

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И.БУДКЕРА СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

КАРНАЕВ СЕРГЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
УСКОРИТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ ВЭПП-4
И БУСТЕРНЫМ СИНХРОТРОНОМ
ИСТОЧНИКА СИ NSLS-II**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск-2017

Содержание

Введение	7
Глава 1. Анализ задач и формулировка требований к системе управления ускорительным комплексом.....	12
1.1 Общие задачи и принципы построения системы управления.....	12
1.2 Синхронизация всех подсистем и данных.....	14
1.3 Управление источниками питания	17
1.4 Диагностика пучка	21
1.5 Программное обеспечение (ПО) системы управления	23
1.5.1 Современный подход к построению ПО системы управления...	23
1.5.2 Анализ задач управления, систематизация переменных и объектов управления	26
1.5.3 Нижний уровень ПО: программное обеспечение периферийных контроллеров.....	30
1.5.4 Средний уровень ПО: базовое программное обеспечение	31
1.5.5 Верхний уровень ПО: пользовательские приложения.....	32
1.6 Требования к системе управления	34
Глава 2. Развитие системы управления комплексом ВЭПП-4.....	36
2.1 Краткая характеристика комплекса ВЭПП-4.....	36
2.2 Структура системы и реализованные методы управления.....	40
2.2.1 Эволюция системы управления ВЭПП-4	40
2.2.2 Обеспечение межпроцессорного обмена данными	42
2.2.3 Управление инжектором	45
2.2.4 Управление накопителем ВЭПП-3.....	49
2.2.5 Управление каналом транспортировки пучка ВЭПП 3 – ВЭПП-4М.....	52
2.2.6 Управление коллайдером ВЭПП-4М.....	55
2.2.7 Работа с инжекционным комплексом (ИК).....	58
2.3 ПО системы управления комплекса ВЭПП-4	60

2.3.1 ПО для взаимодействия с электроникой	61
2.3.2 Операторские программы	67
2.3.3 Сервисные программы в одрятах	70
2.3.4 Компоненты системы управления на базе PC под Linux.....	71
2.4 Автоматизация проведения экспериментов	73
2.4.1 Автоматическая настройка инжектора “Позитрон”	74
2.4.2 Автоматизация перепуска пучка из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М.....	75
2.4.3 Работа с выведенными пучками	79
2.4.4 Сканирование по энергии при наборе статистики на детекторе “Кедр”	80
2.4.5 Стабилизация энергии коллайдера ВЭПП-4М.....	81
2.4.6 Автоматизация набора светимости	82
Глава 3. Структура системы управления бустера NSLS-II.....	84
3.1 Краткая характеристика параметров синхротрона, детализация задач управления.....	84
3.2 Анализ современных систем управления электронными синхротронами и формулировка требований к управлению бустером NSLS-II	91
3.3 Выбор и компоновка оборудования для системы управления.....	94
3.3.1 Принципы выбора и компоновки оборудования	94
3.3.2 Схема компьютеров и электроники	97
3.4 Система синхронизации	101
3.4.1 Принципы построения системы синхронизации	101
3.4.2 Оборудование системы синхронизации	105
3.4.3 Организация цикла бустера	106
3.4.4 Синхронизация данных	106
3.5 Управление источниками питания бустера.....	109
3.5.1 Методика управления источниками питания.....	109

3.5.2 Двухкомпонентная схема контроллеров: контроллер цифровых интерфейсов и контроллер аналоговых интерфейсов	114
3.5.3 Управление источниками питания постоянного тока	119
3.5.4 Управление импульсными системами	123
3.6 Управления вакуумной системой и системой защитных блокировок	128
3.7 Оборудование и электроника для диагностики пучка	133
Глава 4. Реализация алгоритмов управления бустером на уровне базового ПО	140
4.1 Использование EPICS. Иерархия уровней ПО бустера	140
4.2 Конфигурация ИОС	145
4.3 Взаимодействие с PSC	149
4.3.1 Контроль формы и амплитуды функции управления	149
4.3.2 Формирование переходной функции	150
4.3.3 Размагничивание корректоров	151
4.4 Мониторинг значений параметров источников питания. Индикатор состояния параметра	152
4.5 Оптимизация архивирования значений переменных	155
4.6 Выборки сигналов	156
4.7 Измерение импульсных сигналов	157
4.8 Обработка измерений с пикапов	158
4.9 Работа с промышленными контроллерами	161
Глава 5. Инженерные и операторские приложения для управления элементами бустера	163
5.1 Упорядочивание доступа к пользовательским приложениям. Главное меню запуска	163
5.2 Приложения для диагностики оборудования и систем	164
5.3 Комплекс приложений для работы с источниками питания	168
5.3.1 Принципы построения, стартовая панель	168

5.3.2	Основной экран, визуализация текущих значений параметров..	170
5.3.3	Долговременные наблюдения измерений	172
5.3.4	Особенности работы с импульсными источниками питания.....	173
5.3.5	Функции по обработке и сохранению данных.....	173
5.4	Приложение для управления элементами бустера	175
5.4.1	Требования на разработку приложения.....	176
5.4.2	Инструменты главного окна	177
5.4.3	Реализация функций приложения	179
5.4.4	Специальные возможности для управления отдельными элементами	182
5.4.5	Сохранение/восстановление данных и загрузка режима в устройства	183
5.5	Управление группами элементов	184
5.6	Управление энергией ускоренного пучка.....	185
5.7	Автоматизация управления бустером.....	187
5.7.1	Приложение для автоматической коррекции замкнутой орбиты	187
5.7.2	Система автоматической подстройки параметров элементов синхротрона.....	190
5.8	Интеграция сторонних приложений	193
Глава 6. Сервисные операторские приложения		
	системы управления бустером	195
6.1	Приложение для сохранения/восстановления режимов	195
6.1.1	Функциональные возможности, заложенные в разработку системы сохранения/восстановления режимов.....	195
6.1.2	Списки имен PV и сохраненных режимов. Главное окно приложения	197
6.1.3	Процедуры сохранения и восстановления	200
6.1.4	Просмотр режима.....	201
6.1.5	Сравнение режимов	202
6.1.6	Запись операций.....	203

6.2 Операторские экраны отображения состояния бустера и его систем.....	204
6.3 Приложение для визуализации и сравнения значений параметров бустера.....	209
6.4 Мониторинг параметров элементов бустера.....	211
6.4.1 Сигнальный статус параметра в EPICS	211
6.4.2 Задачи и структура системы мониторинга бустера.....	213
6.4.3 Система модификации индикаторов состояния параметров.....	215
6.4.4 Монитор состояния элементов бустера.....	217
6.5 Приложения для диагностики пучка.....	221
Заключение.....	226
Список сокращений.....	230
Список терминов.....	233
Литература.....	234
Приложение 1. Список программ системы управления ВЭПП-4.....	245
Приложение 2. Схемы комплекса источника СИ NSLS-II.....	251
Приложение 3. Оборудование системы управления бустера.....	254

Введение

Крупные комплексы ускорителей заряженных частиц являются важными поставщиками знаний в области науки и технологий. Они состоят 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. Более того, необходимость решения новых задач управления крупными ускорительными комплексами зачастую подталкивает развитие этих отраслей знаний и технологий.

Современный подход к управлению ускорителями, определяемый все возрастающими требованиями на качество управления (например, точность управления, эффективность доступа к данным), предполагает контроль многочисленных параметров физической установки в их взаимосвязи друг с другом, т.е. требуется непрерывное синхронное управление многими элементами и измерение многих параметров во время работы систем ускорителя. 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.

Понимание и систематизация процессов управления ускорительной установкой играет важнейшую роль для правильной постановки задач при разработке ее системы управления. С одной стороны, при управлении различными крупными установками приходится решать сходные задачи по обеспечению их работоспособности: задание согласованных режимов работы устройств, мониторинг параметров устройств и пучка, сохранение текущего состояния контрольно-измерительных параметров и т.п. С другой стороны, каждый крупный ускорительный комплекс или электрофизическая установка представляют собой набор уникальных, нестандартных устройств и систем,

требующих создания специальных методов и аппаратуры для их управления, в разработку которых, как правило, вовлекается большое число специалистов различного профиля: физиков-ускорительщиков, инженеров-электронщиков, программистов. На этом фоне очень важна четкая формулировка требований, которым должны удовлетворять алгоритмы, использующиеся в системе управления.

Первая глава диссертации содержит анализ и формулировку требований на управление крупной ускорительной установкой, включая требования на программное обеспечение (ПО), выработанных автором на основе опыта, полученного при создании и развитии системы управления [1, 2, 3] ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4 [4, 5, 6], построенного в ИЯФ СО РАН.

Вторая глава диссертации содержит изложение результатов работы, выполненной в процессе эксплуатации и развития системы управления ВЭПП-4. Комплекс ВЭПП-4 предназначен для проведения экспериментов по физике высоких энергий, ядерной физике с использованием электронных и позитронных пучков, а также экспериментов с использованием синхротронного излучения (СИ) [7]. В ходе многолетней работы на комплексе было выполнено большое число разнообразных экспериментов, потребовавших использования уникального оборудования и реализации сложного взаимодействия ускорительных установок. Для управления установками и процессами проведения экспериментов автором было разработано множество новых и уникальных способов взаимодействия с аппаратурой, обработки данных, визуализации, архивирования и т.п.

В течение 2010-2014 годов ИЯФ разработал, изготовил и ввёл в эксплуатацию бустерный синхротрон (бустер) [8, 9] для источника синхротронного излучения NSLS-II [10] в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL, США). Под руководством автора для бустера была разработана система управления, при создании которой были применены и развиты в новом качестве (с использованием современной электроники и компьютеров) многие методики, наработанные на комплексе ВЭПП-4. Бустер NSLS-II обеспечивает ускорение пучка от энергии инжекции 200 МэВ до 3 ГэВ за

300 миллисекунд. При этом система управления обеспечивает непрерывный контроль и мониторинг всех параметров источников питания и пучка с частотой 10 кГц. Такой подход позволил реализовать эффективный и надежный процесс ускорения пучка и перепуска его в основное кольцо NSLS-II. Автор в диссертации подробно описал часть работы, связанную с созданием системы управления бустера, потому, что это современная система, опыт разработки и эксплуатации которой будет полезен для создания новых систем управления.

Третья глава диссертации содержит описание структуры системы управления бустера и изложение основных принципов и методик, использованных для ее построения.

Следующие главы содержат описание ПО. ПО системы управления делится на две части. Первая часть – это базовое ПО (серверные приложения), выполняющее взаимодействие с оборудованием, первичную обработку данных и реализующее различные методики, связанные со спецификой задач управления. Вторая часть - прикладное ПО, предоставляющее графические средства для управления бустером и отображения информации, а также средства для сохранения и восстановления данных.

Четвертая глава диссертации включает описание методов управления, реализованных на уровне базового ПО. Для создания системы управления NSLS-II используется программная платформа EPICS [11], что определяет архитектуру ПО и средства для его разработки. В процессе создания системы управления бустера на уровне базового ПО был реализован ряд взаимосогласованных решений по сбору и синхронизации измерительных данных, по подготовке и загрузке в аппаратуру управляющих массивов, по обеспечению непрерывного мониторинга параметров.

Пятая глава содержит описание инженерных приложений и приложений для оперативного управления элементами бустера. Эти две группы приложений являются ключевыми в процессе настройки устройств и последующей отладки установки в целом.

В шестой главе описан комплекс приложений для выполнения различных сервисных функций, выполняемых как оператором, так и в автоматическом режиме, обеспечивающих стабильную регулярную работу бустера: сохранение/восстановление режимов работы, мониторинг параметров, визуализацию состояния бустера и его систем.

В заключение автор подводит итоги проделанной работы и делает выводы о возможности использования полученных результатов для дальнейшего развития систем управления крупными электрофизическими установками.

В тексте диссертации используются сокращения и специфические термины, списки которых приводятся в конце работы. За ними следуют три приложения, содержащие информацию о программном обеспечении комплекса ВЭПП-4, общие схемы комплекса NSLS-II и его инжектора, а также сведения об оборудовании, используемом в системе управления бустером.

Автор руководил или принимал непосредственное участие в разработке всех аспектов систем управления, описанных в данной диссертации, что дает ему основание проанализировать найденные решения, обобщить полученные результаты в виде законченной научной работы.

На защиту автором выносятся следующие положения:

1. Разработана и реализована уникальная структура программно-аппаратного комплекса системы управления ВЭПП-4, включая компоновку контрольно-измерительной аппаратуры и создание программного обеспечения.
2. Впервые предложены и реализованы способы управления ускорительными установками комплекса ВЭПП-4, обеспечивающие возможность для эффективного проведения экспериментов по физике высоких энергий и ядерной физике с использованием пучков электронов и позитронов, а также экспериментов с использованием СИ.
3. Исходя из практических результатов работ по созданию и эксплуатации системы управления комплекса ВЭПП-4, сформулированы общие требования и принципы построения системы управления сложным ускорительным комплексом.

4. На основе анализа возможностей электроники и вычислительной техники, а также следуя сформулированным принципам построения, предложена и реализована схема распределенной системы управления бустера NSLS-II, включающая в себя как специально разработанные устройства для управления и диагностики, так и средства промышленной автоматизации.
5. В соответствии со сформулированными принципами создано ПО системы управления бустера, включающее необходимые базовые программные средства и набор инженерных и операторских программ.
6. Исходя из анализа возможностей аппаратных и программных ресурсов, а также сформулированных требований на управление бустером, предложены и реализованы эффективные алгоритмы для управления источниками питания, для измерения и получения из аппаратуры диагностических данных и их on-line обработки.
7. Впервые создана система тотального непрерывного мониторинга в течение цикла работы бустера, автоматически выявляющая отклонения любых параметров и обеспечивающая визуализацию процесса.
8. Впервые создана гибкая универсальная система сохранения, восстановления и сравнения значений параметров бустера. Система оперирует как со скалярными значениями, так и массивами значений сигналов, описывающими поведение параметров в течение всего цикла работы бустера.

По теме диссертации опубликовано около 100 научных работ, в том числе, более 20 работ - в реферируемых журналах, отмечаемых в Web of Science и Scopus, и более 50 работ представлены на международных научных конференциях.

Глава 1

Анализ задач и формулировка требований к системе управления ускорительным комплексом

1.1 Общие задачи и принципы построения системы управления

Ускорительные комплексы относятся к классу сложных объектов управления, характеризующихся большими размерами, разнообразными режимами работы, большим числом параметров и критериев управления, неполнотой контроля внешних и внутренних факторов, влияющих на характер работы в целом и на состояние отдельных элементов установки, наличием различного рода помех. В этой связи при управлении ускорительным комплексом приходится иметь дело со следующими обстоятельствами и факторами:

- работа со многими распределенными точками контроля и процессами,
- работа аппаратуры и ПО в реальном времени: в определенные моменты времени и с привязкой к конкретным событиям,
- синхронизация процессов и данных: обеспечение меток времени, индикация циклов,
- обмен большими объемами данных с периферийными электронными устройствами,
- большой объем сетевого трафика, множество протоколов, необходимость обеспечения расширения системы новыми компонентами,
- необходимость автоматизации взаимодействия многих процессов,
- необходимость использования обратных связей,
- использование централизованных сервисов: для сохранения-восстановления состояния систем, архивирования данных и логов операций, сигнализации неисправностей, распознавания имен,
- запись текущих данных для восстановления ситуации в случае аварии (post-mortem data), отключения питания,

- использование баз данных для конфигурирования системы управления, для хранения данных о состоянии установки,
- необходимость статистической обработки данных: контрольно-измерительных данных, данных о действиях, совершенных приложениями и оператором,
- организация доступа (кто, что и откуда может делать).

При построении систем управления сложными объектами необходимо следовать принципам иерархичности, унификации, интегрируемости и открытости. Соблюдение указанных принципов подразумевает разбиение системы по вертикали на уровни согласно специфике выполняемых задач (например, уровень принятия решений и исполнительный уровень), использование однотипных узлов, деление системы на отдельные, по возможности, независимые части (например, по функциональному назначению) с использованием универсального интерфейса для их взаимодействия, применение на всех уровнях модульного подхода к построению структуры, доступность и достоверность документации. Эти принципы касаются построения системы управления в целом, и относятся к аппаратной и программной ее частям. В настоящее время классической считается трехуровневая архитектура системы управления: верхний уровень компьютеров, где работают приложения управления, средний уровень, взаимодействующий с устройствами и выполняющий запросы на управление от приложений верхнего уровня, и нижний уровень – уровень устройств.

Функционально систему управления любым ускорительным комплексом можно разбить на несколько типичных подсистем, каждая из которых имеет свои особенности управления: магнитную систему, систему синхронизации, систему ВЧ, импульсные устройства, высоковольтные устройства, различные вспомогательные инженерные системы (вакуум, охлаждение, термоконтроль), диагностику пучка. Ниже в данной главе анализируются требования к наиболее критичным подсистемам, качество работы которых определяет функциональные возможности работы ускорительного комплекса с пучками: к системе

синхронизации, системе управления источниками питания и системе диагностики пучка.

1.2 Синхронизация всех подсистем и данных

Как правило, работа ускорительных установок характеризуется повторением последовательности действий (впуск пучка, ускорение, выпуск, возврат к состоянию впуска), составляющих некий цикл. Последовательности и комбинации таких простейших циклов составляют более сложные циклы работы, связанные с проведением, например, экспериментов с пучками. Каждый цикл работы установки определяется последовательностью событий (старт цикла, события внутри цикла, окончание цикла), которые должны появляться в различных системах и устройствах в виде определенных сигналов (электрические импульсы, сигналы прерывания от электронных модулей, сетевые пакеты и т.п.). Такая система синхронизации называется событийной.

К событиям привязывается работа всех источников питания, обеспечивающих ускорение пучка, импульсных устройств впуска/выпуска, контрольно-измерительной электроники и аппаратуры диагностики пучка. Для задания времени появления событий в цикле используется единая для всей системы тактовая частота, задающая квант событийности по времени, источником которой для электронных ускорителей служит, как правило, задающий генератор ВЧ, что автоматически обеспечивает привязку тактовых импульсов к движению пучка с высокой дискретностью (наносекунды). Остальные тактовые частоты, используемые для синхронизации различных устройств и систем (частота обращения пучка в кольце ускорителя, частота занесения кодов в устройства), получаются целым делением задающей частоты.

Важной задачей для системы синхронизации является привязка к движению пучка импульсных устройств впуска/выпуска. Как правило, для впуска/выпуска в циклическом ускорителе используется два типа импульсных устройств: магниты-септумы и магниты-кикеры. Магниты-септумы служат для ввода/вывода частиц в/из кольца ускорителя, а магниты-кикеры однократно изменяют траекторию

движения частиц в кольце, обеспечивая захват или выпуск пучка. Старт работы импульсных источников питания инициируется запусками, привязанными к определенным событиям цикла ускорителя. В случае коротких импульсов тока магнитов-кикеров, у которых полная продолжительность импульса имеет масштаб сотни наносекунд, привязка старта осуществляется к моменту пролета пучка, т.е. дискретность и точность управления задержкой кикеров должна быть порядка наносекунды. В случае магнитов-септумов с длительностью рабочего импульса тока порядка сотни микросекунд требование на точность привязки значительно грубее, порядка долей микросекунды.

Чтобы правильно оцифровать измерительные сигналы, поступающие с импульсных устройств, для привязки АЦП к моменту появления сигнала, как правило, необходим предварительный импульс запуска, также привязанный к движению пучка. Кроме того, некоторые АЦП могут использовать внешние тактовые импульсы, поступающие от системы синхронизации для установления шкалы времени.

Работа большинства устройств диагностики пучка также привязывается к движению пучка. В случае циклических ускорителей привязка осуществляется к частоте обращения пучка в кольце, а также к моментам впуска новых порций частиц.

Для своевременного получения и правильной обработки данных в некоторых случаях необходим механизм запуска приложений в управляющих компьютерах в определенный момент цикла работы ускорителя. Для этого должна быть предоставлена возможность обеспечить в компьютерах соответствующие прерывания, по которым приложения могут быть активированы.

Процесс управления циклическим ускорителем подразумевает циклический сбор данных о состоянии устройств. Для разных сигналов их измерение и обработка в периферийных устройствах, а также последующая передача и численная обработка в компьютере могут занимать существенно отличающееся время. Данные, соответствующие одному циклу, могут появляться в системе

управления как во время выполнения цикла, так и после его завершения. Поэтому требуется синхронизация результатов измерений в соответствии с циклом работы ускорителя, для которого эти измерения были сделаны.

Система управления оперирует численными данными, которые либо определяют функционирование системы (назовем их "задания"), либо могут быть результатом ее работы ("измерения"). Диаграмма структуры данных представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1: Структура данных в системе управления.

В системе управления установкой, у которой есть выраженный рабочий цикл, данные можно разбить на следующие виды:

- параметры конфигурации; к этому виду данных относятся пересчетные коэффициенты и смещения, участвующие в вычислениях и пересчетах различных величин, настроечные параметры, определяющие режимы работы систем и электроники; данные этого вида изменяются (задаются) редко;

- задания для отработки (уставки) используются для оперативного управления устройствами системы; данные этого вида могут изменяться в максимально возможном для данной системы темпе;
- синхронные измерения; эти данные обновляются в строго определенные моменты рабочего цикла системы;
- асинхронные измерения; обновление данных этого вида не привязано к работе установки, они могут обновляться с любой периодичностью.

Синхронные измерения, обновление которых связано с циклом работы системы, в свою очередь, подразделяются на два вида: срочные и задержанные измерения. Срочные измерения – это данные, которые появляются в системе управления в ходе выполнения цикла до его окончания. Задержанные измерения – данные, которые появляются после окончания цикла, до или во время выполнения следующего.

При обработке и визуализации данных необходимо учитывать момент их обновления. В случае циклически работающей установки это особенно важно при сохранении и восстановлении состояния системы, а также для изучения взаимного влияния различных параметров систем и влияния работы устройств на поведение пучка. В случае совместной обработки синхронных измерений, они должны соответствовать одному и тому же циклу. Если одновременно обрабатываются непрерывные и синхронные измерения, то они должны соответствовать друг другу по моменту обновления. Задания должны быть занесены до момента обновления рассматриваемых измеренных данных. Для обеспечения эффективного управления данные, имеющиеся в системе, должны быть представлены как в графическом, так и в численном виде в темпе их обновления.

1.3 Управление источниками питания

На современных установках для управления магнитными элементами используется цифровой способ управления с использованием контроллеров источников питания, т.е. от системы управления в контроллер источника питания

задается цифровой код. Контроллер, в свою очередь, либо выдает на источник питания с нужной точностью опорное напряжение, либо транслирует задание в цифровом виде непосредственно в сам источник питания. Если требуется отработать сложную зависимость от времени, то в контроллер заранее задается массив значений (вэйвформа), описывающий форму изменения управляемого параметра, а контроллер автономно обрабатывает задание, используя сигналы от системы синхронизации.

Для характеристики точности источника питания обычно используют относительную ошибку обработки заданного параметра (например, тока) которую называют “точность обработки”:

$$\Delta I(t) = \frac{I_{\text{зад}}(t) - I_{\text{опр}}(t)}{I_{\text{макс}}(t)}, \quad (1.1)$$

где $I_{\text{зад}}$ - уровень тока, заданный для отработки, $I_{\text{опр}}$ - величина тока, отработанного источником питания, или величина управляющего сигнала для источника питания, $I_{\text{макс}}$ - величина максимального тока источника питания, или максимальный уровень управляющего сигнала.

В статическом режиме работы источники питания основных дипольных и квадрупольных магнитов, определяющих структуру кольца ускорителя или системы транспортировки пучка, требуют управления с относительной точностью не хуже 10^{-4} , а для особо критичных устройств - 10^{-5} . В процессе ускорения пучка в кольце ускорителя основные элементы магнитной системы (диполи и квадрупольные), как правило, требуют взаимной точности отработки не хуже 10^{-3} . Чтобы выполнить это требование за время ускорения пучка, например, равное 300 мс всеми устройствами должно быть сделано, как минимум, не менее 1000 синхронно отработанных шагов, т.е. дискретизация отработки должна быть меньше 300 мкс. С учетом разнородности свойств элементов магнитной системы 10 кГц является оптимальной тактовой частотой, синхронизирующей отработку всех контроллеров источников питания.

Ускорение пучка в циклическом ускорителе обеспечивается одновременным увеличением токов во всех магнитах и увеличением напряжения на структуре

ускоряющих резонаторов. Можно выделить три фактора, определяющих точность взаимной динамической обработки источников питания:

- дискретизация тактирования, которая во времени определяет величину шага по амплитуде,
- точность обработки ЦАП и самого источника питания; при этом, чтобы исключить заметное влияние управляющего сигнала, для обеспечения относительной точности 10^{-4} на выходе источника питания необходимо использовать контрольно-измерительную электронику с точностью обработки на порядок лучше, т.е. 10^{-5} ;
- амплитудно-частотные характеристики источника питания и нагрузки.

Даже в случае синхронной обработки шагов всеми ЦАП ввиду различных амплитудно-частотных характеристик происходит расхождение токов, обрабатываемых источниками питания. Для снижения этого эффекта требуется: во-первых, задавать как можно более гладкую и пологую форму для обработки тока, во-вторых, увеличивать число шагов ЦАП, чтобы, собственно, обеспечить гладкость обработки, в-третьих, вводить в вэйвформы управляющих сигналов поправки, учитывающие обработку систем с разной постоянной времени. Для иллюстрации сложности учета перечисленных факторов на рисунке 1.2 приведены примеры графика отклонения обработанного тока от задания ЦАП и графика взаимного отклонения обработанных токов для двух одинаковых источников питания BD1 и BD2 дипольных магнитов бустера источника СИ NSLS-II, питающих две половины магнитов кольца.

На графике видно очень большое (порядка 1 %) отклонение обработки в начале процесса ускорения, связанное, кроме выше указанных факторов, еще и с малой величиной тока на энергии впуска. Но при этом относительное отклонение обработки тока двух источников практически везде соответствует 10^{-3} (зеленая кривая).

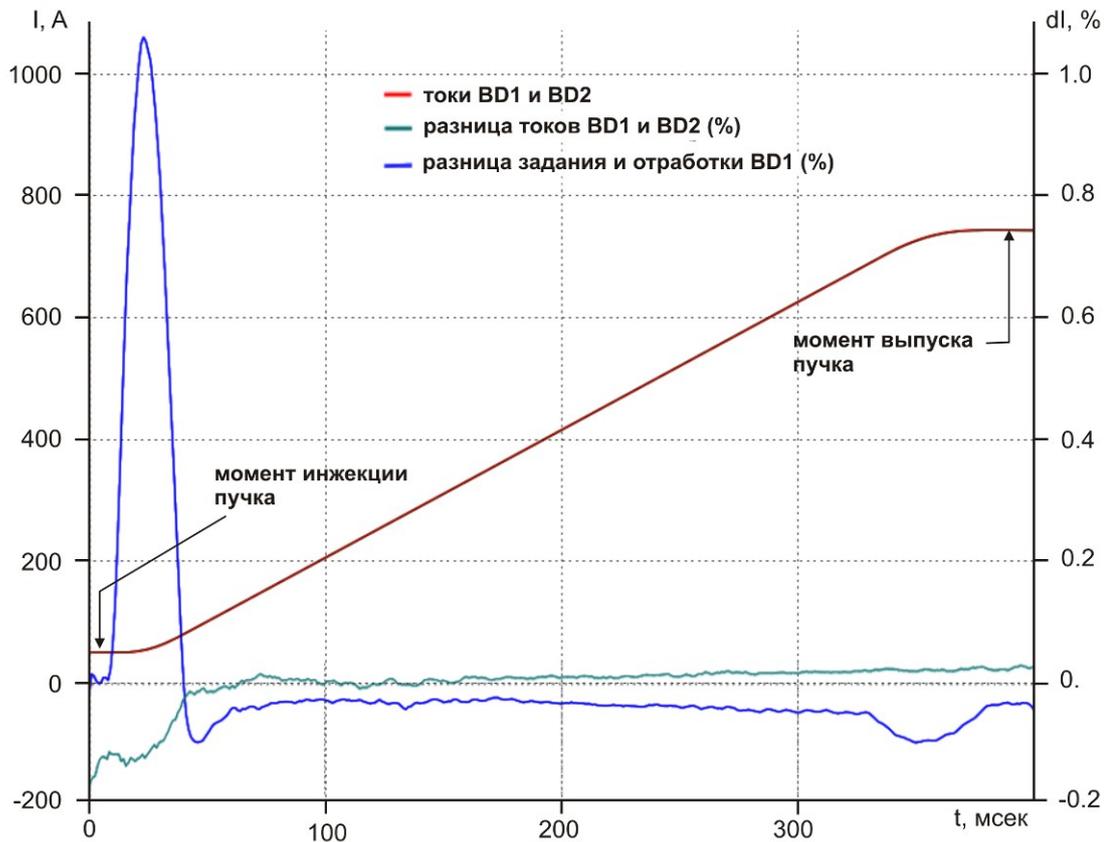


Рисунок 1.2: Графики отклонений отработки задания для источников питания диполей бустера NSLS-II.

Поскольку даже самые незначительные взаимные отклонения отработки источников питания приводят к потерям ускоряемых частиц, то очень важно непрерывно отслеживать правильность отработки в течение всего времени существования пучка в ускорителе. Это позволяет обнаруживать нежелательные отклонения, возникающие в любой момент процесса ускорения, вносить определенные корректирующие поправки в управление и контролировать их обработку. Для выполнения этой задачи необходимо делать измерения параметров источников питания (например, выходного тока и напряжения), по крайней мере, с частотой, соответствующей полосе их отработки. Как правило, эта частота имеет порядок 1 кГц.

