

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет информационных технологий  
Кафедра компьютерных технологий

Направление подготовки: 09.04.01 Информатика и вычислительная техника

Направленность (профиль): Технология разработки программных систем

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА**

**Кошкарева Алексея Михайловича**

Тема работы:

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ  
УСКОРИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ  
ДЛЯ БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ**

**«К защите допущена»**

Заведующий кафедрой, к.ф.-м.н  
(ученая степень, звание)

Зюбин В.Е., / \_\_\_\_\_

«31» мая 2022 г.

**Руководитель ВКР**

Д.ф.-м.н., доцент КафФЭЧ ФФ НГУ  
(ученая степень, звание)

Таскаев С.Ю., / \_\_\_\_\_

«31» мая 2022 г.

Дата защиты: « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Новосибирск  
2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)  
Факультет информационных технологий

Кафедра компьютерных технологий

Направление подготовки: 09.04.01 ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Направленность (профиль): Технология разработки программных систем

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой Зюбин В.Е.  
(фамилия, И., О.)

\_\_\_\_\_ (подпись)

29.10.2021 г.

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ МАГИСТРА**

Студенту Кошкареву Алексею Михайловичу, группы 20223  
(фамилия, имя, отчество, номер группы)

Тема: Разработка и внедрение системы автоматизации ускорительного источника нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии  
(полное название темы выпускной квалификационной работы магистра)

утверждена распоряжением проректора по учебной работе от 17.12.2020 №0446

скорректирована приказом проректора от 29.10.2021 №0294

Срок сдачи студентом готовой работы «20» мая 2022 г.

Исходные данные (или цель работы): разработать и внедрить комплекс автоматизации в комплекс бор-нейтронозахватной терапии в Институте ядерной физики СО РАН.

Структурные части работы: изучение требований к новым диагностикам; выбор программно-аппаратных решений; разработка программно-аппаратного комплекса автоматизации.

**Руководитель ВКР**

д.ф.-м.н., доцент КафФЭЧ ФФ НГУ  
(ученая степень, звание)

Таскаев С.Ю., / \_\_\_\_\_  
(ФИО) (подпись)

29.10.2021 г.

**Задание принял к исполнению**

Кошкарев А.М./ \_\_\_\_\_  
(ФИО студента) (подпись)

29.10.2021 г.

# СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ .....	9
1.1 Описание предметной области .....	9
1.2 Описание установки .....	10
1.3 Формулировка задачи.....	13
1.4 Обзор аналогов .....	14
1.5 Предложенная конфигурация .....	16
2 РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ.....	20
2.1 Используемые программно-аппаратные средства.....	20
2.2 Внедренные диагностики .....	20
2.2.1 Бесконтактный измеритель тока Vergoz.....	21
2.2.2 Измерители радиации.....	22
2.2.3 Охлаждаемые диафрагмы и цилиндры Фарадея .....	24
2.2.4 ${}^7\text{Li}$ мишень.....	28
2.2.5 Источник питания на 1000 кВ (ЭЛВ).....	32
2.2.6 Измеритель мощности.....	34
2.2.7 Система охлаждения масла обдирочной мишени .....	35
2.2.8 Эффективность обдирки .....	38
2.2.9 Напуск аргона.....	42
2.2.10 Вакуум.....	44
2.2.11 Синхронизация магнита по энергии пучка .....	45
2.2.12 Внедрение сторонних диагностик.....	47
2.2.12.1 Быстрый датчик нейтронов .....	47
2.2.12.2 Спектрометр на основе ${}^6\text{Li}$ .....	50
2.2.12.3 Гамма спектрометр HPGe .....	52
2.3 Панель общего пользования .....	52
2.4 ПО физика-аналитика.....	54
2.5 Сервер.....	57
2.5.1 Абстракция канала.....	57
2.5.2 Работа с периферийными устройствами (модули).....	59

2.6 Разработка утилит .....	62
2.6.1 Графики реального времени .....	62
2.6.2 Оповещение об аварии .....	65
2.6.3 Сетевые переменные .....	68
2.6.4 Интегратор.....	69
2.6.5 Журнал эксперимента.....	70
2.6.6 Выгрузка данных эксперимента.....	72
2.7 Монтаж.....	73
2.8 Подготовка системы для внедрения в клинику .....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	78
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	80
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	85
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	93

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БНЗТ	бор-нейтронозахватная терапия
ИЯФ СО РАН	федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Зв	Зиверт – единица измерения эффективной и эквивалентной дозы ионизирующего излучения в Международной системе СИ
Система управления	совокупность модулей сбора данных, программы управления и базы данных
Децентрализованная система управления	система управления, у которой модули сбора данных территориально разнесены и расположены в непосредственной близости к объекту измерения
Периферия	опрашиваемое или управляемое устройство ввода-вывода
АЦП	аналого-цифровой преобразователь
ЦАП	цифро-аналоговый преобразователь
Логический вход	однобитный аналого-цифровой преобразователь
Логический выход	однобитный цифро-аналоговый преобразователь
Супрессор вторичной эмиссии	устройство для подавления нежелательных электронов
Флюенс	интеграл по времени от плотности потока частиц
Пучок	пучок протонов, получаемый в ускорителе заряженных частиц
ПО	программное обеспечение
БД	база данных
Callback	передача исполняемого кода в качестве одного из параметров другого кода.

ЭЛВ	электронный линейный выпрямитель
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor; международный экспериментальный термоядерный реактор
CERN	европейская организация по ядерным исследованиям, крупнейшая в мире лаборатория физики высоких энергий
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных
ТЗ	техническое задание
API	Application Programming Interface – программный интерфейс приложения
ВАХ	вольт-амперная характеристика
CSV	Comma-Separated Values – текстовый формат, предназначенный для представления табличных данных

## ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является разработка и внедрение программной и аппаратной части системы автоматизации экспериментальной физической установки.

Заболеваемость злокачественными образованиями значительна, поэтому требуется развитие новых методов лечения. Одним из таких методов является бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) [1, 2], предложенная в 1936 г.

Данная терапия позволяет избирательно воздействовать на опухолевые клетки, находящиеся в пределах здоровых тканей, не повреждая последние, и таким образом позволяет лечить пока что неизлечимые опухоли, такие как глиомы головного мозга высокой степени злокачественности, включая глиобластому, рак мягких тканей головы и шеи, рак кожи (меланому) и его метастазы [3]. Из-за отсутствия источников нейтронов и невозможности доставки  $^{10}B$  в опухоль вплоть до 2002 г. этот метод не применялся. Впервые БНЗТ начали проводить на ядерном реакторе KUR-M в университете Киото в 2002 г.

Метод показал свою эффективность, и в разных странах в конце 90-х годов было принято решение внедрять его в клиническую практику. На тот момент единственным источником нейтронов нужного спектра и плотности были ядерные реакторы, которые практически невозможно установить в медицинском учреждении из-за их больших размеров, дороговизны и радиационной опасности. Поэтому несколько команд начали работу по созданию компактных ускорителей для генерирования нейтронов, которые можно установить в медицинских учреждениях.

В Институте ядерной физики СО РАН осуществляется разработка ускорительного источника эпитепловых нейтронов [4], энергия которых идеально подходит для проведения БНЗТ злокачественных опухолей в условиях онкологической клиники. Ускоритель является экспериментальной физической установкой, на которой уже было проведено множество

экспериментов, показавших готовность использования концепции ускорителя в клинике.

Для проведения ряда экспериментов с использованием ускорителя требовалось создание системы автоматизации. Спецификой разрабатываемого экспериментального ускорителя является его постоянная модернизация и внедрение новых диагностик, которые необходимо оперативно интегрировать в систему автоматизации. Отсутствие единой масштабируемой системы автоматизации затрудняет анализ данных эксперимента в реальном времени. Решение этой проблемы описывается в данной работе.



# 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

## 1.1 Описание предметной области

Разрабатываемый ускоритель – устройство, состоящее из множества сложных электрофизических устройств и систем, согласованное управление которыми представляет собой непростую задачу, требующую исследований и применения самых передовых достижений в электронике, компьютерной технике и информационных технологиях. На экспериментальных установках считается нормой, когда за разными диагностиками следят несколько физиков-операторов, так как установка состоит из набора узлов, которые сами имеют собственную логику работы и требуют наличия разных компетенций. На примере разрабатываемого ускорителя можно выделить несколько узлов, таких как: ионный источник, источник питания ускорителя типа электронного линейного выпрямителя (ЭЛВ), магнитная система, литиевая мишень и множество других узлов. Для проведения экспериментов и БНЗТ необходимо создание централизованной и масштабируемой системы управления с возможностью диагностики и управления на разных уровнях:

- нижнем с простыми алгоритмами и временем реакции до 1 мс;
- верхнем с алгоритмом более сложным и временем реакции до 2 сек.

Данная работа является развитием бакалаврской работы, где предпринята первая попытка решить эту задачу [5]. В текущей ВКР делается упор на увеличении количества автоматизированных узлов и улучшении информированности персонала во время эксперимента.

Разработанная система включает в себя не все узлы установки, а только часть (около 50 % диагностик внедрено в систему). Это связано с большим перечнем различных диагностик, большая часть из которых имеет разнородную систему управления. Однако система развивается каждый день, и постепенно разработанный комплекс автоматизации будет внедрен для всех узлов экспериментальной установки.

## 1.2 Описание установки

Установка состоит из ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, литиевой мишени для генерации нейтронов в результате пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  и системы формирования пучка эпитепловых нейтронов [6].

Ускорительный источник предназначен для проведения биологических исследований в области бор-нейтронозахватной терапии [7, 8], измерения содержания нежелательных примесей в образцах керамики из карбида бора, разработанных для ITER [9], радиационного тестирования оптических волокон системы лазерной калибровки калориметра CMS для обеспечения работы Большого адронного коллайдера (CERN) в режиме высокой светимости.

Необходимость обеспечения длительной стабильной генерации нейтронов требует разработки диагностических методик, отображающих в режиме реального времени актуальную информацию от разных подсистем источника нейтронов.

Ускоритель расположен на территории Института ядерной физики СО РАН в специальном радиационно-защищенном бункере. Установка позволяет получать пучок протонов или дейтронов с энергией от 0.6 до 2.2 МэВ с током, изменяемым от 0.5 до 10 мА. При использовании различных мишеней происходит генерация нейтронов, формируются нейтроны различного энергетического диапазона: холодные, тепловые, эпитепловые, надэпитепловые, моноэнергитичные и быстрые, генерируются моноэнергитичные фотоны с энергией 478 кэВ или 511 кэВ, а также альфа частицы и позитроны.

Схематичное описание ускорителя представлено на рисунке 1, а его подробное описание – в работе [10].

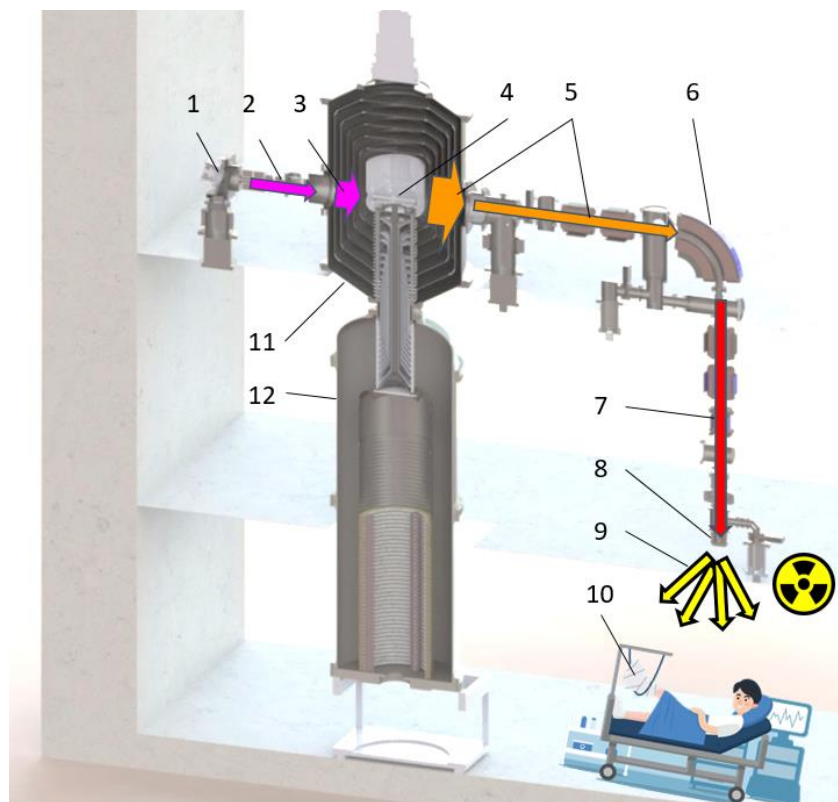


Рисунок 1. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией в ИЯФ СО РАН. 1 – источник отрицательных ионов водорода; 2 и 3 – пучок отрицательных ионов водорода с энергиями 25 кэВ и 1 МэВ соответственно; 4 – перезарядная мишень; 5 – пучок протонов с энергией 2 МэВ и остаточных частиц, летящих из ускорителя; 6 – поворотный магнит; 7 – чистый пучок протонов; 8 –  ${}^7\text{Li}$  мишень; 9 – нейтроны с энергией около 30 кэВ; 10 – пациент; 11 – ускоритель; 12 – ЭЛВ (источник питания на 1000 кВ).

Пучок протонов получают следующим образом. Из поверхностно-плазменного источника (1), использующего пеннинговский разряд с полыми катодами, вытягивают пучок отрицательных ионов водорода (2) с энергией до 25 кэВ. Пучок в магнитном поле источника ионов поворачивают на угол  $15^\circ$ , после чего фокусируют магнитной линзой на вход ускорителя (11) и ускоряют в нем до энергии 1 МэВ (3).

В газовой обдирочной мишени (4), установленной внутри высоковольтного электрода ускорителя, отрицательные ионы водорода превращаются в протоны. Тем же потенциалом 1 МВ, который генерирует источник питания (12), они затем ускоряются (5) до энергии 2 МэВ. Газовая обдирочная мишень выполнена в виде охлаждаемой цилиндрической трубки с напуском аргона [11].

На выходе из ускорителя пучок протонов имеет поперечный размер примерно 1 см [12]. Однако кроме протонов в пучке содержатся разные примеси, такие как оставшиеся отрицательные ионы водорода, нейтралы и ионы аргона [13]. Для сепарации протонов используется поворотный магнит (6). Ток на обмотках рассчитан таким образом, чтобы отклонять на  $90^\circ$  только протоны с энергией 2.2 МэВ (для разных экспериментов энергия может отличаться).

Далее очищенный протонный пучок (7) протонов попадает на литиевую мишень (8), на которой происходит реакция  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ , обеспечивающая максимальный выход нейтронов (9) при их минимальной энергии. Непосредственно около  ${}^7\text{Li}$  мишени должен быть расположен пациент (10), которому показана БНЗТ, или некоторый объект, которому требуется обеспечить нейтронную дозу.

Обслуживание ускорителя затрудняется тем, что в процессе эксперимента радиационный фон может достигать до 1 Зв/ч и более вблизи мишени. Это означает, что за 10 минут человек, находящийся внутри радиационно-защищенного бункера вблизи мишени, получит примерно 200 годовых доз. Однако эту дозу сдерживает толстая бетонная стена, а все щели заделаны бетонными кирпичами с высоким содержанием бора, который эффективно поглощает нейтроны. Кроме того, в процессе работы некоторые узлы находятся под потенциалом 28 кВ на ионном источнике или 1000 кВ в источнике питания ускорителя (далее ЭЛВ). В связи с перечисленными выше особенностями ускорителя все манипуляции должны происходить удаленно.

Для БНЗТ нужны эпитепловые нейтроны, поскольку тепловые нейтроны проникают неглубоко, тогда как быстрые нейтроны проникают глубоко, но дают вредную дозу за счет упругого рассеяния. Эпитепловые нейтроны проникают туда, куда требуется, становятся тепловыми и эффективно поглощаются бором. В месте реакции выделяется большая (2.78 МэВ) энергия, приводящая к повреждению клетки, содержащей бор.

### 1.3 Формулировка задачи

В подходе к обработке и отображению информации, в первую очередь, требуется наглядное графическое представление текущего состояния параметров, отражающее особенности функционирования установки. Процесс создания современной системы управления ускорительным комплексом должен быть нацелен на поиск и реализацию решений, удовлетворяющих этим требованиям, с возможностью их последующего применения в других системах.

Экспериментальная установка имела разрозненную систему управления, которую требовалось модифицировать таким образом, чтобы:

- 1) разные подсистемы управления и автоматизации были соединены в единый комплекс с одной базой данных для простоты анализа результатов экспериментов. Для этого требовалось разработать отдельные ПО и аппаратные решения;
- 2) была упрощена интерпретация данных для оператора и физиков-аналитиков в режиме реального времени;
- 3) не только оператор, но и физики-аналитики и приглашенные коллеги получили доступ к состоянию установки в реальном времени. Для этого требовалось разработать отдельные ПО;
- 4) физики-аналитики должны иметь возможность проводить анализ данных в реальном времени, а также должна быть предусмотрена возможность ведения журнала эксперимента в распределенном режиме;
- 5) часть оборудования, находящегося в бункере, должна быть перенесена на территорию, защищенную от радиации.
- 6) в ходе работы проанализированы требования для решения поставленных проблем по внедрению диагностик. Требовалось подобрать нужное оборудование, смонтировать его в стандартные 19 дюймовые блоки и внедрить диагностику в общую систему;

- 7) должны быть произведены первые шаги по переводу установки из статуса экспериментальной в статус медицинской для прохождения требуемой сертификации.

## **1.4 Обзор аналогов**

Автоматизация различных объектов является стандартной задачей и решается на множестве промышленных объектов, таких как ТЭЦ, ГЭС, ядерных реакторах и подобных узлах. Для решения задачи автоматизации обычно используется трехуровневая архитектура, которая состоит из следующих компонентов:

- пользовательского уровня, в котором реализуется взаимодействие с пользователем;
- серверного уровня, который отвечает за сбор данных, их обработку, принятие решений и предоставление данных на пользовательский уровень, за сохранение данных в БД, за передачу управляющих команд на уровень контроллеров, а также на этом уровне производятся расчеты, требующие мощный ПК;
- уровня контроллеров, в котором происходит оцифровка физического сигнала, принятие моментальных решений (например, блокировки работы при открытии двери бункера) и отправка оцифрованных сигналов на серверный уровень.

Несмотря на то, что принципы разработки систем автоматизации для подобных комплексов аналогичны, однако разработка систем для конкретных установок является уникальным продуктом из-за специфики работы различных подсистем. Поэтому найти готовое решение для автоматизации невозможно.

Чаще всего с задачей автоматизации могут справиться SCADA системы [14], в которых реализованы все описанные выше уровни. Работа с устройствами как правило, реализуется практически полностью, так как промышленные устройства имеют стандартные протоколы связи (например, Modbus). Более того, в некоторых системах SCADA реализованы библиотеки

работы с определенными устройствами ввода-вывода, что позволяет практически моментально внедрить соответствующий блок в систему. Такие системы позволяют сосредоточиться на алгоритмах работы и не тратить время на реализацию сбора данных с устройств ввода-вывода. Наличие систем наподобие SCADA упрощает процесс автоматизации, однако разработка алгоритмов для каждого конкретного случая все еще является актуальной задачей.

Система, разработанная для ускорителя БНЗТ, была построена иначе. Изначально задача автоматизации всего ускорительного комплекса не ставилась. Ускоритель имел множество программ, каждая из которых была связана с определенной областью. Работу каждой программы и состояние диагностики контролировали разные физики-аналитики, что допустимо для экспериментального ускорителя, однако затрудняет эксплуатацию на практике в медицинских целях.

В процессе проведения медицинских экспериментов потребовалось внедрить временную диагностику, позволяющую измерить ток пучка бесконтактным способом при помощи детектора Bergoz (п. 2.2.1) как можно скорее. Модифицировать действующий комплекс автоматизации было невозможно, так как система разработана на языке LabVIEW, которым на установке никто не владел. Поэтому было принято решение сделать программу «как умеем», а именно на языке C++ и фреймворка Qt.

Со временем диагностика измерения тока прижилась на ускорителе и стала постоянной. Через некоторое время было принято решение внедрить новую диагностику, отображающую отклонение пучка по охлаждаемым диафрагмам (п. 2.2.3). Она была внедрена в недавно разработанную программу. Данная диагностика тоже перешла из статуса временной в постоянную.

Было произведено несколько таких итераций, и в какой-то момент временная программа стала неотъемлемой частью установки, содержащей более 10 диагностик. В процессе наращивания списка диагностик архитектура программы постепенно менялась и превратилась из одного приложения с одной

диагностикой в комплекс автоматизации, что позволило осуществлять управление ускорителем одному человеку (иногда требуется второй оператор для запуска двух диагностик). Все используемые диагностики описаны в п. 2.2.

На момент защиты ВКР ведутся работы по созданию медицинской установки для Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина в Москве, в том числе ведутся работы по проектированию новой системы автоматизации. В процессе подготовки ТЗ на автоматизацию новой установки был утвержден полный список автоматизируемых узлов и алгоритмов взаимодействия. Вероятнее всего, в дальнейшем система будет реализована заново на системе SCADA или какой-либо другой подобной системе для увеличения надежности.

## **1.5 Предложенная конфигурация**

Для автоматизации установки используется трехуровневая архитектура, описанная в п. 1.4. Для этого разработано несколько программ:

- ПО общего пользования (п. 2.3);
- ПО физика-аналитика (п. 2.4);
- ПО сервера (п. 2.5).

Все перечисленные выше программы разработаны автором и внедрены в работу ускорителя. На момент защиты ВКР заканчивается согласование ТЗ на панель оператора, которая будет внедрена позднее. В настоящее время оператор использует программу физика-аналитика. Архитектура разработанного комплекса показана на рисунке 2.



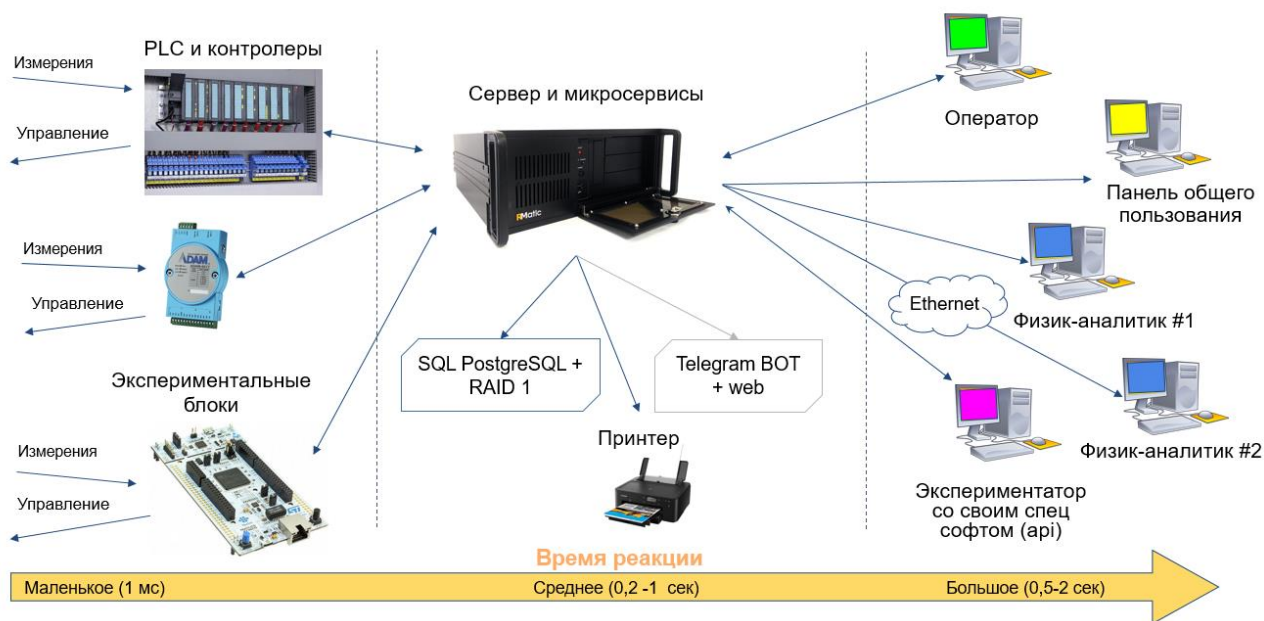


Рисунок 2. Архитектура разработанной системы автоматизации.

Слева изображен уровень контроллеров: это могут быть как устройства ввода-вывода без внутренней логики, так и контроллеры с запрограммированными алгоритмами. Посередине расположен сервер с базой данных и принтером для печати журнала в конце эксперимента. Справа показаны все программы, которые могут использовать API сервера для отображения данных или установки значений на контроллерах через сервер [15].

На момент написания этой работы на уровне контроллеров использовались только контроллеры Adam серии 6000 и 6200, которые не имеют внутренних алгоритмов и используются лишь в качестве устройств ввода-вывода, а также плата STM32 NUCLEO-F767ZI, которая служит контроллером ввода-вывода с заложенным в нее алгоритмом с временем реакции до 1 мс.

Для упрощения структуры серверной программы разработана трехуровневая архитектура, состоящая из следующих уровней:

- устройство;
- каналы (подробнее в п. 2.5.1);
- модули (подробнее в п. 2.5.2).

На каждом уровне реализуется свой слой абстракции.

Рассмотрим предлагаемую систему на примере измерителя мощности (подробнее в п. 2.2.6). Его схема изображена на рисунке 3.

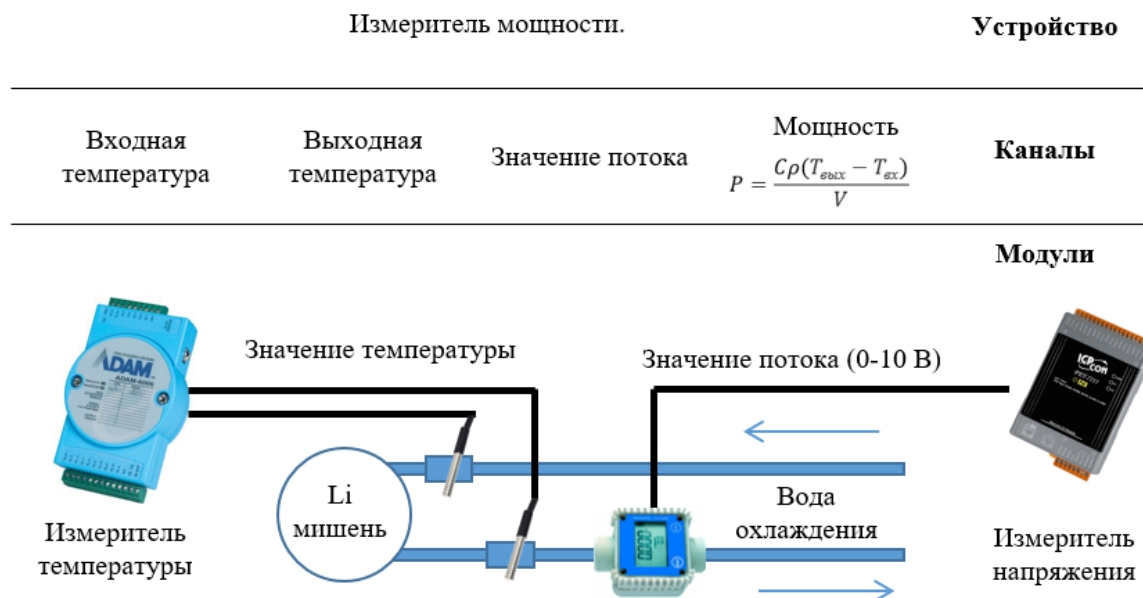


Рисунок 3. Архитектура сервера на примере измерителя мощности.

