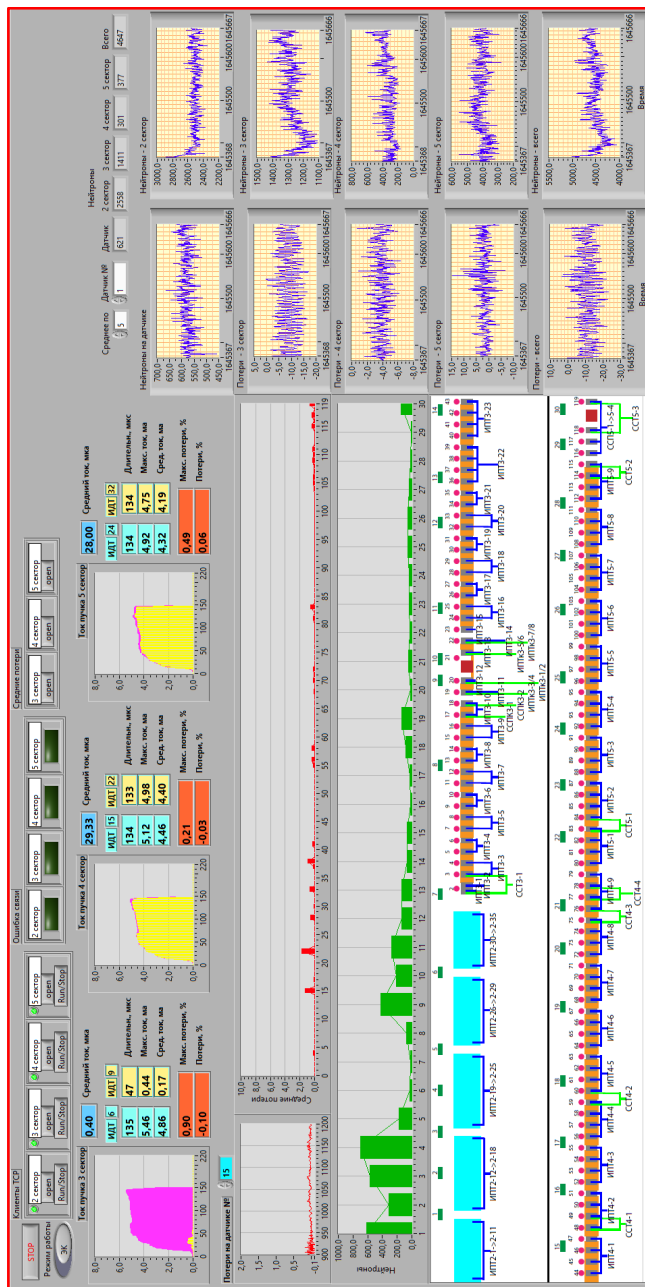


Рисунок 5 – Окно клиентской программы с отображением информации с индукционных датчиков тока в начале и конце секторов основной части ЛУ, ионизационных камер и датчиков нейтронов, установленных вдоль ЛУ