Стабильность отработки выходных параметров источников питания обеспечивается стабильностью ЦАП и внутренней электроникой самих источников питания. В силу изменения условий работы (чаще всего это связано с изменением температуры) стабилизированная отработка источником питания

заданного значения тока или напряжения не может обеспечить стабильность параметра, влияющего на движение пучка (например, величину поля в магните). Необходимая стабилизация в этом случае выполняется с помощью автоподстройки, использующей измерение величины определяющего параметра и вносящей поправки в управление. Возможно два способа решения этой задачи. Первый способ - это внесение поправки в задание контроллеру источника питания от приложения, выполняющего автоподстройку. Второй способ – использование сигнала обратной связи, который складывается с основным сигналом, вырабатываемым для управления либо в контроллере, либо уже в самом источнике питания.

1.4 Диагностика пучка

Измерение параметров пучка в ускорителе является важнейшей функцией системы управления. Поскольку ускоритель предназначен для получения пучка с заданными параметрами, то только измерение этих параметров полноценно характеризует качество работы установки. Поэтому, для диагностики пучка существует и используется множество методик [12], каждая из которых, как правило, применима для своего случая. Для лептонных ускорителей это:

- измерение заряда пучка в каналах транспортировки с использованием цилиндра Фарадея,
- определение профиля поперечного сечения пучка в каналах транспортировки или в кольце ускорителя с помощью люминофорных или сеточных датчиков,
- измерение тока пучка, циркулирующего в кольце ускорителя с помощью трансформатора тока,
- получение распределения частиц по отдельным сгусткам в многосгустковом режиме работы с помощью высокочастотного трансформатора тока или с помощью пикап-электродов;

- определение поперечного положения пучка и орбиты пучка в любой момент в процессе транспортировки, впуска, ускорения и выпуска с помощью пикап-электродов,
- определение поперечного и продольного размера пучка в кольце ускорителя с использованием света синхротронного излучения.

Кроме прямого измерения перечисленных параметров необходимо иметь инструменты для определения энергии частиц, для периодической проверки поперечного эмиттанса и энергетического разброса пучка, т.к. эти параметры также важны для обеспечения эффективной работы ускорителя.

Аппаратура диагностики должна обеспечивать необходимую чувствительность и временное разрешение, как при детектировании, так и при численной обработке сигналов, создаваемых пучками частиц. Современные задачи диагностики требуют от аналоговой электроники чувствительности порядка долей микровольта, а “стандартное” разрешение по времени составляет порядка долей наносекунды. Есть задачи наблюдения пучка (например, с помощью стрик-камеры) [13], где для обработки сигнала необходимо разрешение порядка пикосекунды.

Сама по себе работа диагностического оборудования и электроники не является условием, достаточным для обеспечения качественного управления установкой. Параметры пучка, измеренные с использованием этого оборудования, должны быть оцифрованы и переданы в систему управления для обеспечения быстрого анализа ситуации и возможности влиять на эти параметры. Поэтому вопрос интеграции работы диагностического оборудования с оборудованием, управляющим элементами ускорителя, очень важен при построении системы управления.

1.5 Программное обеспечение (ПО) системы управления

1.5.1 Современный подход к построению ПО системы управления

Современные системы управления крупными физическими установками, куда относятся и ускорительные комплексы, характеризуются следующими особенностями, определяющими структуру построения ПО:

- широкое применение специализированных интеллектуальных контроллеров на уровне управляемых устройств,
- использование мощных серверных станций для организации взаимодействия с периферийными контроллерами по Ethernet,
- использование хорошо зарекомендовавших себя модульных программных решений, разработанных на базе GNU/Linux или Windows, с применением сетевых протоколов, реализованных для языков программирования высокого уровня.

Производительность периферийных контроллеров постоянно растет, расширяются возможности их программирования на языках высокого уровня. Соответственно, на контроллеры все больше возлагаются не только логические функции и функции взаимодействия с периферийным оборудованием, но и вычислительные функции по обработке полученных данных.

Как правило, ПО системы управления разбивается на уровни, между которыми устанавливаются простые и согласованные связи в виде обмена командами и данными:

- нижний исполнительный и регулирующий уровень ПО, работающий в периферийных контроллерах, выполняющий заложенные в него алгоритмы в соответствии с командами и данными, поступающими от среднего уровня,
- средний серверный уровень, реализующий логику взаимодействия с периферийной электроникой (контроллерами, цифро-аналоговой электроникой), обмен данными с нижним уровнем ПО, с базами данных, а

также выполняющий обработку и предоставление данных для ПО верхнего уровня,

- верхний уровень приложений, использующий данные серверного уровня; на верхнем уровне ПО выполняется обработка и визуализация данных, осуществляется взаимодействие с оператором, реализуются сценарии работы установок и т.п.

Вполне четко классическая трехуровневая модель системы управления описана в работе [14] в 2005 году. Эта модель в том или ином виде отражена в любой системе управления ускорительного комплекса, созданной в последние два десятилетия. В связи с постоянно возрастающими вычислительными и сетевыми мощностями и уровнем решаемых задач в модель вносятся различные дополнения. Например, в описании некоторых крупных систем управления введен промежуточный (сервисный) уровень между средним (серверным) и верхним (клиентским) уровнями [15], отвечающий за дополнительную обработку данных, стандартные сервисы (автоматическое архивирование, журналирование, индикацию неисправностей) или сопряжение данной системы с другими программными системами. Но, по сути, такой сервисный уровень можно отнести к серверному уровню, и трехуровневая модель (см. рисунок 1.3) по-прежнему хорошо соответствует такой архитектуре системы управления.

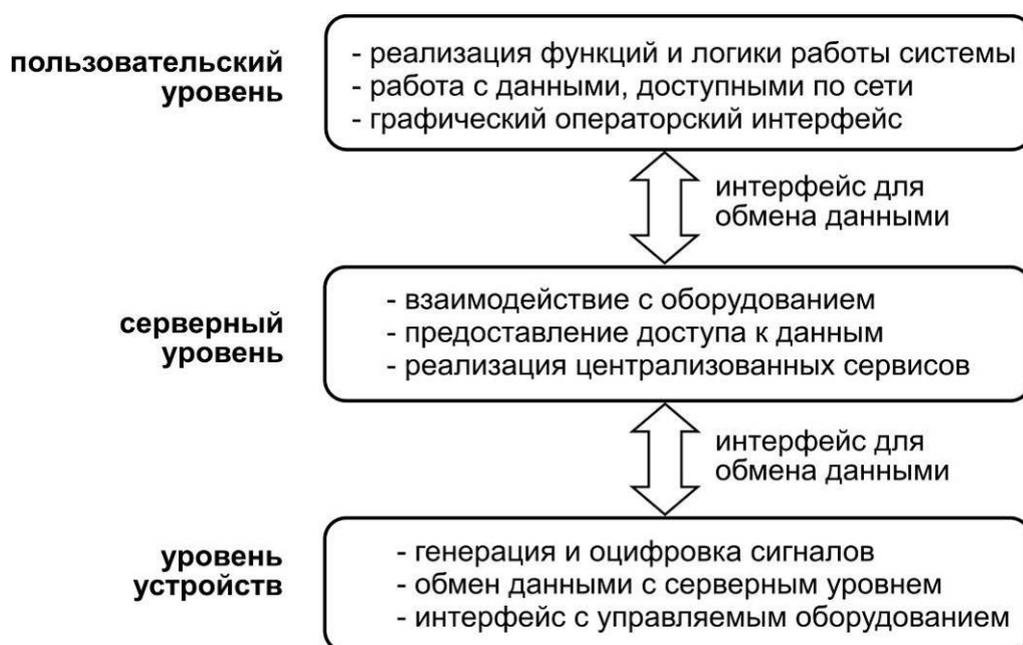


Рисунок 1.3: Трехуровневая архитектура ПО.

Трехуровневая модель обеспечивает системе управления следующие свойства, имеющие важнейшее значение как для разработчиков самой системы, так и для ее пользователей:

- независимость программных компонентов, ответственных за получение, обработку и представление данных, связанных между собой унифицированным интерфейсом, позволяет оптимально использовать, легко модифицировать и сопровождать отдельные части ПО,
- оптимизация группировки и обработки данных позволяют снизить загрузку сети, а также в целом снижается загрузка клиентских машин, баз данных и периферийного оборудования,
- клиентские приложения не заботятся о транзакциях с данными, эта функция выполняется на серверном или сервисном уровне.

ПО современной системы управления является модульным, легко расширяемым, динамически конфигурируемым комплексом. Оно отвечает определенным критериям качества, степень соответствия которым для программных решений определяется уровнем сложности объектов управления и алгоритмов их работы, а также опасностью последствий неправильного поведения системы. Критерии качества программного обеспечения делятся на архитектурные и функциональные. Архитектурные критерии определяют организацию структуры приложений и компонент внутри приложения, а функциональные критерии задают возможности и качество работы приложений.

К архитектурным критериям относятся такие понятия как:

- расширяемость (обеспечение возможности и простоты добавления новой функциональности),
- масштабируемость (возможность расширять число управляемых элементов без потери производительности ПО),
- гибкость (возможность использования готовых модулей для решения новых задач),

- доступность (имеется в виду возможность повторного использования кода программных модулей и дальнейшего сопровождения ПО другими разработчиками),
- совместимость (возможность взаимодействия с другими системами или подключения модулей других систем).

Функциональные критерии оценивают:

- надёжность (обеспечение работы без сбоев),
- отказоустойчивость (задание поведения ПО в случае возникновения исключительных ситуаций),
- уровень соответствия приложения решению поставленной задачи,
- полноту и удобство интерфейса,
- синхронизацию приложения с системой управления и другими приложениями,
- безопасность приложения (защиту от неправильных действий со стороны пользователя).

1.5.2 Анализ задач управления, систематизация переменных и объектов управления

Задачи управления установкой можно разбить на три группы: работа с электроникой управления, работа с источниками питания, работа с параметрами ускорителя (величина магнитного поля, энергия, бетатронные частоты, угол отклонения пучка и т.п.). Для каждой из этих групп задач посредством системных переменных, реализованных на серверном уровне, экспериментальная установка представляется в виде, удобном для соответствующего круга пользователей, и, соответственно, предоставляется нужный программный интерфейс. Например, инженер, обслуживающий контрольно-измерительную электронику, работает с соответствующими переменными через программный интерфейс, специально разработанный для электронных устройств. Персонал, занимающийся настройкой и обслуживанием источников питания, проводит диагностику оборудования, используя ПО, скрывающее особенности и детали работы электроники,

управляющей источниками питания. Физикам и операторам, обеспечивающим работу всего ускорителя в целом, предоставляется интерфейс, использующий переменные, которые содержат значения параметров установки. Соответственно, эти три группы задач определяют структуру переменных в системе управления, приведенную на рисунке 1.4, где переменные распределяются на уровни, связанные взаимным предоставлением данных, причем, на каждом уровне данные сами по себе также имеют практическую значимость.



Рисунок 1.4: Систематизация переменных в системе управления.

Между уровнями заложена связь, которая при изменении значения переменной вызывает изменение значений соответствующих переменных на других уровнях. Такая структуризация позволяет внедрить в систему управления, динамически конфигурируемый механизм преобразования данных, который управляется при помощи стандартных процедур записи значений коэффициентов связи между переменными различных уровней и в случае изменений не требует перезагрузки серверов.

Управление физическими параметрами ускорителя (энергия, бетатронные частоты) требует изменения многих физических сигналов и, как правило, реализуется на уровне отдельных приложений, которые вычисляют все необходимые изменения сигналов и заносят их в соответствующие переменные.

Одним из способов упорядочивания описания и выполнения процессов управления сложной установкой является группирование контрольно-измерительных параметров в объекты, называемые элементами управления. Формирование элементов чаще всего осуществляется по принадлежности параметров к определенной единице оборудования или системе, например: источник питания, система ВЧ. Такой способ группировки параметров обеспечивает согласованное управление как отдельными устройствами, так и группами устройств, позволяет создавать шаблоны для однотипных устройств, формировать удобные интерфейсы для решения различных задач при работе с оборудованием, а также упорядоченно выполнять операции по сохранению и восстановлению режимов работы устройств. Параметры могут быть объединены в элементы по функциональному признаку, когда однородные или относящиеся к одной функциональности параметры группируются в один элемент, что обеспечивает удобный интерфейс для работы оператора или инженера, например, интерфейс для управления всеми задержками синхронизации.

Система наименований объектов и параметров установки играет важнейшую роль в обеспечении эффективной работы на всех этапах от разработки до текущей эксплуатации всей установки в целом, включая ее систему управления. Для предоставления возможности упорядочивания, сортировки и поиска объектов и параметров система наименований должна отражать структуру установки в ее иерархическом построении. Кроме того, имена должны содержать физические характеристики объектов, позволяющие определять их по функциональному назначению. Имя параметра (сигнала) также должно содержать физическую характеристику и описание сигнала. На основе этих требований формируются уникальные имена для всех объектов и контрольно-измерительных параметров системы управления.

Отдельно в списке задач, решаемых системой управления, следует рассмотреть автоматизацию операций управления, т.е. выполнение действий по заданному сценарию без вмешательства оператора. Задачи автоматизации можно разбить на три уровня.

Первый уровень задач касается занесения обновленных уставок в аппаратуру и автоматического сбора данных в привязке к сценарию работы установки. Это - базовый уровень автоматизации, без которого затруднительно построение многоуровневых распределенных систем управления. Как правило, эти задачи решаются в серверном программном обеспечении, где алгоритмы работы с аппаратурой и данными закладываются в серверные приложения, которые уже предоставляют доступ к своим данным для всех компонентов системы.

Второй уровень задач включает приложения автоматической настройки работы отдельных систем или процессов, например: стабилизации выходного тока источника питания, оптимизации захвата пучка, инжектируемого в синхротрон и т.п. Приложения этой группы используют для своей работы различные измеренные данные, поступающие от серверного уровня ПО, и вырабатывают решения на управление соответствующими устройствами. Использование приложений автоматической настройки значительно повышает качество управления и делает возможным выполнение процедур, недоступных для оператора, например, коррекция орбиты пучка в синхротроне в процессе ускорения. Эти приложения относятся к верхнему, операторскому уровню ПО, поскольку, во-первых, их работа контролируется оператором, который может менять настройки и режимы их работы, во-вторых, одной из важнейших функций таких приложений является наглядное представление информации с помощью графических средств.

Третий уровень задач связан с организацией автоматического взаимодействия установок ускорительного комплекса. Главной целью решения этих задач является освобождение оператора от выполнения строгой последовательности множества действий и, тем самым, исключение влияния человеческого фактора на качество работы сложного ускорительного комплекса.

1.5.3 Нижний уровень ПО: программное обеспечение периферийных контроллеров

Нижний уровень ПО представлен в двух сущностях, тесно связанных между собой: обеспечение, работающее в периферийных контроллерах (firmware), и поддержка взаимодействия с ними со стороны компьютера (драйверы). Firmware реализует логику работы и функции контроллеров, а модули драйверов обеспечивают связь контроллеров с программным обеспечением, работающим в компьютере путем предоставления памяти для чтения/записи данных. Кроме того, драйверы обрабатывают прерывания от контроллеров и вызывают исполнение соответствующих подпрограмм в компьютере.

Специализированные контроллеры. В современных системах управления взаимодействие со сложными устройствами (источниками питания, устройствами пучковой диагностики) выполняется при помощи специализированных контроллеров, включающих в себя процессор, аналого-цифровые преобразователи, различные интерфейсы для подключения внешних устройств и цепей. Разработкой и изготовлением таких контроллеров занимаются как специализированные фирмы, так и отделы электроники в крупных ускорительных лабораториях. Создание нижнего уровня ПО, включая драйверы, как правило, требует тесного взаимодействия инженеров-ускорительщиков, программистов и электронщиков, участвующих в создании контроллеров, поскольку код как firmware, так и драйверов, должен отражать и использовать все особенности электроники и одновременно быть согласованным с теми задачами, которые должен решать данный контроллер на установке.

Промышленные контроллеры. В настоящее время для управления ускорителями в системах, не требующих реализации сложных алгоритмов и высоких точностей регулировки и измерений, широко используется электроника для промышленной автоматизации на базе контроллеров с программируемой логикой (ПЛК, PLC), включающая набор аналоговых и цифровых устройств ввода/вывода [16-18]. Как правило, такие средства применяются для автоматизации систем, от которых требуется надежная автономная работа:

вакуумной системы, технологических процессов (охлаждение, вентиляция), блокировок [19-21]. Использование промышленной электроники позволяет значительно повысить надежность системы в целом и сократить затраты на разработку программного обеспечения, поскольку эта электроника снабжается разработчиками развитыми системами для программирования контроллеров и интерфейсами к различным операционным системам и к широко распространенным платформам для разработки систем управления, таким, как EPICS и TANGO [11, 22].

1.5.4 Средний уровень ПО: базовое программное обеспечение

Средний уровень ПО представляет собой базовое (серверное) программное обеспечение, поддерживающее совместное функционирование всего ПО системы управления. Он содержит все данные и настройки системы управления и предоставляет интерфейс единого доступа к данным как для обменов между средним и верхним уровнями, так и для обменов между серверами внутри самого среднего уровня.

Для обмена данными и командами с устройствами контрольно-измерительной электроники серверы используют подпрограммы, которые либо вызывают исполнение модулей драйверов, включенных в серверы, либо взаимодействуют с оборудованием через стандартные каналы ввода/вывода. Серверы выполняют различные управляющие (запись/чтение аппаратуры) и логические функции, а также функции обработки данных. Данные в серверах содержатся в виде переменных, доступ к которым предоставляется через единый интерфейс.

Для реализации функций обработки или сохранения данных используются серверы, не связанные ни с каким оборудованием, а получающие входные данные через интерфейс. Эта часть ПО обеспечивает в системе управления различные сервисы (архивирование данных, файловый сервис, сервис печати и т.п.) и в некоторых моделях систем управления выделяется отдельно в дополнительный сервисный уровень, т.к. не связана ни с аппаратурой, ни с действиями по оперативному управлению установкой.

1.5.5 Верхний уровень ПО: пользовательские приложения

Программное обеспечение верхнего уровня (прикладное ПО) представляет собой согласованный комплекс приложений, разработанных для различных категорий пользователей системы управления: инженерно-технического персонала, занимающегося настройкой и эксплуатацией оборудования, операторов, управляющих установкой, физиков-ускорительщиков, моделирующих параметры ускорителя и пучка. По своему функциональному назначению прикладное ПО можно условно разделить на несколько групп приложений:

- **инженерные приложения** для настройки оборудования и систем (электроники, источников питания, системы ВЧ, систем защитных блокировок, вакуумных устройств и т.п.); предназначены для инженеров и специалистов, обеспечивающих поддержку работы оборудования и систем;
- **приложения для управления элементами и параметрами ускорителя**, влияющими на пучок ускоряемых частиц (задание функции изменения тока в магнитах, согласованное изменение заданий в группах элементов и т.д.); в отличие от инженерных приложений приложения этой группы учитывают специфику работы ускорителя (например, влияние элементов на движение частиц в кольце синхротрона) и предназначены для операторов и физиков, выполняющих управление установкой в режиме работы с пучком; к этой же группе приложений относятся моделирующие программы, которые для вычисления заданий в устройства опираются на расчетную модель ускорителя, а также используют измеренные отклики на внесенные задания в виде изменившихся значений определенных параметров – так называемые матрицы откликов;
- **приложения для сохранения/восстановления параметров установки**, архивирования и задания режимов работы, включая возможность просмотра сохраненных данных;
- **приложения для визуализации и мониторинга состояния установки и ее систем**; используются для оперативного отображения состояния

устройств, систем и установки в целом, выявления и индикации отклонений от заданного режима работы и предназначены для всех групп пользователей;

- **приложения для диагностики пучка;** выполняют обработку и отображение данных, полученных из аппаратуры диагностики пучка (профиль и ток пучка, орбита, бета-функции и т.п.); предназначены для оперативного персонала, управляющего параметрами пучков на ускорительном комплексе;
- **приложения для автоматического управления;** предназначены для управления параметрами ускорителя в автоматическом режиме без участия оператора, например, подстройка параметров источников питания к заданному значению, автоматическая коррекция орбиты, автоматическое взаимодействие установок и т.п.

Описанное выше деление прикладного ПО на группы не является строгим, поскольку с помощью пользовательских программных инструментов часто решаются комплексные задачи, включающие, например, использование в одном процессе средств диагностики пучка и управления источниками питания с возможностью настройки аппаратуры управления. Подобную классификацию приложений полезно использовать в случае необходимости упорядочить разработку спецификаций, процессы проектирования, создания и описания ПО.

Число пользовательских приложений в крупных системах управления составляет многие десятки. Для упорядочивания и ускорения поиска нужных приложений с целью их запуска необходимо выработать подход, систематизирующий приложения по их востребованности, по подсистемам установки и по назначению. Для этого разрабатываются специальные программы – меню запуска, которые предоставляют персоналу возможность простой и наглядной навигации по множеству приложений с помощью кнопок, выпадающих списков и подгружаемых меню. Для большей функциональности экран меню кроме кнопок для навигации и запуска приложений может содержать данные об основных параметрах установки (например: энергию частиц, ток и время жизни

пучка и т.п.), а также графическую информацию, привязывающую кнопки вызова приложений к схеме или системам установки.

1.6 Требования к системе управления

Исходя из анализа задач и условий, рассмотренных в первой главе, можно сформулировать основные требования, предъявляемые к системе управления в целом и к ее основным компонентам.

Архитектура системы управления и в отношении схемы оборудования, и в отношении ПО должна быть построена в соответствии с трехуровневой моделью:

- верхний - пользовательский уровень включает пультовые и персональные компьютеры, в которых работают пользовательские (операторские) приложения,
- средний – серверный уровень состоит из серверных компьютеров общего и специализированного назначения, в которых работают серверные программы, обеспечивающие взаимодействие с оборудованием нижнего уровня, обработку и предоставление данных на верхний уровень,
- нижний уровень периферийных контроллеров и устройств.

Все уровни должны включать компоненты, разделяемые по функциональному и территориальному признакам, и поддерживать динамическую конфигурируемость. Основные компоненты системы управления, к которым относятся система синхронизации, система источников питания и система диагностики пучка, должны обеспечивать следующие функции:

система синхронизации

- задание последовательности событий (старты циклов и сценариев работы, моменты инъекции и выпуска пучков и т.п.), которые должны появляться в системе в виде сигналов и прерываний,
- синхронизацию с заданной точностью отработки всех устройств и систем в процессе перепуска и ускорения пучков, синхронизацию и тактирование контрольно-измерительной электроники и устройств диагностики пучка (генерация стартовых и тактирующих импульсов),

- синхронизацию работы приложений (генерация прерываний),
- синхронизацию данных (метки времени обновления данных и привязка к циклам работы установок);

система управления источниками питания

- задание опорного напряжения для стационарного режима работы основных источников питания дипольных и квадрупольных магнитов, определяющих структуру ускорителя или системы транспортировки пучка, с относительной точностью не хуже 10^{-4} , а для особо критичных устройств - 10^{-5} ,
- задание формы управляющего сигнала для обеспечения ускорения пучка, удовлетворяющей требованиям источника питания (гладкость, согласование на “краях” цикла, точность отработки),
- синхронную согласованную отработку управления источниками питания в течение всего процесса ускорения для основных источников питания с относительной точностью 10^{-3} , для источников питания корректоров – с точностью 10^{-2} ,
- измерение параметров источников питания при ускорении с частотой не ниже частоты задания управляющего сигнала,
- автоподстройку отработки источника питания по измеренной величине тока или поля в магните,
- оперативное управление: включение/выключение, переключение режимов работы, а также мониторинг и сброс сработавших блокировок;

система диагностики пучка

- обеспечение необходимой чувствительности и временного разрешения аппаратуры для детектирования пучков и оцифровки сигналов,
- синхронизация работы диагностического оборудования и оборудования для управления,
- выполнение обработки сигналов (усиление, оцифровка, анализ) на уровне электроники, подключенной к датчикам пучка; предоставление в систему управления уже обработанных данных.

Глава 2

Развитие системы управления комплексом ВЭПП-4

2.1 Краткая характеристика комплекса ВЭПП-4

До 2016 года ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-4¹ [4, 5], включал в себя электрон-позитронный инжектор “Позитрон” [6] с энергией частиц выпущенного пучка 350 МэВ, накопитель ВЭПП-3 с периметром 75 м, ускоряющий пучок до энергии 2 ГэВ, канал транспортировки пучка ВЭПП-3 – ВЭПП-4 и коллайдер ВЭПП-4М с периметром 366 м, работающий в диапазоне энергии от 1 до 5.2 ГэВ. Схематичное изображение установок комплекса представлено на рисунке 2.1.

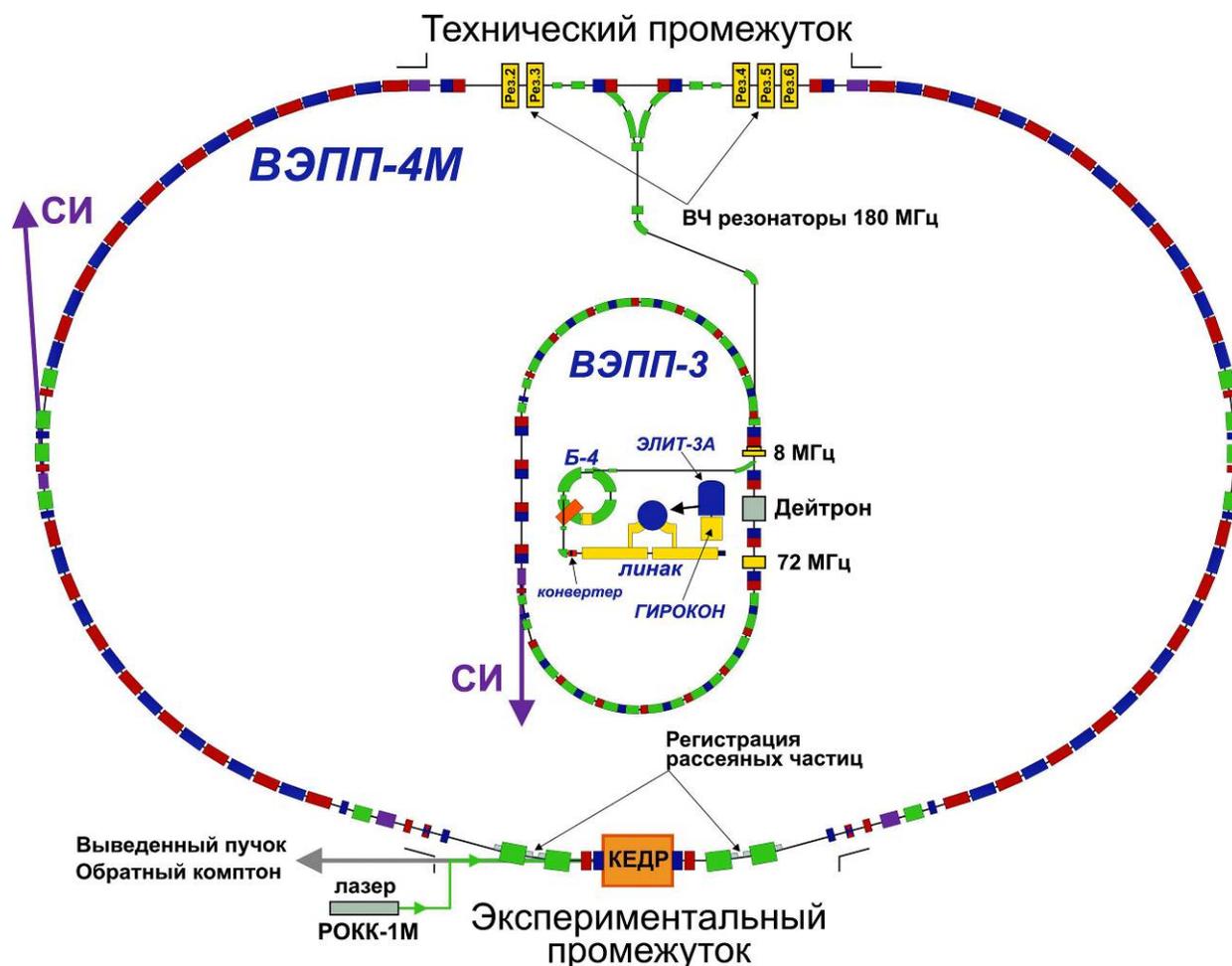


Рисунок 2.1: Схема комплекса ВЭПП-4 с инжектором “Позитрон”.

¹ ВЭПП – Встречные Электрон-Позитронные Пучки

Инжектор “Позитрон” состоит из нескольких ускорительных систем. Мощный импульсный ускоритель ЭЛИТ-3А с током пучка 50 А, длительностью 11 нс и энергией частиц 1.5 МэВ с частотой 1 Гц питает импульсный источник СВЧ “ГИРОКОН”, который накачивает мощностью две секции линейного ускорителя, работающего на частоте 430 МГц. За время накачки суммарное напряжение на секциях достигает 50 МэВ. Для получения позитронов используется следующая схема: ток пушки линака величиной 200 А и длительностью 30 нс ускоряется до полной энергии и сбрасывается на вольфрамовую пластину конвертора толщиной 3 мм. Максимальный выход позитронов, образующихся в вольфраме, приходится на энергию 7 МэВ. Позитроны этой энергии фокусируются импульсной линзой и направляются по каналу транспортировки в синхротрон Б-4, который за 3.5 мс ускоряет частицы до 350 МэВ. Максимальный ток позитронов, захваченных в Б-4, в случае работы ЭЛИТ-3А в режиме 1 кДж достигал 2 мА, что соответствует 3.7×10^8 частиц. При этом максимальная средняя скорость накопления позитронов в ВЭПП-3 в начале процесса накопления составляла 100 мкА/с. В случае получения электронов пучок в линаке ускоряется в первой секции до 25 МэВ и замедляется во второй до 7 МэВ. Далее, как и в случае позитронов, пучок ускоряется в Б-4 и направляется для накопления в ВЭПП-3, магнитная система которого для обеспечения накопления электронов или позитронов меняет полярность.