В данном примере устройство – это набор каналов, объединенных в одну логическую группу для расчета отведенной мощности с охлаждаемого устройства. Алгоритм вычисления мощности настраивается на уровне канала мощности, который рассчитывается на основании температур и потока по заданной формуле.

Уровень канала нужен для преобразования из «сырого» значения АЦП в физическую величину. На этом уровне настраивается имя и физическая величина для отображения и хранения в БД. Также канал служит в качестве интерфейса взаимодействия между разработанными утилитами. Подробнее см. в п. 2.5.1.

Уровень модуля служит для абстрагирования процесса сбора данных с устройств ввода-вывода. В ряде случаев, чтобы получить то или иное значение с периферии. Для этого нужно подключиться к устройству, прочитать из нужного регистра данные и обработать их, и только тогда будет доступно

значение напряжения (в случае с АЦП). Также необходимо отслеживать отсутствие подключения и автоматически восстанавливать связь в случае потери связи. Все используемые модули реализованы в виде классов для переиспользования кода. При сигнале о готовности собранных данных от устройства в канал может быть записано «сырое» значение с АЦП, которое на уровне канала преобразуется в физическую величину.

Для передачи информации между сервером и клиентами требовалось разработать механизм, предполагающий минимальный набор действий для синхронизации значений. Поэтому на уровне канала реализован механизм сетевых переменных (подробнее в п. 2.6.3), который позволяет синхронизировать значения в разных программах.

## **2 РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ**

### **2.1 Используемые программно-аппаратные средства**

В качестве языка для ПО сервера, программы аналитика и программы оператора выбран C++ с фреймворком Qt [16]. Для отображения разных графических компонент выбрана библиотека QCustomPlot [17] как базовая, но впоследствии она была существенно доработана (см. 2.2.3, 2.2.4 и 2.6.1).

Разработка на выбранной платформе затруднена из-за особенностей языка C++, а именно: 1) при пошаговой отладке приложения в родной среде разработки QtCreator выдает ошибку о невозможности изучить состояние полей класса; 2) отсутствует единая система генерации исключений (в каждой библиотеке ошибки обрабатываются по-своему).

В дальнейшем планируется либо перевести медицинскую установку на системы SCADA (по возможности), либо переписать систему, у которой backend будет разработан на языке Kotlin с фреймворком Spring, а frontend – на языке TypeScript и фреймворке React, что позволит управлять ускорителем через браузер без установки и постоянным обновлением ПО на панели оператора.

### **2.2 Внедренные диагностики**

В разработанную систему интегрировано множество устройств. Это позволило объединить данные со всех перечисленных диагностик в одно место, что упростило анализ данных. Список внедренных устройств представлен ниже.

Подразумевается, что для каждого описанного ниже устройства выделено АЦП, ЦАП, логический вход или логический выход, а все показания заведены в единую систему.

### 2.2.1 Бесконтактный измеритель тока Bergoz

Данная диагностика позволяет измерять ток пучка, при этом не разрушая его. Это позволяет узнать значение тока непосредственно в процессе эксперимента.

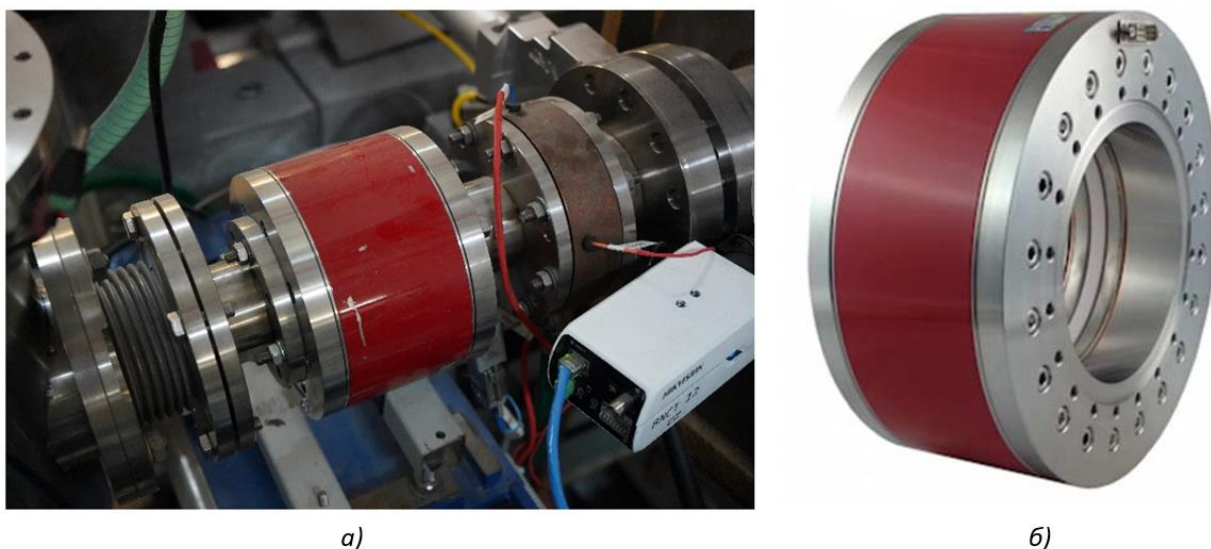


Рисунок 4. Измеритель тока Bergoz: а) детектор, установленный на установке; б) общий вид детектора.

Эта диагностика является параметрическим трансформатором тока. Две последовательно подключенные катушки  $L1$  и  $L2$  на рисунке 5 запитаны от генератора переменного тока, частота которого устанавливается в зависимости от магнитной проницаемости ферромагнетика.

Ток пучка приводит к асимметрии в кривой намагничивания и к появлению в спектре тока измерительной катушки  $L$  четных гармоник частоты модуляции. Амплитуда второй гармоники пропорциональна току пучка.

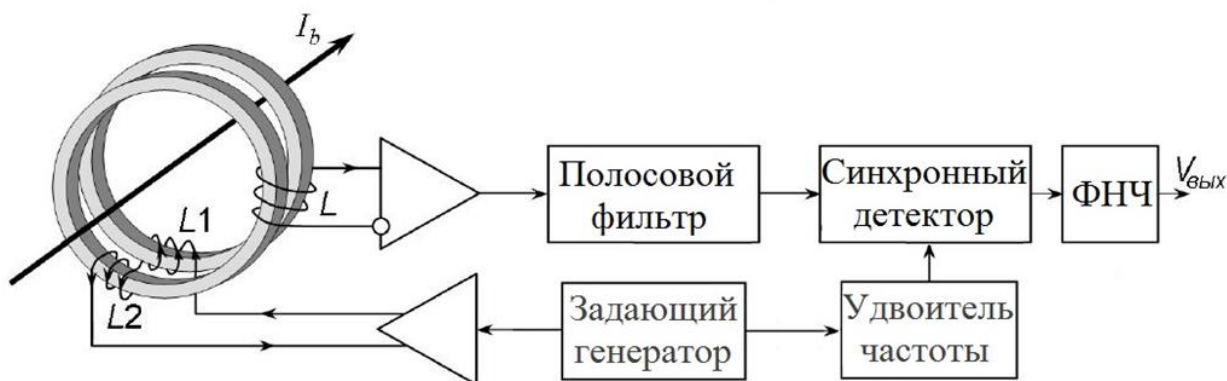


Рисунок 5. Схема трансформатора постоянного тока.

Диагностика состоит из измерителя и блока обработки. Блок обработки измеряет «сырые» данные с измерителя, фильтрует их и выдает информацию в виде напряжения от 0 до 10 вольт. Данное напряжение измеряется при помощи АЦП, а в программе масштабируется в зависимости от диапазона измерения.

### 2.2.2 Измерители радиации

Автоматизируемая установка является источником гамма и нейтронного излучения, поэтому требуется постоянный контроль радиационной дозы сертифицированными приборами [18].

В работе использовался измерительный комплекс от ООО «Доза», Россия, состоящий из:

- датчиков гаммы ДБГ-С11Д;
- датчиков нейтронов УДМН-100;
- блока обработки-передачи информации БОП-1М.

Схема подключения указанных устройств представлена на рисунке 6.

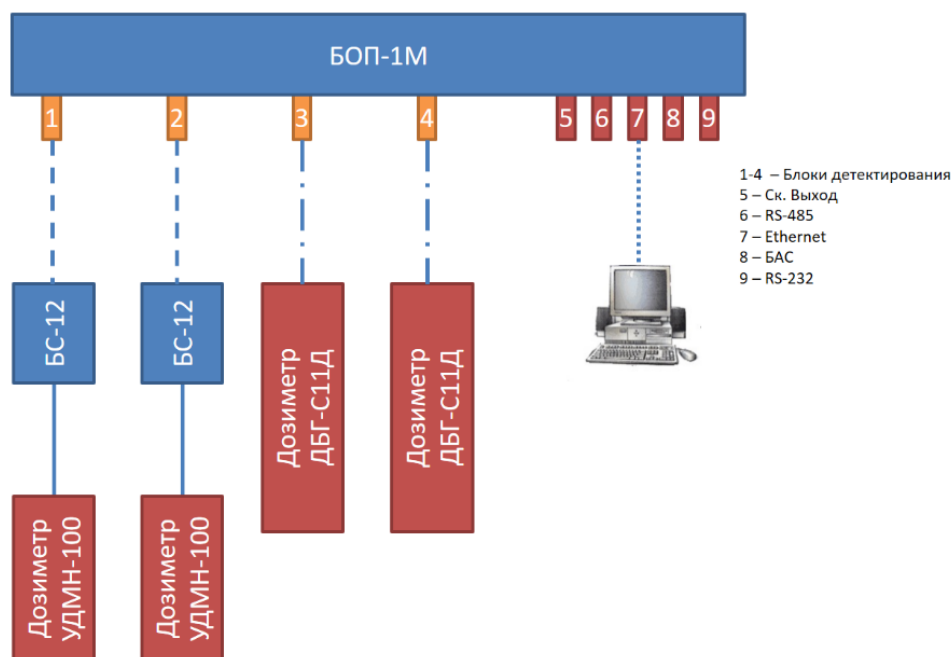


Рисунок 6. Схема подключения гамма и нейтронных дозиметров.

Устройство БОР-1М предназначено для сбора данных с сенсоров гамма и нейтронного излучения и передачи информации в программу управления через протокол UDP. Блок обработки и передачи (БОР-1М) сконфигурирован таким образом, чтобы посылать сообщения на сервер по готовности данных с любого из датчиков.

Датчик гамма-радиации состоит из счетчика Гейгера-Мюллера, платы высоковольтного питания и формирователя сигналов. Датчик нейтронов состоит из: сцинтилляционного детектора на основе смеси фтористого лития LiF, обогащенного до 85 % изотопом  $^6\text{Li}$ , и ZnS(Ag), помещенных в оргстекло для преобразования потока медленных и тепловых нейтронов в световые вспышки; фотоэлектронного умножителя ФЭУ для регистрации световых вспышек; высоковольтного преобразователя – для питания ФЭУ; усилителя-дискриминатора – для усиления и отбора по амплитуде импульсов поступающих с ФЭУ; формирователя – для нормирования выходного сигнала и передачи его на блок сопряжения.

Компоненты измерительной системы представлены на рисунке 7, а панель отображения данных на рисунке 8.

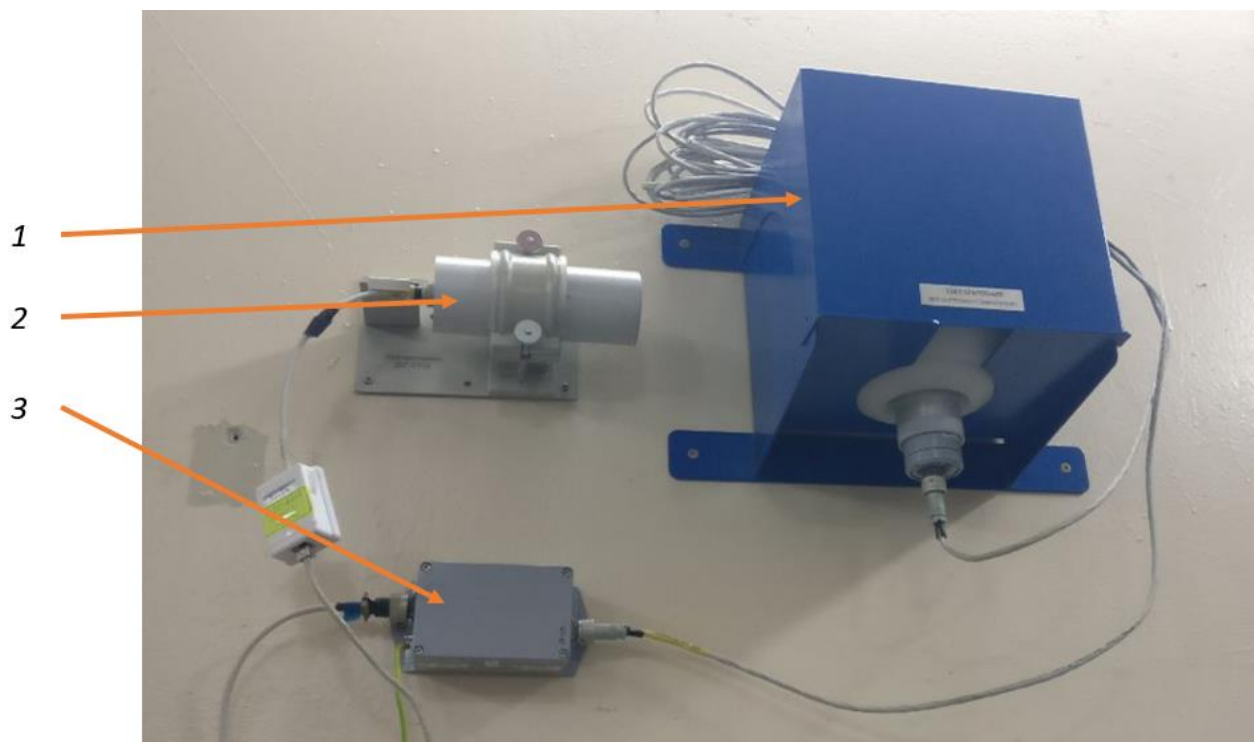


Рисунок 7. Измерители радиации. 1 – УДМН-100; 2 – ДБГ-С11Д; 3 – БС-12.

Radiation		Gamma	Neutrons
ВОР-1М (Sv/h)	Bunker 2	3,7e-05	0,0e+00
	Bunker 3	0,0e+00	0,0e+00
	Hall 2	1,0e-07	0,0e+00
	Hall 3	0,0e+00	0,0e+00

Рисунок 8. Панель отображения уровня радиации.

### 2.2.3 Охлаждаемые диафрагмы и цилиндры Фарадея

Для проведения пучка протонов через ускоритель требуется знать его отклонение от заданной оси. Для этого было принято решение использовать охлаждаемые диафрагмы и выдвигаемые конусы.

Рассмотрим принцип работы диагностики на примере охлаждаемой диафрагмы: это медное изделие с отверстием в середине (для прохода пучка) и каналами для охлаждающей воды. Также на одном радиусе расположено четыре термодатчика с шагом 90°. Диафрагма приведена на рисунке 9. Если пучок проходит через отверстие в центре, диафрагма не нагревается. Если же



пучок проходит не по оси и попадает на диафрагму, то диафрагма выполняет сразу две задачи:

- предотвращает попадание пучка на узлы без охлаждения и предотвращает расплавление (мощность пучка составляет  $20 \text{ кВт/см}^2$ );
- регистрирует отклонение пучка термодатчиками, и это отклонение демонстрируется оператору.

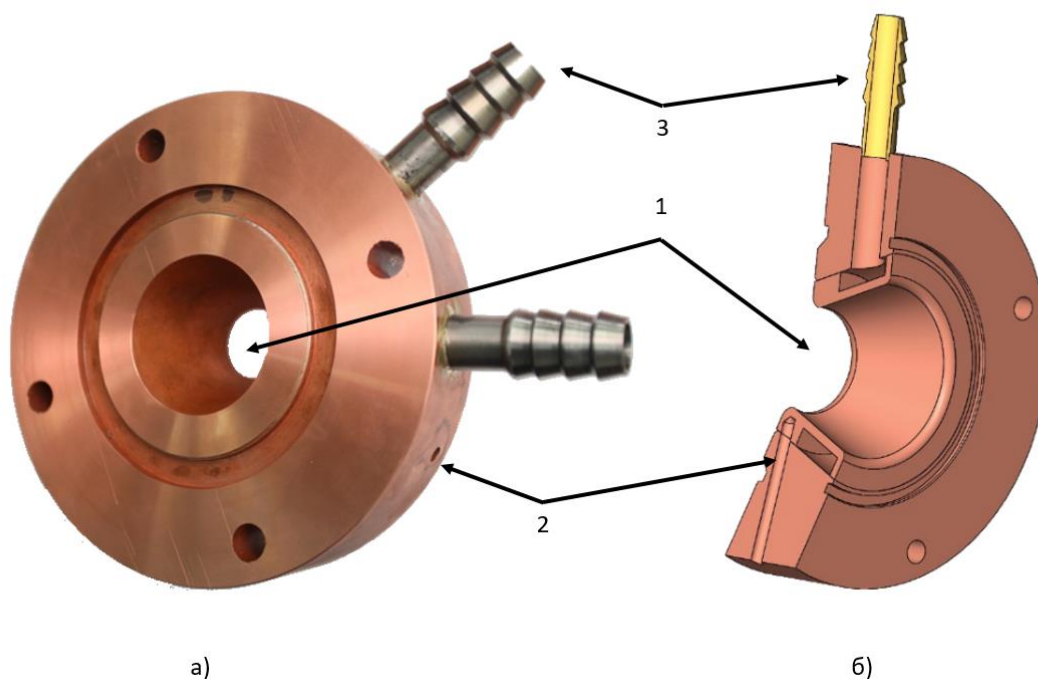


Рисунок 9. Охлаждаемая диафрагма: *а)* общий вид, *б)* сечение. 1 – проходное отверстие, 2 – четыре равномерно распределенные по радиусу отверстия для термодатчиков, 3 – ввод и вывод воды охлаждения.

Расчет отклонения производится путем расчета разницы температур по каждой оси, а затем выполняется построение вектора из центра, формула представлена ниже.

$$d_x = \text{Right} - \text{Left}, \quad d_y = \text{Up} - \text{Down},$$

$$\text{len} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2},$$

$$\text{angleRad} = \text{Atan2}(d_y, d_x),$$

$$\text{angleDeg} = -\left(\frac{\text{angleRad} * 180}{\pi} - 90\right).$$

На установке используется пять охлаждаемых диафрагм, поэтому для отображения отклонения разработан компонент (рисунок 10), который позволяет:

- определить отклонение всех диафрагм в одном месте в виде векторов;
- скрыть показания не интересующих диафрагм;
- поменять цвет каждого отдельного вектора.

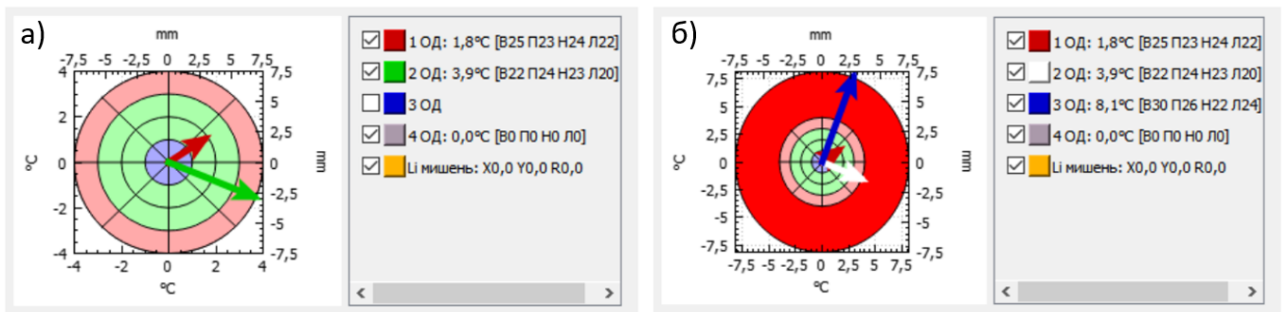


Рисунок 10. Компонент отображения показаний охлаждаемых диафрагм: а) цвет вектора второй диафрагмы – зеленый, отображение третьей диафрагмы отключено; б) цвет вектора второй диафрагмы – белый, отображение третьей диафрагмы включено.

Диафрагма – это диагностический узел, который постоянно находится на оси пучка и позволяет пучку проходить насквозь. Однако иногда эксперимент требует точного позиционирования пучка на оси, для чего был изготовлен конус, который можно ставить на ось пучка для прицеливания и убирать его (рисунок 11). Конус похож на диафрагму, но отличается тем, что:

- у него нет сквозного отверстия, весь пучок высаживается на него;
- он может быть установлен и убран с оси пучка для «пристрелки»;
- у конуса имеется девять термодатчиков (один в центре, четыре на малом радиусе и четыре на большом);

- конус отвязан от земляного потенциала, что позволяет измерять ток пучка.

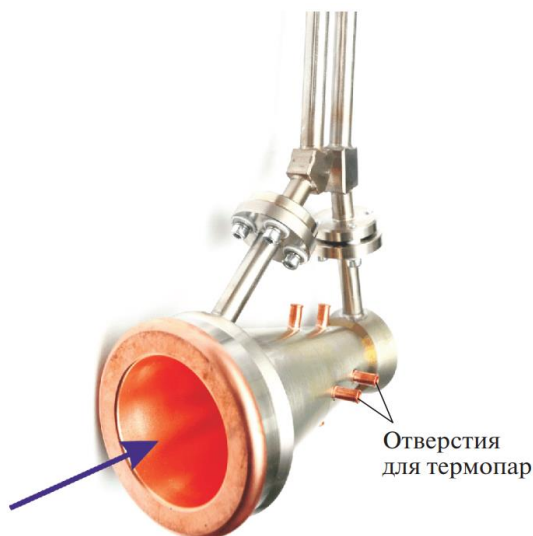


Рисунок 11. Конус с термопарами для диагностики положения пучка.

Первая версия отображения положения пучка на конусе представлена на рисунке 11. Перед использованием векторной компоненты, описанной выше, внедрена компонента, которая отображает значение температуры в точке и относительное значение этой температуры среди остальных (цветовой фон).

Для отображения в цветовом формате каждый раз определяется минимум и максимум температур в конусе. Далее строится градиент от синего к красному, символизирующий относительно холодное и горячее значение соответственно.

Таким образом оператор может определить, что в случае, представленном на рисунке 12, пучок отклонен вправо и вниз.

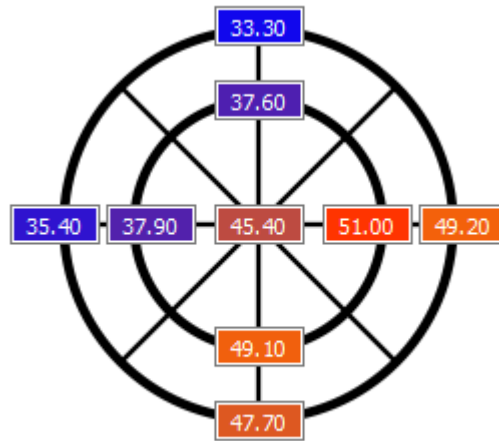


Рисунок 12. Отображение положения пучка на конусе.

#### 2.2.4 ${}^7\text{Li}$ мишень

Для генерации нейтронов на установке БНЗТ в ИЯФ СО РАН используется литиевая мишень. Это узел, состоящий из медной охлаждаемой подложки со слоем  ${}^7\text{Li}$ , на который сбрасывается пучок протонов с энергией 2.2 МэВ и током от 3 мА (в рутинном режиме работы установки). Для генерации нейтронов выбрана реакция  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ , обеспечивающая максимальный выход нейтронов при их минимальной энергии.

На этот узел попадает пучок протонов с максимальной мощностью 20 кВт/см<sup>2</sup>. Такая мощность является достаточно большой, чтобы расплавить любой узел на установке, если пучок отклонится от траектории. Поэтому задача позиционирования пучка является чрезвычайно актуальной.

Для этой цели используются охлаждаемые диафрагмы, конусы (п. 2.2.3) и  ${}^7\text{Li}$  мишень с встроенными в нее термодатчиками [19]. Общий вид мишени и схема расположения термодатчиков показана на рисунке 13.

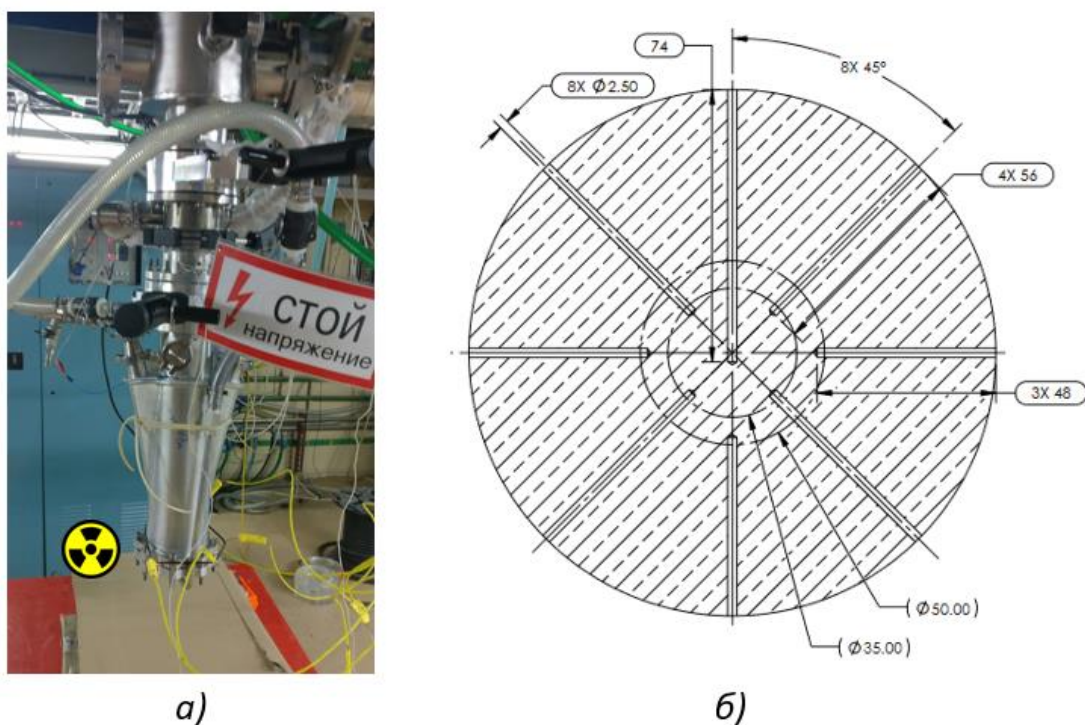


Рисунок 13.  ${}^7\text{Li}$  мишень: а) общий вид; б) схема расположения термодатчиков.