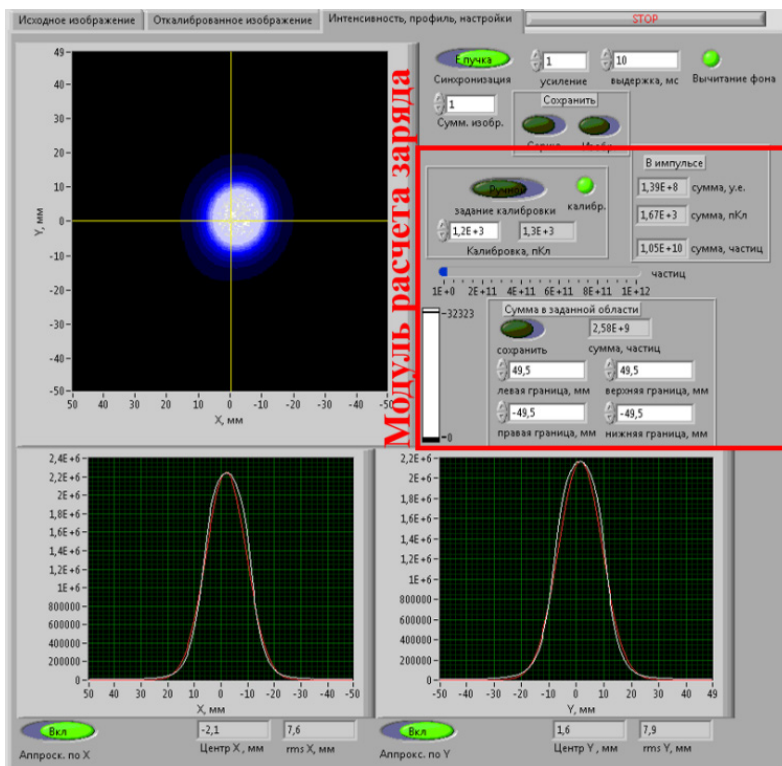
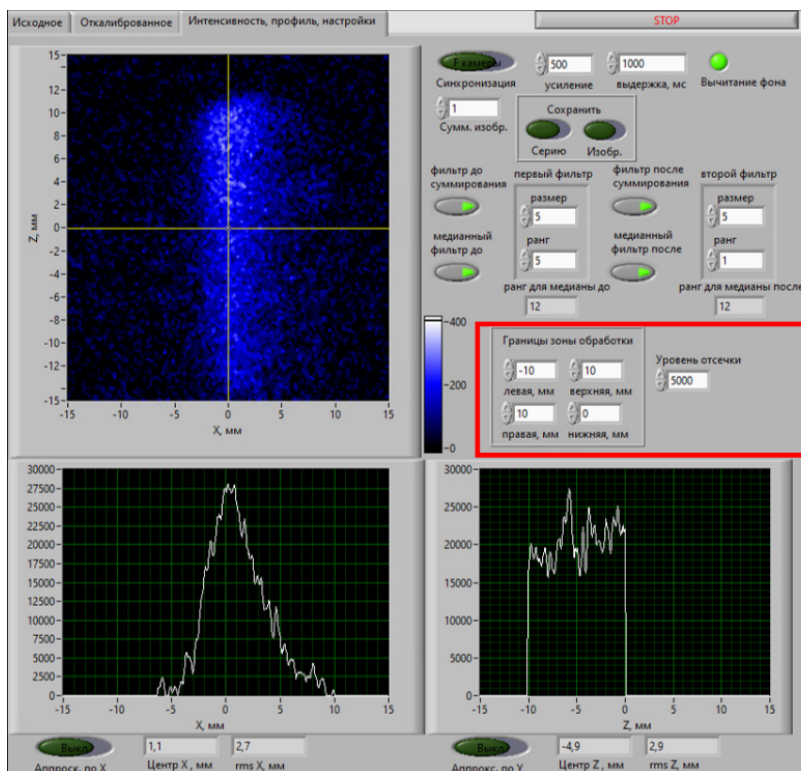


Рисунок 6 – Окно программы обработки изображений для СПО с модулем расчета заряда. Представлены настройки калибровки, результаты расчета заряда и числа частиц в импульсе, а также поля для расчета заряда в заданной области



Модуль обработки
области интереса

Рисунок 7 – Изображение с флуоресцентного монитора (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 за-светок