В 2016 году в связи с вводом в эксплуатацию инжекционного комплекса ВЭПП-5 (ИК) [23] инжектор “Позитрон” был остановлен, и в настоящее время ВЭПП-3 получает электронные и позитронные пучки от ИК. Пучки с энергией частиц 390 МэВ поступают от ИК по каналу транспортировки длиной 150 м: позитроны – 1 раз в 5 секунд, ток до 1 мА, электроны – 1 раз в секунду, ток 1 мА.

Комплекс ВЭПП-4 предназначен для проведения экспериментов по физике высоких энергий, ядерной физике, а также исследований с использованием синхротронного излучения (СИ). Основными компонентами комплекса ВЭПП-4 являются циклические ускорители [24] синхротронного типа ВЭПП-3 и ВЭПП-4М с функцией накопления частиц, которые используются для подготовки

пучков при проведении научных исследований. Синхротрон, обладая сравнительно небольшими размерами, обеспечивает ускорение интенсивных пучков заряженных частиц в широком диапазоне энергий с целью их возможного перепуска в другое ускорительное кольцо. В этом случае синхротрон называется бустерным синхротроном [25]. При наличии возможности гибкого управления уровнем полей в элементах магнитной системы синхротрон позволяет сначала накапливать частицы, а затем ускорять накопленные пучки до заданного уровня энергии, т.е. может выполнять функцию накопителя частиц с последующим ускорением. Эти две функции на комплексе выполняет ВЭПП-3, накапливая пучок на энергии инжекции с последующим его ускорением либо для перепуска в ВЭПП-4М, либо для проведения экспериментов на самом ВЭПП-3. Если же в синхротроне организовать движение частиц в противоположных направлениях с местами встречи частиц, то в этом случае синхротрон или два синхротронных кольца будут выполнять функцию коллайдера частиц. Эту функцию со встречными электронными и позитронными пучками, движущимися в одной вакуумной камере навстречу друг другу, выполняет ВЭПП-4М.

На накопителе ВЭПП-3 в области энергий частиц пучка от 1 ГэВ до 1.6 ГэВ регулярно проводятся эксперименты с внутренней водородной или дейтериевой мишенью (эксперимент “Дейтрон”) [26]. Четверть времени работы комплекса отводится для проведения экспериментов с СИ, вывод которого осуществляется в 10 каналов, по которым излучение поступает в специально оборудованное помещение – “бункер” СИ. В этом случае ВЭПП-3 накапливает до 150 мА тока пучка электронов в одном или двух сгустках и ускоряет их до заданной энергии, максимальная величина которой равна 2 ГэВ. Основную же часть времени ВЭПП-3 работает как бустер, ускоряющий попеременно электронные и позитронные пучки до энергии, на которой происходит перепуск в кольцо коллайдера ВЭПП-4М. Энергия перепуска может меняться в пределах от 1 ГэВ до 1.9 ГэВ. Кроме этого в течение 5 лет (с 1986 по 1991 годы) на ВЭПП-3 был установлен дополнительный прямолинейный промежуток (байпас) с оборудованием для лазера на свободных электронах, на котором были выполнены

пионерские эксперименты [27], заложившие основы для создания специализированных установок для генерации терагерцового излучения [28]. В те же годы на ВЭПП-3 интенсивно велись эксперименты по ядерной физике с использованием выведенного пучка комптоновских гамма-квантов [29], которые затем были развиты и продолжены на ВЭПП-4М [30].

Коллайдер ВЭПП-4М является уникальной установкой, способной работать с пучками частиц в области энергий от 1 ГэВ и ниже до 5.2 ГэВ, что позволяет проводить изучение с- и b-кварковых состояний, включая прецизионное измерение масс элементарных частиц Ψ -, Y -семейств, а также D-мезонов с использованием метода резонансной деполяризации [31]. Эксперименты по физике высоких энергий ведутся с использованием универсального детектора КЕДР [32], установленного в экспериментальном промежутке ВЭПП-4М.

Кроме детектора КЕДР экспериментальный промежуток оснащен системой регистрации рассеянных частиц [33], что позволяет выполнять уникальные эксперименты по двухфотонной физике, а также системой генерации обратного комптоновского излучения РОКК-1М [34], являющейся универсальным инструментом исследований как самого пучка, так и свойств материи. На ВЭПП-4М размещено оборудование для генерации и вывода СИ, что позволяет, используя специальный магнит (вигглер), получать выведенное излучение в жестком диапазоне спектра для обеспечения проведения широкого круга экспериментов по исследованию состояния вещества [35] и быстро протекающих процессов. Кроме того, в экспериментальном промежутке ВЭПП-4 оборудована система для выведения пучка жестких гамма-квантов, которая в настоящее время используется для изучения новых методик регистрации заряженных частиц [36].

Важной частью научной программы комплекса ВЭПП-4 являются эксперименты по ускорительной физике, проводимые как с целью изучения и улучшения параметров самих ускорителей и настройки режимов их работы, так и с целью исследования новых методик управления поведением пучков частиц и наблюдения их параметров [37, 38].

2.2 Структура системы и реализованные методы управления

2.2.1 Эволюция системы управления ВЭПП-4

Исторически система управления комплекса ВЭПП-4 берет свое начало примерно с середины 70-х годов, когда для управления были использованы ЭВМ серии ОДРА-1300, выпущенные в Польше. К началу 80-х годов в ИЯФ был разработан интеллектуальный КАМАК-контроллер, полностью реализующий систему команд машин Одра, который получил название “одренок” [39] и стал использоваться в качестве управляющей ЭВМ. В течение нескольких последующих лет в ИЯФ был разработан широкий набор контрольно-измерительной электроники [40, 41], который в сочетании с одренком и специализированной операционной системой ODOS [42], позволил в течение 80-х – 90-х годов создать систему управления комплексом [1, 43], эффективно работающую по настоящее время. Подробно эволюция систем управления ускорительными комплексами ИЯФ изложена в [40].

В конце 90-х годов в систему управления ВЭПП-4 началось внедрение персональных компьютеров (PC), интерфейса Ethernet, а затем и операционной системы Linux [2]. Это привело к тому, что к 2005 году в качестве интерфейса связи между одрятами был внедрен Ethernet, в качестве графических операторских машин использовались PC под Linux [44], данные, получаемые в ходе работы системы управления, архивировались в СУБД PostgreSQL [45]. Некоторые КАМАК-крейты были напрямую подключены к PC через интерфейс ppi, разработанный в ИЯФ. Были разработаны новые системы диагностики пучка [46], распределенная система термоконтроля [47], которые также подключены к PC [48] (см. п. 2.3.4). Но основу системы управления, по-прежнему, составляли электроника в стандарте КАМАК и одренок.

Первоначально для начальной загрузки одрят и для поддержки их взаимодействия с жестким диском была разработана система на базе дополнительного (“центрального”) одренка, в крейте которого размещались специальные модули, обеспечивающие его собственную загрузку, а также

загрузку других одрят [49]. С помощью этих же модулей центральный одренок обеспечивал для остальных одрят доступ к жесткому диску. С появлением PC и Ethernet функции центрального одренка были перенесены в PC, а с появлением Linux был разработан более мощный файловый сервер, выполняющий еще дополнительные функции межпроцессорного обмена (см. п. 2.2.2). Схема системы управления периода 2010-2016 гг. приведена на рисунке 2.2.

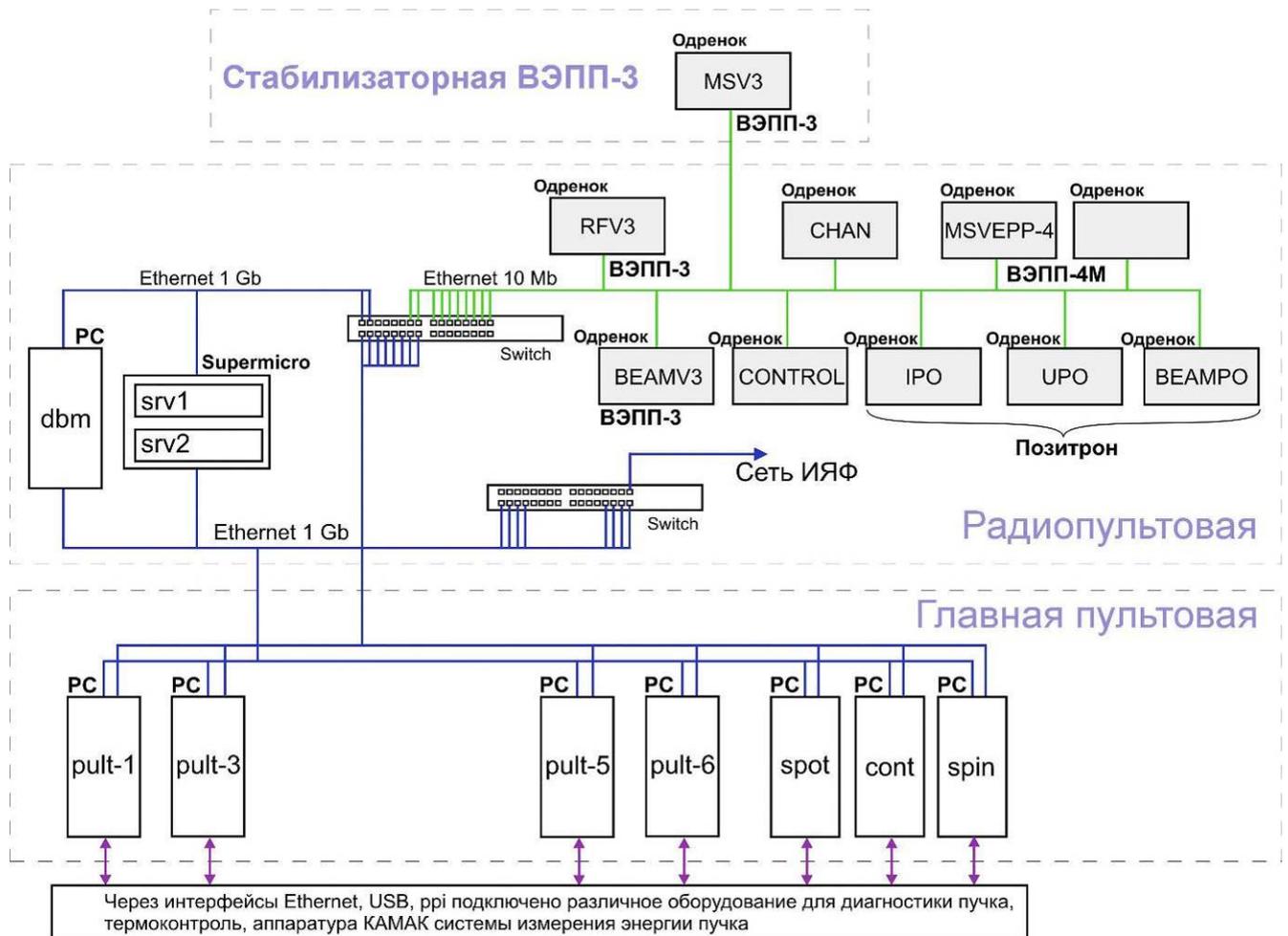


Рисунок 2.2: Схема компьютеров системы управления комплекса ВЭПП-4 в 2016 г.

К настоящему времени продолжается активное внедрение новой электроники, приходящей на замену как аппаратуры КАМАК, так и другой аппаратуры, отработавшей свой срок. К началу 10-х годов были заменены модули ЦАП, управляющие магнитной системой и системой ВЧ коллайдера ВЭПП-4М, запущена система подавления поперечных колебаний пучка [50]. К 2016 году старая пикап-электроника на комплексе была полностью заменена на новые

пикап-станции [51], позволившие принципиально улучшить качество наблюдения пучка в ВЭПП-4М и ВЭПП-3 и исключить из эксплуатации большое число КАМАК-крейтов.

Дальнейшие планы по модернизации системы управления включают постепенную замену основной части контрольно-измерительной электроники КАМАК на специализированные устройства (ЦАП и АЦП) с интерфейсом Ethernet, которые обеспечат более гибкое и точное управление ускорителями комплекса, а также дадут возможность создать систему непрерывного тотального мониторинга состояния элементов. Внедрение нового оборудования позволит перенести управляющее ПО из одрят в РС, что откроет возможность для дальнейшей модернизации управления комплексом.

Детально структура аппаратуры и ПО системы управления ВЭПП-4 периода до 1997 года изложена в [43]. В данной главе диссертации рассматриваются основные решения, выдвинутые и реализованные автором в ходе развития системы управления ВЭПП-4, которые в дальнейшем были использованы при проектировании и создании системы управления бустером NSLS-II, описание которой содержат последующие главы диссертации.

2.2.2 Обеспечение межпроцессорного обмена данными

Система управления комплексом в соответствии с составом самого комплекса разбита на несколько частей: подсистемы управления инжектором “Позитрон”, ВЭПП-3, каналом транспортировки и ВЭПП-4М. Каждая из перечисленных подсистем включает в себя одного или нескольких одрят (см. рисунок 2.2). Кроме того, один одренко (CONTROL) обеспечивает контроль инженерных систем (вакуум, охлаждение) и температуры. Внутри подсистем между программами, работающими в разных одрятах, установлены специальные программно-аппаратные связи, которые позволяют программам, работающим в разных одрятах, обмениваться данными (см. п.п. 2.2.3 – 2.2.6). Для обеспечения универсального межпроцессорного обмена данными между всеми одрятами была разработана специальная система, реализованная через доступ к “внешней” памяти *stap* (STatus Page), открытой на чтение/запись для программ, работающих

в любых одрятах. Со стороны одренка интерфейс доступа к этой памяти реализован на уровне операционной системы ODOS и в программах используется в виде библиотечных процедур. Система предназначена, в основном, для обмена статусной информацией. Формально вся память разделена на зоны, выделенные для каждого одренка на запись. Принцип работы системы такой: программа, работающая в каком-либо одренке, может писать данные в отведенные ей ячейки памяти, и все программы могут читать данные из любых ячеек.

С появлением Linux и Ethernet схема этого механизма, была перенесена в PC, где реализована на базе серверного приложения, выполняющего роль файлового сервера одрят, а сам механизм был несколько изменен. Серверное приложение по специальному одренковскому протоколу ODP [52] асинхронно получает данные от всех одрят и один раз в секунду высылает бродкастовый пакет *stap* в сеть с одрятами. К этой же сети подключены PC, выполняющие роль серверных и пультовых машин, которые также получают этот пакет. Блок-схема системы межпроцессорного обмена статусными данными в системе управления ВЭПП-4 представлена на рисунке 2.3. В том же серверном компьютере, где находится файловый сервер одрят, работают еще два серверных приложения: *stapserver*, который записывает содержимое *stap* в файл, доступный всем компьютерам системы управления по *nfs*, и EPICS-сервер *stapioc*, который транслирует значения, содержащиеся в *stap*, в переменные EPICS.

Операционная система ODOS в каждом одренке, получив пакет *stap*, записывает данные в буферный массив специальной программы ODDS, откуда любая программа, работающая в одренке, может получить их уже по внутреннему межпрограммному обмену.

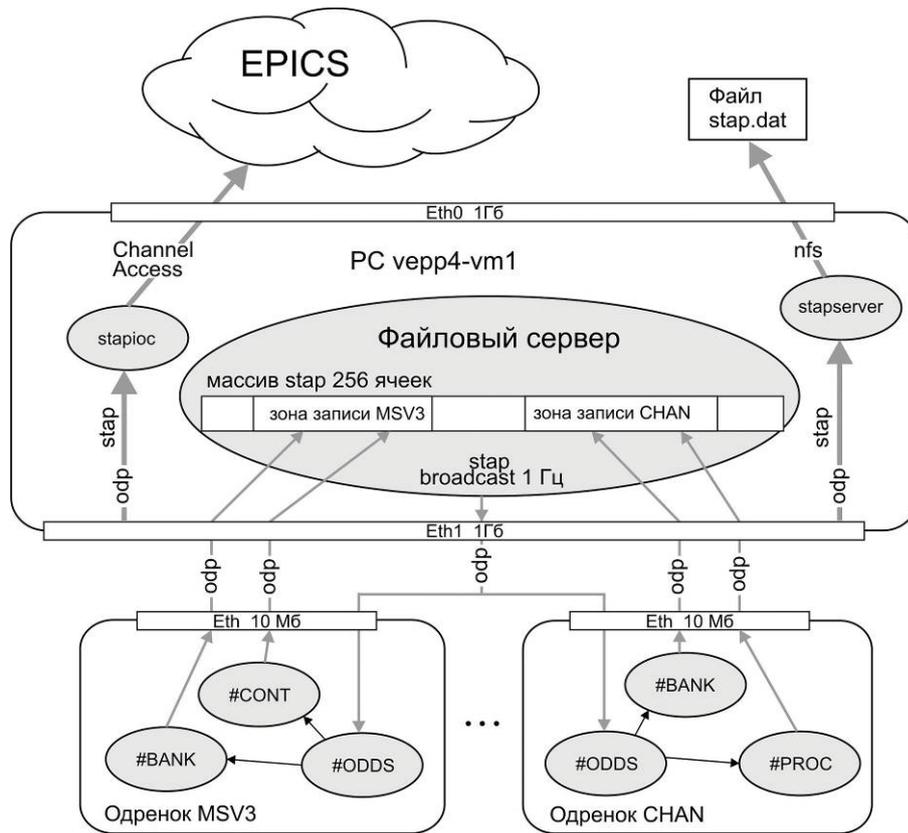


Рисунок 2.3: Блок-диаграмма системы межпроцессорного обмена статусными данными (stap).

Другой механизм обмена предназначен для экспорта контрольно-измерительных данных из программ, работающих в одрятах, в специальную директорию файлового сервера, смонтированную по *nfs* на всех компьютерах, работающих в системе управления. Схема механизма экспорта данных приведена на рисунке 2.4. Все программы в одрятах, взаимодействующие с аппаратурой, по специальному одренковскому протоколу высылают пакеты с данными, которые принимаются и расшифровываются серверным приложением *kadrsserver*. В заголовке каждого пакета, высылаемого из программы в одренке, указано имя файла и способ записи в файл массива данных, содержащегося в пакете. Возможны следующие способы записи: переписывание и дописывание файла. При этом каждое значение записывается в текстовом виде либо с новой строки, либо в виде одной строки записывается весь массив значений. Использование этого механизма позволило организовать передачу данных из одрят в PC и последующее архивирование в базе данных PostgreSQL [45], а также логирование операций, выполняемых программами в одрятах.

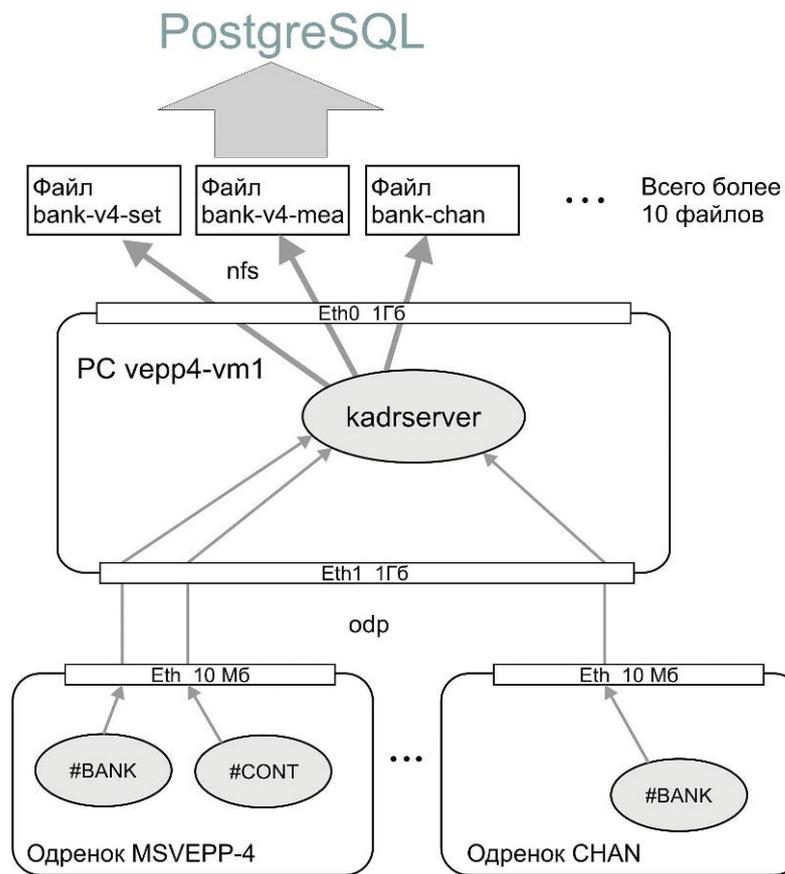


Рисунок 2.4: Блок-диаграмма системы экспорта данных из одрят.

2.2.3 Управление инжектором

На инжекторе “Позитрон” насчитывается более 80 разнообразных элементов, требующих различной методики и точности управления: магнитные системы импульсного и постоянного тока, постоянные и импульсные высоковольтные устройства, ВЧ и СВЧ системы, механические приводы. Вся система устройств работает в циклическом режиме с частотой 1 Гц в строго определенной последовательности, задаваемой от системы синхронизации. Для управления инжектором используются три одренка (UPO, IPO, BEAMPO) и КАМАК-аппаратура, размещенная в 15 крейтах. Контрольно-измерительная аппаратура включает различного вида ЦАП, АЦП, генераторы задержанных импульсов, управляемые линии задержки, измерители интервалов времени, контроллеры для управления шаговыми двигателями и другую аппаратуру. Всего насчитывается более 120 КАМАК-модулей. Упрощенная блок-диаграмма, отображающая аппаратуру, одрят и программы, используемые для управления инжектором “Позитрон”, представлена на рисунке 2.5.

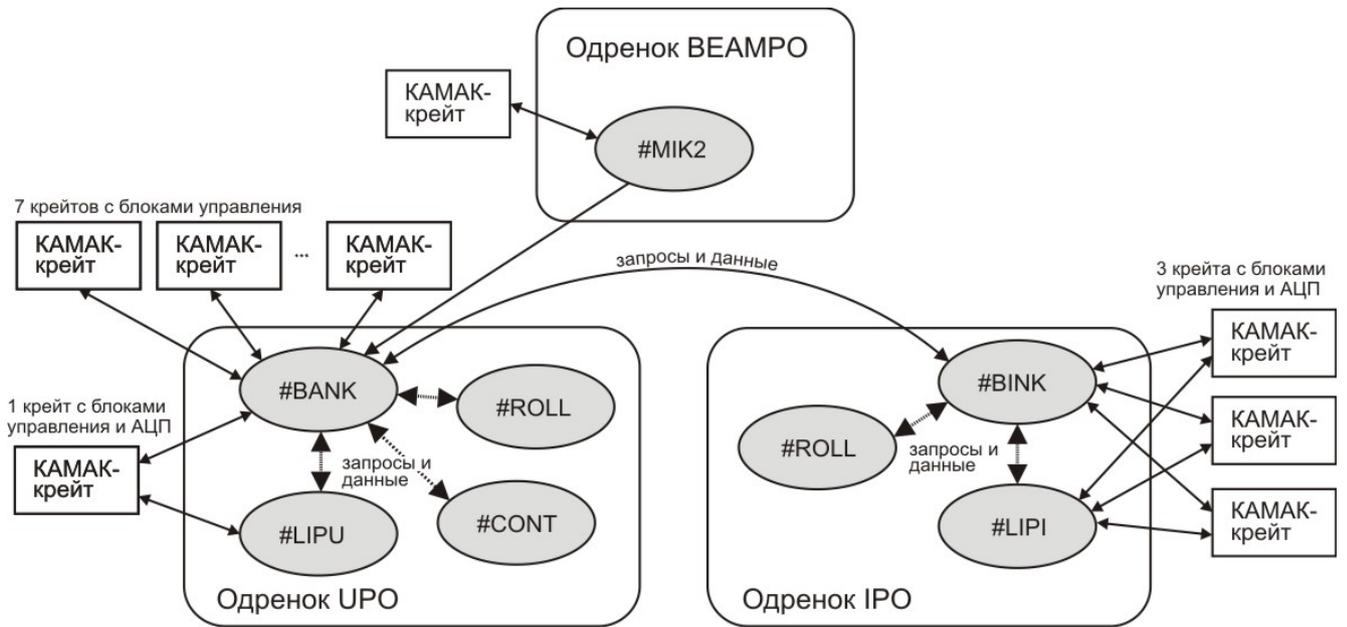


Рисунок 2.5: Блок-диаграмма системы управления инжектором “Позитрон”.

При создании системы управления “Позитроном” было предложено и реализовано несколько методик, позволивших успешно решить задачу управления этой сложной установкой:

(1) **Методика для взаимодействия программ с аппаратурой**, заключающаяся в том, что каждом одренке с аппаратурой взаимодействует специальная программа BANK (в современной терминологии – сервер), которая единолично работает с аппаратурой, выполняя запросы, поступающие от других (пользовательских) программ по межпрограммному обмену, тем самым, исключая конфликты при доступе к аппаратуре. Для упрощения кода основной программы обслуживание АЦП вынесено в отдельную серверную программу (LIPU или LIPI), которая получает запросы на измерение через программу BANK.

(2) **Разделение компьютеров (одрят) по функциональному признаку**. Хотя “Позитрон” сам по себе состоит из нескольких ускорителей, было предложено не делить функции управления по установкам, а реализовать в одном одренке только функции управления всеми источниками питания и другими устройствами, а в другом – функции измерения сигналов. Третий одренок был выделен для диагностики пучков инжектора. Такой подход позволил упростить расстановку и подключение модулей электроники, и разработку программного обеспечения,

выполняющего взаимодействие с аппаратурой (см. п. 2.3.1). Но при этом потребовалось реализовать синхронизацию обмена данными между тремя одрятами, для чего была разработана

(3) *способ синхронного обмена данными* между программами, работающими с аппаратурой в разных одрятах. Данные, соответствующие состоянию всего инжектора в текущем цикле его работы, высылаются в один одренок (URO), где интегрируются в единый массив, который синхронно с циклом работы инжектора рассылается обратно в два других одренка. В результате во всех трех одрятах пользовательские приложения могут использовать данные о состоянии всего инжектора. Сначала механизм межпроцессорного обмена был реализован с помощью интерфейсных модулей последовательной дуплексной связи [53], специально разработанных в ИЯФ для этой цели. Затем с внедрением интерфейсного адаптера Ethernet этот механизм был перенесен на уровень системного сервиса в операционной системе ODOS [52, 54]. В дальнейшем, с появлением Linux, он был также реализован под Linux в виде библиотеки для языка Си.

Чтобы инициировать обращение к аппаратуре, нужно в серверную программу, работающую с аппаратурой, передать соответствующий запрос, который выполняется в определенный момент цикла работы инжектора. Для работы этого механизма была реализована

(4) *методика синхронного обмена запросами* между программами BANK, работающих с аппаратурой в разных одрятах, которая обеспечивает пользовательским программам, управляющим “Позитроном”, возможность одинаково работать в любом из трех одрят.

Большинство элементов “Позитрона” (магниты, кикеры, системы ВЧ и СВЧ) – это импульсные устройства, которые должны срабатывать в заданный момент времени цикла работы инжектора, повторяющегося с частотой 1 Гц. Для решения этой задачи была разработана

(5) *система синхронизации импульсных устройств*, которая обеспечивает взаимную привязку работы импульсных устройств с нужной точностью в

микросекундном и наносекундном диапазонах, а также привязывает начало цикла работы “Позитрона” к фазе сети 50 Гц и к фазе ВЧ ВЭПП-3 8 МГц. Подробное описание системы синхронизации “Позитрона” изложено в [43].

Для обеспечения стабильного прохождения пучка через элементы установки необходимо контролировать параметры элементов в момент пролета пучка, т.е. иметь измерения, сделанные в этот момент времени. Для импульсных источников питания была реализована

(6) методика измерения параметров импульсных источников, которая обеспечивает измерение напряжений на конденсаторных батареях источников непосредственно перед их срабатыванием, а также измерение токов в нагрузках или полей в магнитах непосредственно в момент пролета пучка.

Поскольку заряд конденсаторных батарей источников питания занимает существенную часть времени цикла (около 500 мс), на измерение стабилизированного напряжения выделен совсем небольшой интервал времени порядка 100 мс перед срабатыванием системы. Для выполнения измерений используется всего три АЦП интегрирующего типа [55], на которые сигналы, приходящие от источников питания, поступают через управляемые коммутаторы. За 100 мс невозможно измерить с нужной точностью все сигналы, поэтому в программах LIPU и LIP1, выполняющих измерения, организованы очереди для обработки запросов. В результате опрос напряжения от всех источников питания выполняется за три цикла работы инжектора. Измерения токов в нагрузках и полей в магнитах выполняются с помощью интеграторов входного тока [56] каждый цикл, при этом для характеристики режима работы инжектора используются только те измерения, с которыми согласованы значения напряжений на конденсаторных батареях, померенные в текущем цикле. На базе этих согласованных измерений организован

(7) мониторинг отклонений параметров элементов “Позитрона” от заданного режима работы, который заключается в сравнении текущих измерений параметров с опорными значениями, запомненными для ситуации, когда установка работала в правильно настроенном режиме.