Для демонстрации положения пучка разработано несколько компонент, которые демонстрируют оператору положение пучка на основании показаний с термодатчиков.

Первой версией стала компонента, на фоне которой было схематически изображено две окружности, символизирующие разную глубину внедрения термопар. Поверх этой компоненты было расположено текстовое поле со значением температуры в градусах Цельсия. Однако текстовые поля были модифицированы таким образом, чтобы на фоне отображался цвет из градиента синий-красный, который символизирует относительное значение температуры относительно других датчиков. Минимум и максимум для градиента берется из минимума и максимума данных всех термодатчиков соответственно. Разработанная компонента показана на рисунке 14 а.

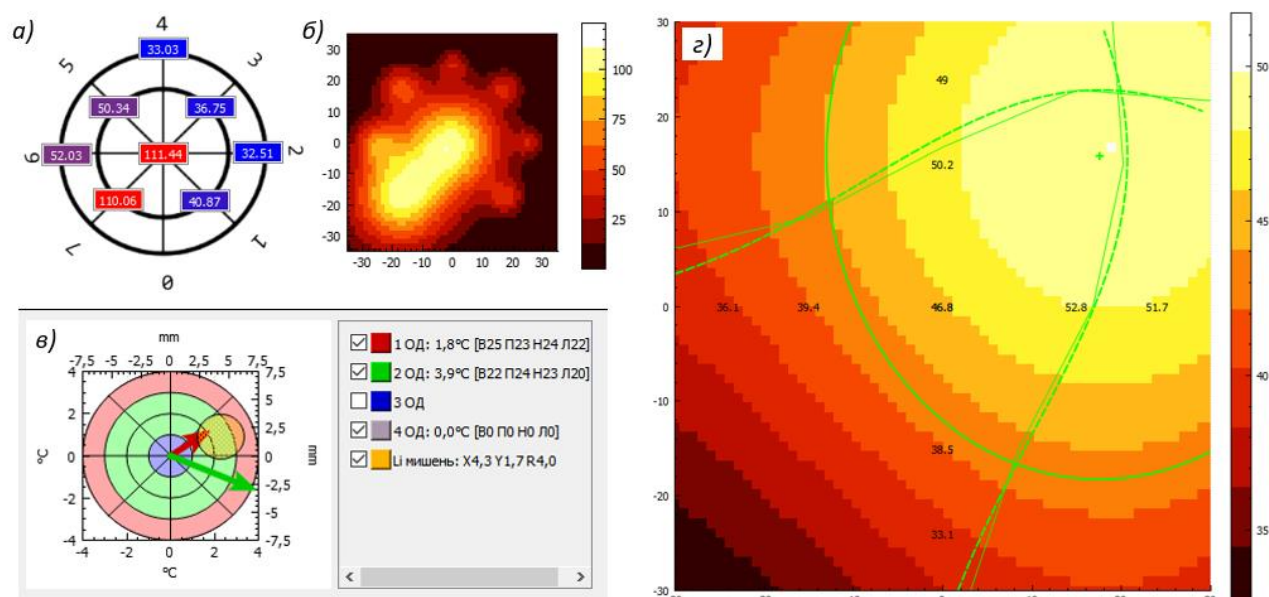


Рисунок 14. Компоненты отображения пучка на  ${}^7\text{Li}$  мишени: а) первая версия; б) вторая версия; в) третья версия; г) четвертая версия.

Первая версия зарекомендовала себя хорошо, но она не позволяла оперативно изменить отображение мишени в случае ее поворота. Поэтому была разработана вторая версия компонента, показанная на рисунке 14 б. Данные для первой и второй версий одинаковы. Этот компонент показывает примерную температурную карту. Картинка строится следующим образом: по данным с каждой термопары строится гаусс, ширина и высота которого зависит от температуры, после чего все гауссы суммируются и отображаются на тепловой карте. Такой способ отображения решил проблему поворота мишени, однако появились другие проблемы:

- шкала справа от графика отображает значения в условных единицах, так как её максимум соответствует максимальной сумме гауссов;
- информативность графика лучше всего отражает определенный диапазон температур. Если температура менялась на 20-30 градусов, то приходилось вручную менять коэффициенты гаусса, так как карта становилась либо слишком «четкая», либо слишком «смазанная» (см. рис. 15).
- в компоненте не видно абсолютного значения температур в точках.

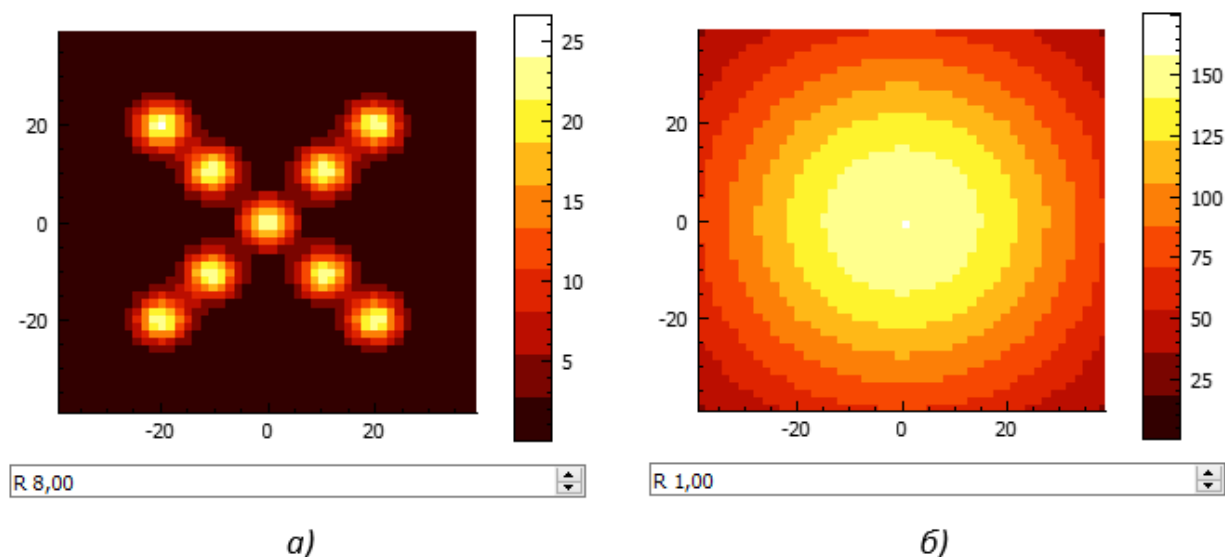


Рисунок 15. Пример второй версии отображения положения пучка: *а)* слишком четкое изображение; *б)* слишком смазанное изображение.

Использование первой и второй версии компонент отображения одновременно позволило провести множество экспериментов. Для улучшения диагностики: был разработан алгоритм, который рассчитывает положение и радиус пучка по температурам. Компонент отображения показан на рисунке 14 *в*. Однако в процессе тестирования выяснилось, что алгоритм хорошо вычисляет радиус пучка только тогда, когда пучок находится в центре, так как в остальных случаях алгоритм сильно усложняется из-за несимметричности расположения термопар (внизу нет термопары).

Четвертая версия, реализованная одним из разработчиков лаборатории, показана на рисунке 14 *г*. Эта версия должна решить все проблемы, поставленные выше:

- решена проблема поворота (которая была в версии два);
- увеличено количество термопар с 8 до 9 в мишени;
- расположение термопар стало крестообразным, как у охлаждаемых конусов (рисунок 12);
- для отображения положения пучка гауссы вписываются по обеим осям при помощи библиотеки GSL [20];

- цветовая шкала отображает корректное значение, так как используются реальные данные, а не сумма пиков гауссов, как в версии два;
- информативность не зависит от температурного диапазона из-за выбранного алгоритма;
- абсолютное значение температуры показывается прямо в компоненте.

Таким образом, четвертая версия имеет большой потенциал и может заменить все ранние версии. Однако алгоритм находится на стадии разработки и все еще не внедрен в единую систему автоматизации.

### ***2.2.5 Источник питания на 1000 кВ (ЭЛВ)***

Для увеличения энергии пучка с 25 кэВ до 2.2 МэВ используется ускоритель вместе с блоком питания типа ЭЛВ [21, 22] на 1000 кВ (далее ЭЛВ). Оба узла показаны на рисунке 1, поз. 11 и 12 соответственно. Энергия пучка является одной из важнейших характеристик пучка протонов, поэтому было необходимо внедрить её значение в единую систему.

ЭЛВ является достаточно сложным устройством с особыми алгоритмами выхода на режим работы и выключения. Управление ЭЛВ осуществляется специализированной программой, которую невозможно изменить таким образом, чтобы она использовала API сервера для записи данных в единую систему. Так как источник питания является важным узлом установки, принято решение начать описывать алгоритмы управления и диагностики в разрабатываемой системе.

Система автоматизации разрабатывалась постепенно: сначала решено завести в систему только диагностику состояний ЭЛВ, не затрагивая при этом начальную систему автоматизации. Это стало возможным из-за специфики управления блоком питания: разработчики ЭЛВ предоставили все интерфейсы измерения и управления в виде набора каналов, измеряемых и управляемых АЦП и ЦАП. Первоначальная система разработана так, что программа оператора подключается к контроллеру с набором периферии ввода-вывода,



который в свою очередь устанавливает и считывает показания на схемах управления. Для снятия показаний параллельно АЦП контроллера был подключено устройство ввода-вывода Adam 6024, которое отправляло информацию на сервер. Схема диагностики представлена на рисунке 16.

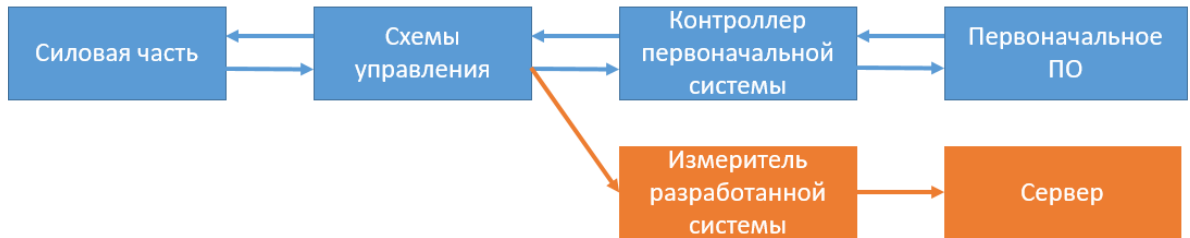


Рисунок 16. Схема взаимодействия первоначальной и разработанной системы управления и диагностики ЭЛВ.

Схемы управления могут сообщить только поданное напряжение на ускоритель, поэтому для расчета энергии напряжение удваивается и суммируется с энергией ионов водорода, которое принято за константу. Интерфейс внедренной диагностики показан на рисунке 17.

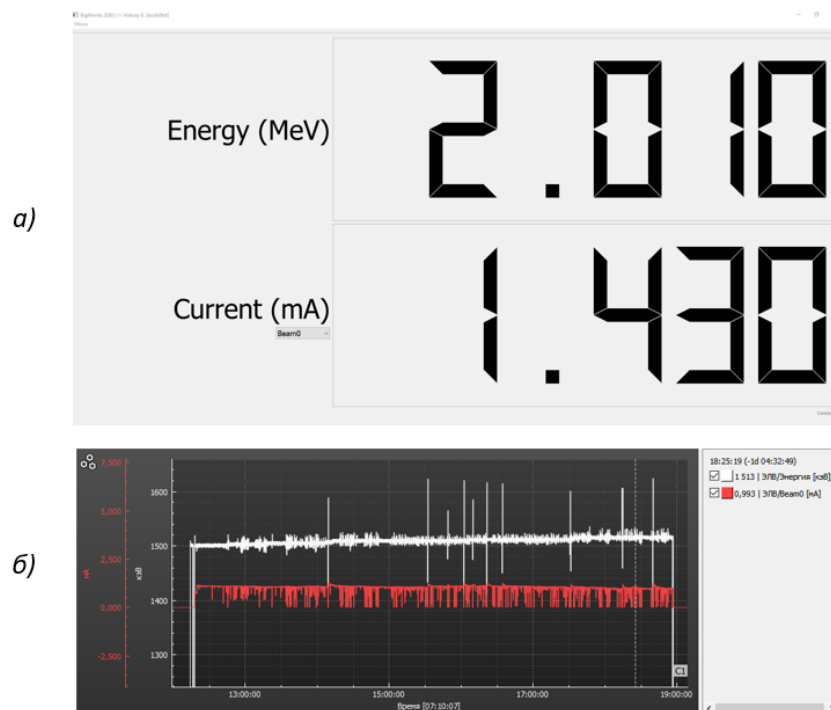


Рисунок 17. Интерфейс измерения энергии пучка: а) моментальное значение; б) значение на графике реального времени.

## 2.2.6 Измеритель мощности

В некоторых экспериментах требуется определить, какое количество пучка теряется на разных охлаждаемых местах ускорителя. Для этого разработана и внедрена диагностика, которая по нагреву узла определяет высаживаемую мощность пучка. Схема измерения показана на рисунке 18.

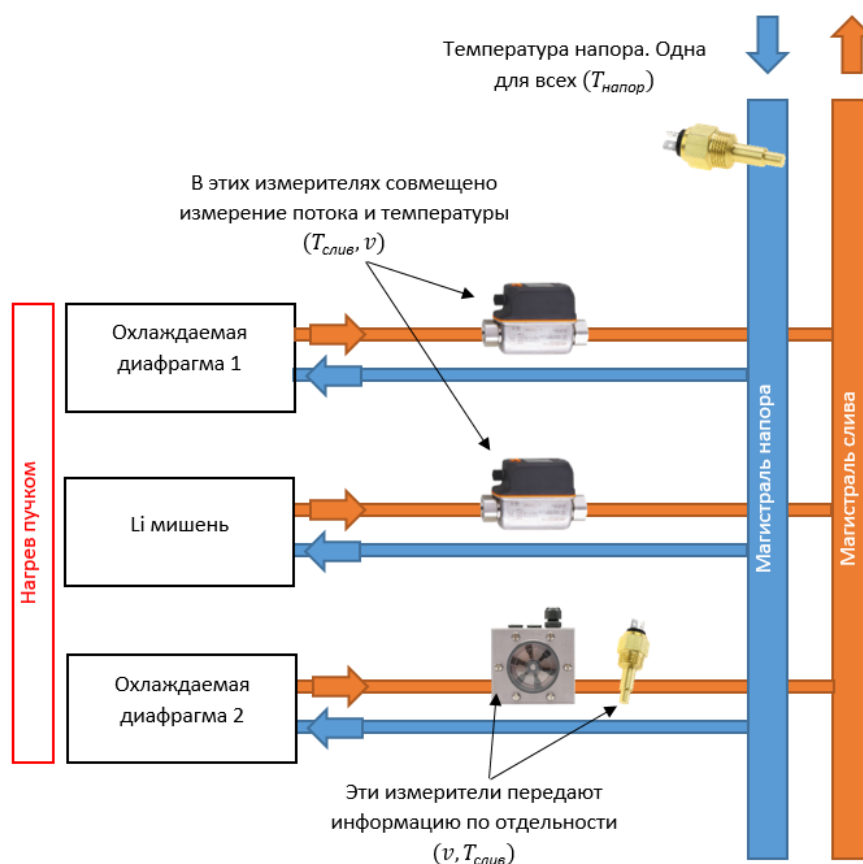


Рисунок 18. Схема измерения мощности.

Диагностика состоит из:

- двух измерителей температур, расположенных на входе (далее напор) и выходе (далее слив) нагреваемого объекта;
- измерителя потока.

Поскольку температура напора одна для всех, она измеряется один раз в самом начале трубы. Значения потока и температуры измеряется либо в одном комбинированном датчике, либо в двух отдельных.

Для диагностики протечки измерители потока установлены на сливе: если шланг сорвет где-то в середине, то измеритель потока начнет фиксировать уменьшение потока, это можно будет отследить в системе автоматизации и вовремя предупредить оператора.

Перед началом измерения мощности диагностика требует фиксации начальных температур напора и слива, чтобы в процессе работы ускорителя диагностировать только разницу между текущим и начальным значением.

Мощность рассчитывается формуле

$$P = \frac{C\rho(\Delta T_{\text{слива}} - \Delta T_{\text{напора}})}{v}$$

где

$P$  – мощность;

$C$  – удельная теплоемкость воды;

$\rho$  – плотность воды;

$T_{\text{слива}}$  и  $T_{\text{напора}}$  – значения температуры на выходе и входе соответственно;

$v$  – скорость потока воды.

Диагностика показала свою эффективность, и она была внедрена в следующие узлы:

- обдирочная мишень;
- входная диафрагма ускорителя;
- линза Воблова в ионном источнике;
- ${}^7\text{Li}$  мишень;
- конусы;
- охлаждаемые диафрагмы.

В дальнейшем планируется оснастить всю установку описанной диагностикой благодаря её простоте и эффективности.

### ***2.2.7 Система охлаждения масла обдирочной мишени***

Из-за того, что на перезарядную трубку может попадать пучок с мощностью до 10 кВт, этот узел требует систему охлаждения, схема которой представлена на рисунке 19. Жидкость охлаждения подается от земляного

потенциала на потенциал 1000 кВ, поэтому в качестве теплоносителя выбрано трансформаторное масло (9), которое удовлетворяет требованиям электрической прочности. Масло охлаждается через теплообменник (10) водяным охлаждением (11).

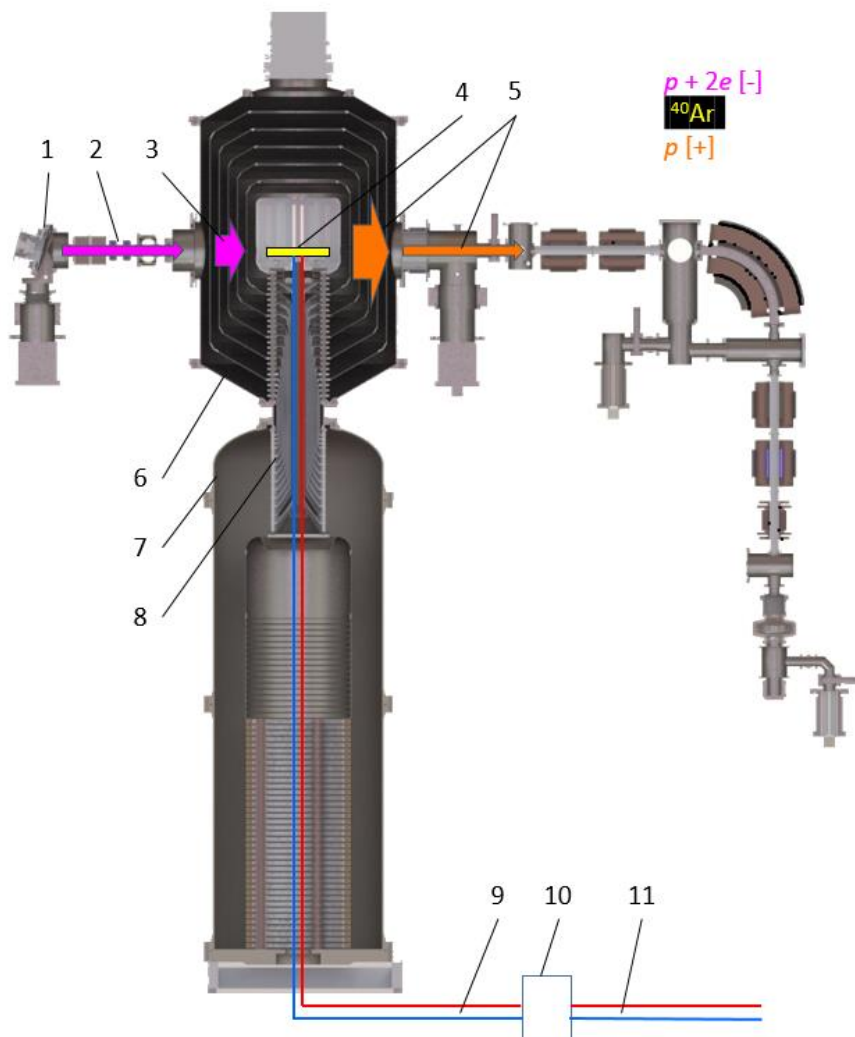


Рисунок 19. Общая схема охлаждения обдирочной мишени. 1 – источник отрицательных ионов водорода; 2 и 3 – пучок отрицательных ионов водорода с энергиями 25 кэВ и 1 МэВ соответственно; 4 – перезарядная мишень; 5 – пучок протонов с энергией 2 МэВ и остаточных частиц, летящих из ускорителя; 6 – ускоритель; 7 – ЭЛВ (источник питания на 1000 кВ); 8 – проходной изолятор; 9 – напор и слив масла охлаждения; 10 – система охлаждения масла; 11 – подвод воды охлаждения.

В работе требовалось автоматизировать систему охлаждения масла. Особенностью данного узла является нахождение всех узлов в бункере, где уровень ионизирующего излучения повышенный, это может губительно

отразится на электронике. Было принято решение автоматизировать этот узел без использования измерительных устройств и устройств принятия решения. В качестве логики были использованы реле. Общий вид системы представлен на рисунке 20.

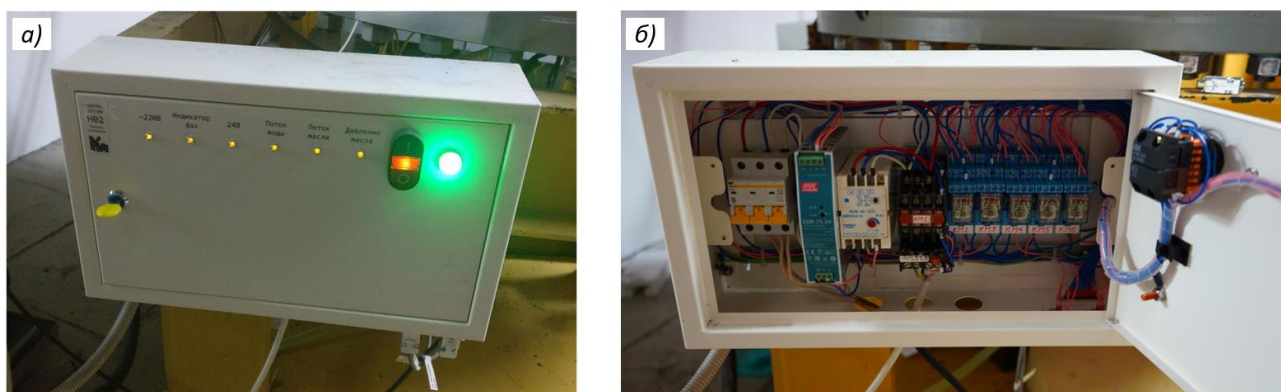


Рисунок 20. Схема управления системы охлаждения обдирочной мишени:  
а) общий вид панели управления; б) внутренний вид схемы.

Система охлаждения должна посылать в источник питания ЭЛВ разрешающий сигнал о том, что охлаждение обдирочной мишени работает исправно. В системе расположено несколько датчиков, которые следят за состоянием системы охлаждения:

- на трехфазный насос фазы приходят в нужном порядке;
- внутреннее питание 24 В работает исправно;
- поток масла выше заданного значения;
- давление масла выше указанного значения;
- поток воды охлаждения выше заданного значения.

Если все вышеперечисленные пункты в порядке и насос включен, схема генерирует сигнал о штатной работе системы охлаждения обдирочной мишени, что позволяет подать на источник питания ЭЛВ 1000 кВ и запустить пучок ионов в ускоритель. Детальная схема системы охлаждения представлена на рисунке 21. Система разработана таким образом, чтобы система зафиксировала протечку масла внутри ускорителя или прорыв шланга, так как поток и давление измеряются в самом конце пути охлаждающего цикла. Для

диагностики мощности, высаживаемой пучком ионов на обдирочной мишени, использована диагностика, описанная в п. 2.2.6.

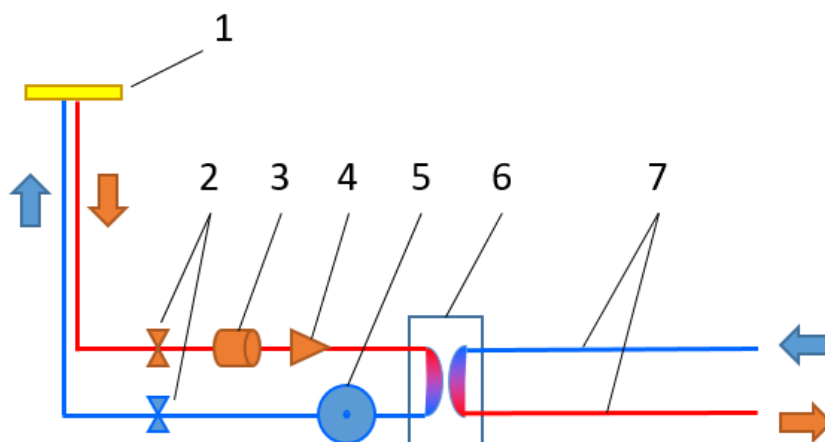


Рисунок 21. Схема системы охлаждения обдирочной мишени. 1 – обдирочная мишень; 2 – датчики температуры масла на входе и выходе; 3 – датчик потока масла; 4 – датчик давления масла; 5 – трёхфазный насос; 6 – теплообменник; 7 – вода охлаждения.

Однако релейная схема оказалась не самым надежным способом диагностировать неполадки, так как реле могут «залипнуть». Эта проблема сейчас находится на этапе обсуждения. На момент защиты ВКР статистика отказоустойчивости системы охлаждения составила одну неисправность за один год.

### **2.2.8 Эффективность обдирки**

В процессе работы ускорителя важно знать процент обдирки ионов водорода для смены знака пучка. Для оценки качества работы ускорителя разработана диагностика [23], которая показала эффективность обдирки газовой перезарядной мишени. Схема диагностики показана на рисунке 22.

Для генерации пучка протонов с энергией до 2.2 МэВ используется ионный источник (1), который инжектирует пучок ионов водорода с предварительной фокусировкой магнитной линзой (2) в ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (3), а он, в свою очередь, ускоряет ионы до 1 МэВ. В центре ускорителя ионы обдираются аргоном в мишени (4), из-за чего пучок

меняет знак с отрицательного на положительный. Далее пучок ускоряется тем же потенциалом, который используется при первом ускорении. Ток пучка измеряется бесконтактным датчиком Bergoz (6).