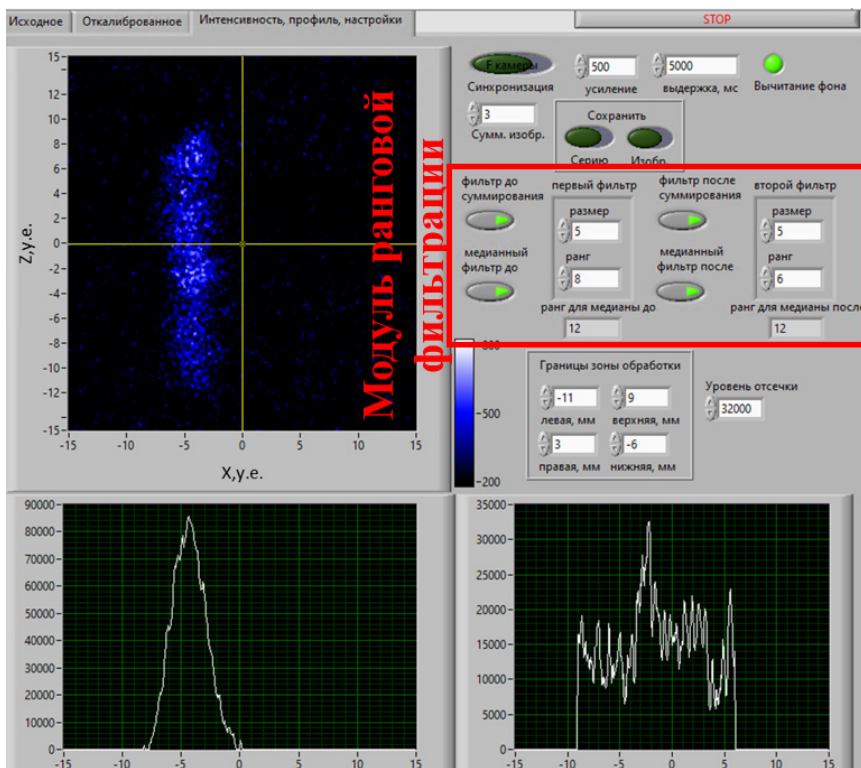


Рисунок 8 – Окно программы с данными ФЛУМ и настройками модуля ранговой фильтрации

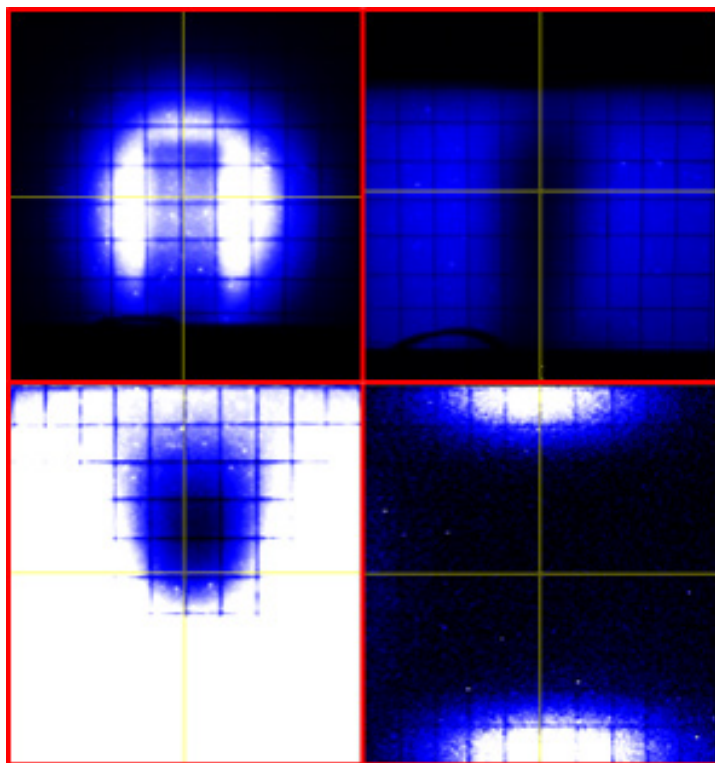


Рисунок 9 – Изображения пучка во время облучения объектов на СПО

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. На Рисунке 10 проиллюстрирована работа алгоритма устранения артефактов томографической реконструкции на основе анализа подпортретов – промежуточных результатов томографии, а на Рисунке 11 представлено окно программы офлайн-томографии. В **разделе 5.4** приведены результаты томографии для различных профилометров. На Рисунке 12 и в Таблице 1 представлены результаты томографической реконструкции на основе данных с одного из проволочных сканеров, установленных на ускорителе.