2.2.4 Управление накопителем ВЭПП-3

Накопитель ВЭПП-3 включает в себя магнитную систему и ВЧ систему, состоящую из двух подсистем: 8 МГц (2-я гармоника частоты обращения) и 72 МГц. Для управления накопителем используется три одренка (для управления магнитной системой, для управления ВЧ системами и для диагностики пучка), а также приложения, работающие в РС. Упрощенная блок-диаграмма системы управления ВЭПП-3 представлена на рисунке 2.6. На диаграмме отображены одрята и РС, аппаратура и основные программы, постоянно использующиеся для управления. Всего в настоящее время используется 10 КАМАК-крейтов и более 70 КАМАК-модулей.

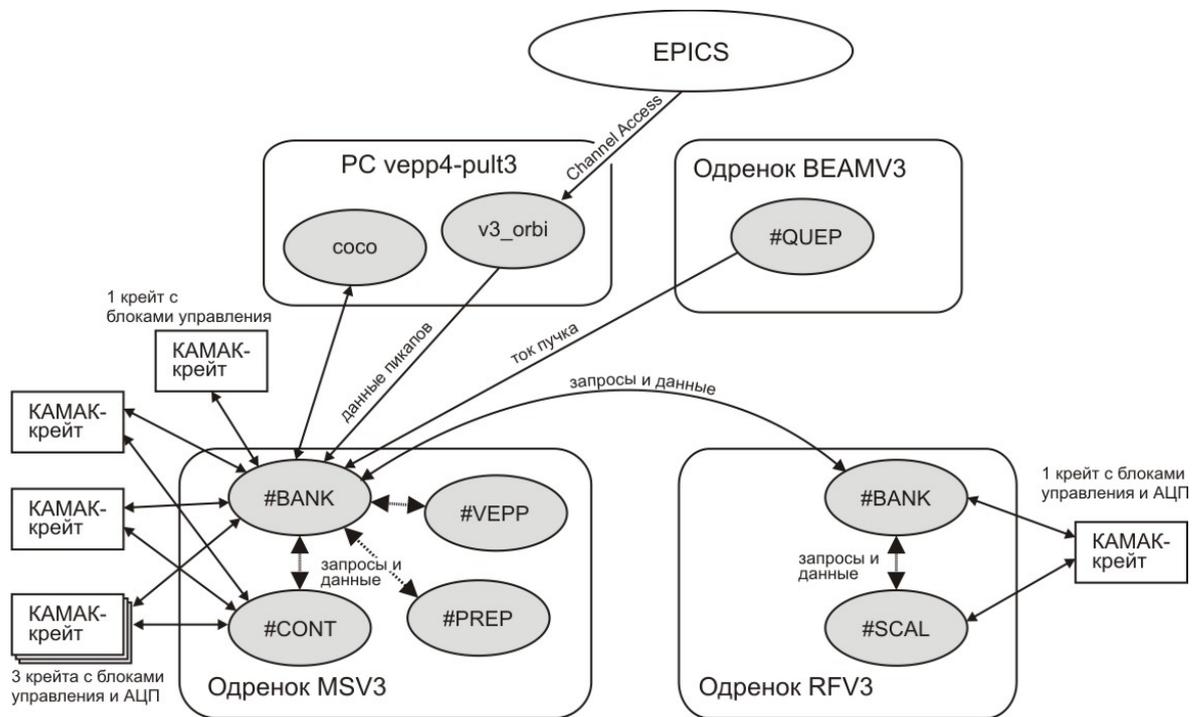


Рисунок 2.6: Упрощенная блок-диаграмма системы управления накопителем ВЭПП-3.

Для управления также задействованы пультовые РС, в которых работают приложения, связанные с диагностикой пучка: опрос и обработка сигналов с пикап-станций, вычисление распределения тока пучка по сепаратрисам, измерение бетатронных частот. Для обслуживания новой электроники используется программная платформа EPICS (см. п. 2.3.4). При этом в

программную систему одрят передается только та часть данных, которая необходима для управления магнитными элементами.

Магнитная система накопителя состоит из магнитов нескольких типов, запитанных, соответственно, от источников питания различного типа. Но с точки зрения управления все они управляются одинаково: одновременная синхронное изменение тока в магнитах с целью поддержания правильной структуры кольца и обеспечения циркуляции пучка на заданной энергии. Процесс ускорения выполняется после накопления заданного тока: значения токов во всех элементах магнитной системы синхронно с частотой задания уставок 3 Гц меняются программой BANK, работающей в одренке MSV3. Одновременно увеличивается напряжение на резонаторе 8 МГц. По достижении энергии 600 МэВ выполняется настройка резонатора 72 МГц, на нем увеличивается напряжение, и происходит “перехват” ускоряемого пучка в ВЧ 72 МГц. Далее ускорение происходит уже с помощью резонатора 72 МГц, а генератор ВЧ 8 МГц постепенно отключается. Ускорение от энергии инжекции 350 МэВ до 2 ГэВ длится примерно 300 секунд. Такое большое время ускорения требуется из-за того, что все элементы магнитной системы изготовлены из цельного железа и из-за возникающих токов Фуко не допускают более высокой скорости изменения магнитного поля. Кроме того, разные типы магнитов ВЭПП-3 имеют различные магнитные свойства: насыщение железа наступает на разных уровнях энергии.

После ускорения пучка до нужной энергии выполняется переход ВЭПП-3 в состояние, соответствующее одному из четырех сценариев работы: перепуск пучка в коллайдер ВЭПП-4, генерация СИ, поляризация пучка или работа на эксперимент “Дейтрон”. После окончания или прерывания заданного режима работы выполняется цикл перемагничивания всех элементов и снова устанавливается состояние впуска и накопления пучка. Для обеспечения ускорения пучка на ВЭПП-3 реализованы методики, описанные ниже.

(1) Перестройка магнитной системы по заранее настроенным режимам с целью ускорения пучка. Процесс настройки ускорения выполняется следующим образом. Из текущего состояния выполняется синхронный пропорциональный

переход всех элементов магнитной системы в новое, более высокое значение энергии. Как правило, величина перехода составляет 500 МэВ. В новом состоянии корректируется орбита, настраиваются параметры пучка и оптики (размеры, частоты, хроматизм), и настроенное состояние сохраняется, как опорное для следующего шага вверх по энергии. При ускорении пучка выполняется плавный переход за заданное время последовательно из одного заранее настроенного состояния в другое. Для обеспечения плавности отработки источниками питания на начальном и конечном участках перехода от одного режима к другому делается сглаживание с помощью полинома. При ускорении пучка выполняется

(2) *подстройка орбиты*: с частотой 3 Гц измеряется положение пучка на двух выбранных пикапах, и вносятся поправки в два корректора, которые не участвуют в общей перестройке магнитной структуры, а предназначены только для коррекции орбиты.

После ускорения и отработки программы эксперимента на высокой энергии при переводе магнитной системы к состоянию впуска пучка для учета гистерезиса железа выполняется

(3) *цикл перемагничивания*. Поскольку все элементы ВЭПП-3 работают в двух полярностях заданий по токам (для электронов и позитронов), то выполняется “полный” (двухполярный) цикл перемагничивания по петле гистерезиса (см. рисунок 2.7). Сначала в элементы задаются значения токов замагничивания, превышающие максимальные значения токов для режимов работы с пучками. Затем, если требуется работать с частицами противоположной полярности, сразу делается плавный переход в режим впуска частиц противоположной полярности. Иначе, делается переход в режим замагничивания противоположной полярности, а затем – возврат в режим впуска для текущей полярности.

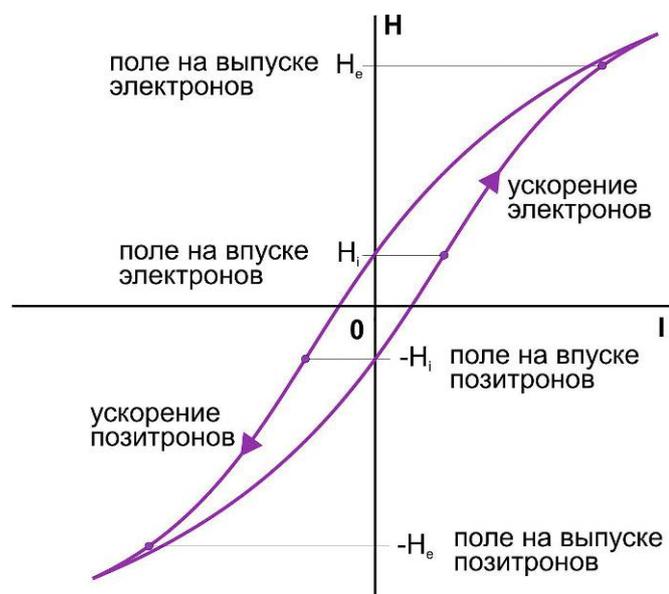


Рисунок 2.7: Цикл перемагничивания магнитной системы ВЭПП-3.

2.2.5 Управление каналом транспортировки пучка ВЭПП-3 – ВЭПП-4М

Канал транспортировки ВЭПП-3 – ВЭПП-4 состоит из более, чем сорока магнитных элементов: дипольных магнитов, квадрупольных линз, магнитов коррекции. Все элементы канала – импульсные, что, с одной стороны, добавило сложности по организации управления (синхронизации, стабилизация полей), но, с другой стороны, позволило сделать магниты канала более компактными по сравнению с магнитами, работающими на постоянном токе. Для управления элементами канала используется один одренок, к которому подключено восемь крейтов с электроникой, всего около 70-ти КАМАК-модулей. Этот же одренок выполняет управление системой выпуска/впуска пучка: дефлектором ВЭПП-3 и инфлекторами ВЭПП-4М.

К точности управления полями в дипольных магнитах канала предъявляются высокие требования: относительная стабильность отработки полей в выбранном режиме работы должна быть не хуже 10^{-4} . Кроме того, канал должен обеспечивать перепуск пучка на различных уровнях энергии в диапазоне от 1 ГэВ до 1.9 ГэВ. Для обеспечения надежного перепуска с высоким коэффициентом прохождения пучка необходимо перед перепуском заданным

образом с высокой точностью (лучше 0.1 мм) выставить орбиты пучка в ВЭПП-3 и ВЭПП-4М. Перепуск пучков из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М происходит сравнительно редко, что, с одной стороны, объясняется продолжительным (порядка 20 минут) временем подготовки пучка в ВЭПП-3, а, с другой стороны, оптимизацией соотношения времен, затрачиваемых на перепуски и на проведение экспериментов в ВЭПП-4М. При каждом перепуске нового пучка в ВЭПП-4М приводит к выбиванию соответствующего циркулирующего пучка. Поэтому очень важна надежность отработки каждого перепуска.

Для выполнения всех перечисленных требований были предложены и реализованы несколько способов, которые описаны ниже.

(1) **Синхронизация измерений параметров источников питания.** Как и в случае инжектора “Позитрон”, при управлении импульсными источниками питания необходимо обеспечить синхронное измерение напряжения на конденсаторной батарее импульсного источника непосредственно перед срабатыванием (“выстрелом”) и поля в магните в момент пролета пучка. В отличие от инжектора, работающего с частотой 1 Гц, где требуется заряд конденсаторных батарей источников за несколько сотен миллисекунд, в случае канала ВЭПП-3 – ВЭПП-4М, срабатывающего не чаще одного раза в минуту, батареи заряжаются малым током за время порядка минуты. В этом случае есть достаточное время, чтобы измерить напряжения на батареях всех источников питания перед выстрелом с хорошей точностью (лучше 10^{-4}). Измерения выполняются с помощью двух АЦП интегрирующего типа за интервал времени порядка 400 мс. Во время “выстрела” выполняется измерение полей или токов в магнитах. После “выстрела” измерения записываются в специальный массив программы BANK, работающей с аппаратурой, и становятся доступными для других программ.

(2) **Методика использования опорных режимов** позволяет оперативно перестраивать энергию канала транспортировки в диапазоне от 1 ГэВ до 1.9 ГэВ. Проблема перестройки канала на другую энергию частиц заключается в том, что магниты различного типа (а используется более 10 типов магнитов) имеют

различное состояние по насыщению железа, и простым пересчетом значений уставок не удастся изменить режим работы по энергии. Реализована методика использования промежуточных опорных режимов, настроенных с шагом в 300 – 500 МэВ. Выбранный опорный режим пересчитывается в нужное значение и загружается в устройства. Далее перед перепуском выполняется

(3) *процедура настройки канала*. Необходимость процедуры настройки объясняется тем, что величины полей в магнитах зависят от температур элементов магнитов, токоподводящих кабелей, элементов источников питания, окружающего воздуха, которые практически никак не контролируются. Поэтому перед тем, как выполнить перепуск, делается настройка канала, задача которой получить значения полей в магнитах в точном соответствии с режимными значениями. Процедура выполняется за несколько “выстрелов”. Первые “выстрелы” делаются с целью вывести элементы канала на стабильный температурный режим, при выполнении трех последних “выстрелов” в задания напряжений на конденсаторных батареях источников питания вносятся поправки с целью получить правильные измеренные значения полей. После настройки режима, перед тем, как сделать “выстрел” с пучком, выполняется

(4) *подготовка перепуска*. Эта процедура необходима для компенсации отклонений, которые все же возникают либо при пересчете режима, либо из-за изменения каких-либо условий, возникающих в процессе работы. Сначала, если режим канала был настроен более чем за 10 минут до перепуска, делается проверочный “выстрел”. Этот выстрел предназначен для восстановления температурного режима и для проверки, что все источники питания работают правильно. Затем в указанные элементы вносятся дополнительные поправки. Далее устанавливается статус канала “готов к перепуску”, по которому подготавливается различное оборудование диагностики пучка. После этого выполняется перепуск. Поправки, автоматически вносимые непосредственно перед перепуском, можно оперативно изменять.

2.2.6 Управление коллайдером ВЭПП-4М

Для управления коллайдером ВЭПП-4 используется два одренка: один – для управления магнитной системой и ВЧ, другой – для диагностики пучка. Упрощенная блок-диаграмма компьютеров, аппаратуры и программ, используемых для управления ВЭПП-4М, представлена на рисунке 2.8. Всего используется более 80-ти КАМАК-модулей, размещенных в 13 крейтах.

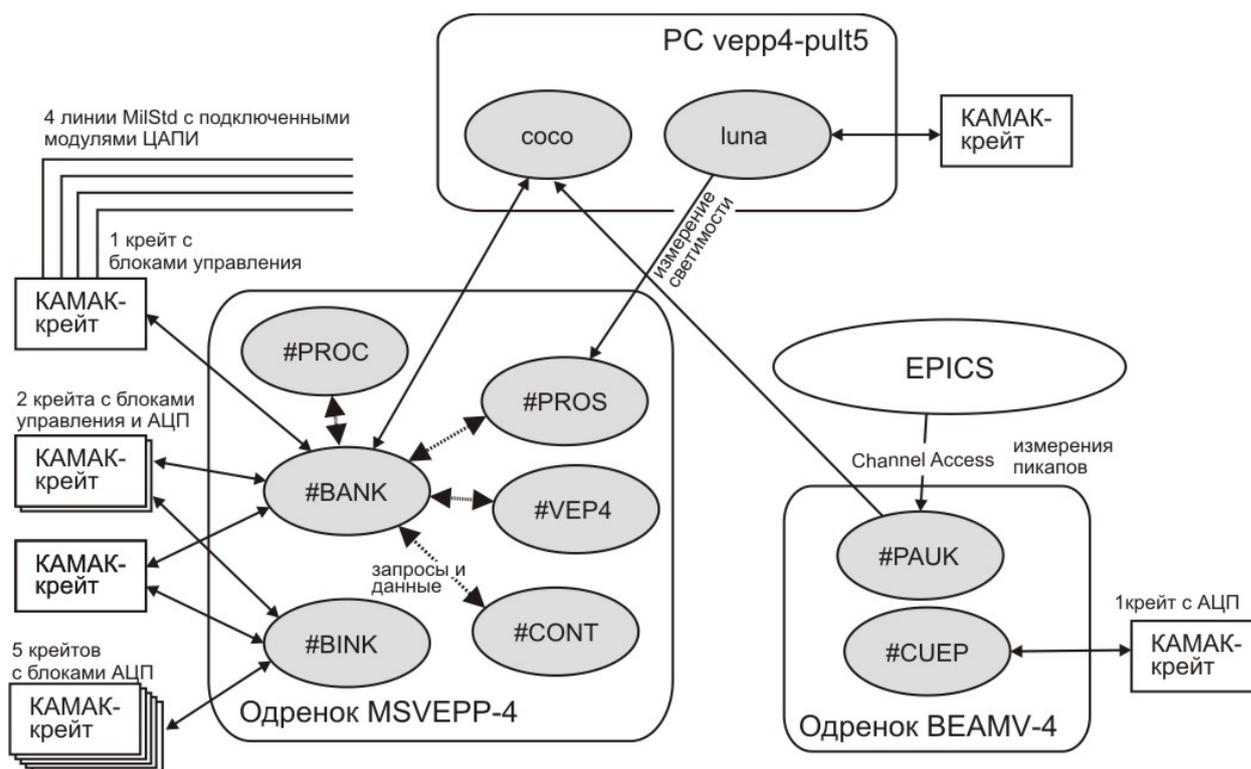


Рисунок 2.8: Упрощенная блок-диаграмма системы управления коллайдера ВЭПП-4М.

Несмотря на сравнительно большое число источников питания магнитной системы (более 300), для синхронного управления ими во время изменения энергии используется всего один одренок, т.к. сам процесс управления (изменение опорного напряжения, управляющего источниками питания) реализуется при помощи почти пятидесяти ЦАП с интерполяцией выходного сигнала (ЦАПИ) [57], подключенных к одренку с помощью интерфейса MilStd [58]. Со стороны одренка требуется предварительная загрузка в ЦАПИ таблиц с опорными значениями и временами переходов к ним. По команде от одренка

между опорными значениями загруженных таблиц в ЦАПИ выполняются переходы по линейной зависимости. При этом все ЦАПИ работают автономно и синхронно, обеспечивая изменение выходного напряжения с частотой 256 Гц. Для управления основными элементами магнитной структуры используется 23 одноканальных ЦАПИ, имеющих 20-ти разрядный ЦАП. Для управления остальными элементами коллайдера используется 25 16-канальных ЦАПИ, имеющих 14-ти разрядный ЦАП. Как и на ВЭПП-3, все магниты коллайдера ВЭПП-4М изготовлены из цельного железа, что ограничивает максимальный темп ускорения на уровне 10 МэВ/с.

Для обеспечения впуска пучков в ВЭПП-4М и их ускорения было предложено и реализовано несколько методик.

(1) *Подготовка кольца для инжекции пучка.* В кольце ВЭПП-4М одновременно могут циркулировать по два сгустка электронов и позитронов. Чтобы сгустки не сталкивались друг с другом организовано четыре места разведения пучков по вертикали, равноудаленных друг от друга на четверть периметра кольца. В этих местах с помощью электростатических полей для равновесных орбит электронов и позитронов сделаны искажения по вертикали в виде противоположных бампов величиной в 3 мм. Для того, чтобы частицы влетели в кольцо коллайдера без вертикальных колебаний перед впуском во впускном промежутке четырьмя вертикальными магнитными корректорами делается антибамп таким образом, чтобы траектория орбиты частиц той полярности, которая впускается, проходила по центру вакуумной камеры. Кроме того, для расширения динамической апертуры для впускаемого пучка делается небольшой сдвиг рабочей точки бетатронных частот.

Как и в случае ВЭПП-3, при изменении энергии кольца ВЭПП-4М из-за неодинаковости насыщения железа у различных элементов магнитной структуры происходит расхождение магнитных полей при пропорциональном изменении токов. Поэтому для обеспечения ускорения применяется та же методика использования промежуточных настроенных режимов (см. п. 2.2.4). Последовательности настроенных значений загружаются в ЦАПИ, которые, после

прихода команды “старт”, синхронно отрабатывают весь процесс перехода по всем промежуточным состояниям. Для компенсации отклонений магнитных полей различных элементов, возникающих в процессе перестройки из-за неодинаковости магнитных свойств железа, применяется способ

(2) *внесения “динамических” поправок при ускорении пучка.* Перед загрузкой в ЦАПИ в таблицы значений токов вносятся поправки, которые учитывают расхождения магнитных полей, возникающих непосредственно в ходе ускорения. В конце процесса ускорения, после отработки последнего поправленного значения делается плавный переход в соответствующее настроенное значение для данной энергии. Использование динамических поправок позволяет в 2-3 раза сократить время ускорения пучка в ВЭПП-4М. В настоящее время ускорение от 1.8 ГэВ до 4 ГэВ занимает примерно 4 минуты.

(3) *Выполнение цикла перемагничивания, “верхний” и “нижний” циклы перемагничивания.* После выполнения программы на энергии эксперимента для возврата к энергии впуска на ВЭПП-4М, как и на ВЭПП-3, требуется выполнить цикл перемагничивания. Основные источники питания ВЭПП-4 (диполи, квадруполь) работают в одной полярности, поэтому для них выполняется “частный” цикл по петле гистерезиса: сначала задаются значения для замагничивания, превышающие максимальные значения для работы с пучком, затем – значения, которые меньше значений, требующихся для впуска пучка, и, наконец, задаются значения для режима впуска. Часть элементов магнитной системы (сосредоточенные корректоры, скью-квадруполь) в разных режимах работы могут иметь различную полярность поля. Эти элементы перемагничиваются по “полной” двухполярной петле.

После выполнения цикла перемагничивания, описанного выше, магнитная система оказывается настроенной для дальнейшего увеличения полей, т.е. для движения вверх по энергии: магнитные домены в железе сориентированы правильным образом и не требуется увеличивать ток, чтобы изменить их ориентацию [59]. Такой цикл перемагничивания называется “верхним”. Но на ВЭПП-4М возможно не только ускорение, но и “замедление” частиц. Эта

процедура выполняется, когда энергия эксперимента оказывается ниже энергии инжектируемого пучка. Для реализации замедления предусмотрен т.н. “нижний” цикл перемагничивания. В нижнем цикле перемагничивание выполняется следующим образом: после отработки пучка на энергии эксперимента сначала задаются минимальные значения токов, затем делается переход в значения токов, превышающие значения токов на впуске пучка, а затем – устанавливаются токи для энергии впуска. После такой процедуры магнитная система сориентирована для движения вниз по энергии. Схематично циклы перемагничивания для ВЭПП-4М показаны на рисунке 2.9.

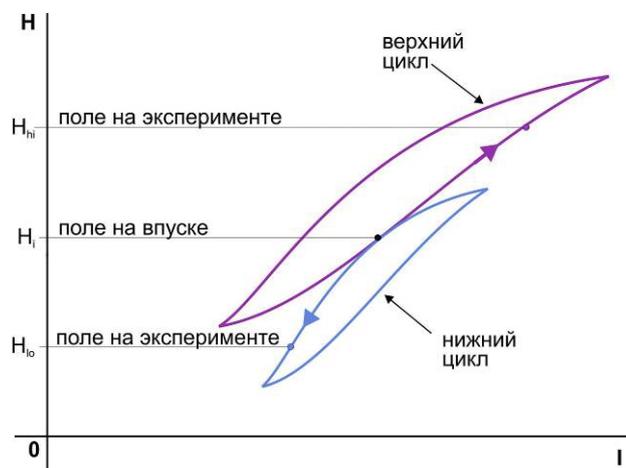


Рисунок 2.9: “Верхний” и “нижний” циклы перемагничивания магнитной системы ВЭПП-4М.

2.2.7 Работа с инжекционным комплексом (ИК)

Осенью 2016 г. для перехода на получение пучков от инжекционного комплекса (ИК) ВЭПП-5 в систему управления комплексом ВЭПП-4 была добавлена подсистема, управляющая частью канала К500 транспортировки пучка от ИК до ВЭПП-3. Эта часть канала включает 20 импульсных и постоянных магнитов. Импульсные магниты запитываются от источников питания ГИД-25. Было также переделано и управление инфлектором ВЭПП-3. Для управления этой частью канала К500 используется аппаратура с интерфейсом CAN [60]. Блок-схема подключения аппаратуры показана на рисунке 2.10.

Для синхронизации управления импульсными элементами была использована хорошо отработанная на ВЭПП-4 методика синхронизации

измерений импульсных источников питания. АЦП, которые используются для измерения напряжения на конденсаторных батареях импульсных источников питания канала К500, не предназначены для работы с привязкой к внешним событиям. Эти АЦП циклически измеряют группу запрограммированных сигналов, поступающих сразу от нескольких источников питания, с периодом примерно 500 мс.

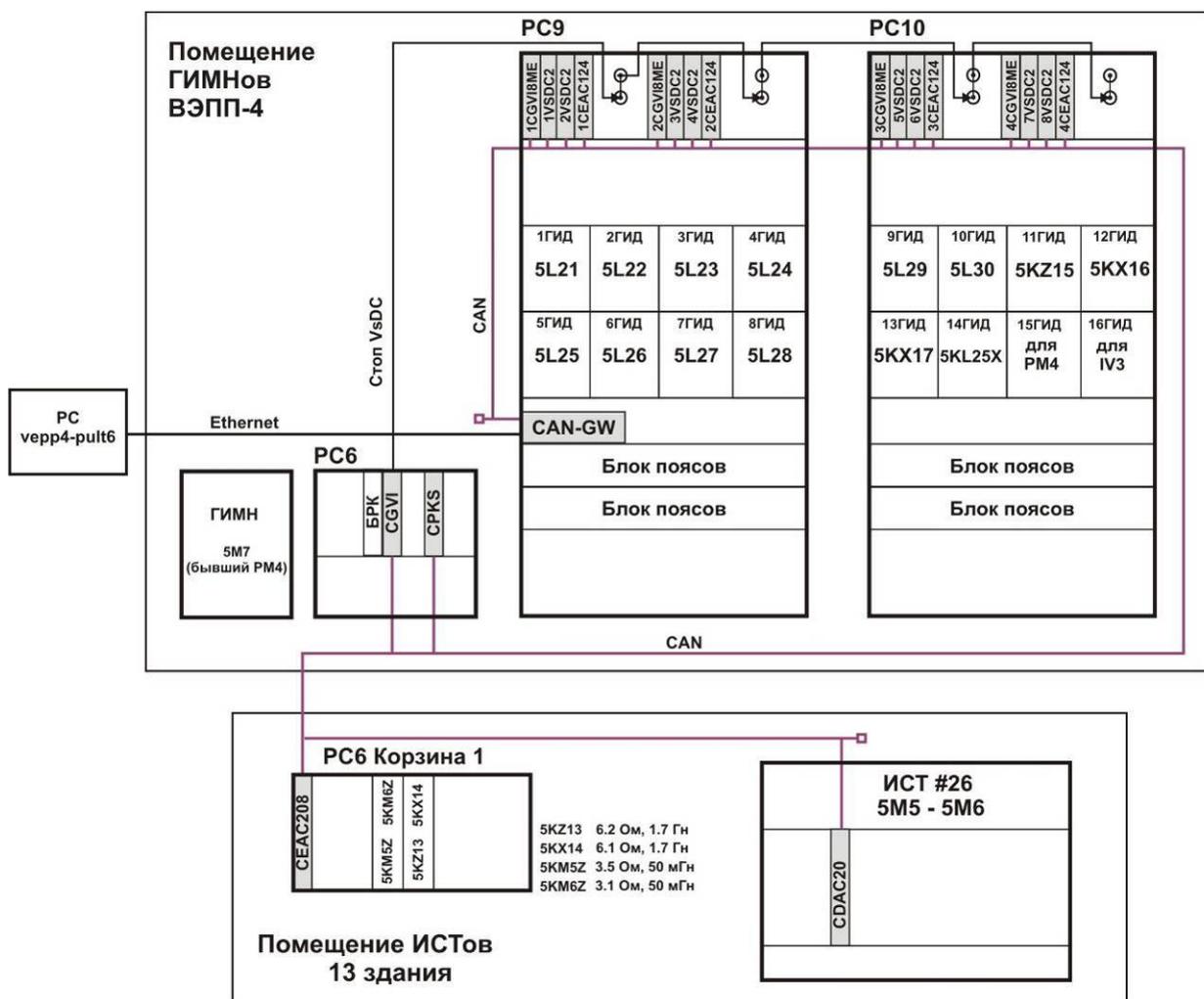


Рисунок 2.10: Схема аппаратуры для управления каналом К500.

Поэтому, задачу синхронизации измерений пришлось решить на программном уровне. Драйвер АЦП, чтобы определить, какое измерение АЦП соответствует текущему “выстрелу” канала, использует привязку к обновлению значения другого измеренного сигнала – тока в магните. Измерение тока выполняется в блоке VsDC [61] и появляется в системе через несколько миллисекунд после “выстрела” канала. Измеренные таким образом величины

напряжения на конденсаторной батарее и тока в магните составляют согласованную пару значений, соответствующую для каждого элемента текущему циклу срабатывания, и используются для характеристики режима работы элемента.

2.3 ПО системы управления комплекса ВЭПП-4

Программное обеспечение, постоянно функционирующее для управления комплексом ВЭПП-4, включает около 70 программ, работающих в семи одрятах, и около 20 приложений в РС. Список основных программ для управления комплексом ВЭПП-4 приведен в Приложении 1. В течение последних нескольких лет на комплексе постепенно внедряется EPICS. Задействовано новое оборудование для диагностики пучка (см. 2.3.4), которое обслуживается серверами ИОС (Input-Output Controller) [62]. Также появились ИОС, обрабатывающие данные, поступающие из одрят. Дальнейшие планы по замене оборудования и переносу ПО из одренка в РС в основном связаны с использованием EPICS.