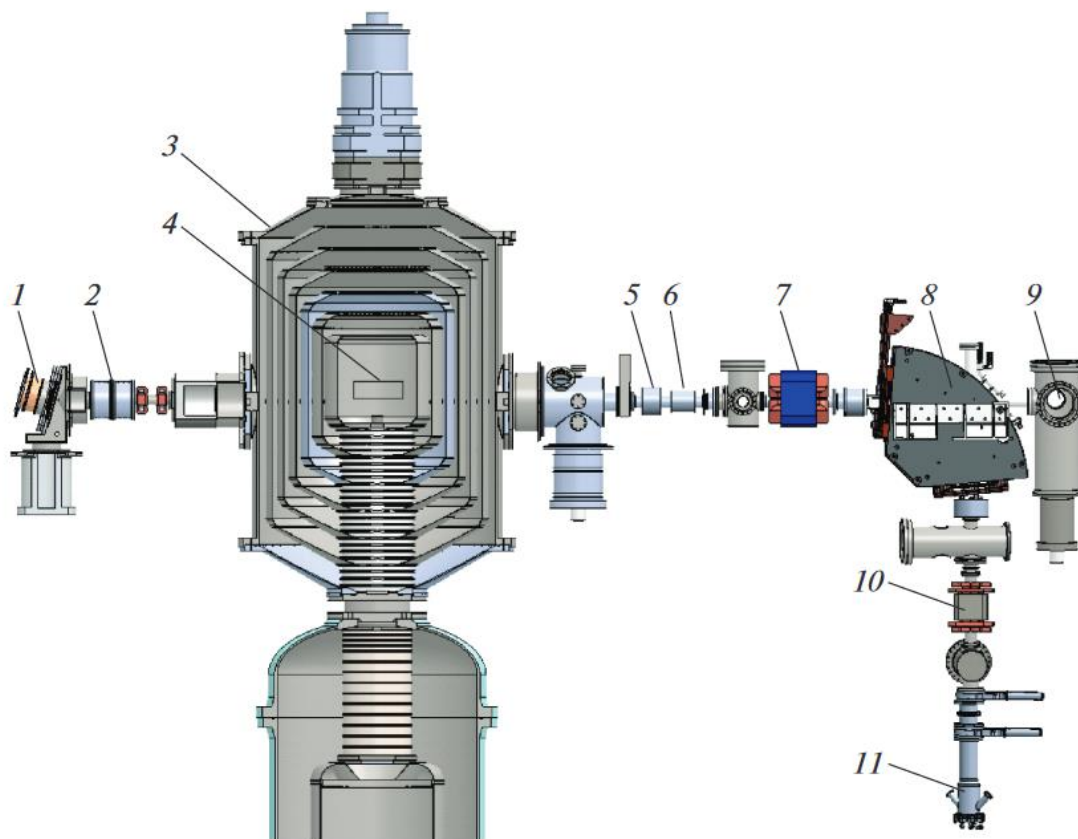


Рисунок 22. Схема эксперимента изучения эффективности обдирки. 1 – ионный источник; 2 – фокусирующая линза; 3 – ускоритель; 4 – обдирочная мишень; 5 – охлаждаемая диафрагма; 6 – бесконтактный измеритель тока Bergoz; 7 – корректор; 8 – поворотный магнит; 9 – диагностическая камера с цилиндром Фарадея; 10 – система развертки пучка; 11 –  ${}^9\text{Li}$  мишень.

При недостаточной плотности атомов аргона в обдирочной мишени часть пучка не перезаряжается и вылетает из ускорителя в виде нейтралов с энергией 1 МэВ. Для анализа эффективности работы обдирочной мишени было предложено разработать и установить новый поворотный магнит (8) со сквозным патрубком, который позволит выводить нейтралы на цилиндр Фарадея (9). В такой конфигурации при подаче тока на поворотный магнит отклоняются только протоны, а нейтралы пролетают до цилиндра Фарадея, не меняя траектории. Из-за невозможности измерить ток нейтралов напрямую пришлось измерять его по вторичным признакам. Вместо нейтралов на цилиндр

Фарадея был сброшен пучок протонов с энергией 1 МэВ. Это было сделано для того, чтобы определить коэффициент вторичной эмиссии электронов, для чего была снята вольт-амперная характеристика. Для этого перед цилиндром Фарадея на изолированное кольцо был подан потенциал от -500 до +500 В и измерен ток пучка. Зависимость представлена на рисунке 23.

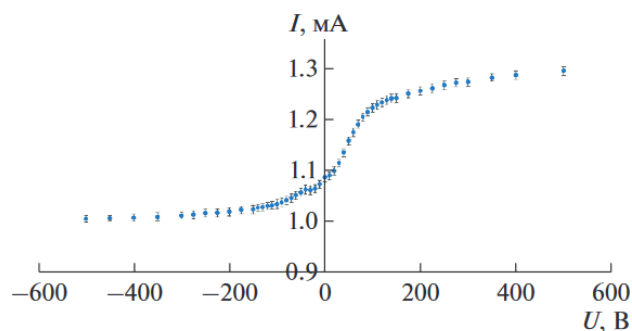


Рисунок 23. Вольт-амперная характеристика, снятая с цилиндра Фарадея при энергии протонов равной 1 МэВ.

Для снятия ВАХ были использованы управляемые блоки питания разной полярности ULTRA-VOLT 1/2AA24-P30-I10 и ULTRA-VOLT 1/2AA24-N30-I10, которые управлялись устройством ввода-вывода Adam 6024 при помощи ПО сервера.

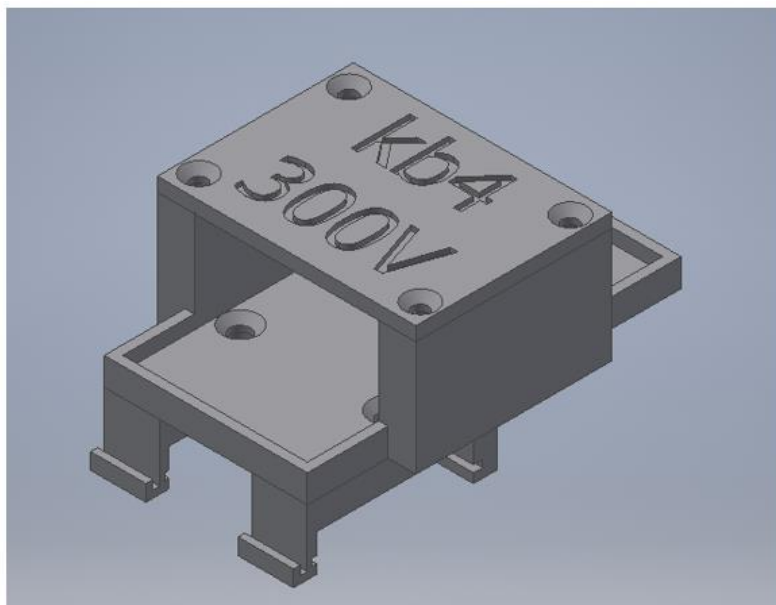
Построенная ВАХ позволила определить, что коэффициент вторичной эмиссии электронов при попадании протонного пучка в данный цилиндр Фарадея равен  $0.29 \pm 0.1$ . Предполагая, что для нейтралов с энергией 1 МэВ этот коэффициент не сильно отличается, можно определить «ток» нейтралов, вытягивая вторичные электроны и измеряя их ток.

Для внедрения диагностики на постоянную основу обеспечено постоянное напряжение 500 В на изолированном вытягивающем кольце перед цилиндром Фарадея для вытягивания вторичных электронов. Источник питания и устройство ввода-вывода смонтировано на DIN рейку в 19” стойку при помощи разработанного в САД системе Autodesk Inventor и распечатанного на 3D принтере ULTIMAKER 3. Финальный монтаж диагностики представлен на рисунке 24.





а)



б)

Рисунок 24. Крепление блока питания: а) монтаж блока питания; б) разработанная 3D модель.

Для вытягивания электронов с цилиндра Фарадея при попадании нейтралов требовалось для каждого эксперимента штатно подавать напряжение на изолированное кольцо перед цилиндром. Полученных знаний стало достаточно, чтобы вычислить коэффициент обдирки, который вычисляется по следующей формуле

$$\varepsilon = I_p / (I_p + \frac{I_n}{k})$$

где

$\varepsilon$  – эффективность обдирки;

$I_p$  – ток протонов, измеряемый бесконтактным датчиком Bergoz (рис. 22, поз б);

$I_n$  – ток нейтралов, измеренный цилиндром Фарадея, измеренный при помощи Adam 6024 и шунта на 1 кОм  $\pm$  0,1% на земляной потенциал;

$k$  – коэффициент вторичной эмиссии.

Вычисляемое значение эффективности обдирки стало постоянной диагностикой, которая выводится в режиме реального времени на панели общего пользования и которая доступна для анализа в программе физика-

аналитика. Панель оператора и панель общего пользования представлена на рисунке 25.

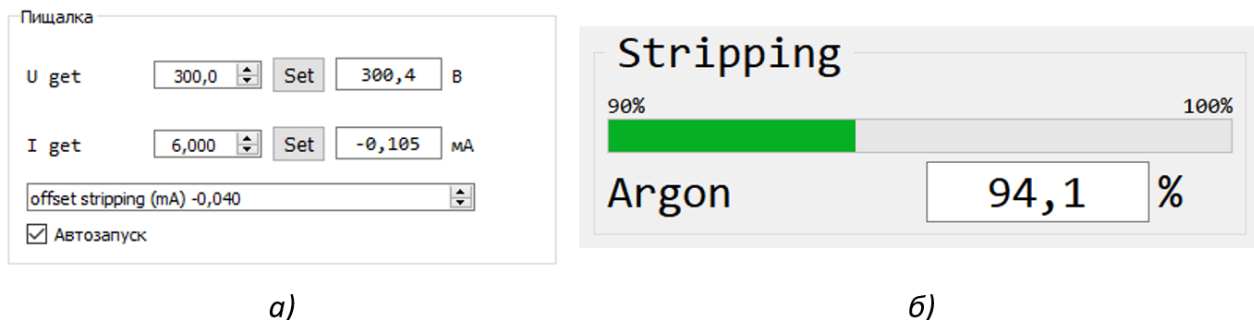


Рисунок 25. Интерфейс диагностики эффективности обдирки: а) панель оператора; б) панель общего пользования.

### ***2.2.9 Напуск аргона***

Для перезарядки ионов водорода в протоны требуется в центр ускорителя подавать аргон, который сдирает у иона с орбиты два электрона, из-за чего остаётся только один протон и знак заряда меняется с отрицательного на положительный.

Из-за ограниченного пространства внутри центрального электрода ускорителя пришлось расположить баллон с аргоном и схему напуска расположить внутри ЭЛВ и соединить мишень с системой напуска через проходной изолятор. Схема представлена на рисунке 26.

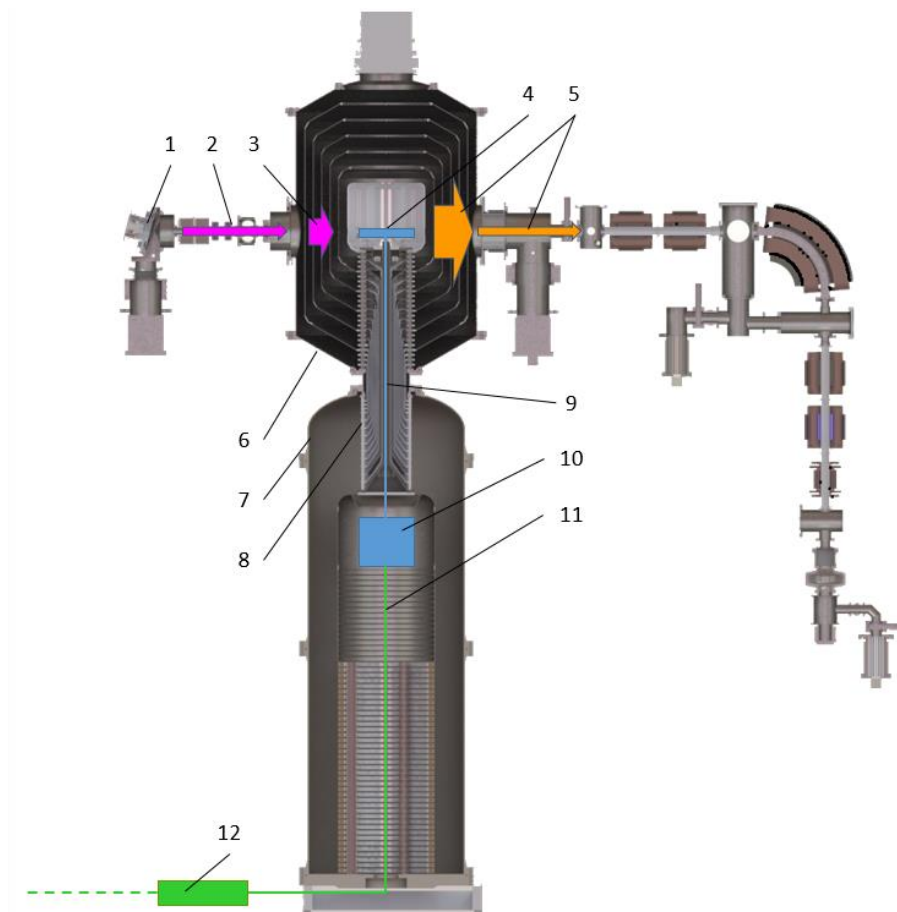


Рисунок 26. Принцип напуска аргона в центр ускорителя. 1 – ионный источник; 2 – пучок ионов с энергией 25 кэВ; 3 – ускоренные ионы водорода до 1 МэВ; 4 – обдирочная мишень; 5 – пучок протонов с энергией до 2.2 МэВ; 6 – ускоритель; 7 – Источник питания ЭЛВ; 8 – проходной изолятор; 9 – трубка подачи аргона; 10 – схема напуска аргона, состоящая из баллона с газом, натекателя и управляемого клапана; 11 – оптоволокно для управления; 12 – схема подачи импульса, управляемая через Ethernet.

Схема напуска аргона располагается под потенциалом 1000 кВ, поэтому её питание осуществляется от специальной обмотки трансформатора внутри бака ЭЛВ. Для подачи аргона в обдирочную мишень требуется подать световой сигнал на схему напуска при помощи схемы, находящейся под земляным потенциалом. Длительность светового импульса соответствует длительности открытия клапана.

В первой версии системы использовался блок ввода-вывода Adam 6024, который подавал управляющий сигнал на схему генерации светового сигнала. На каждое открытие/закрытие клапана приходилось посылать команды с сервера на Adam 6024 по интерфейсу Ethernet TCP. Из-за этого возникали

значительные и различные по времени временные задержки (до секунды), что является крайне нежелательным для данной автоматизации. Также из-за ограничения модуля ввода-вывода переключение состояния клапана было возможно минимум с интервалом 100 мс, что является достаточным, но не удобным в некоторых экспериментах.

Поэтому во второй версии был внедрен контроллер марки STM32 на плате NUCLEO-F767ZI. На этом контроллере был реализован протокол Modbus, в регистры которого записывается временной интервал открытия и закрытия клапана и флаг запуска. Такой подход позволил не слать с сервера сигналы на каждое открытие/закрытие клапана, а один раз послать настройки напуска и команду запуска, контроллер реального времени самостоятельно посылал управляющие сигналы на схему генерации светового сигнала. Такая конфигурация позволила генерировать импульсы одинаковой длительности, и получилось разгрузить сеть от лишних команд открытия/закрытия.

Интерфейс оператора представлен на рисунке

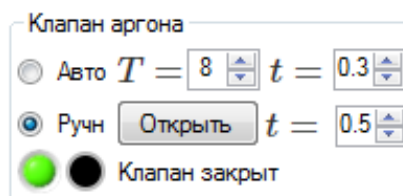


Рисунок 27. Интерфейс напуска аргона.

### 2.2.10 Вакуум

В процессе проведения экспериментов необходимо знать уровень вакуума на установке в разных точках. Для решения этой задачи было закуплено несколько измерителей вакуума Pfeiffer Vacuum PKR 251 с блоками обработки Pfeiffer Dual Gauge TPG 262. Схема подключения показана на рисунке 28. Показания с вакуумных ламп передаются в блок обработки, который преобразует сигнал с лампы в напряжение в диапазоне от 0 до 10 В. Этот сигнал считывается АЦП Adam 6017 и передается на сервер при помощи протокола Modbus.

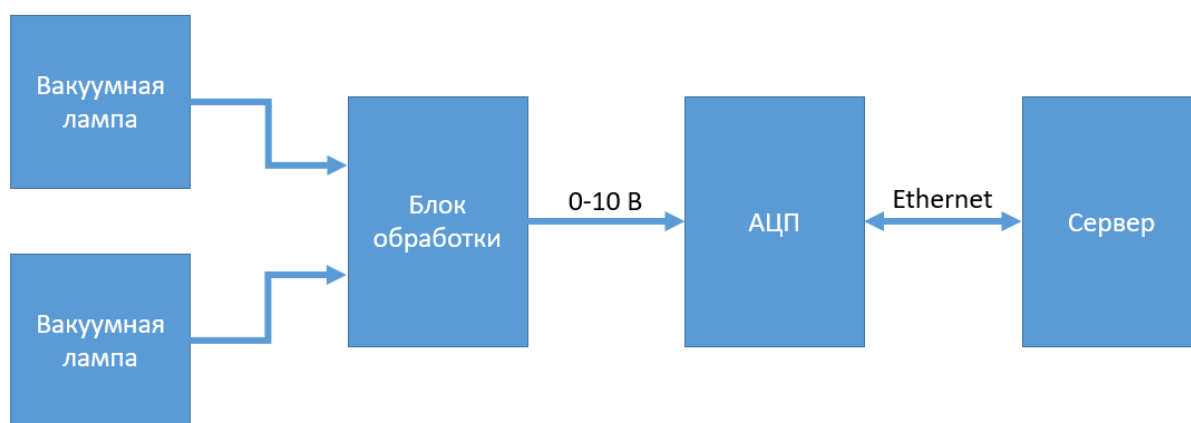


Рисунок 28. Схема подключения измерителей вакуума

Блоки обработки служат для:

- питания вакуумных ламп;
- отображения значения вакуума на дисплее;
- предоставления значения вакуума в виде напряжения от 0 до 10 В, которое требует пересчета в физическую величину. Формула пересчета предоставляется в документации к вакуумной лампе.

В дальнейшем планируется провести работу по внедрению промышленных контроллеров, которые смогут считывать значения с вакуумных ламп и в зависимости от их показаний управлять форвакуумными и турбомолекулярными насосами вместе с вакуумными клапанами, что позволит полностью автоматизировать процесс вакуумной откачки на уровне промышленных контроллеров.

### ***2.2.11 Синхронизация магнита по энергии пучка***

В процессе перезарядки и ускорения ионов до энергии 2.2 МэВ на выходе из ускорителя пучок состоит из протонов, ионов и прочих ненужных для терапии составляющих. В качестве сепаратора используется поворотный электромагнит (рис. 1, поз. 6). Ток на его обмотках магнита устанавливается таким образом, чтобы созданным магнитным полем поворачивать только протоны на 90 градусов для транспортировки на  ${}^7Li$  мишень.

Особенность такой фильтрации заключается в том, что ток в обмотках поворотного магнита обязательно должен быть синхронизирован с энергией

пучка. В 2018 г. на установке не было возможности устанавливать энергию пучка с достаточной стабильностью, поэтому решено было сделать автоматическую установку тока на поворотном магните на основании значений энергии. Автоматизацию решено реализовать на базе контроллера реального времени марки STM32 на плате NUCLEO-F767ZI. Схема автоматизации представлена на рисунке 29.

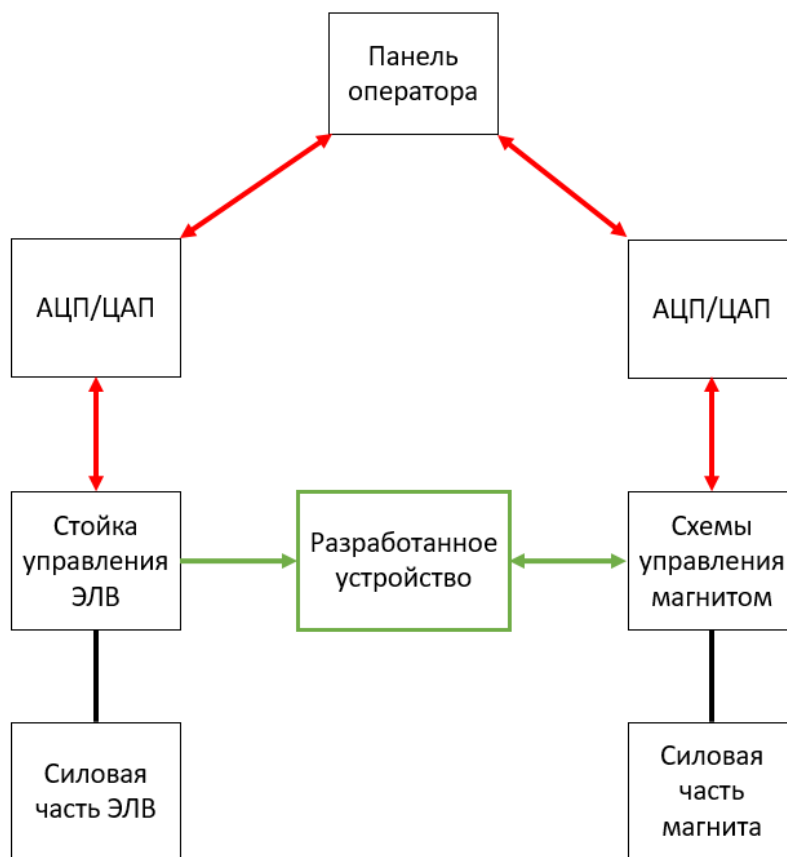


Рисунок 29. Схема автоматизации. Красным показан маршрут синхронизации магнита по энергии, занимающий от 1 до 2 секунд. Зеленым показан разработанный маршрут, занимающий до 1 миллисекунды.

Автоматизация проходила в два этапа: 1) калибровка и 2) работа. На этапе калибровки оператор вручную устанавливал требуемую энергию пучка, после чего корректировал ток поворотного магнита таким образом, чтобы на  ${}^7Li$  мишени пучок был в центре. Центрирование происходило при помощи термопар в мишени (подробнее в п. 2.2.4). После центрирования пучка на разработанную схему посылалась команда на сохранение энергии и тока

поворотного магнита. Описанная операция была произведена в диапазоне энергий от 1.5 до 2.1 МэВ с шагом 50 кэВ. По окончании калибровки на схему отправляется команда сохранить данные в энергонезависимую память и перейти в режим работы. В памяти устройства хранится зависимость тока от энергии в виде точек с разрывами в 50 кэВ. Если значение энергии в рабочем режиме будет между точек, алгоритм произведет линейную аппроксимацию. Прошивка контроллера написана на языке Си с использованием библиотеки Hardware Abstraction Layer (HAL) и конфигулятора CUBE MX.

Контроллер STM32 имеет внутренние АЦП и ЦАП, однако диапазон измерения и уставки ограничен 3.3 В. Для снятия этого ограничения нами была разработана принципиальная схема и печатная плата для производства, которые приведены в приложении А.

Схема внедрена в ускоритель и работала стабильно [24]. Время реакции на изменение энергии – до 1 мс. Однако из-за того, что поворотный магнит разработан из не шихтованного железа, магнитное поле в нем меняется недостаточно быстро. По этой причине пучок часто задевает одно и то же место в вакуумном тракте и с большой вероятностью может прожечь дыру. Поэтому автоматизация отложена до замены поворотного магнита.

## ***2.2.12 Внедрение сторонних диагностик***

### ***2.2.12.1 Быстрый датчик нейтронов***

Как было сказано в предыдущем пункте, задача измерения нейтронного излучения стоит очень остро. Установка обязательно должна иметь сертифицированный прибор, прошедший ряд испытаний и имеющий акт поверки. Таким прибором на ускорителе является серийно производимый НПШ «Доза» БОП-1М вместе с датчиками ДБГ-С11Д и УДМН-100 (п. 2.2.2). Однако в процессе проведения нескольких экспериментов выяснилось, что датчик имеет несколько недостатков:

1) дозиметр нейтронного излучения УДМН-100 является слишком медленным измерителем для некоторых экспериментов (характерное время

интегрирования составляет несколько десятков секунд), а также его показания подвержены дрейфу при больших нагрузках;

2) медикам и биологам нужно знать, какую терапевтическую дозу может обеспечить разрабатываемый ускоритель на поверхности кожи человека. Это значение требуется для расчета суммарной дозы после инъекции  $^{10}\text{B}$ -содержащего препарата для пациента. Дозиметр нейтронного излучения УДМН-100 не подходит для измерения этой дозы, так как является очень большим (диаметр сенсора с замедлителем составляет 30 см) и не позволяет определить точную дозу на поверхности организма.

В лаборатории 3-13 ИЯФ СО РАН разработан многоканальный измеритель нейтронного излучения [25, 26, 27]. Уникальность этого прибора обоснована:

- компактными сенсорами  $9 \times 9 \times 5$  мм;
- быстрым временем реакции (около 100 мс);
- легкостью погружения чувствительного элемента в воду с сохранением работоспособности и точности измерения.

Все перечисленные пункты важны для проведения эксперимента по оценке профилей глубины дозы в водном фантоме [28, 29]. Оценка дозовых профилей, полученных с использованием сцинтилляторов, обогащенных бором, позволяет проверить распределение дозы в условиях, аналогичных реальным лечебным процедурам. Помимо нейтронов, такие системы генерируют значительное количество гамма-излучения. Эти гамма-лучи связаны как с процессом генерации нейтронов на литиевой мишени, так и с реакцией  $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{D}$ . Поэтому оценка вклада всех возможных компонентов в дозу облучения пациента становится жизненно важным вопросом для оптимизации системы лечения. Для решения этой проблемы проведена серия экспериментов с водным фантомом и системой мониторинга нейтронного потока, разработанной в ИЯФ СО РАН.

Этот эксперимент полезен медикам и биологам для расчета нейтронной дозы, требуемой для лечения пациента. Ранее для расчета дозы использовалось



только математическое моделирование. Суть эксперимента в том, чтобы измерить дозу внутри тела пациента. В проведенном эксперименте в качестве тела использовался водяной фантом – аквариум с размерами  $330 \times 313 \times 330$  мм, в котором расположена подвижная область, приводящаяся в движение при помощи шаговых моторов. На эту область на были закреплены компактные детекторы нейтронов. Их показания имитировали значения дозы в тканях человека с высокой точностью. Внутри аквариума налита вода, которая имитирует ткани человека, так как человек состоит на 60% из воды, что является достаточным для оценки поглощения нейтронов в ткани.

В эксперименте задействовано три детектора: А, В и С. Детектор А располагался вне водного фантома, рядом со стационарным дозиметром гамма-излучения, и его данные использовались для проверки стабильности системы мониторинга и перекрестной калибровки с дозиметром. Детекторы В и С были размещены на подвижной платформе водного фантома. На рисунке 30 показана экспериментальная установка с установленным водяным фантомом.