Таблица 1. Результаты томографической реконструкции на основе данных с проволочного сканера. Здесь x_e, x'_e и y_e, y'_e — соответственно координаты центров фазовых эллипсов в фазовых плоскостях XX' и YY' , α, β, γ – параметры Твисса, ε и $\varepsilon_{\text{норм}}$ — обычный и нормализованный эмиттансы, v_e – параметр эллиптичности фазового портрета

Плоскость- XX'		Плоскость- YY'	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
x_e , мм	-0,30±0,13	y_e , мм	0,16±0,12
x'_e , мрад	0,03±0,12	y'_e , мрад	0,00±0,12
α	-0,03±0,01	α	2,22±0,44
β , мм/мрад	1,53±0,31	β , мм/мрад	5,40±1,08
γ , мрад/мм	0,65±0,13	γ , мрад/мм	1,09±0,22
ε , мм*мрад	4,81±0,97	ε , мм*мрад	6,72±1,35
$\varepsilon_{\text{норм}}$, мм*мрад	2,60±0,52	$\varepsilon_{\text{норм}}$, мм*мрад	3,63±0,73
v_e	0,28	v_e	0,47

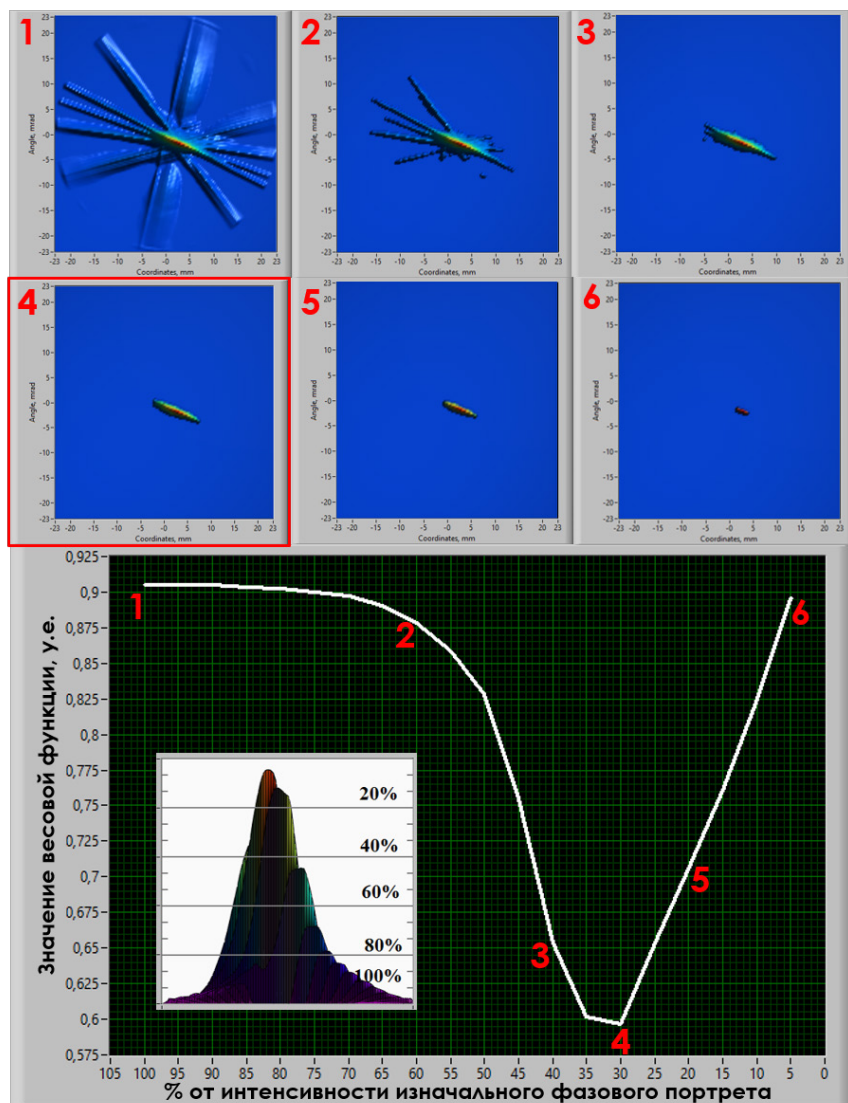


Рисунок 10 – Вверху – изображения подпортретов. Обведенный рамкой портрет – итоговый результат томографической реконструкции. Внизу – график зависимости значений весовой функции от суммарной интенсивности подпортрета, цифрами обозначены соответствующие подпортреты. На вставке к графику – вид сбоку на первичный результат работы вычислительного ядра