Для организации ПО управления реализована следующая структура:

- программы для взаимодействия с аппаратурой,
- программы, используемые операторами для задания уставок в устройства и для визуализации их состояния,
- сервисные программы для настройки режимов и сценариев работы установок комплекса,
- программы автоматизации работы комплекса.

Кроме этого существуют еще программы для работы с конфигурационными файлами, программы, обеспечивающие инфраструктуру одрят и РС, широкий набор программ для тестирования электроники и источников питания. Всего ПО системы управления ВЭПП-4 без учета приложений, разработанных под EPICS, насчитывает более 120 программ, которые регулярно используются операторами и инженерами комплекса.

2.3.1 ПО для взаимодействия с электроникой

В основу системы управления ВЭПП-4 заложена концепция вынесения взаимодействия ЭВМ с электроникой в отдельную программу, которая должна обеспечивать доступ к аппаратуре, получая запросы и данные от остальных программ. Такой подход исключает конфликты при работе с аппаратурой и разгружает многочисленные пользовательские программы от дублирования функций, обеспечивающих доступ к устройствам. Кроме того, поскольку работать с аппаратурой нужно, как правило, в реальном времени синхронно с работой установки, то использование специализированной программы позволяет реализовать механизмы синхронизации только в одной программе. Исторически в системе управления ВЭПП-4 такая специальная программа для работы с аппаратурой называется BANK, т.к. при работе в действительности содержит в своих массивах банк данных о конфигурации и состоянии всех устройств. Все данные (значения параметров, идентификаторы аппаратуры, коэффициенты, и т.п.) в программе BANK размещаются в виде соответствующих друг другу массивов, при этом, каждое значение, относящееся к одному параметру, во всех массивах занимает одно и то же положение, которое является одной из характеристик параметра.

В данном разделе описаны некоторые способы, реализованные автором в программах BANK для обеспечения работы с аппаратурой при управлении различными установками комплекса.

Для организации запросов на чтение/запись из/в аппаратуру, разработаны два способа, позволяющие управлять работой серверных программ BANK из других программ.

Первый способ с использованием единой специальной индикаторной ячейки (“семафора”) (см. рисунок 2.11) применяется для задания уставок в элементы ВЭПП-3 и ВЭПП-4М.

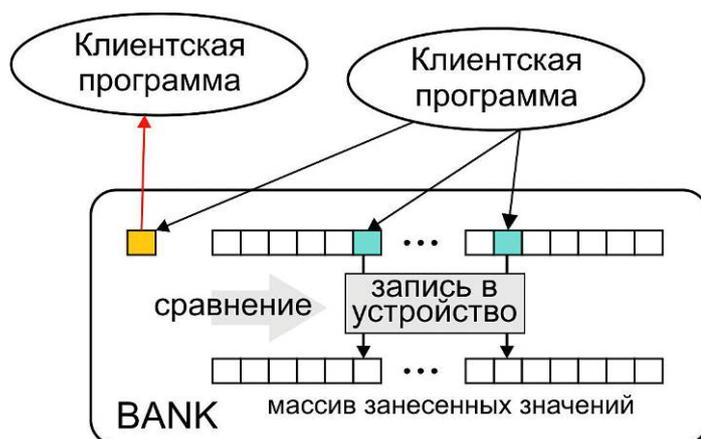


Рисунок 2.11: Схема обработки запросов типа “семафор” на запись уставок при управлении элементами ВЭПП-3 и ВЭПП-4М.

В этом случае клиентская программа записывает уставки в определенные ячейки специального массива в памяти программы BANK и устанавливает значение семафора, равное времени, за которое новые уставки должны быть занесены в устройство. BANK, обнаружив установленный семафор, производит сравнение двух массивов: массива, куда записаны новые уставки, и массива, в котором содержатся значения, занесенные в аппаратуру. Если значения соответствующих ячеек отличаются, то новые уставки после проверки на соответствие допустимому диапазону заносятся в аппаратуру. Наличие установленного семафора для другой клиентской программы означает, что BANK занят работой по занесению новых значений в аппаратуру.

Второй способ использует флаговый механизм, когда для заказа на обновление (запись/чтение) каждого значения используется отдельный флаг. Этот способ применяется в случае управления импульсными устройствами и в случае запросов на чтение интегрирующих АЦП. Схема флагового механизма показана на рисунке 2.12. В этом случае программа BANK, работая синхронно с установкой по заданному циклу, в определенные моменты выполняет проверку флагов и в случае установленного флага заносит значение в аппаратуру или выполняет чтение.

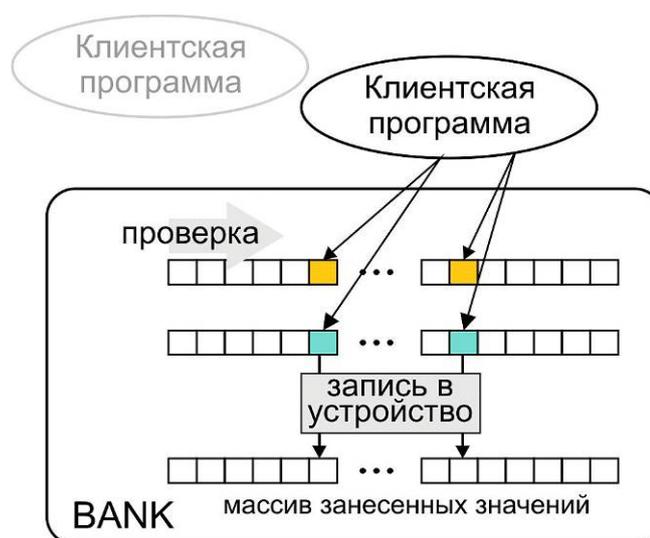


Рисунок 2.12: Схема флагового механизма обработки запросов на взаимодействие с аппаратурой.

Инжектор “Позитрон” работает в циклическом режиме с частотой 1 Гц. За время цикла нужно выполнить два сеанса измерений параметров установки (до и после “выстрела”), а сразу после “выстрела” задать новые значения, поступившие от других программ, в устройства, чтобы устройства успели отработать новые задания до следующего “выстрела”. Привязка работы программ к внешним событиям осуществляется при помощи специального механизма прерываний (пинтов – от сокращения слов Peripheral INTerruption), реализованного в операционной системе ODOS. В частности, механизм запускается от внешних импульсов, поступающих от системы синхронизации на вход специального блока, обслуживаемого ODOS. По приходу импульса в течение нескольких десятков микросекунд ODOS генерирует прерывание, по которому управление может быть передано какой-либо программе. Существует система приоритетов, по которой в первую очередь запускается программа с самым большим приоритетом. Программы, работающие с аппаратурой, как правило, имеют наибольший приоритет.

Измерения, выполняемые для управления установкой, можно разбить на две группы:

- **“регулярные”** измерения, которые не требуют запроса на их выполнение, выполняются программой BANK по внешней

синхронизации и, начиная с определенного момента времени цикла работы установки, готовы для чтения,

- “*заказные*” измерения, которые выполняются по запросу из программы, работающей с аппаратурой, занимают продолжительное время, которое нужно учитывать при формировании цикла работы программы.

Заказные измерения выполняются при помощи АЦП интегрирующего типа [55]. Их, в свою очередь, можно разделить на три группы:

- сигналы, которые должны быть измерены до “выстрела”; это, в основном, напряжения на конденсаторных батареях импульсных генераторов (см. п. 2.2.3(6)),
- сигналы, которые должны быть прочитаны из аппаратуры сразу после “выстрела”; например, значение тока пучка, захваченного в накопитель,
- сигналы, которые, в принципе, могут быть измерены в любой момент времени цикла; например, токи накалов ламп, токи элементов постоянного питания магнитной системы².

Упрощенная диаграмма цикла работы программ BANK, управляющих инжектором и каналом транспортировки ВЭПП-3 –ВЭПП-4М, показана на рисунке 2.13. Поскольку на BANK возложена функция формирования банка данных значений параметров в привязке к работе установки, то для упрощения логики его работы взаимодействие с интегрирующими АЦП вынесено в отдельную программу LPA. Программа LPA работает одновременно со всеми АЦП, сортируя запросы в зависимости от фазы работы установки. В определенный момент цикла работы инжектора LPA передает результаты измерений, сделанных в предыдущем цикле, в BANK, откуда они становятся доступными для других программ.

² Такой подход не предоставляет достоверной информации о состоянии DC-источников питания в момент пролета пучка. В разделах 3.4.4 и 3.5.2 Главы 3 рассматривается подход, решающий эту задачу.

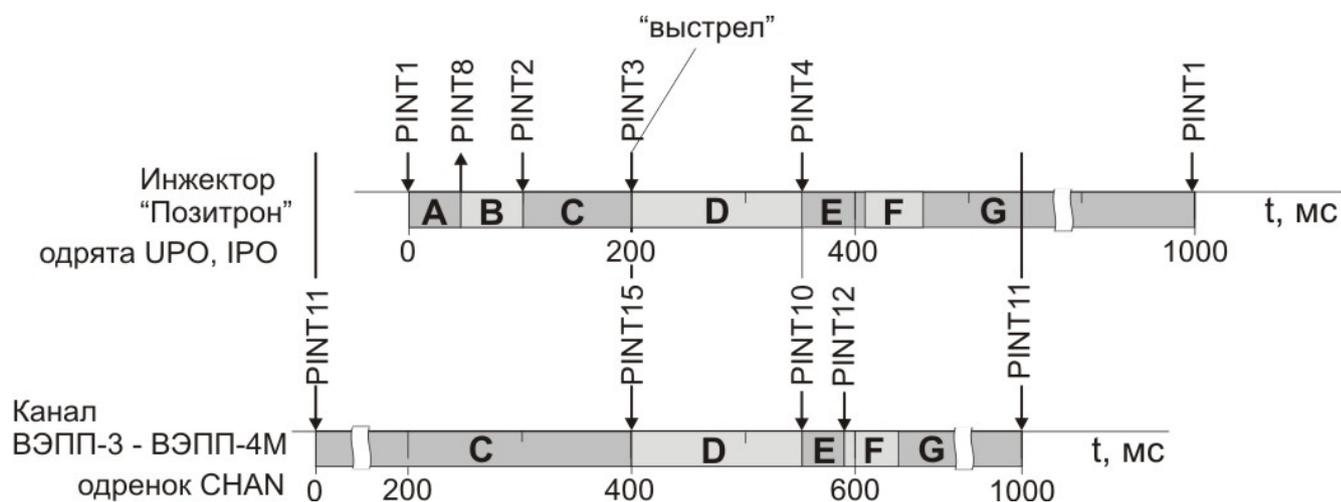


Рисунок 2.13: Упрощенная диаграмма цикла работы программ, взаимодействующих с аппаратурой, для инжектора “Позитрон” (сверху) и канала транспортировки ВЭПП-3 - ВЭПП-4М (снизу).

На рисунке 2.13 отмечены следующие интервалы:

- А – начальный интервал цикла в течение которого происходят обмены данными, соответствующими предыдущему циклу, с программами LIPU, LIP1 и BINK (см. п. 2.2.3), а также “гасятся” обслуженные запросы на управление и измерение, полученные в предыдущем цикле; после подготовки данных программа BANK генерирует прерывание (PINT8) для других программ, означающее, что данные готовы;
- В – интервал, в течение которого другие программы могут прочесть данные из BANK, соответствующие предыдущему циклу инжектора;
- С – интервал, выделенный для опроса напряжений на конденсаторных батареях перед “выстрелом”;
- Д – работа электроники во время выполнения и после “выстрела”;
- Е – обслуживание запросов на измерение - чтение аппаратуры (опрос регулярных измерений);
- Ф – обслуживание запросов на управление – запись в аппаратуру новых уставок;
- Г – ожидание прерывания, означающего старт следующего цикла.

Канал транспортировки пучка ВЭПП-3 – ВЭПП-4М может работать с периодичностью не чаще 1 раза в минуту, но при этом делает свой “выстрел” каждый раз синхронно с “выстрелом” инжектора “Позитрон”. Это позволяет при измерении сигналов, отображающих значения параметров устройств канала, учесть наводки, неизбежно возникающие во всех измерительных цепях, когда происходит срабатывание мощных импульсных устройств инжектора. Поэтому работа программы BANK в одренке, управляющем каналом, синхронизирована с программой BANK инжектора. В BANK канала формируются интервалы, аналогичные интервалам BANK инжектора, за исключением интервалов А и В. Интервалы F и G в случае канала означает, что другие управляющие программы могут прочесть данные, соответствующие предыдущему циклу.

Управление коллайдером ВЭПП-4М осуществляется с помощью ЦАПов-интерполяторов (ЦАПИ) (см. п. 2.2.6). ЦАПИ имеют два режима работы:

- переход из текущего в указанное значение за заданное время, выполняемый по линейной зависимости (режим одной строки),
- отработка таблицы, заранее загруженной в память ЦАПИ (режим таблицы).

Таблица содержит строки, состоящие из пар значений (уставка и время отработки). В режиме таблицы ЦАПИ по команде старт самостоятельно отработывает последовательность табличных значений, делая переходы между ними по линейной зависимости. В случае 16-канального ЦАПИ отработка таблицы выполняется одновременно для всех каналов. Поэтому нужно заботиться о содержании таблиц всех каналов данного ЦАПИ, если требуется отработать уставку для одного, или нескольких каналов.

Программа BANK ВЭПП-4М реализует все функции работы с ЦАПИ: режимы одиночной строки и таблицы, может останавливать и продолжать выполнение отработки, проверять статус ЦАПИ. Данные каналов управления в любой момент доступны для чтения/записи из других программ. BANK имеет внутренний цикл по обработке запросов на управление, тактируемый частотой 5 Гц. В случае отработки задания вносить в ЦАПИ какие-либо новые уставки

невозможно до окончания обработки таблицы, или принудительной остановки обработки.

В системе управления коллайдера ВЭПП-4М имеется около 700 сигналов от источников питания и ВЧ системы, которые измеряются с помощью 10 АЦП интегрирующего типа. Как и в случае инжектора “Позитрон” с целью упрощения программы BANK для работы с АЦП была разработана отдельная программа BINK, которая обслуживает запросы на измерения, поступающие от других программ. Работа программы BINK не связана с работой BANK и, соответственно, с работой ВЭПП-4М. BINK, получив запрос, немедленно запускает измерение соответствующего канала одного из 10 АЦП. По окончании измерения BINK выставляет прерывание, по которому программа, сделавшая запрос, может прочитать измеренное значение из буфера BINK. В среднем на передачу запроса, обработку прерываний и чтение значения дополнительно к времени, требующемуся на выполнение самого измерения в АЦП, тратится примерно 5 мс, чем ограничивается максимальная частота опроса одного канала.

2.3.2 Операторские программы

Операторские программы, или программы верхнего уровня (см. п. 1.5.5 Гл. 1), предоставляют пользователю интерфейс для управления параметрами установки. В этом разделе кратко изложены некоторые методы, предложенные и реализованные автором при создании операторских программ.

В 80-90е годы на этапе разработки системы управления ВЭПП-4 еще не существовало графических дисплеев высокого разрешения, сенсорных экранов, манипуляторов с помощью которых в настоящее время выполняется ввод и вывод информации. При использовании одренка практически была возможность задействовать только клавиатуру и алфавитно-цифровой дисплей. В этих условиях для системы управления ВЭПП-4 был разработан набор эффективных программ для задания уставок с одновременным отображением численной информации об управляемых параметрах. Было разработано две группы программ: для управления циклическими системами (инжектор и канал ВЭПП-3 –

ВЭПП-4М) и для управления “статическими” системами - кольцами ВЭПП-3 и ВЭПП-4М.

При управлении циклическими системами для удобства и наглядности используется группировка параметров в элементы, т.е. в конфигурации системы определяется элемент управления (например, импульсный магнит), и к нему относятся все контрольно-измерительные параметры, характеризующие его состояние: уставки напряжения и задержки запуска, измерения напряжения и тока, состояния реле переключений и блокировок. При выборе нужного элемента на экран терминала выводится список параметров управления для этого элемента, а после выбора нужного параметра управления программа переходит в режим циклического вывода на экран состояния всех параметров данного элемента. Ввод нового значения выбранного параметра управления осуществляется после нажатия специальной клавиши, останавливающей процесс вывода. Ввод значений осуществляется как в абсолютных, так и в относительных величинах, путем прямого задания или с помощью добавки, величину которой можно менять с помощью стрелок клавиатуры. Программы предоставляют подсказки на всех уровнях работы: при вводе имени элемента или канала управления и при выборе способа занесения уставки.

Все подсистемы комплекса ВЭПП-4 состоят из множества элементов, за состоянием которых осуществляется непрерывное наблюдение. Состояние определяется путем сравнения измеренных отработанных значений с опорными значениями, т.е. осуществляется непрерывный мониторинг значений параметров.

В качестве опорных значений для мониторинга используются либо (1) уставки, занесенные в устройства, либо (2) измерения, запомненные для правильного настроенного состояния установки. Первый способ применяется для мониторинга состояния колец ВЭПП-3 и ВЭПП-4М. Второй способ используется для импульсных систем, у которых значение параметра, влияющего на движение частиц пучка, определяется двумя или большим числом задаваемых параметров, например: напряжением на конденсаторной батарее, задержкой запуска устройства. В этом случае надежным параметром для мониторинга оказывается

запомненное значение поля в импульсном магните. По сравнению с первым способом, второй способ имеет преимущество в том, что выполняется мониторинг параметра, непосредственно влияющего на движение пучка.

Из-за большого числа элементов и параметров численный способ представления информации о состоянии установки для оператора практически неудобен и неэффективен. Был реализован способ оперативного отображения состояния параметров при помощи закрашки соответствующим цветом прямоугольников, обозначающих элементы. В окне, выводимом программой, все прямоугольники, обозначающие элементы, имеют фиксированное положение и упорядочены в соответствии с их функциональным назначением или по схеме движения пучка. Используется четыре уровня состояния:

- отклонение параметра в норме (зеленый цвет),
- отклонение параметра не приводит к существенному нарушению режима работы (желтый цвет),
- существенное отклонение значения параметра, для нормальной работы необходимо исправление ситуации (сиреневый цвет),
- сильное отклонение параметра, работа с пучком невозможна (красный цвет).

Для каждой установки комплекса ВЭПП-4 разработана программа мониторинга (исторически эти программы называются CONT), в которой учитываются специфика работы и задачи конкретной установки. В окне каждой программы отображаются не только обозначения элементов, но также в виде чисел и текста выводятся состояния наиболее важных параметров: энергии частиц и тока пучка, статуса установки и др. Пример окна программы CONT для канала транспортировки пучка ВЭПП-3 – ВЭПП-4М приведен на рисунке 2.14.

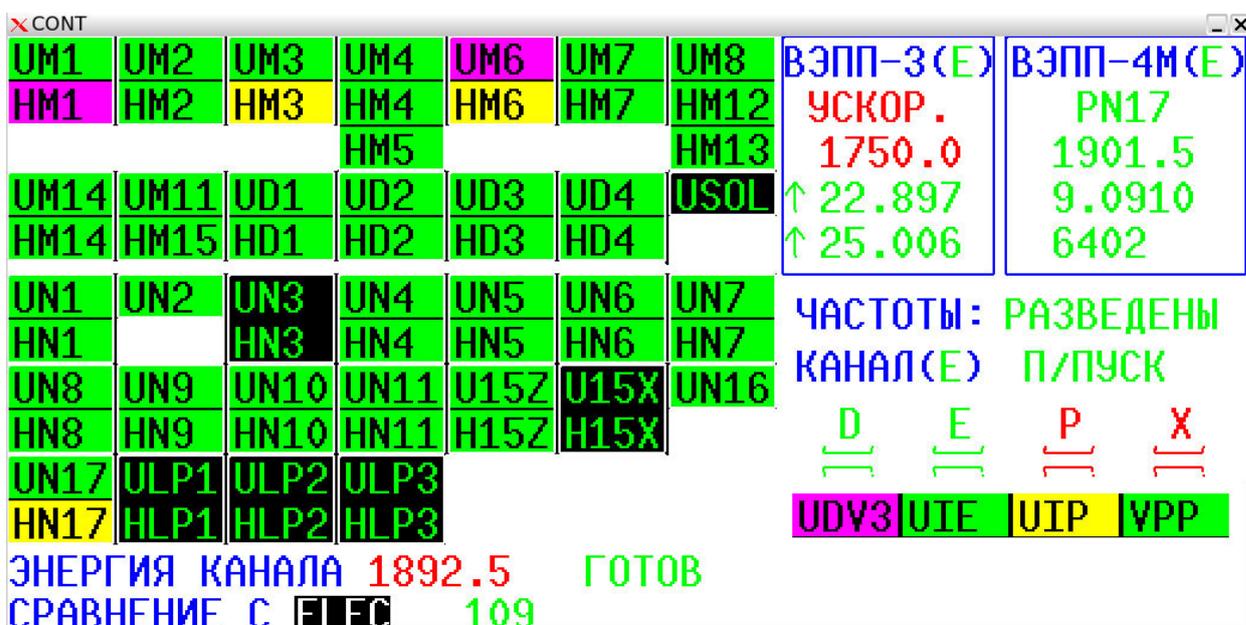


Рисунок 2.14: Окно программы мониторинга и автоподстройки состояния канала транспортировки ВЭПП-3 – ВЭПП-4М.

На рисунке 2.14 программа отображает состояние параметров элементов в момент перепуска пучка. Некоторые параметры, соответствующие величинам измеренных магнитных полей, окрашены в желтый и малиновый цвет, что в данном случае является результатом внесения специальных добавок, обеспечивающих дополнительную настройку относительно зафиксированного режима (см. п. 2.2.5). Кроме графического представления по желанию оператора может быть выполнен численный вывод отклонений параметров.

2.3.3 Сервисные программы в одрятах

В ПО системы управления важное место занимают программы, не использующиеся непосредственно в управлении установками, но выполняющие важную роль в формировании процессов управления: программы обеспечивают работу с данными и конфигурирование системы. В современной структуризации систем управления эти задачи во многих случаях решаются на уровне системных сервисов (см. п. 1.5.1 Главы 1), поэтому эта часть ПО выделена в данном разделе, как сервисные программы.

В первую очередь необходимо отметить программы, обеспечивающие сохранение текущего состояния установки (режима работы) с возможностью его

последующего восстановления. Программы позволяют сохранять режим, загружать выбранный режим в устройства, делать детальное сравнение режимов, включая сравнение с текущим состоянием, как поэлементно, так и по группам. Режим в программах представляется в виде упорядоченного списка элементов управления и значений их параметров.

Для ВЭПП-4М, у которого много сценариев работы, предусмотрен сервис, позволяющий работать со многими архивами (сборками) режимов: для ускорения, для “замедления” пучка, для работы с включенным и выключенным детектором “Кедр”, для работы на генерацию СИ и т.п. По этой же причине для ВЭПП-4М разработан редактор процессов, позволяющий оперативно создавать и изменять различные сценарии процесса ускорения пучка.

Для конфигурирования аппаратуры и элементов управления была разработана система, позволяющая формировать и редактировать описание всех необходимых составляющих системы управления: компьютеров, крейтов, модулей электроники, элементов и контрольно-измерительных каналов. Был разработан специальный формат файлов, позволяющий в компактном виде хранить данные, а специальные программы позволяют редактировать и просматривать содержимое файлов в различных вариантах. Кроме того, специальные программы на основе содержимого этих файлов заранее подготавливают рабочие массивы с данными (адресами, максимальными уставками и т.п.) для программ BANK, работающих с аппаратурой, что позволяет уменьшить размер программ, постоянно находящихся в оперативной памяти одрят.

2.3.4 Компоненты системы управления на базе РС под Linux

В процессе развития системы управления на базе РС под управлением Linux были внедрены следующие программные системы:

- файловый сервер, обеспечивающий загрузку одрят, предоставляющий им доступ к жесткому диску, а также поддерживающий систему межпроцессорного обмена star (см. п. 2.2.2),

- kadrserver, обеспечивающий прием данных из одрят и их запись в специальные текстовые файлы для последующего использования приложениями, работающими в РС,
- база данных PostgreSQL параметров установок и систем комплекса ВЭПП-4, сохраняющая значения всех контрольно-измерительных каналов, статусы установок в процессе их изменения [45], а также набор серверных приложений, обеспечивающих запись данных в базу.

Была создана тотальная система измерения температур на комплексе ВЭПП-4, включая измерения температуры элементов различных систем, температуры охлаждающей воды, воздуха и стен тоннеля [47]. Эта система позволяет не только отслеживать температуры, но и прогнозировать изменение энергии частиц пучка в ВЭПП-4М между калибровками энергии [63]. Для этой системы был разработан специальный контроллер с интерфейсом RS485, к которому можно подключать до 32-х цифровых термодатчиков [64]. Термоконтроллер обеспечивает измерение температуры и блокировочные функции. Всего на комплексе установлено более 35 контроллеров и более 700 термодатчиков, из которых более 400 датчиков задействовано в цепях блокировок источников питания магнитов по температуре нагрузок.

К РС подключено несколько новых систем диагностики пучка: система измерения поперечного профиля пучка по пятну синхротронного излучения [65], многоанодный ФЭУ для пооборотного измерения поперечного размера пучка, позволяющий детектировать фазовые колебания [66].

Под управлением EPICS на комплексе работает новая система электроники пикапов [51], на ВЭПП-3 - аппаратура для измерения бетатронных частот и распределения пучка по сепаратрисам. Активно внедряются “программные” ИОС [62] для обработки данных, предоставляющие пользователю доступ к данным по протоколу Channel Access [67]. Таким образом, например, обрабатываются данные, полученные с пикап-станций, и в итоге пользователю предоставляется готовая орбита пучка, или массив значений бета-функции в кольце ВЭПП-4М. Также в виде PV представлены все значения параметров, получаемые из

программ, работающих в одрятах. Всего в РС, связанных с системой управления ВЭПП-4 в настоящее время работает около сотни ИОС.

Для взаимодействия с аппаратурой, управляющей каналом K500 перепуска пучка из инжекционного комплекса (ИК) в ВЭПП-3, используется сервер модульной сетевой системы управления СХ [68], разработанной в ИЯФ. Сервер обеспечивает запись уставок в аппаратуру и чтение измерений. Большая часть элементов канала имеет импульсный режим работы, в связи с этим в сервере реализован метод синхронного чтения данных, описанный в п. 2.2.7. Для взаимодействия приложений, работающих для управления ИК, и программ системы управления ВЭПП-4М разработана система конверсии данных из переменных среды EPICS в среду СХ и обратно.

2.4 Автоматизация проведения экспериментов

Автором данной диссертации лично или при его непосредственном участии была обеспечена автоматизация работы ускорителей комплекса ВЭПП-4 для всех экспериментов, проводившихся на комплексе, начиная с запуска ВЭПП-3, восстановленного в 1986 году после аварии. Полностью автоматизированы процессы получения пучков на инжекторе “Позитрон”, ускорения пучка в ВЭПП-3 и перепуска пучка из ВЭПП-3 в коллайдер ВЭПП-4М. В процессе проведения экспериментов на коллайдере автоматически регулируются энергия и токи пучков, а также настраивается светимость.

Для проведения экспериментов на коллайдере ВЭПП-4М необходимо обеспечить согласованную работу всех установок комплекса: инжектора, накопителя ВЭПП-3, канала транспортировки частиц и собственно коллайдера. Процессы накопления, ускорения, перепуска частиц состоят из множества операций, которые выполняются в заданной последовательности в зависимости от результата выполнения предыдущих действий, и успешное взаимодействие установок практически невозможно без автоматического выполнения всех операций. В данном разделе кратко описана автоматизация основных процессов управления, обеспечивающих проведение экспериментов на комплексе ВЭПП-4.

2.4.1 Автоматическая настройка инжектора “Позитрон”

Важным фактором, обеспечивающим успешное проведение экспериментов, является снабжение установок комплекса электронными и позитронными пучками. Для обеспечения эффективной работы инжектора “Позитрон” были автоматизированы процедуры отключения/включения систем инжектора по востребованности пучка и настройки режима работы устройств. Отключение позволяет значительно экономить ресурсы расходных элементов (электронные пушки, СВЧ лампы, конвертор), а также снизить расход электроэнергии. При отключении снимаются запуски с импульсных источников питания, снижаются токи накалов и токи, питающие постоянные магниты, а также снимаются запуски с электронных пушек. После появления от ВЭПП-3 запроса на накопление пучка автоматически выполняется загрузка нужного режима (электроны или позитроны), включаются все системы, и начинает выполняться автоподстройка элементов по измерениям полей. В очередном цикле работы в уставки вносятся поправки, пропорциональные отклонению текущих значений параметров от опорных. Опорные значения берутся из режима, заданного в устройства. Коэффициент пропорциональности для задания выбирается меньше единицы, чтобы сгладить процесс подстройки. Процедура настройки систем инжектора занимает примерно 30 – 60 секунд.

Автоматизирована настройка линака, ускоряющего пучок для сброса его на мишень конвертора. В режиме получения позитронов две секции линака настраиваются для обеспечения максимальной энергии частиц, а в режиме электронов – практически в противофазе для обеспечения торможения пучка во второй секции для того, чтобы на выходе линака получить энергию электронов, равную 7 МэВ. Используется следующая методика: первая секция всегда поддерживается настроенной на максимум, а вторая – перестраивается в зависимости от режима работы. В начале настройки заданным образом с помощью механизма, приводимого в движение шаговым двигателем, производится механическое изменение размера торцевого резонатора второй секции, что приводит к смещению ее собственной частоты и тем самым

обеспечивает нужное смещение фаз первой и второй секций в время пролета пучка в течение 30 нс. Затем настройка второй секции с помощью этого же механизма продолжается по эффективности захвата пучка в синхротрон Б-4. Такой способ оказывается наиболее надежным, т.к. собственная частота секций сильно зависит от температуры, а в случае настройки по эффективности захвата в синхротрон влияние температуры линака исключается. По окончании процедуры положение настроечного механизма запоминается как исходное для следующей операции настройки в режиме получения частиц данной полярности.