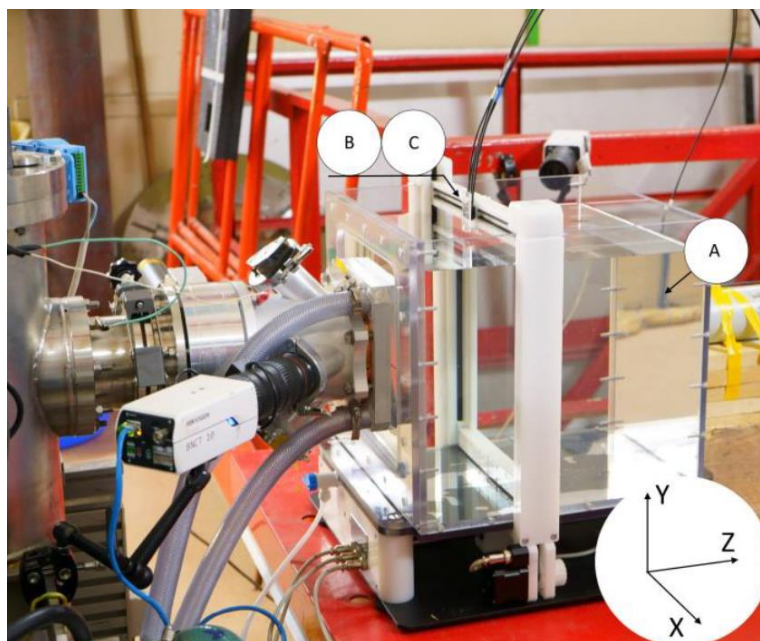


Рисунок 30. Экспериментальная установка с водяным фантомом, установленным непосредственно за нейтронно-генерирующей мишенью. Стрелки указывают положение детекторов: А (за резервуаром с водой), В и С.

Для снятия значений с датчиков использовался контроллер, производящий все измерения и расчеты дозы, которые можно узнать через предоставленный API. Для связи с детектором автором был разработан микросервис, который отвечал за подключение, сбор данных, калибровку сенсоров и передачу информации на единый сервер.

Одним из сотрудников лаборатории был создан микросервис автоматического управления фантомом. Разработанное ПО использовало API сервера для сохранения координат положения. Таким образом сервер собирал информацию с двух независимых сторонних устройств и сохранял в одной базе данных положение подвижных датчиков *B* и *C* и все измеренные значения, что позволило с легкостью восстановить ход эксперимента.

Результаты моделирования эксперимента с помощью пакета GEANT4 продемонстрировали хорошую согласованность с экспериментальными данными и могут быть использованы для дальнейшего совершенствования системы.

### *2.2.12.2 Спектрометр на основе ${}^6\text{Li}$*

При проведении БНЗТ огромное значение имеет спектр энергий генерируемых нейтронов. Для измерения спектра нейтронов на ускорителе была предложена времяпролетная диагностика [30]: короткие вспышки нейтронов создавались при помощи подачи прямоугольного импульса напряжения 40 кВ длительностью 200 нс на генерирующую нейтроны мишень, электрически изолированную от корпуса установки. На протяжении 200 нс энергия протонов увеличивалась с 1.775 до 1.915 МэВ, что приводило к вспышке нейтронного излучения, которое фиксировалось сцинтилляционным детектором с  ${}^6\text{Li}$ .

Нейтроны долетали до датчика за разное время, которое зависит от энергии: сначала прилетали самые быстрые нейтроны, потом нейтроны со средней скоростью, а после – медленные. Зная разницу во времени между подачей напряжения и прилетом нейтронов, можно определить их энергию. С помощью разработанной времяпролетной методики спектр получаемых

нейтронов был измерен [31]. Однако ввиду большой сложности, данный метод не использовался на постоянной основе и показания сцинтиляционного детектора не были интегрированы в систему.

Одним из сотрудников лаборатории БНЗТ была проведена работа по переводу детектора на новую аппаратную базу (рисунок 31) на основе микроконтроллера АМРТЕК DP5G, что позволило разработать отдельный специализированный софт, который по каналу связи Ethernet получал показания с нового АЦП. Программа была создана как самостоятельная единица, позволяющая настроить датчик и некоторые параметры, а в последствии была интегрирована в единую систему автоматизации при помощи API и стала микросервисом. Итоговая схема передачи данных представлена на рисунке 32.

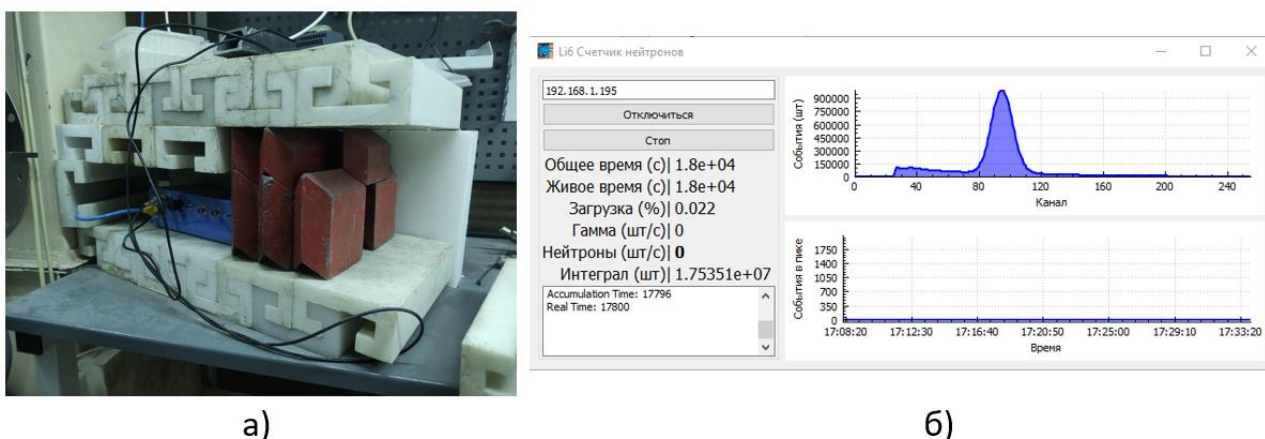


Рисунок 31. Спектрометр с  ${}^6\text{Li}$ : а) общий вид сенсора и АЦП с замедлителем, б) спец. ПО, внедренное в систему через API.

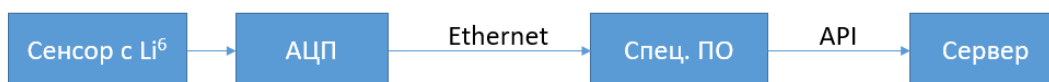


Рисунок 32. Схема передачи данных спектрометра на основе  ${}^6\text{Li}$

Данная диагностика предоставила нашей лаборатории уникальные знания о генерации нейтронов. Долгое время в качестве единственного измерителя нейтронного излучения использовался БОП-1М с дозиметром УДМН-100 (п. 2.2.2), показания которого изменялись в меньшую сторону по

датчику УДМН-100 на несколько процентов за рабочую смену. На основании этих данных было построено несколько теорий, объясняющих причины падения показаний. В одном из экспериментов был дополнительно внедрен сцинтилляционный детектор с  ${}^6\text{Li}$ . Удалось установить, что показания датчика с  ${}^6\text{Li}$  [32] с течением времени не изменялись, а показания УДМН-100 уменьшались. Полученные результаты указывают на то, что нейтронный дозиметр УДМН-100 не подходит для длительной работы в диапазоне доз от 1 до 10 мЗв/ч.

### *2.2.12.3 Гамма спектрометр HPGe*

Для изучения характеристик установки требовалось провести эксперимент, который бы показал спектр энергий генерируемого гамма-излучения. Для этого был использован детектор High Purity Germanium (HPGe) при помощи которого проведено несколько экспериментов [33, 34, 35]. Предоставляемое в комплекте ПО требовало доработки. Поэтому собственными силами лаборатории разработано ПО, которое улучшило интерпретацию данных и использовало API сервера для сохранения промежуточных измерений в единую базу данных.

## **2.3 Панель общего пользования**

Установка применяется для проведения международных экспериментов, в которых участвуют коллеги из разных стран. Чаще всего гостям интересно знать текущие параметры ускорителя.

Для информирования всех участников эксперимента автором разработана программа, которая состоит из трех окон и на трех ЖК-мониторах с диагональю 50 дюймов отображает всю основную информацию об эксперименте. На рисунке 33 представлена панель общего пользования и вид панели в пультовой.

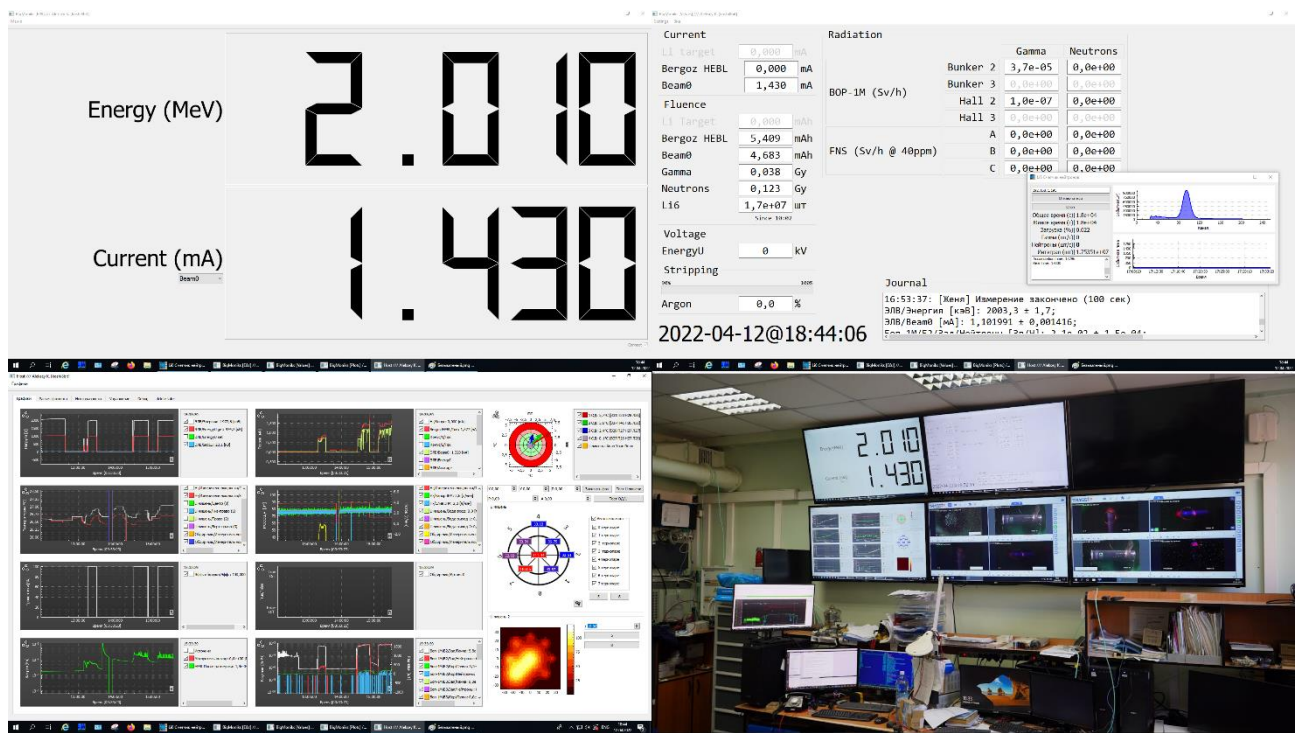


Рисунок 33. Панель общего пользования с общим видом на пультовой.

Панель разделена на три области, на которых отображена информация в разных форматах. На левом верхнем мониторе крупно отображаются два важнейших параметра установки – энергия и ток пучка. На нижнем мониторе – графики, которые отображают изменения значений во времени и несколько диагностик, описанных в пунктах 2.2.3 и 2.2.4. Компонент графика реального времени разработан автором и подробно описан в пункте 2.6.1. На правом мониторе отображаются множество дежурных значений, которые чаще всего интересны в ряде различных экспериментов, такие как

- токи пучка в разных местах;
- накопленные интегралы значений по токам и радиации;
- эффективность обдирки (подробнее в п. 2.2.8);
- серверное дата и время, которое используется во всем комплексе;
- последние записи в журнале эксперимента;
- уровни гамма и нейтронного излучения в разных местах установки.

Программа общего пользования уже используется в международных экспериментах, при помощи которой приглашенные гости понимают текущий статус эксперимента. Последними гостями были команды из CERN и ITER.

## 2.4 ПО физика-аналитика

Для анализа результатов эксперимента физикам приходится обрабатывать значительные массивы данных. Для анализа всех данных, до внедрения разработанной системы, физику-аналитику приходилось:

- 1) собирать файлы с данными разного ПО диагностики;
- 2) объединять все собранные данные в одной Excel таблице;
- 3) синхронизовать разные диагностики по времени;
- 4) восстанавливать последовательность событий во время эксперимента.

Обычно анализ сводится к однотипным действиям: вычисление среднего значения с отображением среднего отклонения; фильтрацией данных по определенным условиям; отображение данных на графике. Обычно такая рутинная работа занимала у физика-аналитика от 2 до 4 часов, а данные о проведенном эксперименте можно было получить только на следующий день, так как файлы можно было получить только после окончания эксперимента вечером.

Ручная компиляция большого объема данных эксперимента из разных программ чревата ошибками в процессе обработки. Для автоматизации этой процедуры в серверное ПО были заведены все диагностики, требующие обработку данных, а также был разработано и внедрено специальное ПО, показанное на рисунке 34.

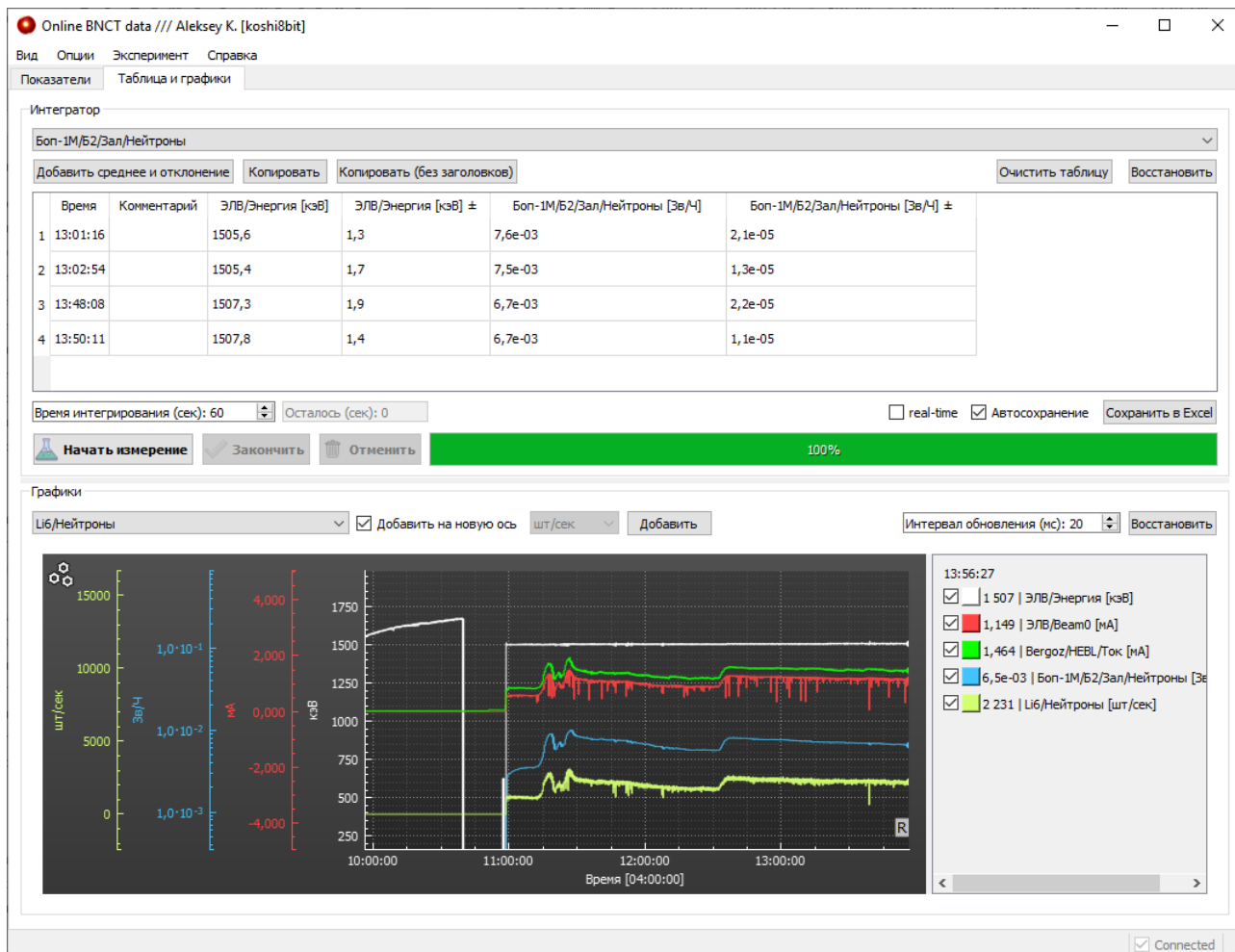


Рисунок 34. ПО физика-аналитика. Показана область усреднения и область отображения данных в реальном времени.

Программа позволяет:

- отображать значения в реальном времени с возможностью добавления любого количества графиков и привязкой к разным осям;
- производить построение зависимости одного канала измерения от другого и отображать погрешность в виде «усов»;
- производить усреднение значений канала во времени по указанным условиям с последующим графическим представлением, учитывающим погрешность изменения;
- производить распределенное ведение журнала с автоматической печатью журнала по окончании эксперимента.

В некоторых экспериментах [36, 37, 38, 39, 40] требовалось проводить анализ данных только по определенному условию. Например, считать среднее

значение гамма излучения, если энергия находится в допустимых диапазонах. Регулярно требуется нормировать показание прибора на ток пучка и только потом выводить его на график. Для этого реализован соответствующий механизм, панель графика и настроек которого представлена на рисунке 35.

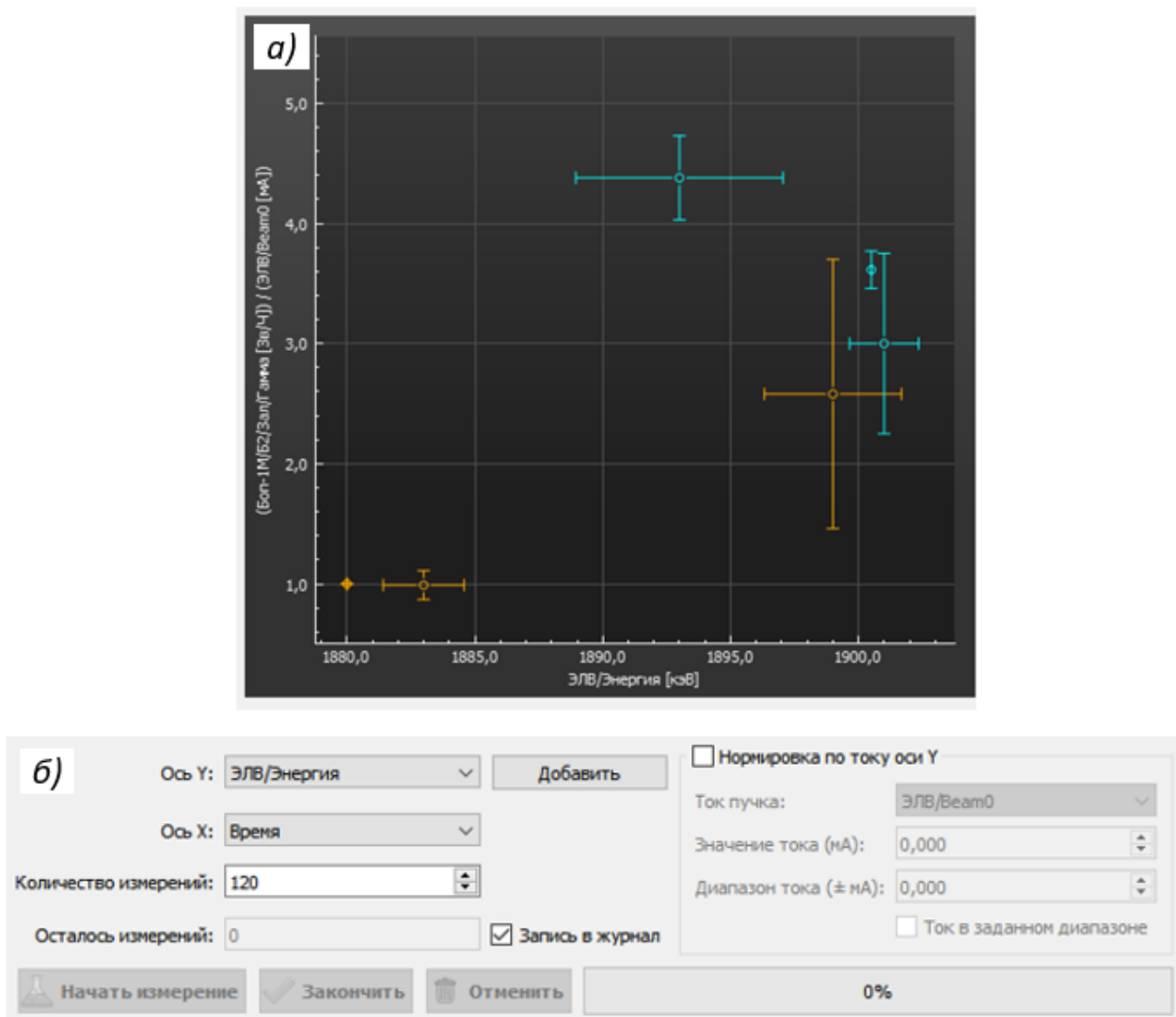


Рисунок 35. Панель построения зависимостей: а) зависимость показаний гамма-детектора (деленного на ток пучка) от энергии пучка; б) панель настроек.

Автоматизируемая установка является экспериментальным устройством, которое постоянно модернизируется и на котором проводится множество экспериментов.

Для восстановления информации о конфигурации эксперимента данные о каждом эксперименте должны быть зафиксированы в цифровом виде и на



бумажном носителе. В процессе эксперимента требуется ведение журнала с различных рабочих мест, так как разные диагностики могут управляться разными людьми с разным ПО. Для этого разработан механизм ведения логов через программу физика-аналитика, в котором отображается время сообщения, имя пользователя и текст сообщения. Подробнее механизм описан в п. 2.6.5.

Инструкция пользователя представлена в приложении Б.

## **2.5 Сервер**

Для обеспечения масштабируемой системы разработано ПО сервера, которое выполняет несколько функций:

- сбор данных с устройств ввода-вывода;
- описание абстракций различных диагностик;
- выполнение различных алгоритмов автоматизации;
- проксирование данных между пользовательскими приложениями и устройствами ввода-вывода;
- Сохранение данных в БД.

Для распространения данных между сервером и клиентами использовались разработанные сетевые переменные (подробнее п. 2.6.3).

### ***2.5.1 Абстракция канала***

На установке измеряется множество показаний и существует десяток каналов управления. Все каналы имеют общие особенности, такие как:

- отображаемое имя в интерфейсе;
- имя в колонке БД;
- метод установки и получения значения;
- возможность «подписки» на событие изменения значения с вызовом callback функции;
- постфикс физической величины.

Для упрощения работы с каналами создан класс, в котором реализованы перечисленные выше характеристики. Реализация позволяет создавать

переменные любого типа данных, но для самых часто используемых реализованы специальные классы. Самыми популярными оказались следующие типы данных:

- 1) значения с плавающей точкой;
- 2) целочисленные;
- 3) булевы;
- 4) строковые.

У первых трех реализована полная совместимость с графиками реального времени (см. подробнее в п. 2.6.1) с возможностью указания цвета серии данных. При обновлении значения автоматически обновляются на графике и в легенде. У первых двух существует возможность представления в экспоненциальной записи. А у значений с плавающей точкой реализована возможность указания количества знаков после запятой в интерфейсе, логах и на графике.

В процессе развития комплекса появилось требование по распространению данных между приложениями. Для этого был реализован механизм сетевых переменных (подробнее в п. 2.6.3). Этот механизм внедрен в абстракцию канала, что упростило реализацию синхронизации данных между программами. В качестве уникального имени переменной используется имя в БД, так как оно тоже уникально.

Для значений с плавающей точкой инкапсулирована возможность перерасчета из «сырых» данных в реальные. Такая функциональность требуется, например, для перерасчета из «сырых» значений измерителя потока (вольты) в физическую величину (литры в минуту). Причем есть две возможности рассчитать истинное значение: 1) вызвать функцию, в которую передаётся минимум и максимум как для сырого, так и для вычисляемого значения, а алгоритм пропорции сам вычислит результаты; 2) указать собственную функцию расчёта.

Кроме того, в классе значений с плавающей точкой реализована возможность расчета среднего значения и стандартного отклонения,

использующее скользящее окно с последними несколькими значениями, размер которого можно настроить в любой момент.

Дополнительно можно указать минимум и максимум допустимых значений. При выходе за пределы этих значений будет показано сообщение в виде рамки (см. подробнее в п. 2.6.2).

### ***2.5.2 Работа с периферийными устройствами (модули)***

Для работы с устройствами ввода-вывода разработана концепция модулей, которая на разных уровнях описывает разную функциональность. Данный подход необходим, чтобы привести все блоки измерения с разными интерфейсами подключения и протоколами к единой системе. Схема абстракции указана на рисунке 36. На самом верхнем уровне описана логика работы любого устройства, например:

- работа каждого устройства происходит в собственном потоке;
- у каждого устройства есть информация о состоянии подключения; при изменении статуса подключения возможно подключить свой callback;
- в постоянном цикле происходит опрос состояния устройства с заданным интервалом. Если устройство оказалось не подключенным, происходит попытка подключения. Подключение описывается на нижних уровнях;
- уникальное имя устройства для идентификации.

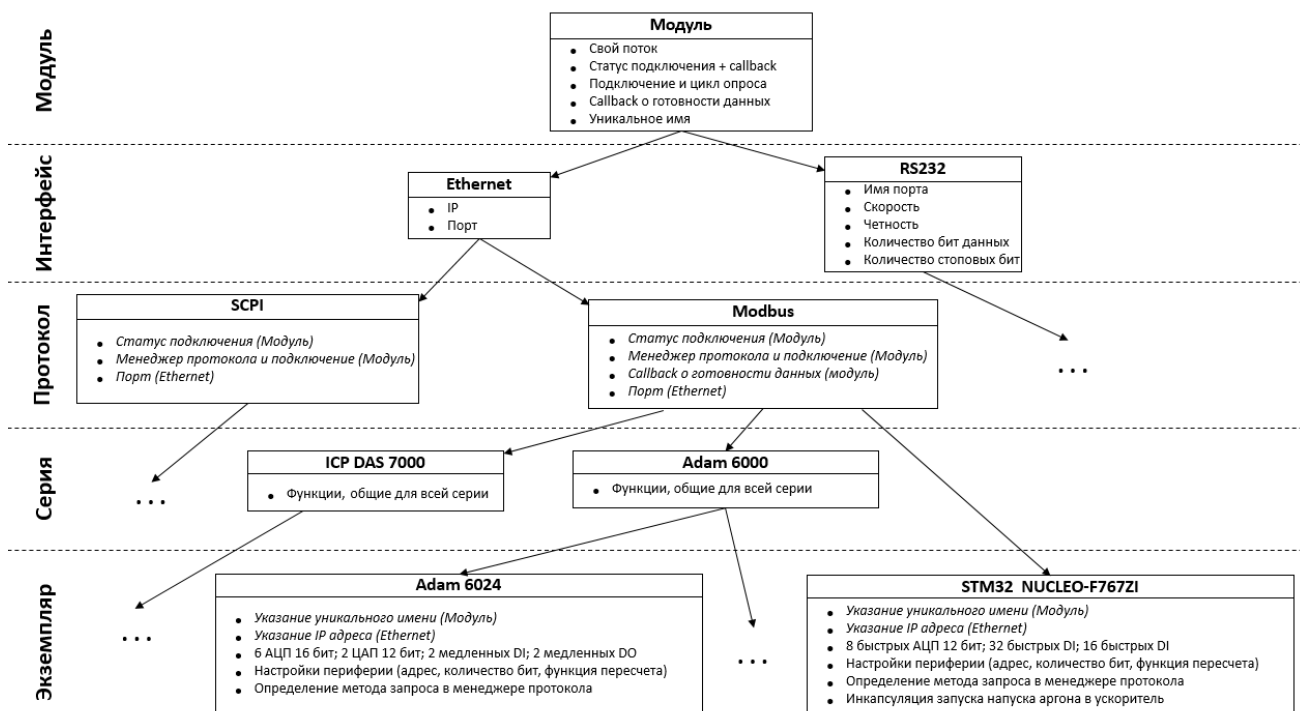


Рисунок 36. Схема абстракции модулей. Для простоты схемы показана только реализация модуля Adam 6024. Курсивом выделена реализация метода или заполнение параметра в родительском классе, а в скобке указано, какого именно.