Управление томографом

Результаты томографии

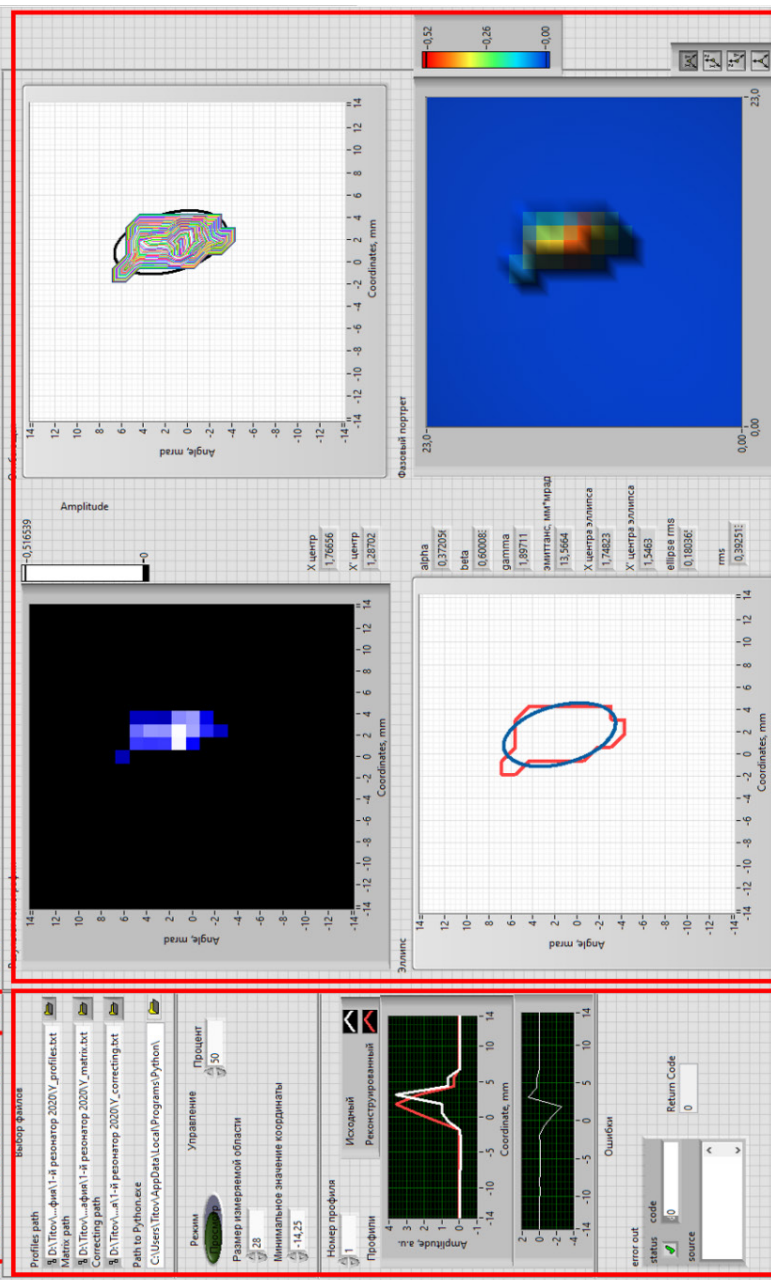
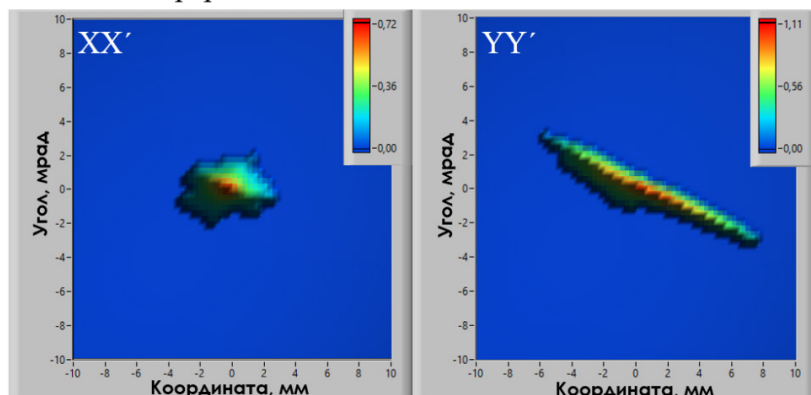