2.4.2 Автоматизация перепуска пучка из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М

После запуска в 1992 году модернизированного коллайдера ВЭПП-4М проведение первых же экспериментов [69] потребовало автоматизировать процесс перепуска пучка из ВЭПП-3. Перепуск пучка выполняется на энергии, величина которой выбирается из следующих соображений. Канал транспортировки не может перепускать пучок на энергии выше, чем 1.9 ГэВ, поэтому, если для проведения экспериментов нужна более высокая энергия частиц, то перепуск выполняется на энергии 1.9 ГэВ, и далее требуется ускорить пучок в коллайдере до нужной энергии. Если же для эксперимента требуется энергия частиц ниже 1.9 ГэВ, то перепуск выполняется на энергии эксперимента. Перепуск сопровождается согласованными операциями по установлению соответствующих режимов работы накопителя, коллайдера и канала транспортировки. Установление режимов выполняется по заданному сценарию несколькими программами, работающими в одрятах и РС. Диаграмма межпрограммного взаимодействия для автоматизации перепуска пучка приведена на рисунке 2.15. На рисунке в секундах обозначены характерные времена отработки различных этапов сценария.

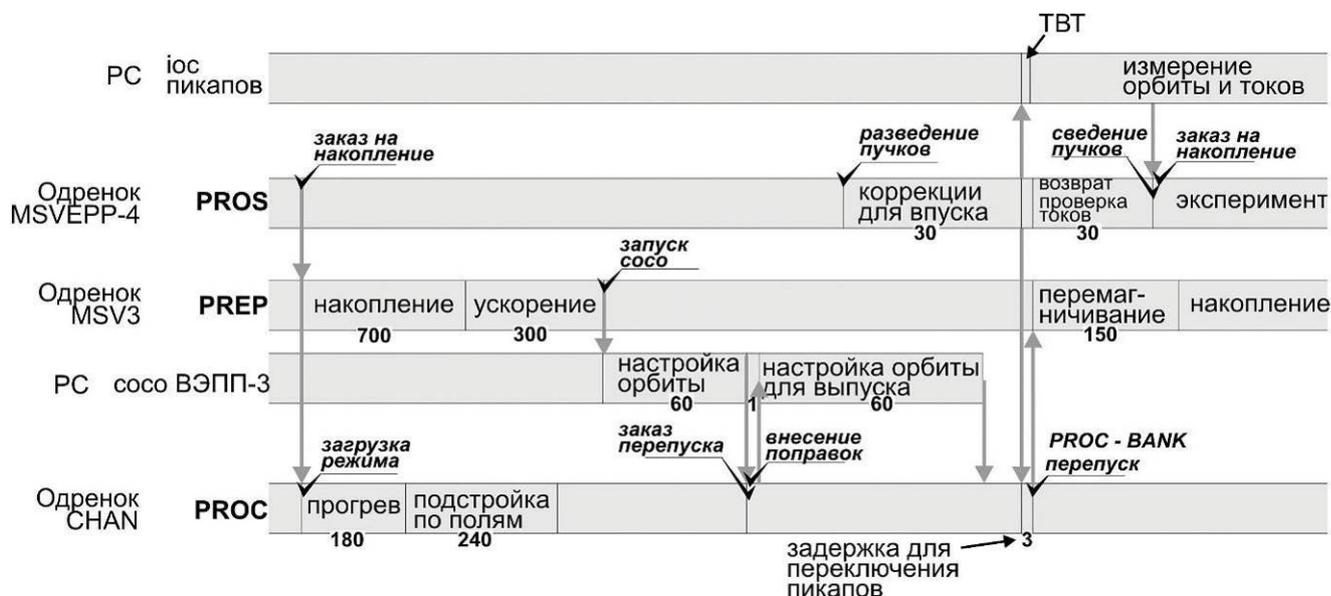


Рисунок 2.15: Диаграмма взаимодействия программ для обеспечения перепуска пучка из накопителя ВЭПП-3 в коллайдер ВЭПП-4М.

Программа PROS, управляющая процессом работы с пучками в ВЭПП-4М, делает заказ на накопление частиц нужной полярности и заказывает параметры перепуска: энергию частиц, число сгустков для накопления в ВЭПП-3 и токи в сгустках. Программа PREP, управляющая работой с пучками в ВЭПП-3, получив информацию через рассылку *star*, обеспечивает накопление и ускорение заказанных пучков до нужной энергии. В это время программа PROC, управляющая работой канала транспортировки, загружает в устройства соответствующий режим, пересчитанный для выбранной энергии из базового режима. После этого PROC выполняет настройку магнитных элементов канала, делая сначала три выстрела каналом с интервалом в одну минуту, а затем еще три выстрела с подстройкой элементов по значениям измеренных полей. При этом элементы выпуска/впуска, ударяющие по пучку (пластины кикеров), блокируются. Из-за малой апертуры канала и малого акцептанса ВЭПП-4М канал требует очень точной настройки режима работы элементов. Типичные значения относительных поправок для основных магнитов находятся в диапазоне от 0.01 % до 0.1 %. При правильной настройке коэффициент перепуска пучка достигает 90 % и выше.

После отработки приложения *soso*, которое обеспечивает заданное положение орбиты пучка, ускоренного в ВЭПП-3, программа PROC начинает процедуру перепуска. PROC устанавливает статус “перепуск” и вносит в указанные магнитные элементы добавки, дополнительно выправляющие орбиту пучка в канале перепуска. Добавки определяются экспериментально для выбранной энергии с целью оптимизировать прохождения пучка по каналу и захват частиц в ВЭПП-4М. Программа PREP, после установления статуса “перепуск”, вводит искажение орбиты пучка в ВЭПП-3 по вертикали вверх с целью подвести пучок к носику магнита-септума и вновь запускает *soso* для коррекции орбиты пучка уже к другой орбите, настроенной для выпуска. Программа PROS, управляющая коллайдером ВЭПП-4М, в это время выполняет подготовку кольца ВЭПП-4М к впуску нового сгустка частиц:

- с помощью программы SVED выполняет разведение пучков,
- чтобы компенсировать искажение орбит из-за электростатического разведения пучков, вносит локальное искажение орбиты по вертикали в техническом промежутке,
- чтобы перепустить пучок в нужную фазу периода обращения выставляет задержку запуска перепуска относительно фазы обращения пучка в коллайдере и необходимые задержки срабатывания дефлектора ВЭПП-3 и инфлекторов ВЭПП-4М,
- для расширения динамической апертуры делает поправку бетатронных частот,
- выдвигает из апертуры подавитель фона пучка – пластину, которая в рабочем положении “срезает” часть гало пучка, что в процессе набора статистики улучшает фоновую ситуацию на детекторе “Кедр”.

После выполнения этих операций PROS выставляет статус на готовность кольца ВЭПП-4М к перепуску.

PROC, управляющий каналом транспортировки, дожидается готовности ВЭПП-4М и орбиты в ВЭПП-3, делает паузу, во время которой пикап-станции ВЭПП-4М переключаются в режим пооборотных измерений (ТВТ), и после этого

дает команду программе BANK (в одренке CHAN), сделать “выстрел” всеми элементами канала, включая элементы выпуска/впуска. Тем самым, выполняется перепуск пучка. Если в ВЭПП-3 были накоплены и ускорены два сгустка, то сначала сгусток с наибольшим током перепускается в ВЭПП-4М вместо сгустка с наименьшим током. Затем спустя одну минуту, необходимую для восстановления источников питания магнитов канала, делается второй перепуск. Диаграмма регулярных перепусков сгустков из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М показана на рисунке 2.16.

После перепуска PROS переводит кольцо ВЭПП-4М в исходное состояние: убирает вертикальный антибамп и сдвигу частот, дает команду на ввод подавителя фона. Затем дожидается от системы обработки данных с пикапов ВЭПП-4М измерения посгусткового распределения токов и принимает решение, какой полярности частицы нужно копить в ВЭПП-3. Далее, если это требуется по условиям проведения эксперимента, PROS после проверки, что величины токов в сгустках не превышают максимальных допустимых значений, с помощью программы SVED выполняет сведение пучков: зануляются и выключаются основные источники питания напряжения пластин разведения пучков в экспериментальной промежутке, и к этим пластинам подключается вспомогательный источник для точной регулировки сведения.

Сценарий процедуры перепуска может быть оперативно переформатирован с помощью механизма программных ключей – точек ветвления программы, которые позволяют обходить отдельные этапы выполнения общего сценария, а также с помощью настроек, содержащихся в конфигурационном файле для процесса перепуска.

Автоматизация процедуры перепуска обеспечила проведение широкого круга экспериментов с использованием электронных и позитронных пучков по измерению масс частиц и поиску новых резонансов [70 - 73].

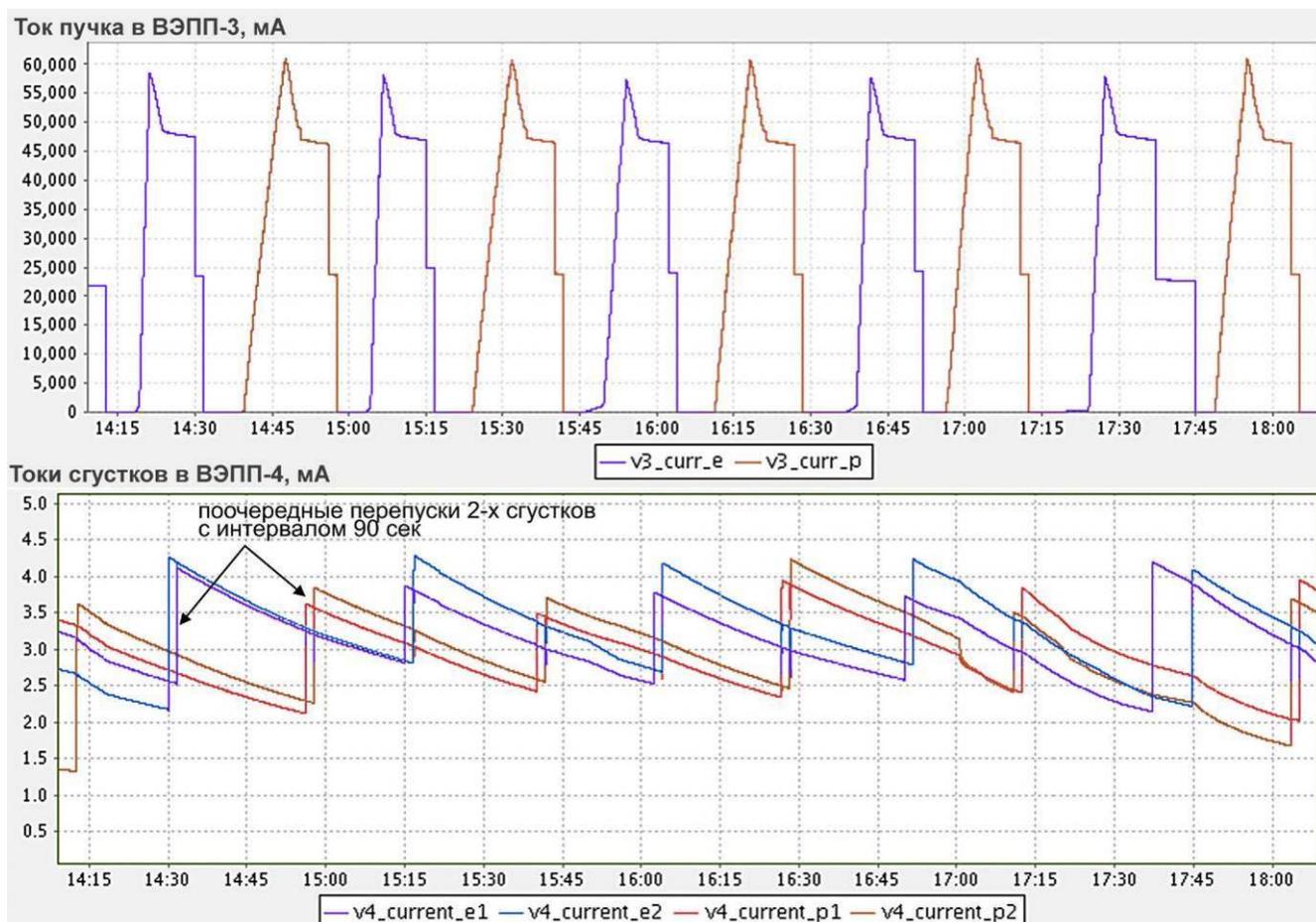


Рисунок 2.16: Процесс перепуска пучков в ВЭПП-4М в автоматическом режиме набора статистики на энергии, равной энергии инжекции.

2.4.3 Работа с выведенными пучками

На ВЭПП-4М проводятся эксперименты с тремя видами выведенных пучков:

- с синхротронным излучением от циркулирующих электронов,
- с пучком жестких гамма-квантов, образующихся на мишени, вводимой в гало циркулирующего пучка электронов,
- с пучком комптоновских гамма-квантов, получаемых при столкновении электронов циркулирующего пучка со встречными фотонами, излучаемыми лазером.

Для проведения этих экспериментов, как правило, требуется ускорение пучка от энергии инжекции 1.9 ГэВ до энергии эксперимента и последующая стабилизация орбиты пучка к заданному состоянию.

Процесс ускорения выполняется путем отработки за определенное время последовательности переходов всех элементов магнитной системы коллайдера и ВЧ по нескольким заранее настроенным состояниям (режимам), соответствующим все возрастающим уровням энергии (см. п. 2.2.6). Каждый режим заранее настраивается с целью обеспечения оптимальных параметров пучка: рабочая точка по частотам, орбита, время жизни и т.д.

Для автоматизации отработки процесса ускорения в ВЭПП-4М разработана программа PROC, функционирующая в одренке, управляющем магнитной системой ВЭПП-4М (см. рисунок 2.8). Программа PROC загружает в память всех ЦАПИ (см. п. 2.2.6) указанный набор режимных состояний и дает команду на отработку. Далее ЦАПИ в автономном режиме синхронно обрабатывают изменение до конечного состояния. В случае использования поправок, компенсирующих рассогласование полей, программа PROC перед загрузкой в ЦАПИ добавляет поправки к режимным значениям, а в конце отработки всего процесса ускорения устанавливает конечный режим без поправок.

После окончания процесса ускорения программа PROC запускает в РС приложение *soso*, которое обеспечивает настройку и, затем, периодическую (через 5 минут) стабилизацию орбиты пучка.

2.4.4 Сканирование по энергии при наборе статистики на детекторе “Кедр”

Для проведения эксперимента по поиску узких резонансов в широком диапазоне по энергии частиц [72] требуется оперативно перестраивать энергию коллайдера в соответствии с запросом от системы набора статистики детектора. Для решения этой задачи в программе PROS реализована специальная функция, отслеживающая состояние набора статистики и величину заказанной энергии. В соответствии с этими параметрами программа автоматически устанавливает заказанную энергию для частиц, а в случае уменьшения токов ниже установленного порога выполняет цикл перемагничивания и делает перепуски новых пучков на нужной энергии. Обмен данными с детектором выполняется через запись в файл: программа управления набором статистики пишет запросы в файл, доступный для чтения из программы PROS, а программа PROS, отработав

очередной запрос на перестройку энергии или перепустив новые пучки, включает режим светимости: “сводит” встречные пучки в детекторе “Кедр”.

2.4.5 Стабилизация энергии коллайдера ВЭПП-4М

Коэффициент зависимости энергии вращающихся частиц от температуры основных магнитов структуры кольца для коллайдера ВЭПП-4М примерно равен 80 кэВ/град. При проведении прецизионных экспериментов по измерению масс рождающихся частиц [73 - 76] необходимо обеспечивать стабильность энергии первичных частиц с точностью несколько кэВ, а также нужно иметь возможность при определении энергии в момент зарегистрированного события учитывать поправки на изменение температуры [77]. В различных режимах работы коллайдера были проведены специальные эксперименты по изучению температурных зависимостей [78, 79]. Для стабилизации температуры был разработан целый комплекс решений, включающий стабилизацию температуры воды (дистиллята), охлаждающей магниты. Специальная программа с помощью клапанного механизма, регулирующего проток дистиллята, обеспечивает долговременную стабильность температуры магнитов кольца ВЭПП-4М в пределах 0.1 градуса (см. рисунок 2.17). Программа имеет настраиваемый алгоритм регулировки, позволяющий компенсировать влияние внешних факторов: температуры внешней охлаждающей воды, расхода и температуры дистиллята. Использование этой системы позволяет измерять энергию частиц методом резонансной деполяризации с точностью 1-2 кэВ, что дает относительную точность измерения энергии сталкивающихся электронов и позитронов порядка 10^{-6} .

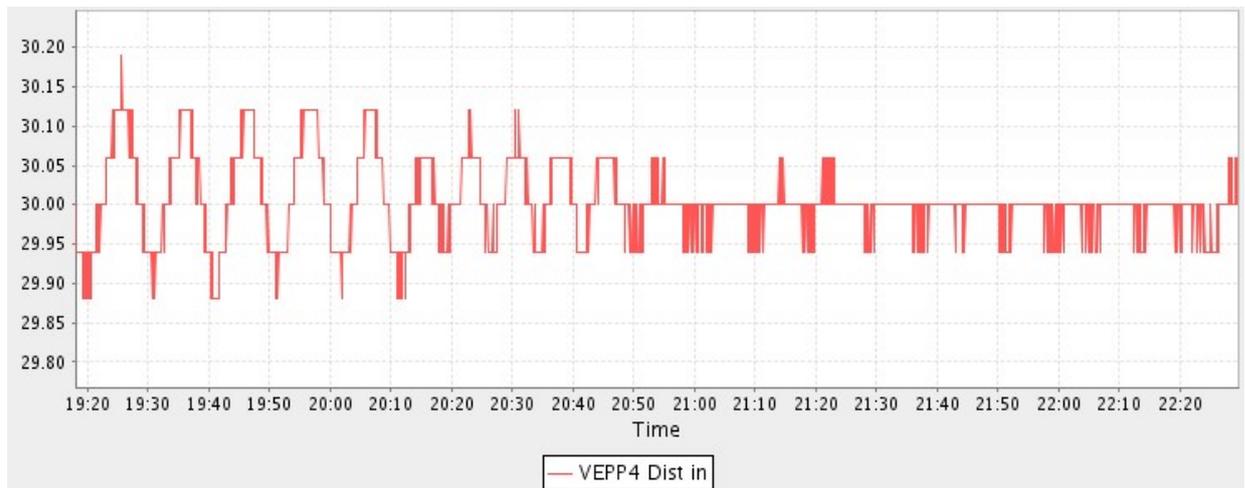


Рисунок 2.17: Постепенная релаксация стабилизации температуры дистиллята, охлаждающего основные магниты коллайдера ВЭПП-4М, в результате настройки алгоритма работы системы автоматической регулировки.

2.4.6 Автоматизация набора светимости

Светимость, производимая коллайдером, определяется не только свойствами и настройкой параметров магнитной системы, но и величиной и соотношением зарядов (токов) встречающихся сгустков электронов и позитронов. В процессе набора статистики величины токов сгустков уменьшаются, соотношение токов сгустков меняется также в результате перепусков новых пучков. Для увеличения набранного интеграла статистики крайне важной является задача оптимизации светимости в соответствии с изменением ситуации с токами сгустков.

Для оптимизации светимости был разработан специальный алгоритм, реализованный в программе PROS. Программа выполняет настройку светимости, оперируя токами и напряжениями элементов, указанных в списке для настройки: скью-квадрупольными линзами, элементами электростатического разведения, коррекциями градиентов линз финального фокуса. В конце цикла прохода настройки по списку элементов, занимающего около 5 минут, включается коррекция орбиты с помощью приложения *soco* (см. п. 2.2.6). Таким образом компенсируются возможные уходы орбиты во время подстройки магнитных и электростатических элементов. После впуска нового сгустка для сокращения времени подстройки перед процедурой сведения пучков в соответствии с новым

соотношением токов сгустков выполняется упреждающая регулировка элементов, участвующих в автоматической подстройке.

Реализация механизма настройки светимости позволила примерно на 15-20 % увеличить записанный интеграл событий, что особенно актуально для экспериментов, требующих продолжительного набора статистики [80-83]. Результат работы алгоритма автоподстройки светимости показан на рисунке 2.18, где изображены графики светимости и тока пучка от времени. По мере уменьшения тока пучка автоподстройка скручивает значения заданных элементов управления оптимальным образом так, что светимость практически поддерживается на одном уровне при суммарном токе пучков, убывающем экспоненциальным образом в соответствии с временем жизни пучка.

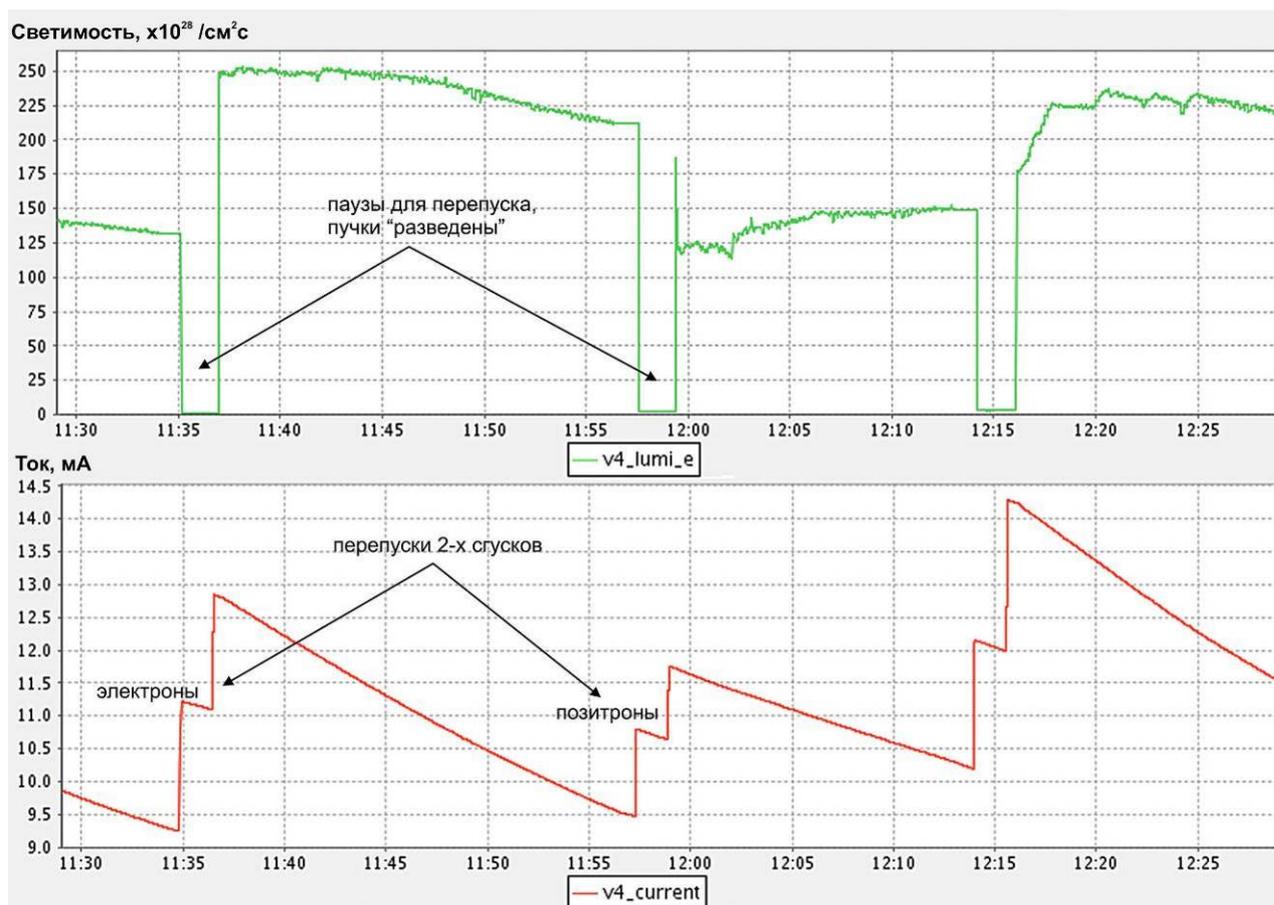


Рисунок 2.18: Подстройка светимости в процессе набора статистики.

Глава 3

Структура системы управления бустера NSLS-II

3.1 Краткая характеристика параметров синхротрона, детализация задач управления

Бустерный синхротрон (бустер) [8, 9] источника синхротронного излучения NSLS-II [10] – это компактный электронный синхротрон на энергию 3 ГэВ, рассчитанный на работу с частотой 1 или 2 Гц. Бустер является частью инжекционного комплекса NSLS-II, включающего в себя, кроме синхротрона, линейный ускоритель (линак) на 200 МэВ, канал транспортировки пучка из линака в бустер (LTB) и канал транспортировки пучка из бустера в основное накопительное кольцо (BTS). Инжекционный комплекс поставляет электроны в основное кольцо NSLS-II на полной рабочей энергии 3 ГэВ, что обеспечивает высокую стабильность и непрерывный режим генерации синхротронного излучения для проведения научных и технологических исследований с использованием СИ. Схема комплекса NSLS-II и обзорная схема инжекционного комплекса представлены на рисунках 1 и 2 в Приложении 2. Основные физические параметры синхротрона приведены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1. Основные параметры бустерного синхротрона NSLS-II.

Параметр	Впуск	Выпуск
Энергия электронов, МэВ	200	3000
Периметр, м	158.4	
Частота повторения цикла, Гц	1 (2)	
Число банчей в пучке	1, 80-150	
Период обращения, нс	528	
Частота ускоряющего ВЧ, МГц	499.68	
Число гармоник ВЧ	264	
Амплитуда ВЧ, МВ	0.2	1.2
Синхротронная частота, кГц	36.4	20.9
Бетатронные частоты: ν_x/ν_y	9.64 / 3.41	
Скорректированный хроматизм: ξ_x/ξ_y	1.25 / 2.05	
Горизонтальный эмиттанс, ε_x , нм x рад	0.17	37.4
Энергетический разброс, σ_E/E	$0.6 \cdot 10^{-4}$	$8.3 \cdot 10^{-4}$
Потери энергии на обороте, U_0 , кэВ	0.014	685.8

Времена затухания колебаний, сек: (τ_x, τ_y, τ_s)	15.6, 15.6, 7.8 с	4.6, 4.6, 2.3 мс
---	-------------------	------------------

Схема бустера представлена на рисунке 3.1. Геометрически синхротрон разбит на четыре квадранта, состоящих из зеркально симметричных поворотных арок (A1 - A4) радиусом 18.9 метров и четырех прямолинейных промежутков длиной по 10 метров. Промежутки используются: (IS) для инжекции пучка, (XS) для выпуска ускоренного пучка, (CS) для размещения секции ускоряющих резонаторов и (DS) для размещения оборудования диагностики пучка.

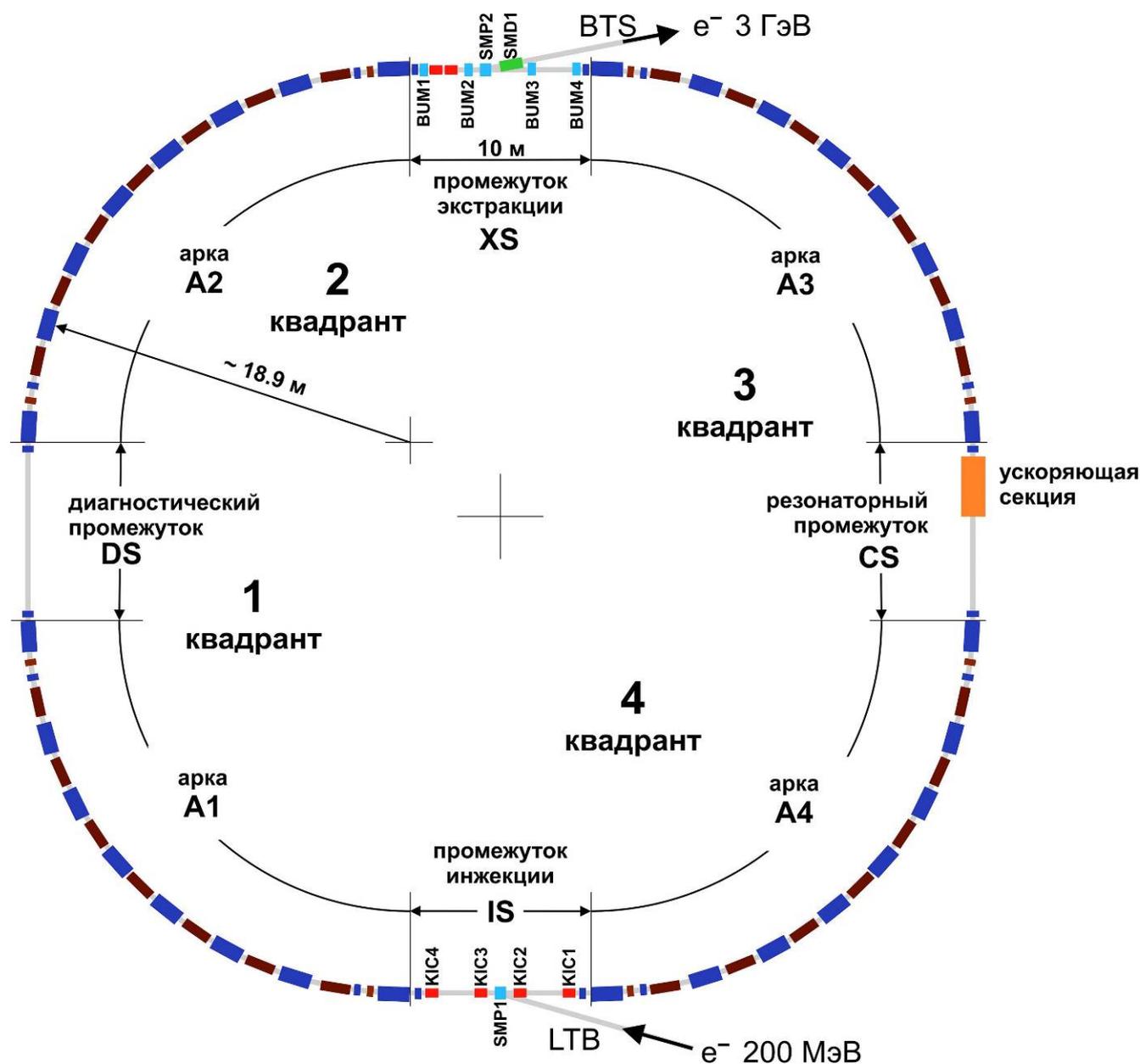


Рисунок 3.1: Схема бустера NSLS-II.