Следующий уровень описывает работу по разным интерфейсам, таким как Ethernet или RS232. На этом уровне описывается, что для подключения к Ethernet устройству требуется указать IP адрес и порт, а для RS232 такие характеристики, как имя порта, скорость, четность, количество бит данных и количество стоповых бит. Дальнейшее описание будет на примере Ethernet.

Далее описываются разные протоколы, которые работают через интерфейс. Для интерфейса Ethernet определено два протокола: Modbus [41] и SCPI [42]. На уровне протокола описано, какую библиотеку нужно использовать для работы протокола, а также происходит инициализация менеджера протокола, в который передается информация об IP адресе и порте подключения из уровня выше. Также на этом уровне изменяется статус подключения в зависимости от состояния менеджера протокола, описанный в самом верхнем уровне (модуль). Как правило, на этом уровне можно указать порт подключения для уровня выше и не спрашивать порт у пользователя на самом нижнем уровне.

После описываются все производители модулей и их линейки, которые используют описанный выше протокол, например модули фирмы Adam 6000 и 6200, ICP DAS 7000 и собственная реализация Modbus на STM32 (плата NUCLEO-F767ZI, которая использовалась для напуска аргона (п. 2.2.9) синхронизации магнита по энергии в п. 2.2.11). На этом уровне описываются различные функции, которые едины для всех модулей определенной серии. Например, для всех модулей Adam 6000 был реализован механизм пересчета сырого значения АЦП в напряжение, в зависимости от указанного диапазона. На этом же уровне указывается интервал опроса устройства.

Последний уровень – реализация каждого устройства из серии. Например, у устройства Adam 6024 описывается, что у него есть такая периферия, как 6 АЦП, 2 ЦАП, два логических входа и два логических выхода, при этом у каждого интерфейса указываются свои настройки. У АЦП – по какому адресу нужно обратиться менеджеру Modbus и какой метод запроса использовать, а также отмечается количество бит точности и функция пересчета из сырого значения в напряжение из уровня выше. На этом уровне устанавливаются нулевые значения всех в случае пропажи связи с устройством. На этом уровне описывается последовательность опроса или установки значения на периферию и вызов указанной.

Так, для Adam 6024 будет передано минимум параметров для начала работы:

- уникальное имя, которое будет записано в самом верхнем уровне абстракции;
- IP адрес устройства, которое будет сохранено в уровне интерфейса, а будет использовано на уровне протокола;
- указания callback функции готовности данных;
- указания callback функции изменения статуса подключения;
- По необходимости указать настройку периферии (например, диапазон измерения АЦП).

Такая реализация позволяет максимально упростить способ использования периферии и позволяет обращаться к разной периферии единым стандартным способом, скрывая реализацию на разных уровнях абстракции.

Возможное дальнейшее улучшение данного механизма возможно переходом от наследования в ООП к реализации интерфейсов.

## **2.6 Разработка утилит**

### ***2.6.1 Графики реального времени***

На физической установке необходимо наблюдать за изменением трендов значений. Установка БНЗТ является ускорителем, и показания меняются в среднем один раз в секунду. Идеальное состояние установки между включением и выключением – это отсутствие изменений значений на разных диагностиках (прямая линия на графике). Самым удобным способом отображения изменений трендов является график реального времени.

Требования к графику были следующими:

- 1) график должен отображать данные не менее чем за 3 дня, с условием добавления данных 4 раза в секунду;
- 2) частота обновления данных должна быть не менее 10 Гц;
- 3) должна быть предусмотрена возможность изменять цвет у графика;
- 4) должна быть предусмотрена возможность изменять видимость графика;
- 5) должна быть обеспечена возможность переключаться между:
  - а) режимом реального времени, в котором справа отображаются самые свежие данные, а весь компонент графика показывает последние N минут;
  - б) режимом истории, в котором можно отвязаться от реального времени и изучить любой временной промежуток;
- 6) должна быть обеспечена возможность навести курсор на данные в любом времени и получить значение всех измерений в этот момент времени;

- 7) должна быть реализована возможность измерения разницы значений между данными (аналогия с курсорами в цифровом осциллографе) и представлением временного промежутка между данными;
- 8) пользователь должен иметь возможность настраивать оси, а именно: цвет, подпись, количество знаков после запятой, минимум, максимум, а также включать и отключать экспоненциальное представление данных;
- 9) должна быть предусмотрена возможность расположения на форме до 16 графиков для разных физических величин (например, ток и напряжение должны быть отражены на разных графиках для упрощения интерпретации), при этом изменение режимов графика (п. 5, 6, 7) и зума графика должно быть синхронизировано на всех компонентах;
- 10) быстрое создание скриншотов с копированием в буфер обмена или автоматическим открытием в редакторе Paint.

На момент начала создания системы лучшей библиотекой визуализации данных с указанными требованиями для языка C++ и фреймворка Qt являлась QCustomPlot. Эта библиотека позволяет отображать 10 графиков реального времени с частотой 50 Гц на 8 компонентах (всего 80 серий данных) данных за 4 суток, которые занимают в оперативной памяти всего 800 Мб, при условии добавления данных на каждый график 4 раза в секунду.

Готового компонента для использования физиками в библиотеке не было, поэтому был создан собственный компонент. Из готового в библиотеке были реализованы пункты 1 и 2. Все остальное было реализовано автором. Пример разработанной компоненты показан на рисунке 37. В панели общего пользования отображается одновременно восемь графиков реального времени (по графику на физическую величину). Их вид представлен на рисунке

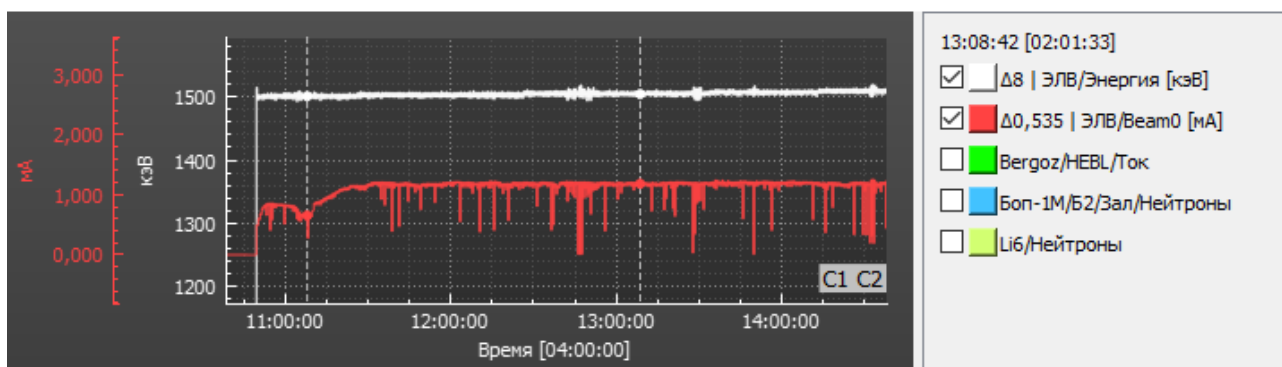


Рисунок 37. Разработанный компонент в режиме сравнения данных в разное время с отображением разницы значений в легенде.



Рисунок 38. Восемь графиков реального времени различных физических величин, синхронизированные между собой.

Для удобства изучения данных на разных графиках был использован механизм синхронизации позиции и размера области отображения серий данных. Это требуется для того, чтобы данные на разных графиках располагались точно друг под другом. Если у одного графика ось данных сдвигается (например, ось настраивается на отображение десяти знаков после



запятой), то и у всех остальных графиков эта область сдвинется и окажется в том же месте. Пример показан на рисунке 39.

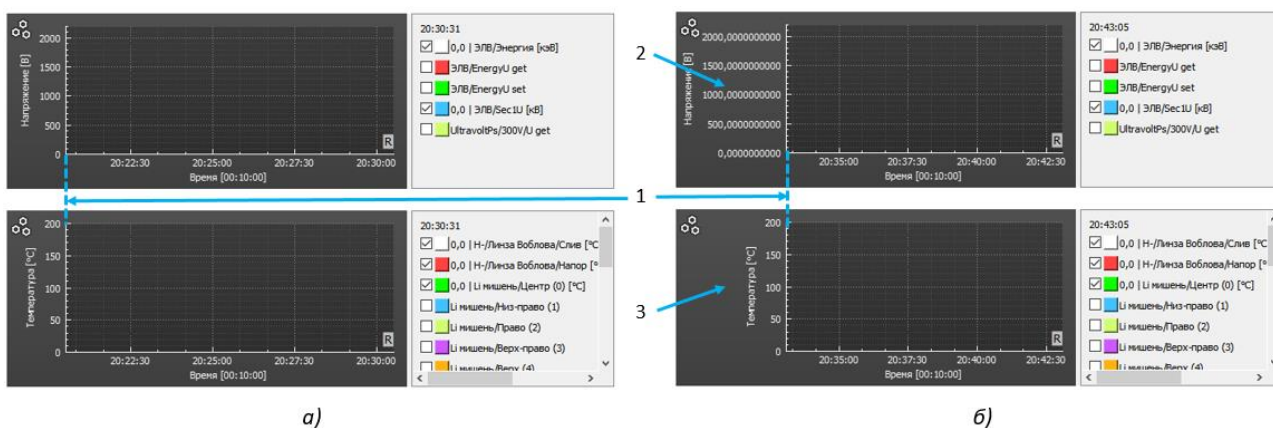


Рисунок 39. Синхронизация области данных. На рисунке количество знаков после запятой на верхнем графике равно: а) нулю; б) десяти. В обоих случаях области данных имеют один размер и синхронизированы по левой стороне (1). Из-за ширины легенды (2) сдвинулась и вторая легенда (3).

При изменении масштаба, режима реального времени или видимости курсоров все восемь графиков меняют режим работы, так как они синхронизированы между собой.

Инструкция пользователя представлена в приложении В.

### 2.6.2 Оповещение об аварии

На физической установке обязательным является механизм, оповещающий о наличии неисправности с расшифровкой сообщения. В первых версиях системы автоматизации был использованы стандартные диалоговые окна (см. рис. 40). В первых двух примерах оператору нужно молниеносно принять решение.

В примере (а) оператору предлагается два варианта: да / нет. Если размер сообщения об ошибке достаточно большой, оператору для выбора варианта ответа, возможно, потребуется дважды перечитать сообщение, чтобы понять контекст ответов, при этом последствия могут быть оценены не адекватно. Также по умолчанию в фокусе выбрана кнопка, которую можно случайно

нажать при помощи клавиш «пробела» или «ввода» на клавиатуре, что может привести к фатальным последствиям.

В примере (б) содержимое кнопок более однозначно указывает на то, к чему может привести то или иное действие, что ускоряет время реакции на событие. Фокус на кнопку по умолчанию изменен на ту, которая не приведет к потере данных в данном примере.

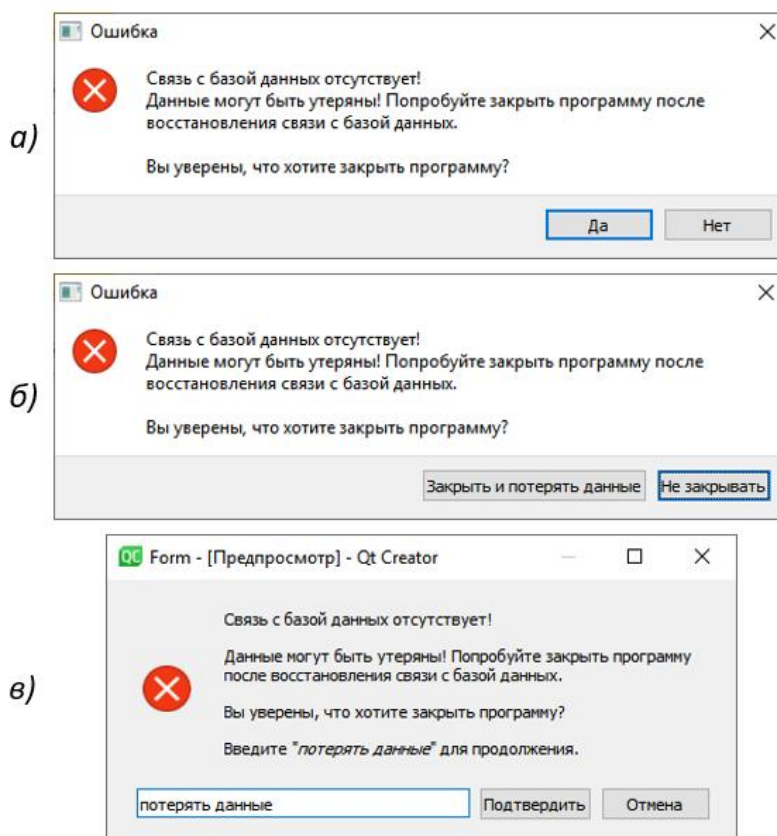


Рисунок 40. Пример диалогового окна с ошибкой: а) неудачный дизайн; б) улучшенный дизайн; в) дизайн, требующий письменного подтверждения от оператора.

Однако для некоторых очень важных сообщений иногда даже таких мер недостаточно. В примере указана проблема потери данных, которая является критической. В таком случае важнее удостовериться в том, что оператор случайно не выберет фатальный вариант в спешке или по ошибке. В таком случае оператору может быть предложено окно (в), в котором требуется ввести текст, явно формулирующий последствия его действий, что заставит задуматься о принятом решении.

В данном примере оптимальным было бы сохранить данные локально на компьютере, а потом загрузить их в БД при появлении связи. Опустим эту возможность, так как здесь рассматривается ожидание действий от оператора непосредственно в момент появления неисправности.

Однако все перечисленные методы лучше всего подходят только для оповещения и ожидания реакции от оператора, но часто возникают ситуации, когда нужно только оповестить оператора. Модальные окна не подходят для этой задачи, так как они блокируют ввод и не позволяют получить доступ к компонентам под окном. Любые компоненты ввода под модальными окнами блокируются. Возможна ситуация, когда во время аварии могут появиться одновременно несколько модальных окон (рис. 41). В таком случае вместо того, чтобы среагировать в интерфейсе программы, потребуется закрыть все окна, на что может быть потрачено недопустимо много времени.

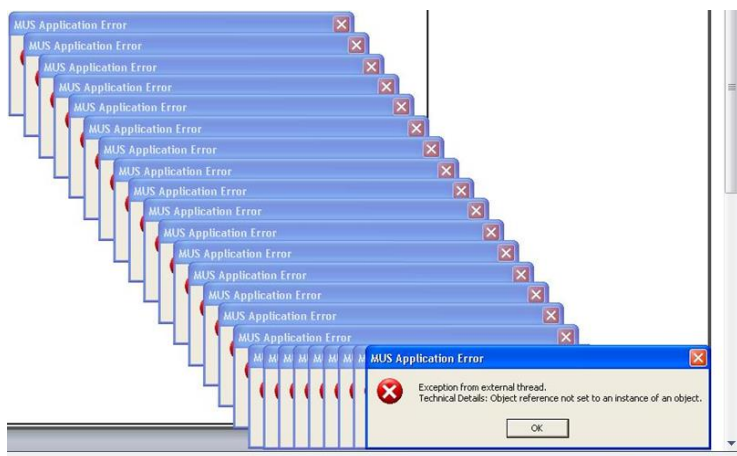
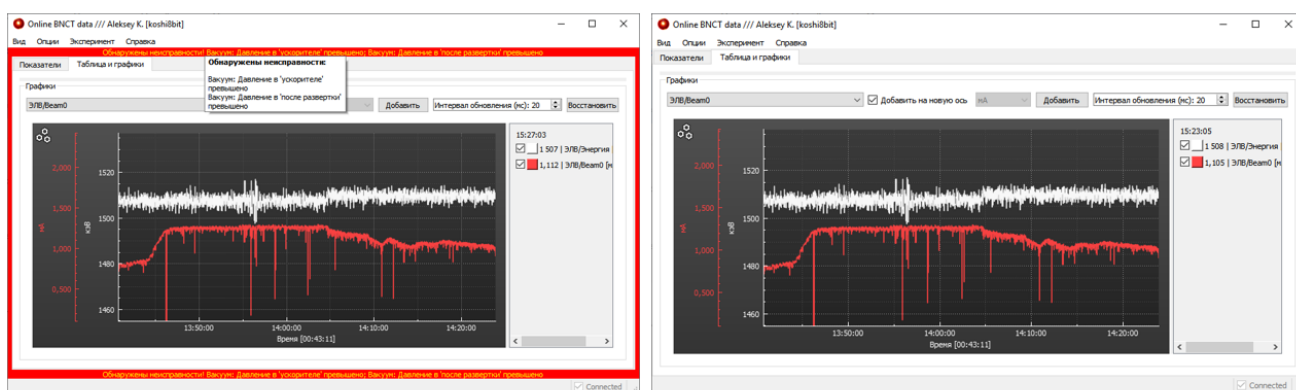


Рисунок 41. Множественные сообщение об ошибке, которые отображены при помощи модальных окон.

Поэтому в работе использован собственный компонент оповещения, который выглядит как красная рамка вокруг панели, в которой отображается сообщение об ошибке. Если текст сообщения не помещается в рамке, его можно прочитать, наведя мышкой на текст (см. рис. 42).



а)

б)

Рисунок 42. Пример системы оповещения: а) на экране показаны две неисправности, с которыми можно ознакомиться, наведя курсор на рамку; б) неисправностей нет.

### 2.6.3 Сетевые переменные

Для синхронизации значений в разработанных программах требовался механизм, который бы обновлял данные во всех программах по каналу Ethernet. В качестве идеи была взята концепция из языка программирования LabVIEW, в котором эта возможность называется «Shared variables» – общие/сетевые переменные (далее – переменные).

Готовой реализации на C++ или Qt не нашлось, поэтому в комплекс автоматизации была внедрена собственная разработка лаборатории, и она показала свою эффективность.

Была выбрана архитектура клиент-сервер. Для создания переменной требуется один раз проинициализировать библиотеку, указав порт для использования на сервере (для клиента требуется дополнительно указать IP сервера) и создать требуемое количество переменных, в конструкторе которых достаточно указать лишь их имя. У всех программ, использующих переменные в конструкторе, должно быть одинаковое имя для идентификации. Значения обновляются во всех программах только при изменении значения для снижения нагрузки на сеть.

Если значение переменной на сервере поменялось, то всем клиентам будет разослано новое значение (рис. 43 а). А если значение поменялось у клиента, то оно посылается на сервер, а потом пересылается всем клиентам

(рис. 43 б). При этом если на сервере нет переменной, которая обновилась на клиенте, это не мешает серверу разослать значение этой переменной всем подключенным к серверу клиентам.



Рисунок 43. Распространение данных. Инициирование обновления переменной происходит: а) сервером; б) клиентом.

В настоящий момент данная разработка не имеет возможность авторизации, поэтому она используется для распространения показаний только от сервера к клиенту. Для установки значения с панели оператора (которая еще находится на стадии разработки) будет использован REST API с авторизацией.

В первой версии для коммуникации был использован UDP сокет из-за простоты реализации и наименьшей временной задержки, однако из-за отсутствия очередности пакетов и невозможности проверки успешности приёма сообщения алгоритм был переписан на TCP сокет.

Разработка протестирована и показала свою эффективность на конфигурации, в которой было:

- 6 клиентских приложений;
- 1 сервер;
- 62 общих переменных;
- время обновления каждой переменной 0.1-0.3 сек.

#### **2.6.4 Интегратор**

Во время проведения эксперимента требуется знать не только текущее значение определенных величин, но и накопленный интеграл. Например, в

качестве «контракта» между биологами или медиками, с одной стороны, и лабораторией БНЗТ ИЯФ СО РАН, с другой, может использоваться интеграл тока протонного пучка, попавшего на  ${}^7\text{Li}$  мишень.

Интегратор полностью совместим с каналами (подробнее в п. 2.5.1), в которых заложена функциональность хранения моментального значения, так и скользящей средней. В конструктор интегратора передается указатель на канал. Интегратор устроен так, что накапливаются моментальные значения в течение секунды, после этого вычисляется среднее и в конце оно добавляется в буфер. Алгоритм повторяется до завершения работы программы.

На данный момент интегратор задействован в 6 каналах, однако при необходимости можно добавить больше каналов.

### ***2.6.5 Журнал эксперимента***

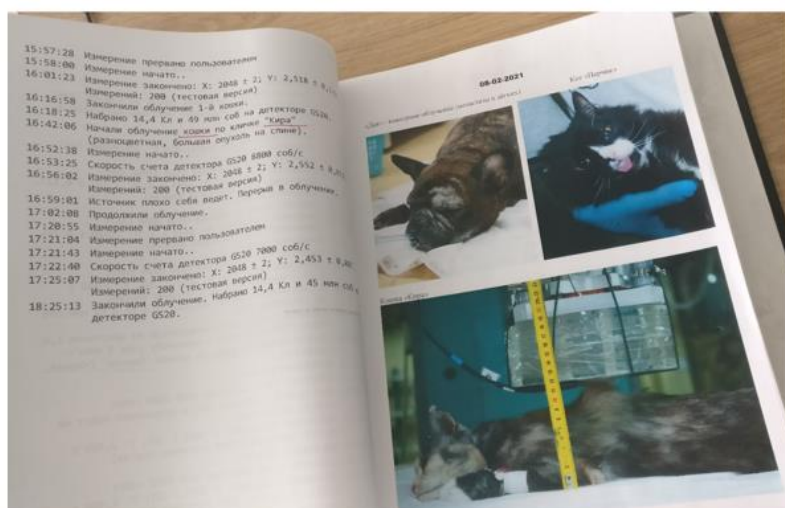
Большую популярность получил механизм распределенного ведения журнала эксперимента, так как достаточно сложно восстановить ход эксперимента только по значениям разных диагностик. Бывают случаи, когда при изучении данных выясняется, что по какой-то причине установка не работала некоторое время. В таком случае физику-аналитику требуется понять, почему это произошло. Синхронизированные записи в электронном и бумажном журнале позволяют решить эту задачу.

За основу алгоритма электронного журнала взят принцип бумажного журнала эксперимента, который ведется на любых физических установках. Недостаток такого бумажного журнала в том, что в фиксированный момент времени его может вести только один человек. Также у ведущего журнал человека должен быть разборчивый почерк, что не всегда соответствует действительности.

Электронный журнал позволяет сохранять текстовые метки в той же базе данных, в которой хранятся параметры ускорителя с привязкой по времени. В данный журнал можно писать любую текстовую информацию из программы оператора или программы физика-аналитика (п. 2.4). После написания

сообщения в журнале оно появляется на панели общего пользования (п. 2.3), панели оператора, во всех подключенных к серверу программах физиков-аналитиков и в БД.

Как оказалось, иногда быстрее и проще найти информацию именно на бумажном носителе. Для этого был разработан механизм печати журнала в конце эксперимента, который в определенном формате печатает все сообщения из журнала с сервера. Печать с сервера позволяет не иметь прямого доступа к принтеру у компьютеров, на которых запущена панель оператора или программа физика-аналитика. Пример журнала показан на рисунке 44 а.



а)



б)

Рисунок 44. Журнал эксперимента: а) фрагмент книги, в которую подшивается журнал; б) толщина журнала (почти 50 мм).

Ведение журнала в таком формате позволяет наполнять журнал не только текстовыми данными, но и фотографиями или графиками. Добавление инфографики реализовано через добавление информации в редакторах Word или Excel или подобных с последующей печатью и подшиванием в общую книгу. Однако такой способ имеет недостаток в том, что общая картина эксперимента с текстом описания шагов эксперимента и инфографикой

находится на бумажном носителе в единственном экземпляре. На момент защиты ВКР этот вопрос удобства ведения и сохранности данных прорабатывается.

Журнал был внедрен 10 февраля 2020 г. и показал свою эффективность. С момента начала ведения журнала его толщина составляет 50 мм, он состоит уже из двух книг (рис. 44 б).

### ***2.6.6 Выгрузка данных эксперимента***

Так как пользователями установки и системы автоматизации являются преимущественно физики, которые в лаборатории БНЗТ чаще всего используют Microsoft Excel для обработки дежурных данных и язык Python для обработки экспериментальных данных, требовалось реализовать выгрузку данных эксперимента в формате, который легко воспринимается обоими инструментами.

Данные представляют из себя таблицу, у которой в заголовке колонок расположены разные диагностики, а в строках – показатели диагностик с интервалом в одну секунду.

Для решения этой задачи сначала был выбран общепринятый для большинства данных такого типа формат CSV [43], который является общепринятым для большинства данных такого типа. Однако использование такого формата в Microsoft Excel оказалось не совсем удобным, так как при импорте файла из CSV требуется проделать несколько шагов для импорта, в которых требуется:

- указать, есть ли разделители в файле, или разбить данные по фиксированной ширине;
- указать, есть ли в файле заголовки;
- указать символ «разделитель» для колонок;
- выбрать формат данных для каждого столбца.

Так как в зависимости от проведенного эксперимента необходимо обрабатывать разные объемы данных, есть вероятность, что физику придется



открыть десяток таких файлов и для каждого файла пройти указанные выше шаги. Для решения этой проблемы сделаны CSV файлы с расширением XLS. В таком случае Excel открывает файл в один клик. Однако Excel по умолчанию использует в качестве разделителя дробной части разделитель системы, которым на большинстве компьютеров с русской локализацией используется запятая. В формате CSV используется точка, из-за чего данные в XSL файле распознаются как строки и нет возможности построить графики или использовать формулы.

В итоге для экспорта данных из системы автоматизации был выбран формат, который использует символы `\t` для разделения столбцов, `\n` для разделения строк и запятую в качестве представления дробной части. Хотя это не вполне соответствует формату CSV, но зато файл можно открыть в Microsoft Excel в один клик. При этом совместимость с библиотеками чтения CSV (например, Pandas) на языке Python не потерялась за счет того, что можно указать все вышеперечисленные разделители при открытии файла.

В процессе эксплуатации обнаружилось еще одно ограничение Excel: в файлах формата XLS возможно наличие максимум 65536 строк. Эта проблема была решена сохранением файла в более новом формате XLSX.