Рисунок 11 – Окно программы офлайн-томографии

Фазовые портреты



Фазовые эллипсы

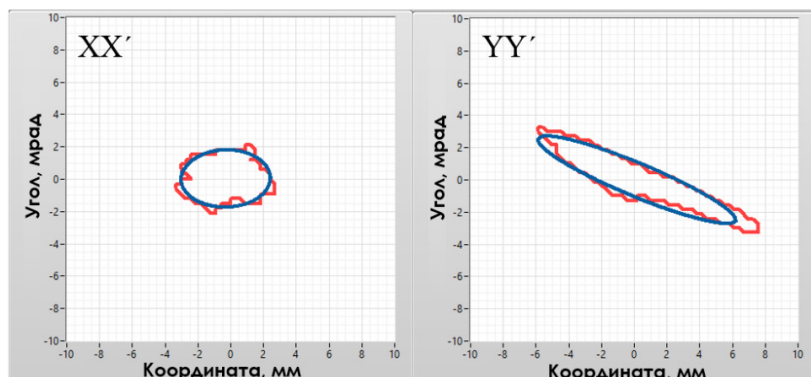


Рисунок 12 – Фазовые портреты (на верхних графиках), их огибающие (красные линии на нижних графиках) и фазовые эллипсы (синие линии на нижних графиках), реконструированные на основе данных с проволоочного сканера

Раздел 5.5 посвящен обсуждению полученных результатов, в нём проведено сравнение с уже использующимся методом поперечных профилей. На Рисунках 13–14 соответственно показаны динамика положения центра тяжести и огибающей пучка пучка вдоль ионопровода 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 дрей-

фа. На графиках синие линии — динамика по оси X, красные — по оси Y. Разность между измеренными и восстановленными значениями параметров пучка, выраженная в стандартных отклонениях результатов методов, представлена в Таблице 2 для обоих методов. В разделе 5.6 представлены выводы главы.

Таблица 2. Разность между измеренными и восстановленными параметрами пучка для томографии и метода поперечных профилей, измеренная в стандартных отклонениях соответствующего метода

Параметр, ст. отклонения	Томография	МПП
разница положений γ_x	0,39	2,12
разница положений γ_y	0,20	2,42
разница огибающих пучка α_x	0,86	0,15
разница огибающих пучка α_y	0,11	0,36

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

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.