На бустере можно выделить следующие функциональные системы, управление которыми требует применения различных методик, и при этом между ними существуют взаимосвязи, определяющие режимы их работы:

- система синхронизации, задающая синхроимпульсы, обеспечивающие согласованную работу всех систем,
- магнитная система, обеспечивающая циклическое движение частиц в вакуумной камере в процессе ускорения,
- ВЧ система, обеспечивающая ускорение пучка,
- вакуумная система, обеспечивающая необходимый уровень вакуума в вакуумной камере синхротрона,
- система защитных блокировок, независимо обеспечивающая безопасную работу других систем,
- система диагностики пучка, обеспечивающая измерение всех необходимых значений параметров пучка: тока пучка, орбиты, поперечных размеров, бетатронных частот.

Пучок электронов с энергией 200 МэВ из линейного ускорителя, пройдя по 30 метровому каналу транспортировки ЛТВ, инжектируется в кольцо бустерного синхротрона. Инжектируемый пучок представляет собой последовательность сгустков, следующих друг за другом через 2 нс. Число сгустков в пучке может быть задано от одного до полутора сотен, т.е. время пролета пучка в многосгустковом режиме может составлять 300 нс.

При работе синхротрона с частотой 1 Гц предусмотрено 2 режима впуска пучка: однократный впуск, когда пучок влетает в синхротрон и сразу ускоряется, и двойной впуск, когда пучок инжектируется повторно через 100 мс для удвоения захваченного тока. Ускорение электронов от энергии впуска до 3 ГэВ в режиме работы 1 Гц осуществляется за 370 мс. При работе с частотой 2 Гц впуск пучка выполняется 1 раз, а время ускорения занимает 300 мс. Диаграмма цикла работы бустера в режиме 1 Гц с двойной инъекцией представлена на рисунке 3.2.

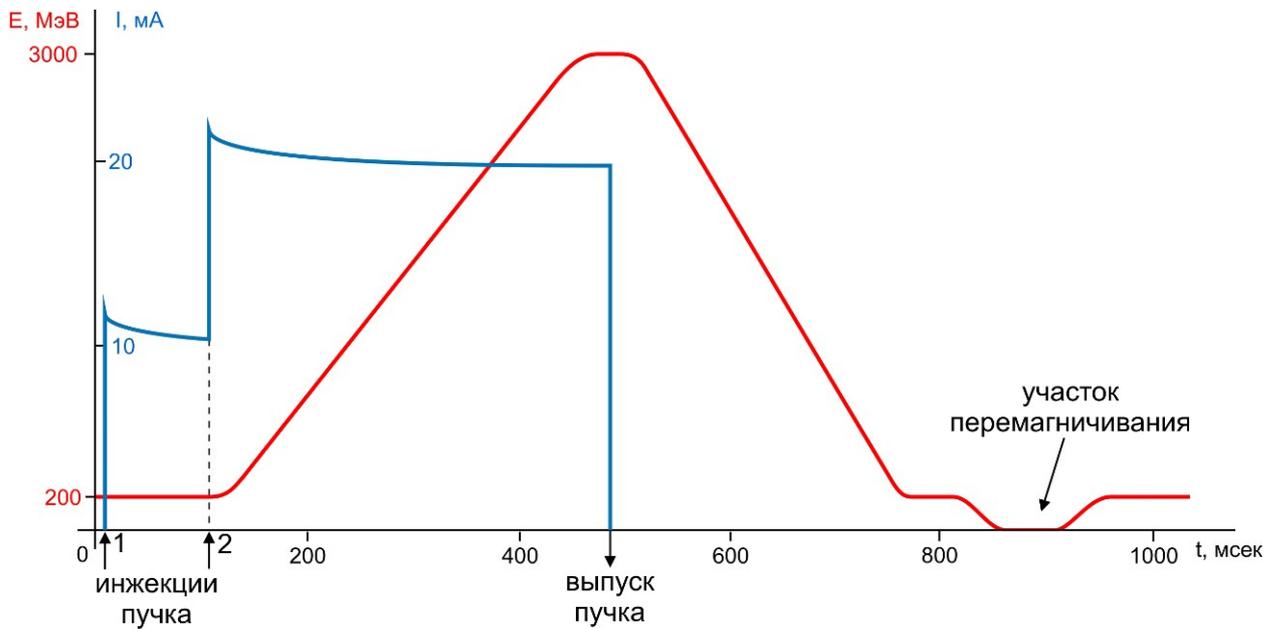


Рисунок 3.2: Диаграмма цикла бустера в режиме 1 Гц с двойной инъекцией.

Для синхронизации появления в системе управления событий используется тактовая частота 125 МГц, источником которой служит задающий генератор ВЧ, что обеспечивает привязку событий к движению пучка с дискретностью 8 нс.

Магнитная структура синхротрона включает 60 поворотных магнитов (диполей) с комбинированными функциями и 24 квадрупольных магнита (квадруполья). Диполи обеспечивают поворот и фокусировку пучка (магниты имеют квадрупольную и секступольную компоненты поля) и делятся на два семейства: 28 магнитов ВF с фокусировкой по горизонтали и 32 магнита ВD с фокусировкой по вертикали. Квадрупольные линзы разбиты на три семейства по 8 квадрупольных линз: два семейства (QF, QG) с фокусировкой по горизонтали и одно семейство (QD) с фокусировкой по вертикали. Диполи с фокусировкой задают оптику, определяющую размеры пучка, в арках квадрантов, а квадрупольные служат для согласования оптических функций на краях квадрантов. Диполи и квадрупольные являются основными магнитами бустера, а их источники питания, соответственно, являются основными источниками питания. Кроме основных магнитов на кольце синхротрона установлены еще отдельные магниты для коррекции секступольной компоненты и орбиты пучка.

Система управления должна учитывать некоторые особенности магнитной системы бустера. Использование диполей с комбинированными функциями за счет снижения общего числа магнитов позволяет уменьшить размер кольца ускорителя, но приводит к дополнительным сложностям в настройке режима ускорения, поскольку при изменении величины тока изменяются пропорции между компонентами поля. Необходимость дополнительной коррекции секступольной компоненты в процессе ускорения также связана с влиянием токов, наводимых на стенках вакуумной камеры изменяющимися полями в диполях. Коррекция орбиты нужна для компенсации ошибок в выставке диполей и квадруполей, а также относительного расхождения магнитных полей диполей при изменении тока.

Магниты каждого основного семейства последовательно подключены к своему источнику питания. Для снижения величины рабочего напряжения, прикладываемого к цепи дипольных магнитов типа BD, это семейство разбито на две равные части: к двум одинаковым источникам питания последовательно подключено по 16 магнитов, расположенных, соответственно, в арках A1 - A2 и A3 - A4.

Для обеспечения стабильной инжекции и ускорения пучка, согласно результатам численного моделирования [84], необходимо выдерживать заданные токи в шести основных источниках питания с относительной точностью не хуже, чем 10^{-3} .

Для источников питания поворотных магнитов есть еще одно требование: в момент выпуска пучка из бустера от них требуется повышенная точность и повторяемость отработки тока порядка 10^{-4} . Такая точность необходима для обеспечения стабильного воспроизведения параметров выпускаемого ускоренного пучка от цикла к циклу. Это требование, прежде всего, распространяется на сами источники питания. Но это еще означает, что относительная точность контрольно-измерительной электроники, используемой для управления источниками питания диполей, должна быть порядка 10^{-5} .

Требования на точность управления источниками питания, обеспечивающими ускорение пучка (рэмпы), приведены в Таблице 3.2.

Для корректирующих источников питания требования значительно ниже, чем для основных: точность отработки задания не должна быть хуже, чем 10^{-2} от полной амплитуды тока 6 А в течение всего цикла.

Таблица 3.2. Требования на относительную точность рэмповых источников питания.

Тип магнита	Число источников питания/магнитов	Требуемая точность, %
Поворотный магнит	3 / 60	0.1 - инжекция и рэмп, 0.01 - выпуск
Квадрупольный магнит	3 / 24	0.1
Секступольный магнит	16 / 16	1
Корректор орбиты	36 / 36	1

У бустера в процессе ускорения нет необходимости управлять частотой и фазой ВЧ. С точки зрения обеспечения ускорения пучка управление ВЧ системой не отличается от управления обычным источником тока: требуется менять амплитуду напряжения ВЧ на ускоряющей секции в соответствии с ростом энергии пучка, чтобы компенсировать потери энергии частицы на обороте в кольце бустера. При этом не требуется высокой точности соответствия напряжения ВЧ и энергии частиц: относительная точность может быть равна процентам.

Впуск пучка в синхротрон осуществляется в горизонтальной плоскости во впускном промежутке IS (рисунок 3.1). Из канала транспортировки пучок проходит через впускной импульсный магнит-септум SMP1, который поворачивает его вдоль орбиты движения частиц в бустере. При этом траектория влетевшего пучка имеет отклонение в 30 мм от равновесной орбиты. Это отклонение убирается однократным “ударом” магнитных полей двух магнитов-кикеров KIC3 и KIC4, расположенных в промежутке сразу за впускным магнитом: KIC3 поворачивает пучок в сторону равновесной орбиты, а KIC4 устраняет этот

угол поворота, обеспечивая дальнейшее движение частиц вдоль равновесной орбиты.

В режиме двойного впуска по пучку, уже захваченному в синхротрон, делается предудар двумя магнитами-кикерами KIC1 и KIC2, расположенными до впускного септума. С точки зрения управления кроме обеспечения высокой стабильности и точности работы устройств в режиме двойной инжекции есть задача в течение 100 мс перед второй инжекцией изменить и стабилизировать зарядное напряжение на накопителях энергии источников питания впускных кикеров KIC3 и KIC4, а также септума SMP1.

По окончании ускорения примерно за 1 мс до момента выпуска четырьмя импульсными корректорами BUM1 - BUM4, расположенными в выпускном промежутке XS, делается искажение равновесной орбиты пучка в горизонтальной плоскости с целью подвести пучок как можно ближе к выпускному магниту-септуму SMP2. Затем выполняется “удар” коротким импульсом магнитного поля четырех выпускных магнитов-кикеров, в результате чего пучок попадает в апертуру выпускного магнита-септума и выводится из вакуумной камеры синхротрона. Далее, пройдя через постоянный доворотный магнит SMD1, пучок попадает в канал транспортировки BTS, по которому перелетает до основного кольца NSLS-II.

Из-за малых размеров апертур выпускного магнита-септума и канала транспортировки для обеспечения эффективного выпуска от кикеров и септума требуется более высокая стабильность и точность работы, чем от устройств инжекции.

Требования на точность управления импульсными источниками питания, а также на точность управления постоянным доворотным выпускным магнитом приведены в Таблице 3.3.

Таблица 3.3. Требования на точность импульсных источников питания.

Тип магнита	Число источников питания/магнитов	Требуемая точность
Импульсный септум	2 / 2	0.05 % - инжекция, 0.02% - выпуск

Импульсный корректор	1 / 4	0.05 %
Кикер	4 / 4 - инжекция, 2 / 4 – выпуск	0.5 % - инжекция, 0.2% - выпуск
Постоянный выпускной магнит	1 / 1	0.1%

3.2 Анализ современных систем управления электронными синхротронами и формулировка требований к управлению бустером NSLS-II

В последние годы в мире построены и продолжают активно строиться крупные ускорительно-накопительные комплексы с электронными пучками высокой энергии, создаваемые для генерации СИ - так называемые источники СИ третьего поколения. Они характеризуются высокой яркостью и жесткостью излучения, что достигается при помощи специальной магнитной структуры накопительного кольца, обеспечивающей малые размеры электронного пучка, и наличием специальных устройств для генерации излучения: ондуляторов и вигглеров. Важным показателем источника СИ является стабильность уровня излучения, которая, в значительной мере, обеспечивается качественным инжектором электронного пучка. Поэтому почти все современные накопительные комплексы - источники СИ - имеют в своем составе бустерный синхротрон, поставляющий электроны с энергией, равной энергии частиц, циркулирующих в основном кольце, что позволяет постоянно поддерживать стабильность тока пучка для генерации излучения на уровне единиц процентов и лучше.

Управление процессом ускорения пучка на современных электронных синхротронах осуществляется при помощи цифровой регулировки уровня тока магнитных элементов [85, 86]. Использование цифрового способа регулировки выходного тока svelo множество проблем нестационарного способа управления, использовавшегося ранее, к единственному вопросу качества аналого-цифрового преобразования, что на базе современных электронных комплектующих выполняется с очень хорошей точностью и стабильностью. Эта методика была отработана для управления бустерным синхротроном SLS, Швейцария [85] и в дальнейшем была использована при создании других источников СИ: Diamond, Soleil [87, 88] и многих других.

Но применение контроллеров источников питания, вычислительная мощность которых невелика, и программирование которых осложняется необходимостью знания деталей устройства электроники, приводит к возникновению проблем, связанных с приемом и обработкой массивов данных большого размера. Задание формы тока в контроллеры источников питания выполняется заранее и может занимать значительное время, в течение которого источник питания, как правило, пребывает в нерабочем состоянии. Короткое время выполнения рабочего цикла с пучком (несколько сотен миллисекунд) из-за проблем с передачей данных не позволяет в управляющем компьютере в режиме on-line контролировать основные параметры источников питания: ток, напряжение на нагрузке, сигнал ошибки тока. Соответственно, эти функции либо отсутствуют в системе управления, либо возлагаются на сам контроллер источника питания, а на операторском уровне текущая информация предоставляется лишь в виде результирующих статусных сигналов. Недостаток подробной информации о работе источников питания вызывает затруднения при оперативном поиске и анализе неисправностей, делает невозможным мониторинг стабильности. Поскольку требования к качеству пучка источников СИ постоянно возрастают, то на существующих ускорительных комплексах ведутся работы по улучшению источников питания бустерных синхротронов и по модернизации их управления. Особенно остро этот вопрос касается ускорительных комплексов, введенных в эксплуатацию двадцать и более лет назад с использованием аналогового метода управления источниками питания [89, 90].

В обеспечении стабильной работы циклического ускорителя важную роль играет система впуска/выпуска частиц. Как правило, импульсные устройства систем впуска/выпуска имеют простейшую диагностику, далеко не достаточную для полноценного анализа их работы: в лучшем случае - это измерение напряжения на накопителе энергии, статусная информация, полученная из контроллера источника питания, и некоторые осциллограммы сигналов токов в нагрузке, прочитанные из осциллографов. Нет практики измерения такого параметра, как величина магнитного поля в импульсном магните. В процессе

наладки импульсные устройства настраиваются специалистами, и дальнейшая их эксплуатация осуществляется в режиме воспроизведения этих настроек без возможности внесения каких-либо контролируемых изменений и использования компьютерной диагностики.

Управление циклическим ускорителем невозможно без наблюдения и использования значений параметров пучка: величины тока, положения орбиты, значений бетатронных частот. Поэтому важнейшей задачей, которую должна решать система управления, является сбор и обработка данных, поступающих из аппаратуры диагностики пучка. В последние годы на синхротронах используется мощная электроника для обработки сигналов с пикап-электродов, например, разработки фирмы Libera [91, 92], позволяющая с высокой точностью измерять положение орбиты, бетатронные частоты в различные моменты процесса ускорения пучка. Проблема заключается в том, чтобы за малое время цикла синхротрона предоставить эти данные в компьютер для обеспечения работы управляющих программ, например, программ коррекции замкнутой орбиты, программ изменения бетатронных частот с целью приведения этих параметров к нужному значению в различные моменты времени ускорения пучка. В существующих системах управления данные об измеренной орбите возможно получить только однократно в определенный момент времени ускорения. Это обстоятельство, наряду со сложностями, связанными с загрузкой управляющих вэйвформ в контролеры источников питания, затрудняет процедуру настройки процесса ускорения в синхротроне.

Решение проблем, перечисленных выше, очень важно, как для ускорения процесса запуска синхротрона, так и для последующих настроек режимов его работы. Иначе поиск неисправностей или внесение изменений могут занимать существенное время и требовать привлечения усилий многих специалистов, а все настроечные действия придется выполнять “по эффекту”.

В результате анализа опыта запуска и эксплуатации нескольких бустерных синхротронов [87, 93 – 97], введенных в строй в последние годы, был

сформирован список требований к управлению бустером NSLS-II, не имеющих решения в существующих системах:

- обеспечение оперативной записи формы отрабатываемого тока в управляющие контроллеры без остановки отработки и со сглаживанием перехода от отрабатываемой вэйвформы к вновь загружаемой,
- непрерывное измерение значений всех параметров источников питания в процессе выполнения цикла и on-line предоставление данных для операторских программ,
- on-line мониторинг правильности работы источников питания, в том числе, импульсных источников системы впуска/выпуска; возможность автоподстройки к заданным значениям,
- обеспечение многократного измерения замкнутой орбиты пучка и бетатронных частот в процессе ускорения.

Успешная реализация этих требований в процессе создания системы управления впоследствии обеспечила быстрый запуск, а затем надежный и стабильный управляемый режим работы синхротрона.

3.3 Выбор и компоновка оборудования для системы управления

3.3.1 Принципы выбора и компоновки оборудования

Система управления бустером является составной частью системы управления комплекса NSLS-II, поэтому на выбор оборудования для управления бустером накладывались условия, определяемые общим подходом, выработанным для всего NSLS-II:

- система должна быть разработана на базе EPICS;
- компьютеры должны работать под управлением операционных систем Linux или RTEMS и должны быть тех типов, которые используются на других установках комплекса NSLS-II;
- все оборудование должно быть подключено к компьютеру через Ethernet или через последовательную связь с использованием интерфейса в Ethernet;

- контрольно-измерительная электроника должна быть в формате VME или cPCI;
- вся используемая электроника должна иметь поддержку в EPICS;
- для управления источниками питания должны использоваться двух уровневые контроллеры, специально разработанные в BNL для проекта NSLS-II;
- промышленные контроллеры и электроника должны быть производства фирмы Allen Bradley;
- в системе диагностики пучка для обработки сигналов с пикап-электродов должны использоваться контроллеры, специально разработанные в BNL для проекта NSLS-II.

Выбор программной платформы EPICS (версия 3.14.12) в качестве основы для создания системы управления предоставил возможность использовать широкий набор поддерживаемых контрольно-измерительных устройств (АЦП, системы PLC, видеокамеры и т.д.), а также целый комплекс ПО.

Система управления бустерного синхротрона делится на несколько практически независимых функциональных подсистем, синхронизированных между собой либо внешними сигналами запусков, приходящими от системы синхронизации, либо метками времени обновления данных, привязанными к циклу бустера. С функциональной точки зрения и по методике управления целесообразно выделить следующие подсистемы:

- система управления магнитными элементами и ВЧ, обеспечивающая синхронное изменение заданий в элементах с целью ускорения пучка,
- система управления впуском/выпуском (импульсные элементы), обеспечивающая впуск пучка в бустер из канала транспортировки частиц LTB и выпуск ускоренного пучка в канал транспортировки BTS,
- система управления вакуумным оборудованием, обеспечивающая непрерывное измерение вакуума в камере бустера,
- система блокировок, обеспечивающую безопасную работу всех элементов и систем бустера,

- система диагностики пучка, обеспечивающая наблюдение и измерение параметров пучка, циркулирующего в бустере в процессе инжекции, ускорения и выпуска.

При построении структуры системы управления и размещении оборудования учитывались следующие принципы:

- **деление по функциональному назначению:** для выполнения определенных задач управления выделены отдельные серверные компьютеры, в которых работает программное обеспечение, обслуживающее оборудование, подключенное к данному серверу через локальный сетевой сегмент;
- **деление по территориальному расположению:** однородное оборудование, расположенное удаленно по всей территории установки, для снижения нагрузки на компьютер и уменьшения длины кабельных трасс подключено к серверам, разнесенным по территории комплекса и выполняющим одинаковые функции;
- **объединение серверов в отдельный сетевой сегмент:** для обеспечения максимальной скорости обмена данными между серверами, управляющими бустерным синхротроном, все компьютеры подсоединены к одному сетевому коммутатору, имеющему выход через 10 Гбит Ethernet-порт в систему управления NSLS-II;
- **оптимизация длины кабельных трасс и путей их прокладки:** источники питания, электроника и компьютеры размещены с учетом оптимизации длин кабельных соединений; кабели проложены в соответствии с их назначением с целью исключить возможные электромагнитные наводки и избежать взаимного влияния сигналов.

Все серверные компьютеры и контрольно-измерительная электроника размещаются в радиостойках, расположенных в технической зоне ISA (Injection Service Area) (см. рисунки 2, 3 Приложения 2), снаружи биозащиты тоннеля кольца бустера. Здесь же размещаются все источники питания и ВЧ система. Такое размещение обеспечивает защиту электроники от радиационного

облучения и возможность доступа персонала к оборудованию во время работы бустера с пучком.

3.3.2 Схема компьютеров и электроники

В системе управления бустером в качестве серверов, обслуживающих контрольно-измерительное оборудование, т.е. серверов, в которых работают ИОС, используется три типа компьютеров:

- IBM System x3550 M3 - универсальный сервер общего назначения;
- MVME31006E-1152 - контроллер крейта VME,
- ST11T7C10KL1 - контроллер крейта сPCI.

Всего для управления используется десять IBM-серверов, четыре VME-крейта с установленными в них пятью контроллерами MVME3100, и один сPCI-крейт. Часть перечисленных компьютеров используется для решения задач управления всего инжектора в целом (линака, каналов транспортировки пучка и бустера): управление вакуумом, обслуживание люминофорных флагов, обслуживание некоторых систем диагностики пучка. Блок-схема компьютеров и аппаратуры системы управления представлена на рисунке 3.3, на схеме также обозначены имена радиостоек, в которых размещается оборудование.

Сокращения, использованные на рисунке 3.3: ВРМР – пикап-станция (ресивер), CPU - контроллер, DAC - ЦАП, DIO - модуль цифрового ввода, DO - модуль цифрового вывода, FAO - Fan-out (оптический размножитель), HRD - АЦП с высоким разрешением (24 бит) и частотой оцифровки 100 кГц для измерения тока пучка [98], HSD - АЦП с высокой частотой оцифровки 8 ГГц для измерения распределения тока пучка по сгусткам [99], VSD – АЦП, интегрирующее входной сигнал для измерения поля в импульсном магните [100], WFD - АЦП с частотой оцифровки до 200 МГц для измерения формы импульса тока кикера [101].

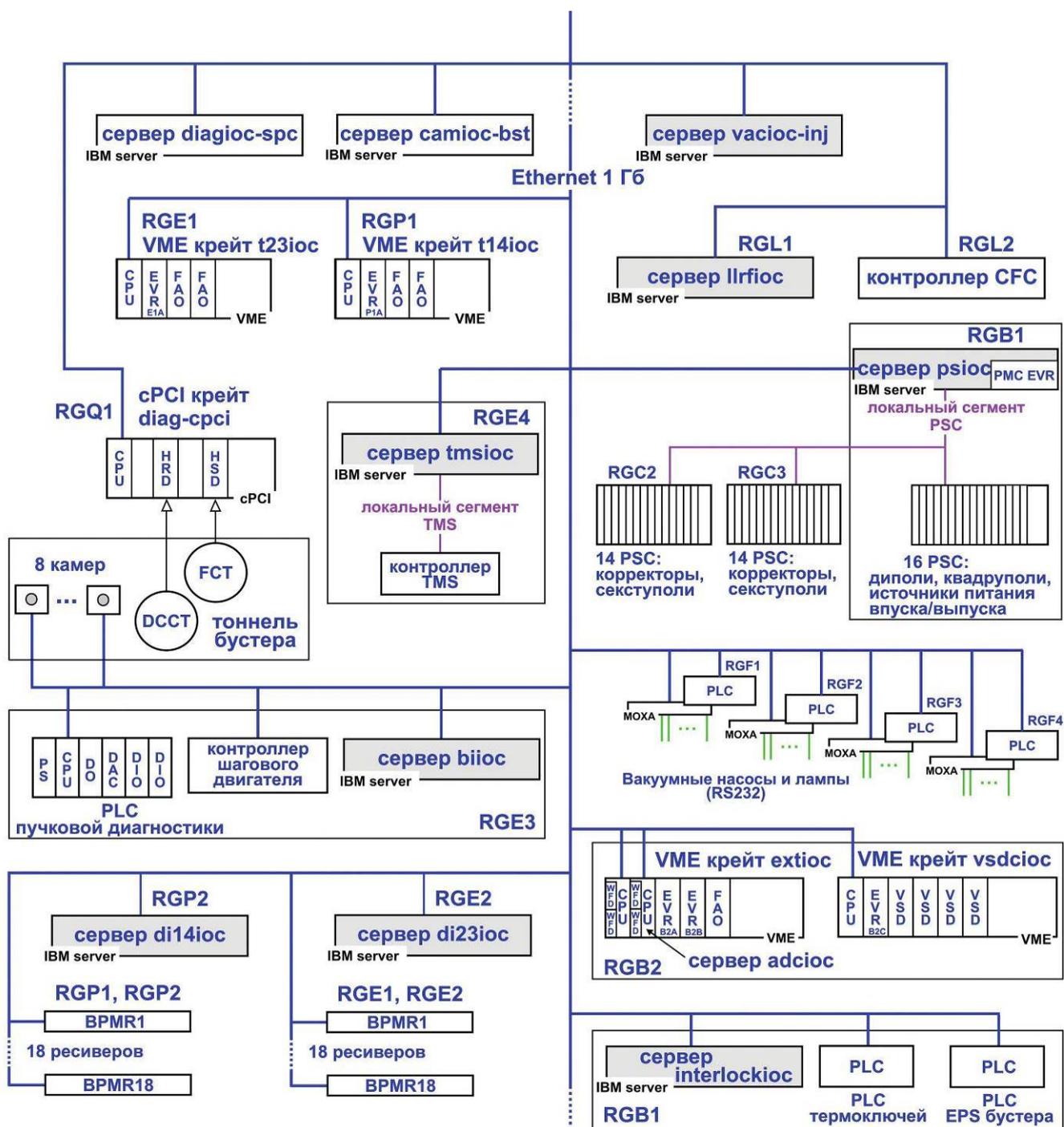


Рисунок 3.3: Блок-схема компьютеров и аппаратуры системы управления бустерного синхротрона.

В системах автоматической регулировки (управление вакуумными шиберами и блокировками) используются промышленные PLC-контроллеры и электронные модули серии 1769 производства фирмы Allen Bradley. Полный список контрольно-измерительной и коммутационной электроники, используемой в системе управления бустерным синхротроном, приведен в Таблице 1 Приложения 3.

По функциональному назначению компьютеры системы управления бустера распределены следующим образом:

- IBM-сервер **psioc** предназначен для управления источниками питания;
- IBM-сервер **interlockioc** обслуживает аппаратуру системы защитных блокировок (два шасси PLC с модулями цифрового ввода/вывода), а также выполняет различные функции обработки данных;
- IBM-сервер **vacioc-inj** для бустера обслуживает аппаратуру вакуумной системы инжектора;
- два IBM-сервера **di14ioc**, **di23ioc** предназначены для обслуживания электроники пикапов и вычисления орбиты пучка;
- IBM-сервер **lrfioc** взаимодействует с контроллером ВЧ (контроллером CFC- Cavity Field Controller) [102];
- IBM-сервер **biioc** обслуживает цифровые камеры мониторов светимости;
- IBM сервер **camioc-bst** предназначен для обслуживания цифровых камер люминофорных флагов;
- к IBM-серверу **tmsioc** подключен контроллер системы измерения бетатронных частот;
- VME-контроллеры **t14ioc** и **t23ioc** предназначены для синхронизации электроники диагностики пучка;
- VME-контроллер **vsdcioc** обслуживает аппаратуру синхронизации импульсных устройств и модули, измеряющие величины магнитных полей в импульсных магнитах системы инжекции и выпуска;
- VME-контроллер **extioc** обслуживает аппаратуру синхронизации импульсных устройств и АЦП, оцифровывающие сигналы токов в магнитах-кикерах; в этом крейте в качестве носителя двух мезонинных плат для АЦП установлен дополнительно еще один VME-контроллер **adcioс**;
- сРСІ-контроллер **pcioc** обслуживает АЦП, оцифровывающие сигналы тока пучка в бустерном синхротроне.