## **2.7 Монтаж**

Кроме разработки программной части автором были произведены работы по внедрению аппаратной части. По поставленным научным проблемам автором было подобрано измерительное оборудование, оно было закуплено и внедрено в стандартные 19-дюймовые стойки, которые тоже были скомплектованы автором. Также разработаны схемы подключения и ТЗ на работу для лаборантов по монтажу оборудования и проводки.

Автоматизируемая установка является источником ионизирующего излучения. В процессе проведения экспериментов обнаружена корреляция между фактом генерации нейтронов и сбоями измерительного и управляющего оборудования, так как нейтроны могут вывести из строя практически любое

устройство, имеющее микропроцессор. Поэтому примерно треть всего измерительного оборудования на установке была вынесена за пределы бункера. Укомплектованная стойка и ее компоненты показаны на рисунке 45.



Рисунок 45. Монтаж измерительных устройств: а) общий вид стойки; б) маршрутизаторы и скомпонованные блоки ввода-вывода; в) внутреннее наполнение 19 дюймового корпуса.

Первоначально автором был предложен монтаж блоков ввода-вывода в монтажных коробах прямо в бункере. Однако из-за причин, описанных выше, корпуса были переукомплектованы клеммными колодками, а устройства ввода-вывода перенесены в стойку в коридоре. Таким образом, в зале с высоким уровнем ионизирующего излучения осталась только коммутация. Обе версии монтажа представлены на рисунке 46.



Рисунок 46. Монтаж в коробах внутри установки: а) первая версия с устройствами ввода-вывода; б) вторая версия без устройств ввода-вывода.

На установке используются специфические устройства диагностики, расположенные в радиационно-защищенном бункере, некоторые из которых имеют в качестве интерфейса связи только USB или RS232/485. Из-за этого сначала для работы с этими диагностиками использовался ПК в непосредственной близости от них (поскольку расстояние ограничено длиной USB-кабеля). Из-за применения в ПК микроэлектроники с техпроцессом в несколько десятков нанометров вероятность выхода его из строя под воздействием ионизирующего излучения достаточно высока, и часто в процессе эксперимента компьютер выходил из строя с «синим экраном смерти».

Для решения этой проблемы были использованы дистанционные интерфейсы USB и RS232/485: USB 2.0 Ranger 2324 MMF Extender и MOXA NPort IA5450A соответственно. Использование таких модулей позволило вынести компьютеры из зоны повышенной радиации и повысить стабильность работы.

## 2.8 Подготовка системы для внедрения в клинику

Перевод установки от статуса экспериментальной в статус медицинской является отдельной задачей, которая не охватывается в полном объеме в данной работе. Однако первые шаги по созданию комплекса автоматизации для

медицинской установки в Национальном медицинском исследовательском центре онкологии им. Н. Н. Блохина в Москве уже сделаны, а именно:

- на основании опыта работы на экспериментальной установке разработан перечень всех устройств и узлов, требующих автоматизации;
- начата разработка технического задания на систему с полным описанием всех алгоритмов;
- сформирован список требуемых узлов ввода-вывода для полной автоматизации ускорителя;
- прорабатываются варианты сертификации оборудования, алгоритмов и схем подключения;
- выбрана аппаратная база нижнего уровня Siemens Semantic S7 1500 или MOXA ioThinX 4500;
- ведется работа по выбору языка программирования верхнего уровня. Рассматриваются варианты использования SCADA систем или реализация собственной системы с использованием языка Kotlin на сервере и фреймворка React на клиентской стороне. Будет учтена простота внедрения нестандартных диагностик с собственным API и возможностью отображения экспериментальных данных разного рода в режиме реального времени, а также возможность тестирования алгоритмов обработки перед внедрением в готовую систему;
- производится анализ систем, работающих в критических условиях (таких как ядерный реактор) или в медицинских учреждениях (таких как рентген-аппарат).

Разработанная система уже хорошо себя зарекомендовала: при помощи созданного комплекса успешно проведены эксперименты на клетках и лабораторных мышах. Кроме того, удалось провести терапию на крупных домашних животных со следующими клиническими случаями [44]:

- 1) кошка с опухолью в области слизистой левого носового хода (лимфома крупноклеточная высокой степени злокачественности);

- 2) кот с опухолью мягких тканей области носа и верхней губы (плоскоклеточная карцинома);
- 3) кошка с опухолью мягких тканей левого бедра;
- 4) собака с опухолью мягких тканей со смещением носовой перегородки и обструкцией носоглотки;
- 5) собака с опухолью мягких тканей с тотальным поражением носовой полости и обструкцией носоглотки (две процедуры облучения);
- 6) кошка с карциномой околоушной железы;
- 7) лабораторные мыши с различными опухолями;
- 8) и еще 4 домашних питомца.

Фото некоторых ветеринарных пациентов, которым была проведена терапия на разработанном комплексе автоматизации, показаны на рисунке 47.

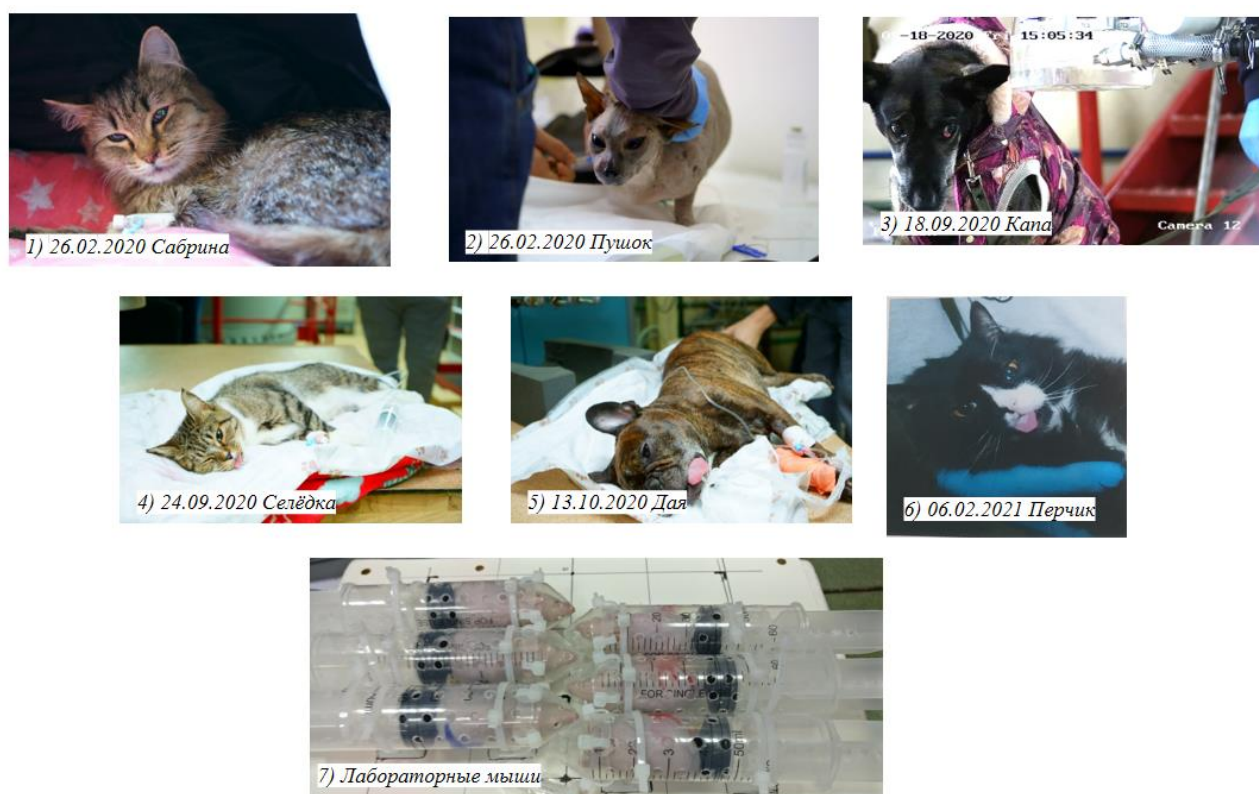


Рисунок 47. Животные, которым была проведена БНЗТ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана программная и аппаратная часть системы автоматизации экспериментального ускорительного источника эпитепловых нейтронов для БНЗТ на базе промышленного оборудования.

Система автоматизации внедрена в ускоритель (имеется акт о внедрении), и система находится в ежедневной эксплуатации. Успешно проведено тестирование системы в условиях электромагнитных помех и ионизирующего излучения в ходе десятков экспериментов.

Решены следующие задачи:

- 1) разработан программно-аппаратный комплекс автоматизации;
- 2) программно-аппаратный комплекс внедрен в работу ускорителя, что позволило провести множество физических экспериментов и терапий на животных;
- 3) упрощена интерпретация данных эксперимента в реальном времени;
- 4) разработана единая база данных для хранения информации об эксперименте.

Результаты работы отражены в 17 коллективных статьях, опубликованных с 2017 по 2022 гг., индексируемых в базах данных Scopus и Web of Sciences, а также в докладе на 60-й Международной научной студенческой конференции (Новосибирский государственный университет, 13 апреля 2022 г.), удостоенном диплома первой степени [45].

В дальнейшем планируется расширять список устройств, управляемых новой системой автоматизации, и разработать язык сценариев для полной автономности ускорителя, как это было предложено в предыдущих работах [46, 47]. Также начата работа по созданию системы автоматизации для медицинской установки в Национальном медицинском исследовательском центре онкологии им. Н. Н. Блохина в Москве.

Выражаю искреннюю благодарность моему научному руководителю Таскаеву Сергею Юрьевичу за помощь в подготовке данной работы и всем сотрудникам лаборатории БНЗТ за поддержку.

Выпускная квалификационная работа выполнена мной самостоятельно и с соблюдением правил профессиональной этики. Все использованные в работе материалы и заимствованные принципиальные положения (концепции) из опубликованной научной литературы и других источников имеют ссылки на них. Я несу ответственность за приведенные данные и сделанные выводы.

Я ознакомлен с программой государственной итоговой аттестации, согласно которой обнаружение плагиата, фальсификации данных и ложного цитирования является основанием для не допуска к защите выпускной квалификационной работы и выставления оценки «неудовлетворительно».

Кошкарев Алексей Михайлович  
*ФИО студента*

\_\_\_\_\_  
*Подпись студента*

20 мая 2022 г.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Sauerwein W. A. G. et al. (ed.). Neutron capture therapy: principles and applications. – Springer Science & Business Media, 2012.
2. Таскаев С. Ю., Каныгин В. В. Бор-нейтронозахватная терапия. – Федеральное государственное унитарное предприятие Издательство Сибирского отделения Российской академии наук, 2016.
3. Таскаев, С. Ю. Бор-нейтронозахватная терапия : [монография] / С. Ю. Таскаев, В. В. Каныгин. - Новосибирск : Издательство СО РАН, 2016. – 216 с. - ISBN 978-5-7692-1500-1.
4. Bayanov B. F. et al. Accelerator-based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1998. – Т. 413. – №. 2-3. – С. 397-426.
5. Кошкарев А.М. Разработка адаптивной системы автоматизации ускорительного источника эпитепловых нейтронов БНЗТ ИЯФ СО РАН. Выпускная квалификационная работа бакалавра, НГУ – Новосибирск, 2017
6. Zaidi L. et al. Beam shaping assembly design of  ${}^7\text{Li}$  (p, n)  ${}^7\text{Be}$  neutron source for boron neutron capture therapy of deep-seated tumor // Applied Radiation and Isotopes. – 2018. – Т. 139. – С. 316-324.
7. Sato E. et al. Radiobiological response of U251MG, CHO-K1 and V79 cell lines to accelerator-based boron neutron capture therapy // Journal of radiation research. – 2018. – Т. 59. – №. 2. – С. 101-107.
8. Taskaev S. Y. Development of an accelerator-based epithermal neutron source for boron neutron capture therapy // Physics of Particles and Nuclei. – 2019. – Т. 50. – №. 5. – С. 569-575.
9. Shoshin A. et al. Qualification of boron carbide ceramics for use in ITER ports // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2019. – Т. 48. – №. 6. – С. 1474-1478.
10. Taskaev S. Y. Accelerator based epithermal neutron source // Physics of Particles and Nuclei. – 2015. – Т. 46. – №. 6. – С. 956-990.



11. Таскаев С. Ю. Ускорительный источник эпитепловых нейтронов : дис.. д-ра физ.-мат. наук // Новосибирск: ИЯФ им. ГИ Будкера СО РАН. – 2014.
12. Badrutdinov A. et al. In situ observations of blistering of a metal irradiated with 2-MeV protons // Metals. – 2017. – Т. 7. – №. 12. – С. 558.
13. Kolesnikov Y. A. et al. Measuring the Current of a Beam of Argon Ions Accompanying a Beam of Protons in a Tandem Accelerator with Vacuum Insulation // Instruments and Experimental Techniques. – 2021. – Т. 64. – №. 4. – С. 503-507.
14. Системы SCADA [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SCADA> (дата обращения: 30.05.2022)
15. Koshkarev A. M. et al. Increasing Quality of Experiment Interpretation in Real-Time // Proc. of the XXVII Russian Particle Accelerator Conference, Alushta, Russia, September 26th-October 2st, 2021, WEPSC33. – 2021. – С. WEPSC33.
16. Фреймворк Qt [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.qt.io/> (дата обращения: 30.05.2022)
17. Библиотека QCustomPlot [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.qcustomplot.com/> (дата обращения: 30.05.2022)
18. Kasatov D. et al. Method for in situ measuring the thickness of a lithium layer // Journal of Instrumentation. – 2020. – Т. 15. – №. 10. – С. P10006.
19. Vykov T. A. et al. A study of the spatial charge effect on 2-MeV proton beam transport in an accelerator-based epithermal neutron source // Technical Physics. – 2021. – Т. 66. – №. 1. – С. 98-102.
20. Nonlinear Least-Squares Fitting [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gnu.org/software/gsl/doc/html/nls.html> (дата обращения: 30.05.2022)
21. Немытов П. И. Стабилизация и контроль основных параметров мощного электронного пучка промышленных ускорителей прямого действия : дис.. канд. физ.-мат. наук // Новосибирск: ИЯФ им. ГИ Будкера СО РАН. – 1997.
22. Немытов П. И. Системы питания и управления серии высоковольтных промышленных ускорителей электронов с мощностью выведенного пучка

- сотни киловатт : дис.. д-ра физ.-мат. наук // Новосибирск: ИЯФ им. ГИ Будкера СО РАН. – 2010.
23. Kolesnikov Y. A. et al. Diagnostics of the Efficiency of a Gas Stripping Target of a Tandem Accelerator with Vacuum Insulation // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2020. – Т. 63. – №. 3. – С. 310-314.
24. Синхронизация поворотного магнита [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=YJ7VPgBvpq0> (дата обращения: 30.05.2022)
25. Porosev V. V., Savinov G. A. Evaluation of boron-enriched plastic scintillator for thermal neutron detection // *Journal of Instrumentation*. – 2019. – Т. 14. – №. 06. – С. P06003.
26. Bykov T. A. et al. A multichannel neutron flux monitoring system for a boron neutron capture therapy facility // *Journal of Instrumentation*. – 2019. – Т. 14. – №. 12. – С. P12002.
27. Bykov T. A. et al. Initial trials of a dose monitoring detector for boron neutron capture therapy // *Journal of Instrumentation*. – 2021. – Т. 16. – №. 01. – С. P01024.
28. Bykov T. A. et al. Evaluation of depth-dose profiles in a water phantom at the BNCT facility at BINP // *Journal of Instrumentation*. – 2021. – Т. 16. – №. 10. – С. P10016.
29. Taskaev S. et al. Neutron source based on vacuum insulated tandem accelerator and lithium target // *Biology*. – 2021. – Т. 10. – №. 5. – С. 350.
30. Aleynik V. et al. New technical solution for using the time-of-flight technique to measure neutron spectra // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2011. – Т. 69. – №. 12. – С. 1639-1641.
31. Алейник В. И. и др. Измерение спектра нейтронов ускорительного источника времяпролетным методом // *Приборы и техника эксперимента*. – 2014. – №. 4. – С. 9-9.

32. Kasatov D. A. et al. A Fast-Neutron Source Based on a Vacuum-Insulated Tandem Accelerator and a Lithium Target // Instruments and Experimental Techniques. – 2020. – Т. 63. – №. 5. – С. 611-615.
33. Taskaev S. et al. Measurement of the  ${}^7\text{Li} (p, p'\gamma) {}^7\text{Li}$  reaction cross-section and 478 keV photon yield from a thick lithium target at proton energies from 0.65 MeV to 2.225 MeV // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2021. – Т. 502. – С. 85-94.
34. Zaboronok A. et al. Gold nanoparticles permit in situ absorbed dose evaluation in boron neutron capture therapy for malignant tumors // Pharmaceutics. – 2021. – Т. 13. – №. 9. – С. 1490.
35. Bykov T. et al. Measurement of the  ${}^7\text{Li} (p, p'\gamma) {}^7\text{Li}$  reaction cross-section and 478 keV photon yield from a thick lithium target at proton energies from 0.7 to 1.85 MeV // Applied Radiation and Isotopes. – 2021. – Т. 175. – С. 109821.
36. Bykov T. A. et al. HIGH FLUX ACCELERATOR-BASED NEUTRON SOURCE // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2021. – Т. 44. – №. 2. – С. 145-147.
37. Bykov T. et al. In situ study of the blistering effect of copper with a thin lithium layer on the neutron yield in the  ${}^7\text{Li} (p, n) {}^7\text{Be}$  reaction // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2020. – Т. 481. – С. 62-81.
38. Bykov T. et al. Measurement of the space charge effect of a negative hydrogen ion beam // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2018. – Т. 2052. – №. 1. – С. 070004.
39. Kasatov D. et al. New Feedthrough Insulator of the Compact Tandem-Accelerator with Vacuum Insulation // 2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). – IEEE, 2018. – Т. 2. – С. 761-764.
40. Bykov T. A. et al. Use of a wire scanner for measuring a negative hydrogen ion beam injected in a tandem accelerator with vacuum insulation // Instruments and Experimental Techniques. – 2018. – Т. 61. – №. 5. – С. 713-718.

41. Протокол Modbus [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.modbus.org/>  
(дата обращения: 30.05.2022)
42. Протокол SCPI [Электронный ресурс]. – URL:  
<https://www.ivifoundation.org/scpi/default.aspx> (дата обращения: 30.05.2022)
43. Формат табличных данных CSV [Электронный ресурс]. – URL:  
<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4180> (дата обращения: 30.05.2022)
44. Kanygin V. et al. In Vivo Accelerator-Based Boron Neutron Capture Therapy for Spontaneous Tumors in Large Animals: Case Series // *Biology*. – 2022. – Т. 11. – №. 1. – С. 138.
45. Кошкарев А.М. Внедрение системы сбора данных и автоматизации и для визуализации экспериментальных данных в реальном времени на установке БНЗТ // *Материалы 60-й Международной научной студенческой конференции*. – Новосибирск. – 10 - 20 апреля 2022, – Сдано в печать.
46. Koshkarev A. M. et al. Development of automation system of the ion source // *24th Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2014*. – 2014. – С. 380-382.
47. Koshkarev A. M. et al. Development and implementation of the automation system of the ion source for BNCT // *XXV Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2016)*. – 2017. – С. 733-735.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### *Схемы синхронизации тока поворотного магнита по энергии*

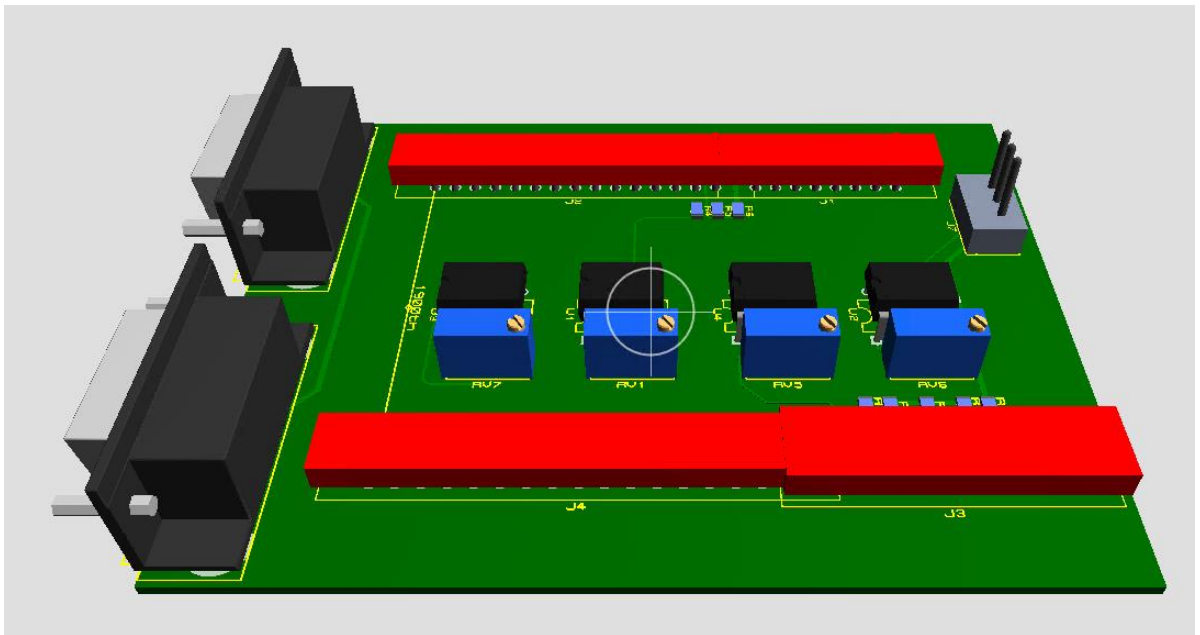


Рисунок 1. Общий вид платы, куда устанавливается контроллер на плате NUCLEO-F767ZI.

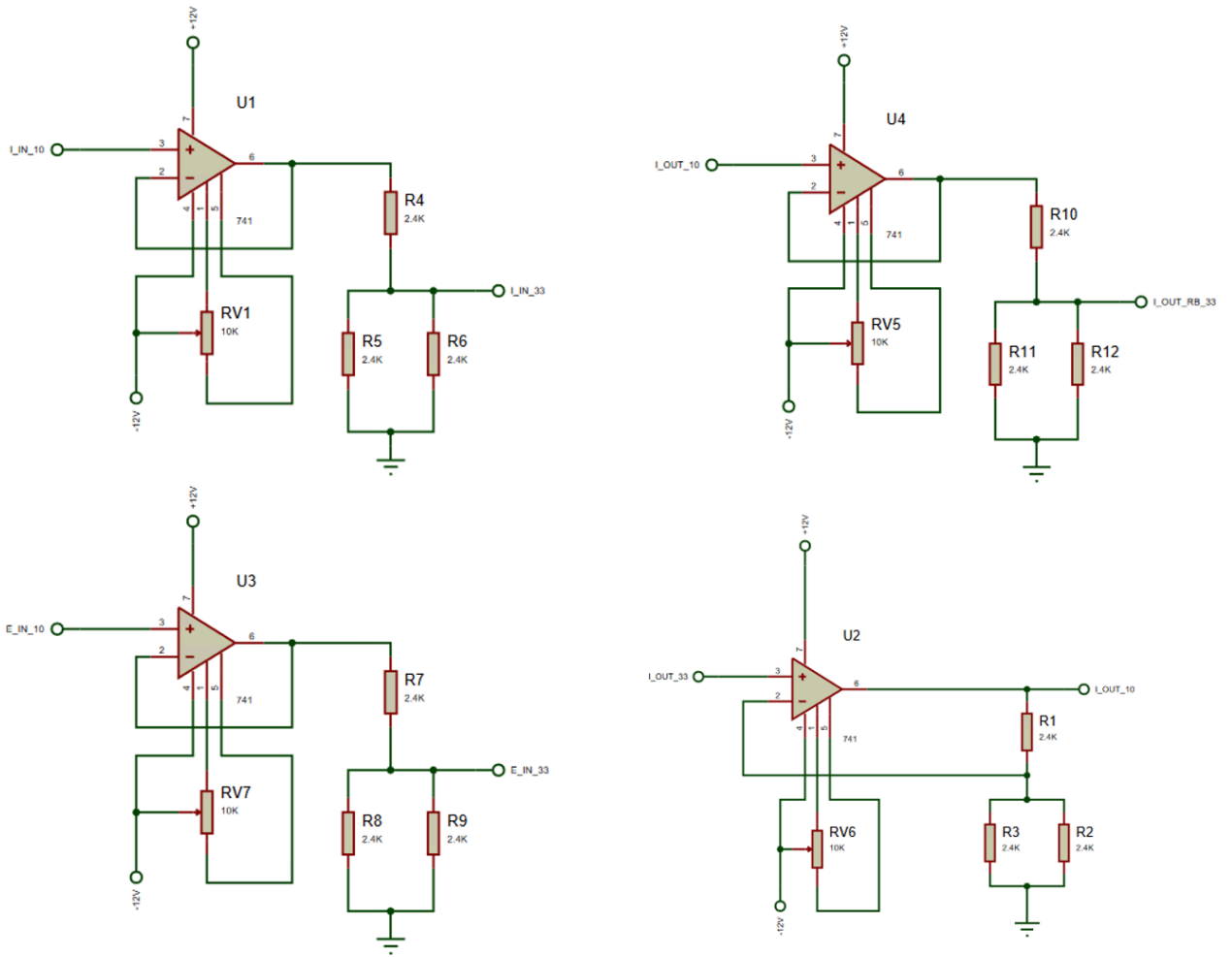


Рисунок 2. Схемы ввода и вывода сигнала.

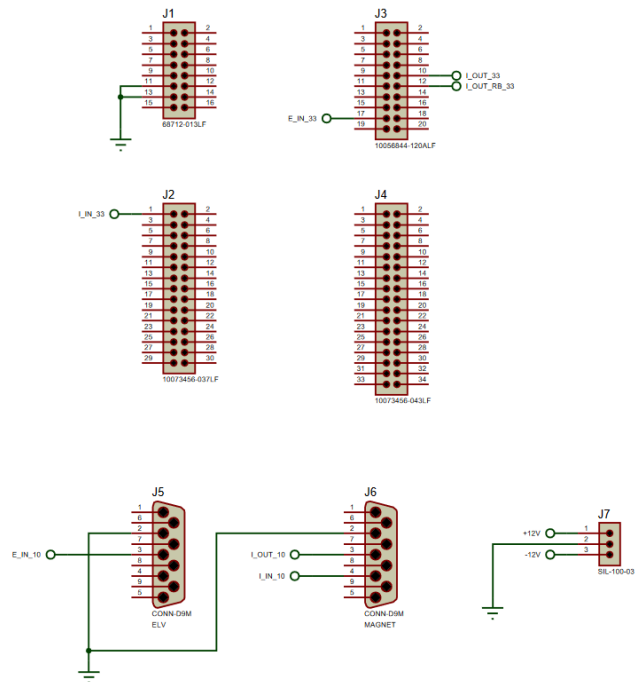


Рисунок 3. Схема коннекторов.