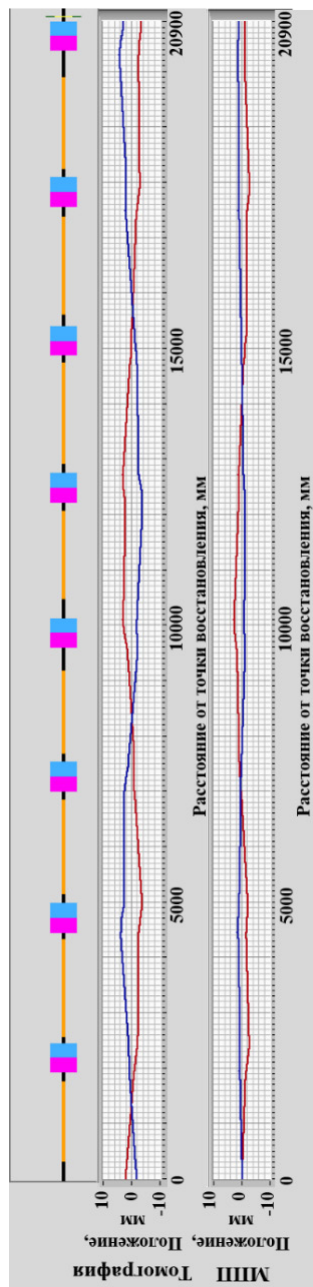


Рисунок 13 – Схема расположения элементов магнитооптики около согласующего резонатора и динамика положения центра тяжести пучка вдоль смоделированного канала по данным метода томографической реконструкции и МПП.

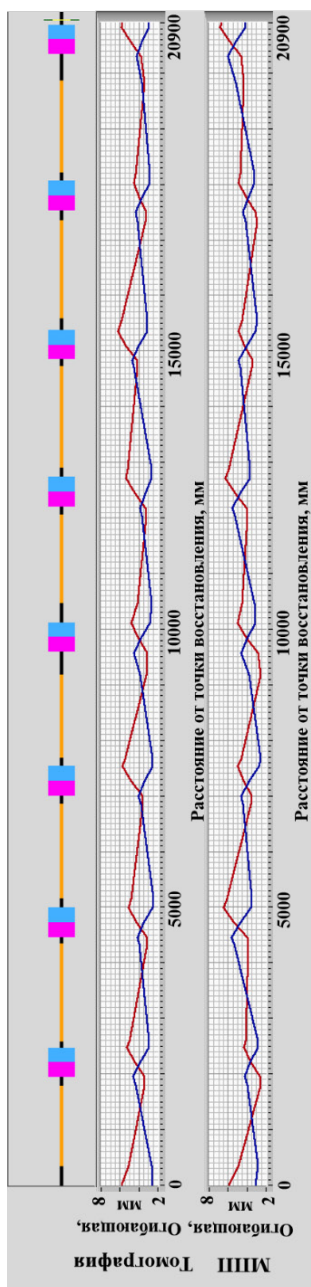


Рисунок 14 – Схема расположения элементов магнитооптики около согласующего резонатора и динамика отбоящей пучка вдоль смоделированного канала по данным метода томографической реконструкции и МПП

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 КИТ, 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.

Публикации автора по теме диссертации

В реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. 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 Techniques, Vol. 66, № 1, pp. 1–18, 2023.
2. 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.

3. 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.

В журналах, индексируемых международными базами цитирования Scopus и Web of Science

4. 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.

В трудах конференций

5. 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.
6. Titov A., Gavrilov S. Luminescent diagnostics of low intensity proton beams at INR RAS linac. // Proceedings of RuPAC18, pp. 489–491, 2018.
7. Titov A., Gavrilov S. Transverse phase portrait tomography of proton beams at INR RAS linac. // Proceedings of IBIC20, pp. 193–196, 2020.
8. 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 RuPAC21, pp. 433–435, 2021.
9. Titov A. I., Gavrilov S. A. Concept of decision support system for INR RAS linac beam tuning. // Proceedings of RuPAC21, pp. 436–438, 2021.

Список литературы

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

- A2. Verstovek I. et al. Recent trends in accelerator control systems. // Proceedings of IPAC2011, pp. 2844–2847, 2011.
- A3. Deghaye S., Fortesque E. Introduction to the Accelerator Control System. // <http://cds.cern.ch/record/2915506>.
- A4. Labview. <https://www.ni.com/en-us/shop/labview.html>
- A5. Wiedemann H. Particle Accelerator Physics. Fourth Edition. / Springer, 2015. – 1029 p.

Научное издание

Титов Александр Иванович

Развитие аппаратно-программных средств
управления и диагностики пучка
для ускорительного комплекса ИЯИ РАН

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 05.06.2025

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,2 Зак. № 033/25 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