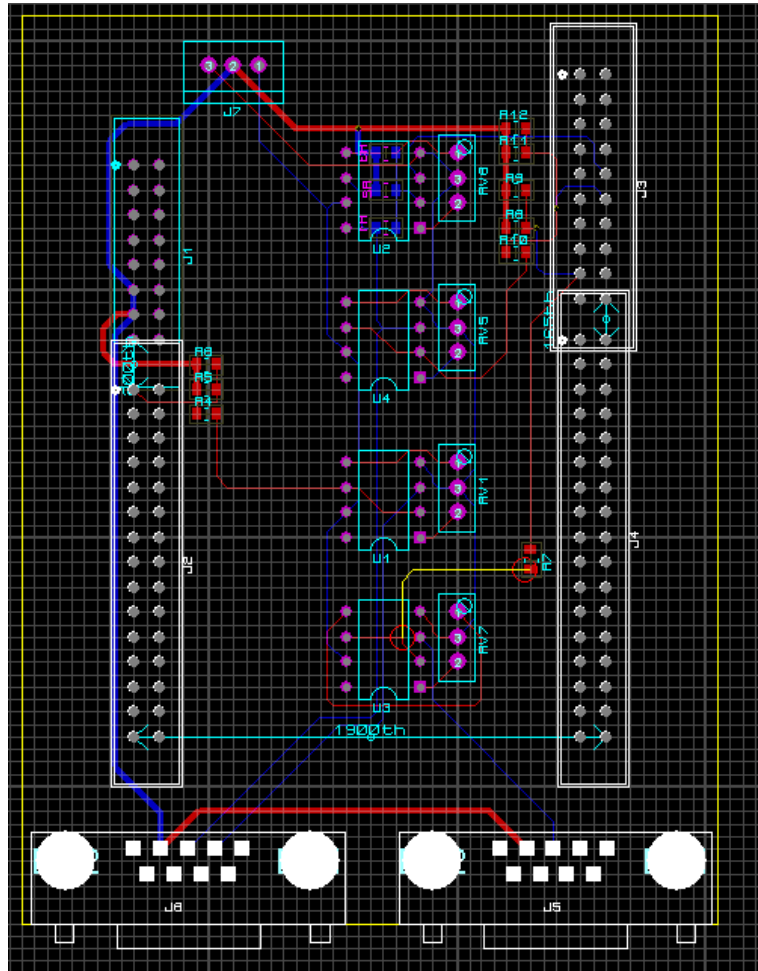


Рисунок 4. Разработанная печатная плата.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### *Инструкция пользователя программы физика-аналитика*

Приложение физика-аналитика создано для упрощения анализа экспериментальных данных. Для запуска приложения устанавливать различные фреймворки не требуется, все необходимое находится в папке с программой. Приложение работает только на платформе Windows 7 и выше. По необходимости автор может скомпилировать версию и для UNIX систем.

Программа состоит из двух вкладок. Первая вкладка служит для ведения и отображения журнала. Панель журнала представлена на рисунке 1.

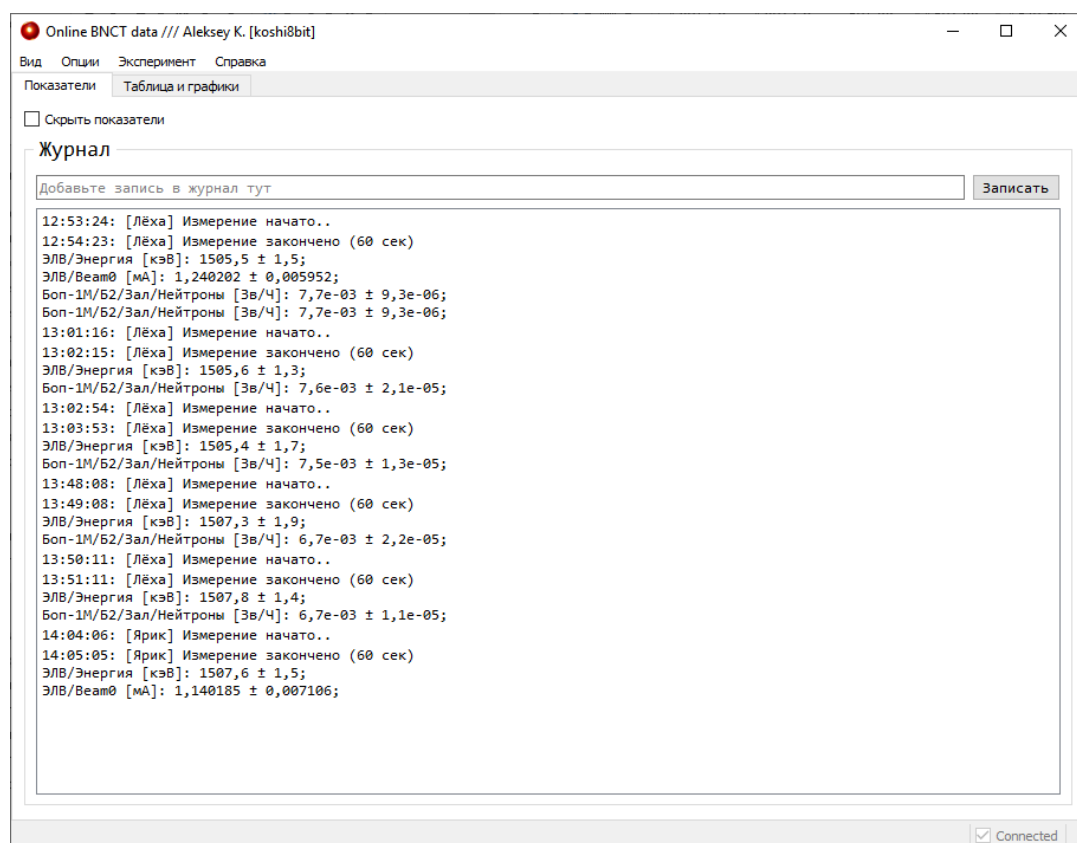


Рисунок 1. Панель журнала.

При первом запуске программа запросит имя пользователя, которое будет отображаться перед сообщением. В любой момент можно изменить имя, выбрав на верхней панели команды *Опции* → *Введите своё имя*.

Для добавления записи требуется ввести сообщение в поле сверху и нажать на кнопку *Записать*. Сообщение появится в журнале ниже и будет



передано на сервер, откуда будет разослано всем остальным клиентам. Программа позволяет распечатать журнал в любой момент, при этом пользователю не требуется устанавливать драйвер на принтер, так как программа лишь посылает команду печати на сервер, на котором уже установлены все драйверы и с которого производится реальная печать журнала. Для печати следует выбрать на верхней панели команды *Эксперимент* → *Печать* или нажать сочетание клавиш *Ctrl+P*.

Во второй вкладке объединено две функциональности: измерение среднего значения вместе со стандартным отклонением и отображение показаний на графике реального времени. Общий вид интерфейса показан на рисунке 2.

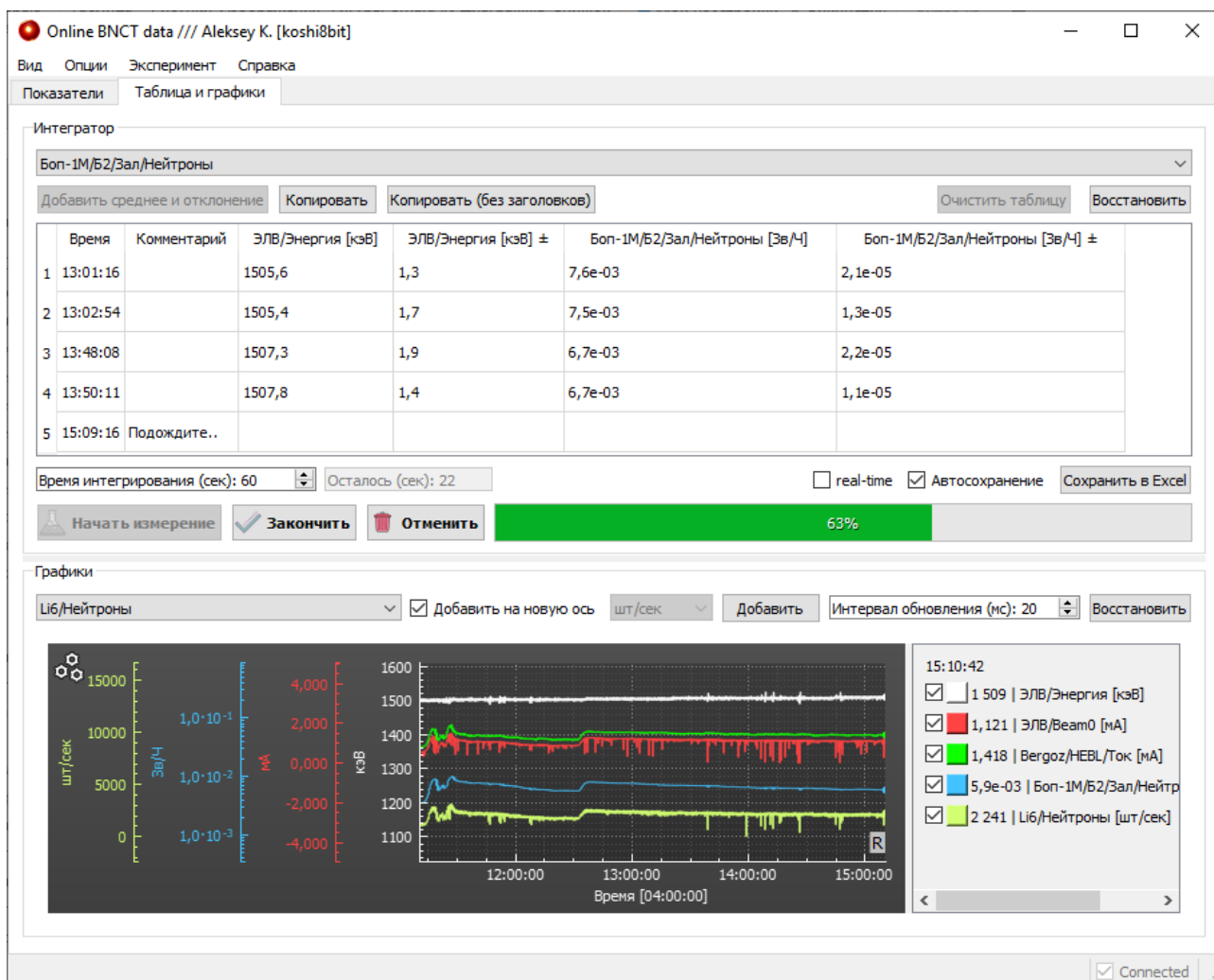


Рисунок 2. Панели вычисления среднего значения вместе с отклонением и графики реального времени.

Рассмотрим подробнее панель вычисления среднего значения и отклонения, которая представлена на рисунке 3.

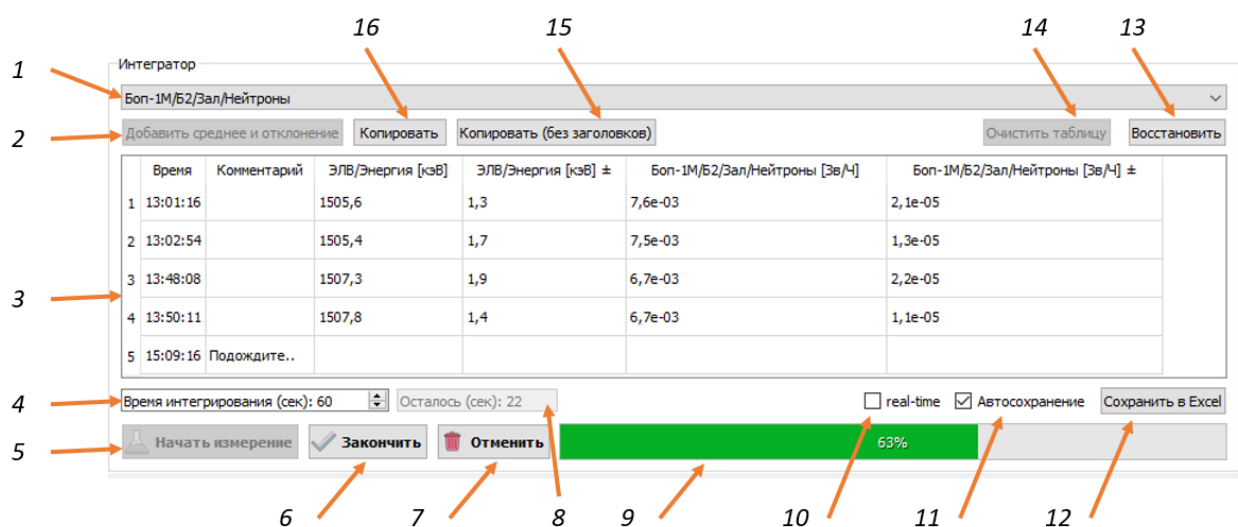


Рисунок 3. Панель вычисления среднего значения и отклонения.

Для добавления канала в таблицу надо выбрать канал в выпадающем меню (1) и нажать на кнопку (2). Если процесс вычисления уже запущен, программа не позволит добавить канал в таблицу, так как кнопка будет заблокирована. В таблице (3) будут отображены все вычисленные значения в нескольких колонках. Колонки *Время* и *Комментарий* присутствуют всегда, в них отображается время начала измерения и комментарий пользователя соответственно. Далее следуют пары колонок: среднее значение и отклонение, которое отображается в таблице как *имя канала* и *имя канала ±* соответственно. Таких пар значений может быть до сотни (более не тестировалось).

Пользователю предоставлена возможность изменять время интегрирования (в секундах) в поле (4). Для запуска следует нажать кнопку (5). Если во время интегрирования пользователь решил, что пора прекратить вычисления, он может воспользоваться кнопкой (6) для досрочной остановки измерений с сохранением результата в таблицу или кнопкой (7) для отмены вычислений и полной потери результата текущего вычисления (данные в таблицу не запишутся). В панели (8) отображается оставшееся время

интегрирования в секундах, а в поле (9) отображается статус вычисления в процентах.

Галочка (10) позволяет отображать результаты вычисления в таблице непосредственно во время измерения. Эта опция удобна для ознакомления с промежуточным результатом в процессе длительного интегрирования. Однако из-за особенностей компонента отображения такая опция не позволяет писать комментарий во вторую колонку, так как значения постоянно обновляются. Галочка (11) позволяет включать и отключать возможность автоматического сохранения результата в файл после каждого измерения. Кнопка (12) сохраняет таблицу (3) в формате Excel в папку, указанную пользователем.

Кнопка (13) служит для восстановления данных в случае сбоя программы или внезапного отключения электричества. Кнопка (14) очищает таблицу, однако эта кнопка не активна в процессе интегрирования.

Кнопки (15) и (16) позволяют копировать выделенную область в таблице в Excel вместе с заголовками или без них соответственно.

По умолчанию в журнал пишутся все измерения при каждом вычислении среднего значения, однако эту опцию можно отключить при помощи галочки в верхней панели *Опции* → *Запись в журнал*.

Теперь рассмотрим панель графиков реального времени, представленную на рисунке 4.



Рисунок 4. Компонент графика реального времени.

Для добавления канала на график следует выбрать его из выпадающего списка (1). Если требуется создать новую ось у для канала, следует включить флажок (2), иначе нужно его выключить и выбрать ось в выпадающем списке (3), к которой привязать график. После настройки осей следует нажать кнопку (4), и канал будет показан в легенде (7), а данные будут отображаться на графике (8).

В случае, если ПК оператора не справляется с отображением графика с интервалом 20 мс, можно увеличить этот интервал до приемлемого уровня при помощи панели (5). Кнопка (6) позволяет восстановить последнюю конфигурацию каналов на графике.

По команде в верхней панели *Справка* отображается краткая информация о программе и авторе, а также версия программы. В качестве версии выбрана дата и время коммита в git репозитории и его уникальный хэш для упрощения поиска исходных кодов в случае исправления ошибок.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### *Инструкция пользователя графиков реального времени*

Компонент отображения данных в реальном времени состоит из двух областей: области данных и легенды. Разработанный график реального времени показан на рисунке 1.

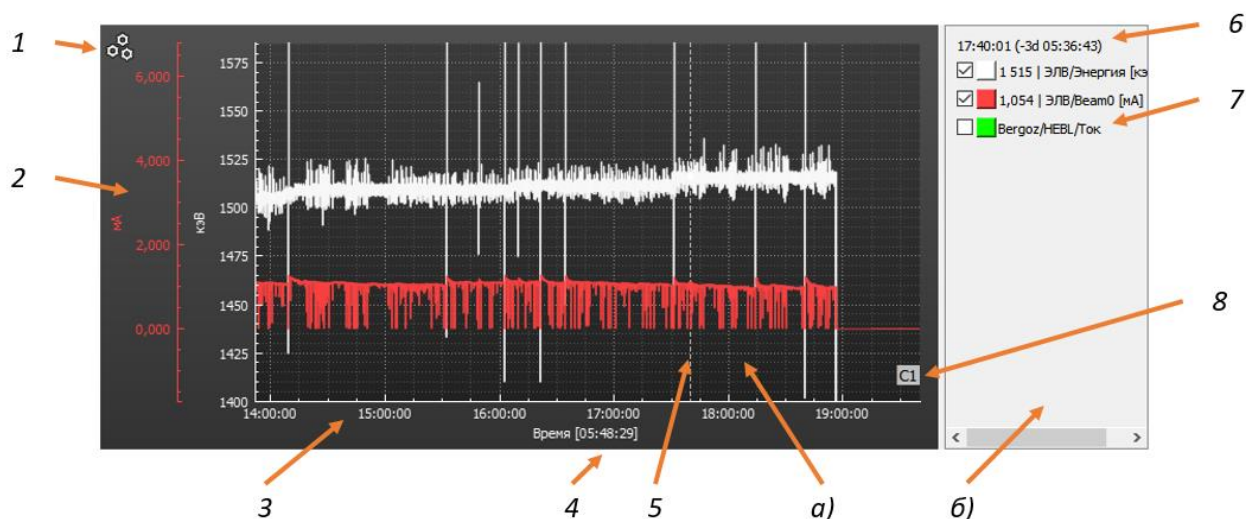


Рисунок 1. График реального времени: а) – область данных; б) – область легенды. 1 – кнопка вызова доп. опций; 2 – область шкал значений; 3 – шкала времени; 4 – «ширина» показываемых значений, на примере она составляет 5 часов 48 минут и 29 секунд; 5 – курсор; 6 – время курсора и его смещение относительно настоящего времени; 7 – серии данных; 8 – индикатор режима.

Для масштабирования осей (2) и (3) требуется навести курсор на ось и крутить колесико мыши. Также возможно сделать двойной клик левой кнопкой мыши (2x ЛКМ) по оси для вызова диалога настроек. Если нажать на правую кнопку мыши (ПКМ), то оси автоматически подстроятся под графики.

Существует два основных режима работы: *realtime* и *свободный*. Режим изменяется двойным кликом мышки (ЛКМ) по области графика (а). В режиме *realtime* показываються только последние несколько минут без возможности прокрутки оси времени, сбоку (8) появится буква R (Realtime). В этом режиме нельзя двигать ось времени влево или вправо, однако можно менять временной диапазон. В режиме *свободный* можно листать график по любым осям без ограничений, буквы R не будет.

По умолчанию в области легенды показывается самое последнее значение в сериях данных. Однако часто необходимо узнать значение в произвольном моменте. Для этого следует активировать курсор нажатием правой кнопкой мыши (ПКМ) по области графика (а), и справа в легенде (б) будет показано значение всех серий данных в позиции курсора. В этом режиме отображается надпись *C1* (Cursor 1) сбоку (в).

Компонент позволяет активировать второй курсор нажатием на колесико мыши (КМ), и это дает возможность посмотреть в легенде разницу между значениями и временем под курсорами, как в осциллографе. Режим второго курсора отображается надписью *C2* (Cursor 2) сбоку. Пример показан на рисунке 2.

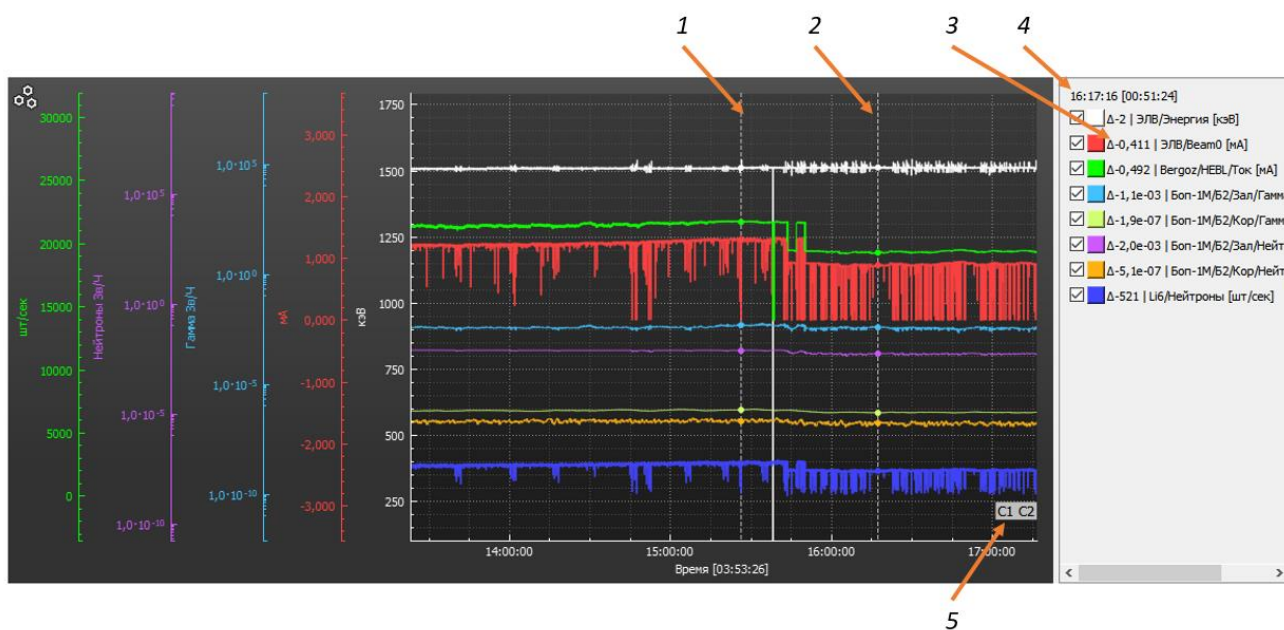


Рисунок 2. Режим двух курсоров. 1 – первый курсор; 2 – второй курсор; 3 – разница значений; 4 – время первого курсора и временная разница между курсорами; 5 – индикация текущего режима.

В легенде можно отключить видимость графика и изменить его цвет. Сверху показано время. В режиме *realtime* показывается текущее время. В режиме *свободный* показывается время первого курсора *C1*, а в круглых скобках указана разница между текущим временем и временем курсора. Если

включены оба курсора *C1* и *C2*, в скобках показывается временная разница между ними.

Диалог настройки оси значений представлен на рисунке 3. Он позволяет:

- менять подпись оси;
- активировать автомасштаб;
- указать количество знаков после запятой на шкале;
- указать минимум и максимум;
- активировать экспоненциальный режим. При этом можно оставить ось в линейном представлении, но с подписью в экспоненциальном формате. Пример показан на рисунке 4;
- изменить цвет оси.

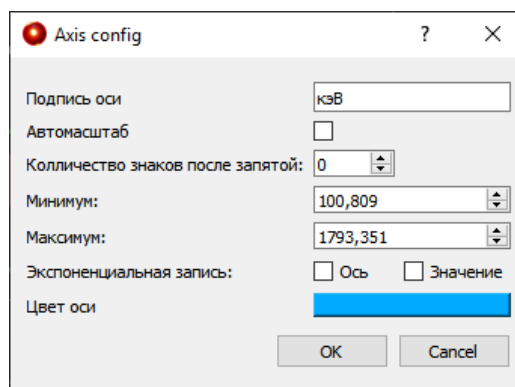


Рисунок 3. Диалог настройки оси значений.

На рисунке 5 отображен диалог настройки оси времени. Он позволяет выбрать стандартные временные интервалы, такие как: 1 минута, 5 минут, 10 минут, 30 минут и т. д. Однако при желании можно настроить интервал в секундах, минутах, часах и днях.

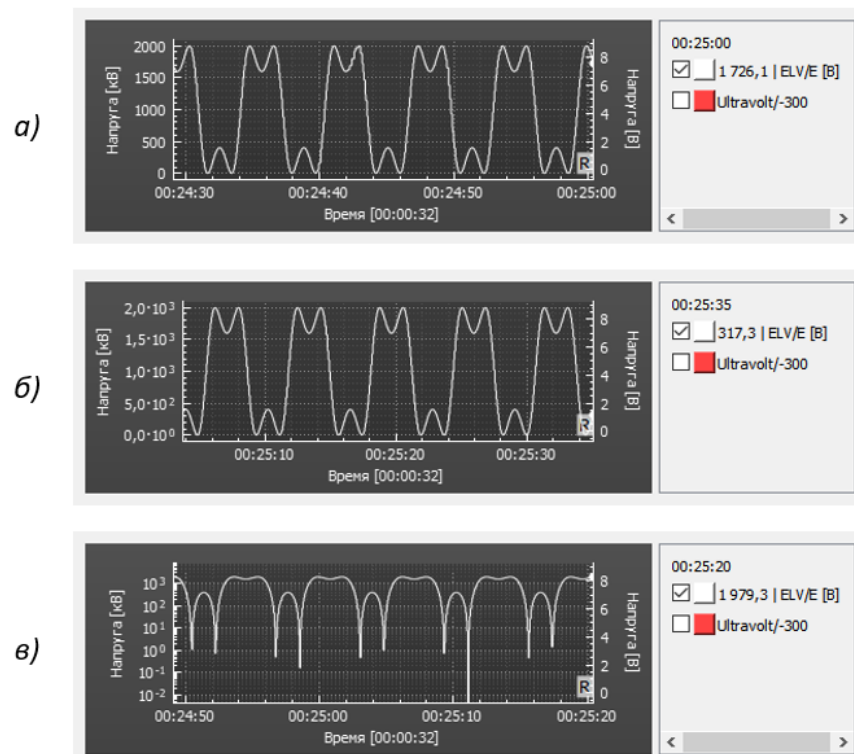


Рисунок 4. Разные режимы левой оси у: а) отображение и подписи в линейном формате; б) отображение линейное, а подписи в экспоненциальном формате; в) отображение и подписи в экспоненциальном формате.

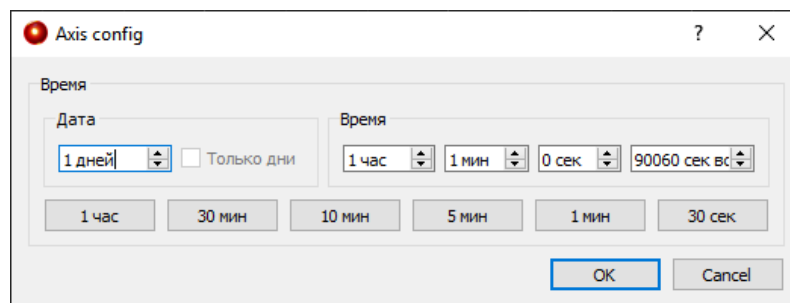


Рисунок 5. Диалог настройки оси времени.



## **ЦВЕТНАЯ ПЕЧАТЬ**

*Авто-генерация номеров страниц*

– TODO Все картинки

25, 28, 34