Кроме того, для взаимодействия с PLC, используемым для диагностики пучка, задействован еще один IBM-сервер **diag-spc**. Более подробно функциональное назначение серверных компьютеров описано в п. 4.2 Главы 4.

Блок-схема соединения компьютеров, контроллеров и оборудования системы управления бустерным синхротроном представлена на рисунке 3.4. Каждое подключение к компьютеру или контроллеру отмечено на схеме черной точкой.

В основе схемы используются два спаренных 48-ми портовых коммутатора **rge-2-a** и **rge-2-b** Brocade FCX648, обеспечивающих 96 портов с пропускной способностью 1 Гбит/с для коммутации всех компьютеров без использования промежуточных соединений, а также для подключения аппаратуры со встроенными контроллерами (электроника пикапов и камеры). Кроме линий для передачи данных подключены дополнительные кабели для системного администрирования коммутаторов.

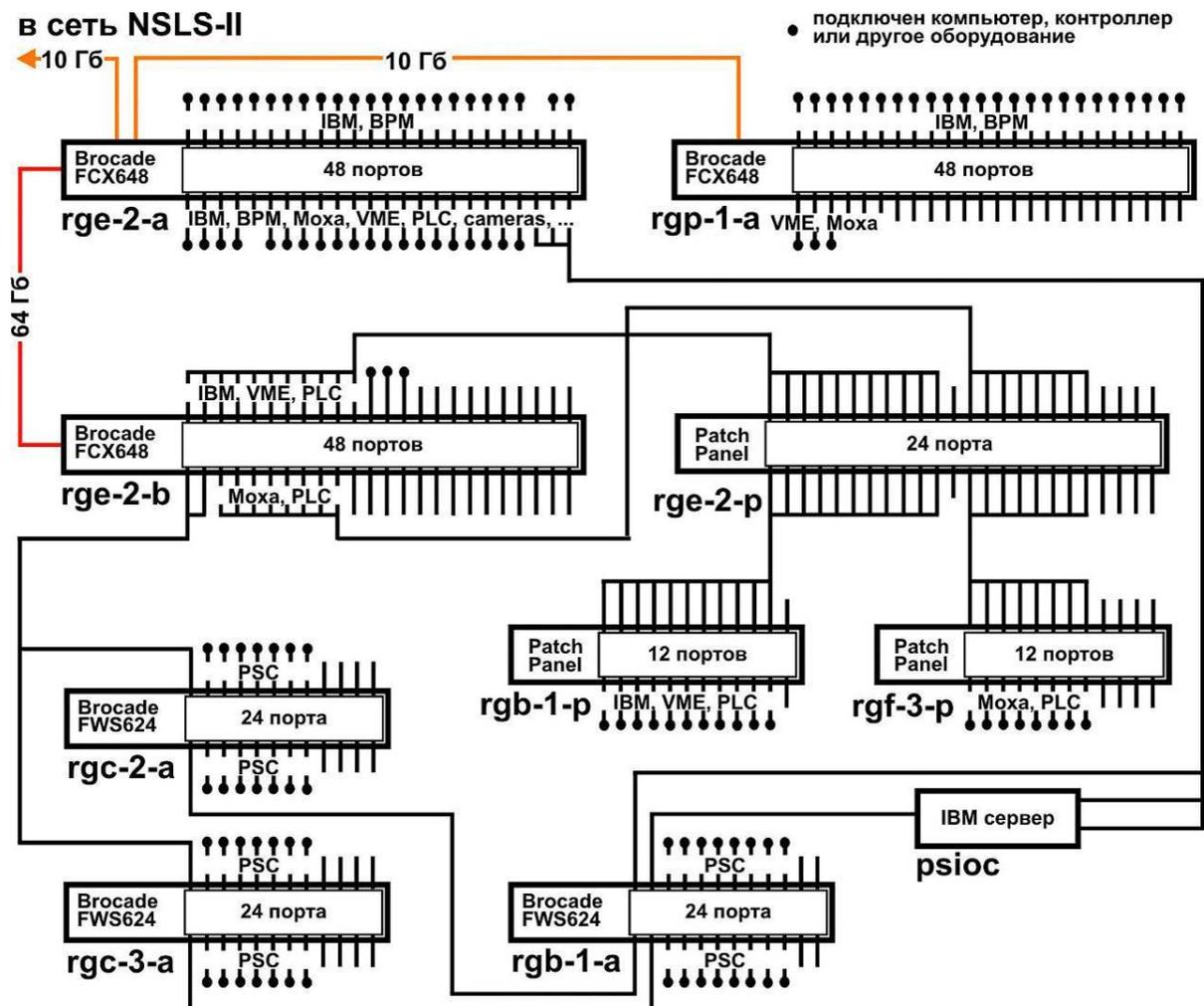


Рисунок 3.4: Сеть Ethernet системы управления бустером.

Ко второму порту Ethernet IBM сервера psios подсоединен 24-х портовый коммутатор **rgb-1-a** Brocade FWS624, к которому подключены еще два коммутатора **rgc-2-a** и **rgc-3-a**, располагающиеся в группе стоек, где размещены 52 источника питания корректоров. Эти три коммутатора составляют локальную сеть для подключения 44-х контроллеров источников питания PSC. Скорость передачи данных через Ethernet у PSC равна 100 Мбит/с. Объем данных, передаваемых из каждого PSC один раз в секунду после окончания цикла бустера, составляет примерно 100 кбайт. Таким образом, общее время, затрачиваемое на передачу данных из всех контроллеров PSC в IBM сервер, равно примерно 5 мс.

3.4 Система синхронизации

3.4.1 Принципы построения системы синхронизации

Система синхронизации комплекса NSLS-II построена на базе технологии синхронных событий [103, 104] с использованием аппаратуры фирмы Micro-Research Finland Oy [105]. Специализированный комплект электроники фирмы Micro-Research предоставляет широкие возможности для обеспечения синхронизации распределенных систем и в настоящее время широко используется на многих ускорительных комплексах. Только на конференции по автоматизации крупных физических установок ICALEPCS'13 было представлено несколько работ [106 - 108], посвященных этому вопросу. Основной функционал был заложен в аппаратуру при создании системы синхронизации источника СИ Daimond (Англия) [109].

Главным устройством системы является генератор событий EVG (Event Generator) [110], который тактируется частотой 499.68 МГц от задающего генератора ВЧ (ЗГ). EVG имеет делитель входной частоты, с установленным коэффициентом деления, равным четырем. Полученная частота 124.92 МГц является рабочей тактовой частотой системы синхронизации. Генератор событий EVG с тактовой частотой высылает в оптический кабель двухбайтные синхропакеты, содержащие код события (первый байт) и данные (второй байт). Байт данных носит название “распределенная шина данных” (Distributed Bus).

Синхропакеты через оптические размножители Fan-out распространяются по всему комплексу во все устройства синхронизации (EVR – Event Receiver), которые дешифруют пакеты и выполняют определенные действия в зависимости от содержимого обоих байтов. Наличие кода события в байте во всех устройствах синхронизации запускает процессы, инициируемые этим событием. Изменение состояния определенного бита в байте данных вызывает изменение состояния EVR [111], связанных с этим битом: например, изменяет уровень напряжения на соответствующем аналоговом выходе EVR.

Период цикла бустера в режиме работы 1 Гц определен как 127281000 периодов рабочей частоты синхронизации 124.92 МГц, что составляет 1.0189 секунды. Частоты всех процессов, происходящих на комплексе, задаются целночисленным делением исходной тактовой частоты 124.92 МГц. Диаграмма деления частоты для синхронизации бустера приведена на рисунке 3.5. В соответствии с заданными коэффициентами деления EVG генерирует два периодических события, используемые для синхронизации оборудования инжектора:

- тактовая частота 10 кГц (код события 31), используемая для синхронизации контроллеров источников питания бустера (см. п. 2.4.1) и электроники пикапов (см. п. 2.8.4);
- тактовая частота инжектора 1 или 2 Гц, запускающая в EVG генератор последовательных событий (секвенсер).

Генерация всех событий привязана к фазе обращения пучка в основном кольце NSLS-II. Частота обращения пучка в основном кольце равна исходной тактовой частоте, деленной на 330. Поскольку периметр бустера составляет точно одну пятую часть периметра основного кольца, то привязка к фазе обращения в основном кольце стабильна по отношению к обращению пучка в бустере. Привязка к частоте обращения позволяет легко менять фазу впуска пучка в основное кольцо, синхронно сдвигая задержку всех импульсных устройств инжектора и время старта пушки линака.

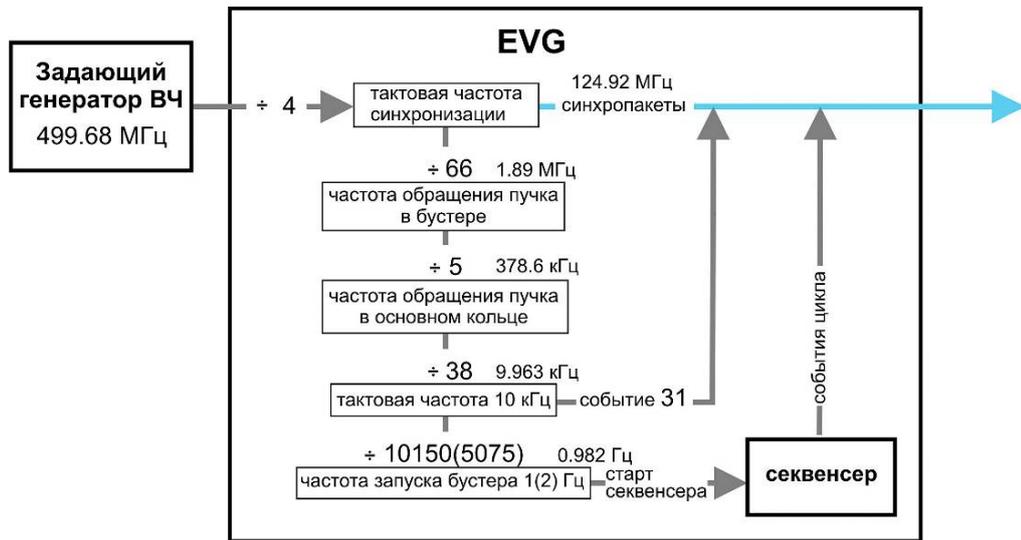


Рисунок 3.5: Диаграмма деления задающей частоты системы синхронизации бустера.

В EVG имеется механизм генерации последовательности событий (секвенсер), который запускается с заданной частотой 1 или 2 Гц и определяет события цикла инжектора, включая бустер. Соответствующие события стартуют различные системы инжектора: линак, систему впуска пучка в бустер, систему выпуска пучка из бустера, устройства диагностики пучка. При выборе режима синхронизации в память EVG загружается соответствующая таблица событий.

События старта впуска и старта выпуска в цикле бустера запускают отдельные независимые шкалы времени, отсчитываемые от момента появления соответствующего события (см. рисунок 3.6): старт цикла стартует общую шкалу цикла, старт впуска - шкалу впуска, старт выпуска - шкалу выпуска. Использование независимых шкал времени упрощает настройку взаимной синхронизации импульсных устройств и различных процессов. Например, для выпуска пучка из бустера нужно правильно расположить по времени старты нескольких импульсных источников питания и измерительной аппаратуры. Событие “выпуск” (код события 26), появляющееся незадолго до момента выпуска и привязанное к фазе обращения пучка в основном кольце NSLS-II, задает нулевой момент времени для шкалы выпуска (шкала (2) на рисунке 3.6), и все задержки стартов устройств выпуска отсчитываются в относительно небольших величинах от нуля этой шкалы.

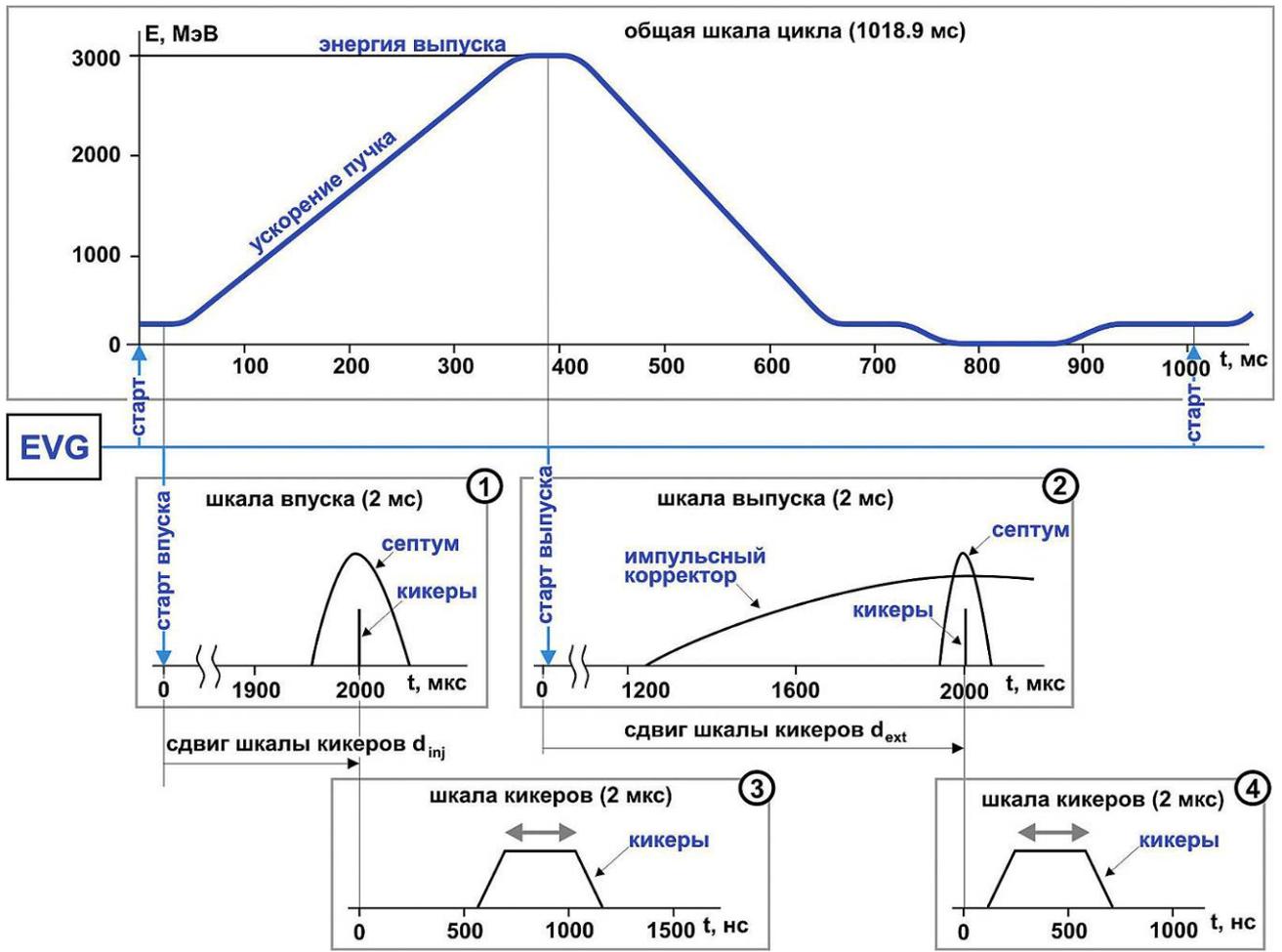


Рисунок 3.6: Шкалы для регулировки задержек элементов впуска/выпуска.

Для генерации стартовых импульсов (запусков), задержанных относительно событий, используется генератор задержки EVR с дискретностью 8 нс, что вполне достаточно для правильной синхронизации почти всех устройств и процессов инжектора. Для управления задержкой запуска электронной пушки линака и магнитов-кикеров требуется точность лучше, чем 2 нс. Чтобы обеспечить такую точность, используется специальная возможность EVR, позволяющая уменьшить дискретность регулировки задержки до 0.4 нс. При этом на шкалы впуска и выпуска (шкалы (1) и (2) на рисунке 3.6) накладываются более точные шкалы (3) и (4) с рабочим диапазоном регулировки 2 мкс. Положения этих шкал сдвинуты относительно нулей соответствующих шкал впуска или выпуска на заданную величину d_{inj} или d_{ext} , кратную периоду обращения пучка в основном кольце NSLS-II.

Кроме механизма синхронных событий для синхронизации устройств используется также Distributed Bus, при помощи которой в системе распространяются частоты обращения пучка в основном кольце и бустере, а также тактирующая частота 10 кГц (см. Таблицу 3.4).

Таблица 3.4: Биты синхронизации в байте данных синхропакета EVG.

Бит	Сигнал
0	f_{SR} частота обращения в основном кольце NSLS-II
1	f_{BR} частота обращения в бустере
2	f_{10k} частота 10 кГц для тактирования системы обратной связи положения орбиты пучка в основном кольце NSLS-II

3.4.2 Оборудование системы синхронизации

Для генерации импульсов запуска в системе синхронизации бустера используется пять модулей VME EVR-230RF и один модуль PMC-EVR. Для размножения сигналов, распространяемых от EVG по оптическому кабелю, используется шесть размножителей оптического сигнала Fan-out [112], представляющих собой 12-ти канальные хабы, включенных каскадно. Блок-диаграмма электроники синхронизации представлена на рисунке 3.7.

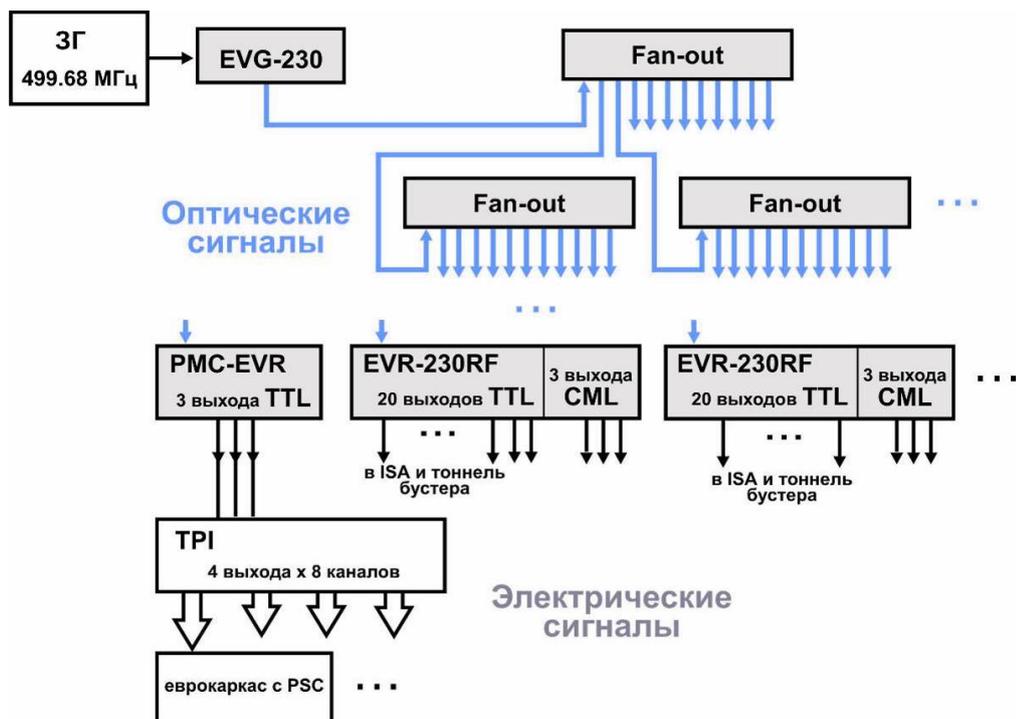


Рисунок 3.7: Блок-диаграмма электроники системы синхронизации.

3.4.3 Организация цикла бустера

Предусмотрено три режима работы бустера: 1 Гц с однократным впуском, 1 Гц с двойным впуском с интервалом 100 мс и режим 2 Гц с однократным впуском пучка. Для каждого режима работы в EVG загружается своя таблица для секвенсера, распределяющая события внутри цикла бустера. Таблица содержит коды событий и задержки, выраженные в периодах тактовой частоты 124.92 МГц. Счетчик секвенсера отсчитывает периоды тактовой частоты, и, когда его значение сравнивается с очередным табличным значением, EVG отправляет в оптику соответствующий код события. Диаграммы работы бустера для режимов 1 и 2 Гц представлены на рисунке 3.8.

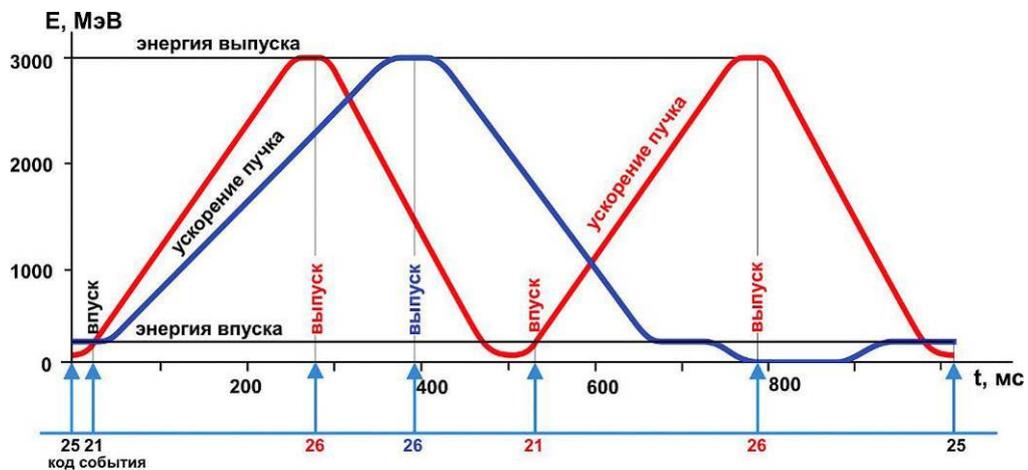


Рисунок 3.8: Диаграмма цикла бустера для одно- и двухгерцового режимов работы.

На рисунке 3.8 синим цветом обозначены события, относящиеся к режиму работы 1 Гц, красным цветом – к режиму 2 Гц, черным цветом – к обоим режимам работы.

Во избежание лишних запусков систем диагностики пучка предусмотрена возможность генерировать соответствующие события только в случае работы с пучком.

3.4.4 Синхронизация данных

Впервые в практике сбора данных в системе синхронизации был реализован механизм привязки измерений параметров бустера к событиям цикла его работы и взаимной привязки данных, полученных в течение цикла бустера, к

соответствующему циклу (текущему или предыдущему) в зависимости от времени получения данных их аппаратуры.

Система управления бустера в основном оперирует с данными в виде массивов, содержащих детализацию поведения установки в течение цикла. В EPICS данные хранятся в виде переменных PV (Process Variables), у которых есть свойство: время обновления (*Time*) [113]. Время обновления автоматически устанавливается процессом (IOC), который обслуживает данную переменную. Имеется механизм привязки времени обновления одной переменной к времени обновления другой переменной, т.е. при обновлении значения у некой переменной ей присваивается время обновления другой заданной переменной. Это свойство описывается при конфигурации PV в базе данных EPICS.

Работа механизма синхронизации данных в виде диаграммы показана на рисунке 3.9. В примере задействованы три условных IOC: IOC1, получающий измерения, соответствующие прошедшему циклу, IOC2, получающий асинхронные измерения, и IOC3, получающий измерения от аппаратуры, приходящие во время текущего цикла.

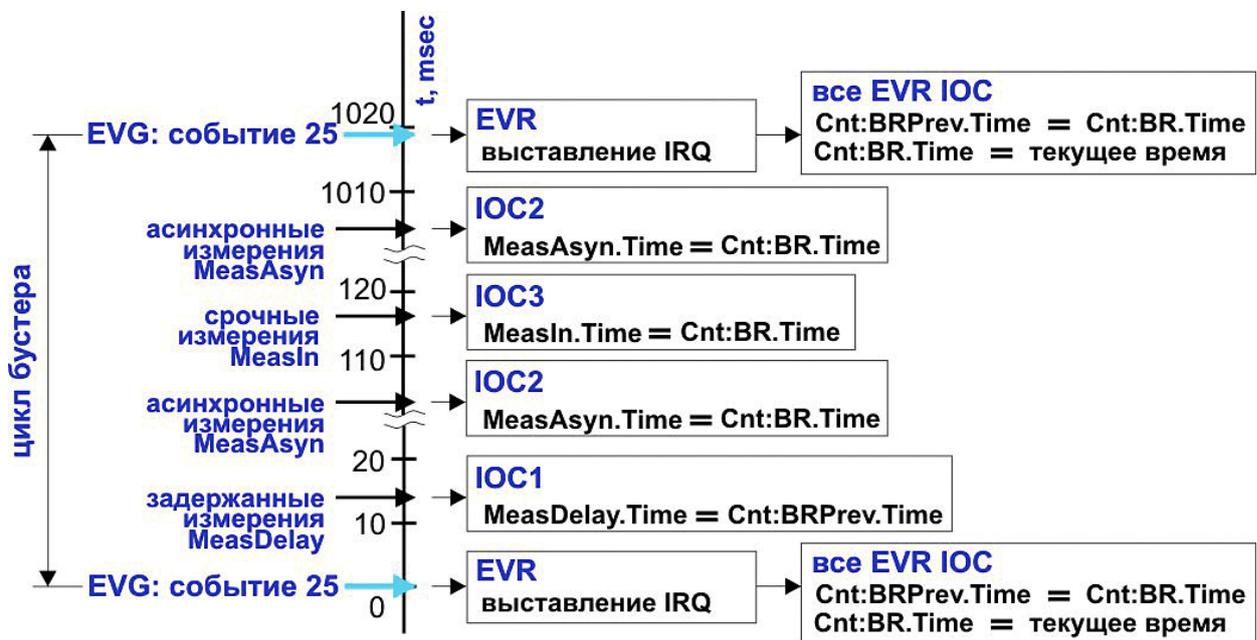


Рисунок 3.9: Диаграмма синхронизации данных.

Для взаимной привязки всех данных, соответствующих одному циклу, в каждом IOC, обслуживающем EVR, используются две специальные PV. Одна PV (Cnt:BR) имеет время обновления Cnt:BR.Time, соответствующее моменту начала

текущего цикла, вторая PV (Cnt:BRPrev) – время обновления Cnt:BRPrev.Time, соответствующее моменту начала предыдущего цикла. Эти PV заведены во всех ИОС, обслуживающих модули EVR, для уменьшения времени, затрачиваемого на обновление параметра *Time* у других “привязанных” к ним PV (в других ИОС), и для сокращения сетевого трафика. Время обновления у указанных PV изменяется одновременно с приходом очередного события старта цикла (код события 25): Cnt:BRPrev.Time получает значение Cnt:BR.Time, а Cnt:BR.Time – значение времени в момент прихода старта цикла.

В соответствии с принципами структурирования данных, изложенными в п. 1.2 Главы 1, все измерения в системе управления делятся на асинхронные (MeasAsyn) и синхронные измерения. Синхронные же измерения, в свою очередь, подразделяются на измерения, обновляемые в течение цикла (MeasIn), и задержанные измерения, обновляемые после окончания цикла (MeasDelay). Такое дополнительное деление связано с особенностями работы электроники. Например, контроллер, управляющий источником питания, начнет передачу результатов измерений, выполненных в течение цикла, только после старта следующего цикла.

Все измерения MeasIn при их обновлении получают время от PV Cnt:BR.Time, а все измерения MeasDelay – от Cnt:BRPrev.Time.

Для получения согласованных измерений, соответствующих одному циклу, программному приложению нужно дождаться значений, имеющих одинаковое время обновления, на что может потребоваться время, чуть большее, чем время одного цикла. Если требуется согласовать измерение с заданием, то приложение должно проконтролировать, что задание имеет время обновления меньшее, чем текущее измерение.

3.5 Управление источниками питания бустера

3.5.1 Методика управления источниками питания

Основной задачей управления элементами магнитной системы бустера, влияющими на процесс ускорения пучка, является формирование управляющих функций (вэйвформ), которые затем заносятся в управляющие контроллеры и задают поведение соответствующих источников питания в течение цикла работы бустера.

Для определения функции управления источником питания бустера предусмотрено два способа:

- задание узловых точек с линейной интерполяцией между ними,
- задание коэффициентов для построения кусочно-полиномиальной кривой 4-го порядка.

Перед записью в PV сформированные зависимости и того и другого вида обрабатываются в управляющем приложении с целью получения вэйвформы, содержащей 10150 значений управляющего сигнала (см. п. 3.5).

Первый способ задания с линейной интерполяцией между узловыми точками обеспечивает формирование сигнала любой формы, но в случае необходимости плавных изменений формы управляющей функции требует определения большого числа узловых точек, что вызывает затруднение при редактировании сигнала. При управлении бустером способ задания узловых точек применяется при формировании управляющих вэйвформ для магнитов-корректоров, когда не требуется обеспечивать плавные переходы между линиями соседних участков изменения тока, и число узловых точек сравнительно невелико (см. пример отработки программы коррекции орбиты, приведенный на рисунке 4.4, п. 4.3.3 Главы 4).

Второй способ, использующий кусочно-полиномиальную аппроксимацию, применяется для управления мощными источниками питания магнитной системы, когда важно обеспечивать плавное изменение управляющего сигнала с целью не допустить перенапряжений в силовых питающих цепях с большими

индуктивностями, вызываемых резкими изменениями управляющего сигнала ЦАП. В методе аппроксимации, реализованном для бустера, управляющая функция разбивается на 9 участков (см. рисунок 3.10), часть из которых представляет собой прямые линии, а часть – полиномы 4-го порядка с нулевым квадратичным членом.

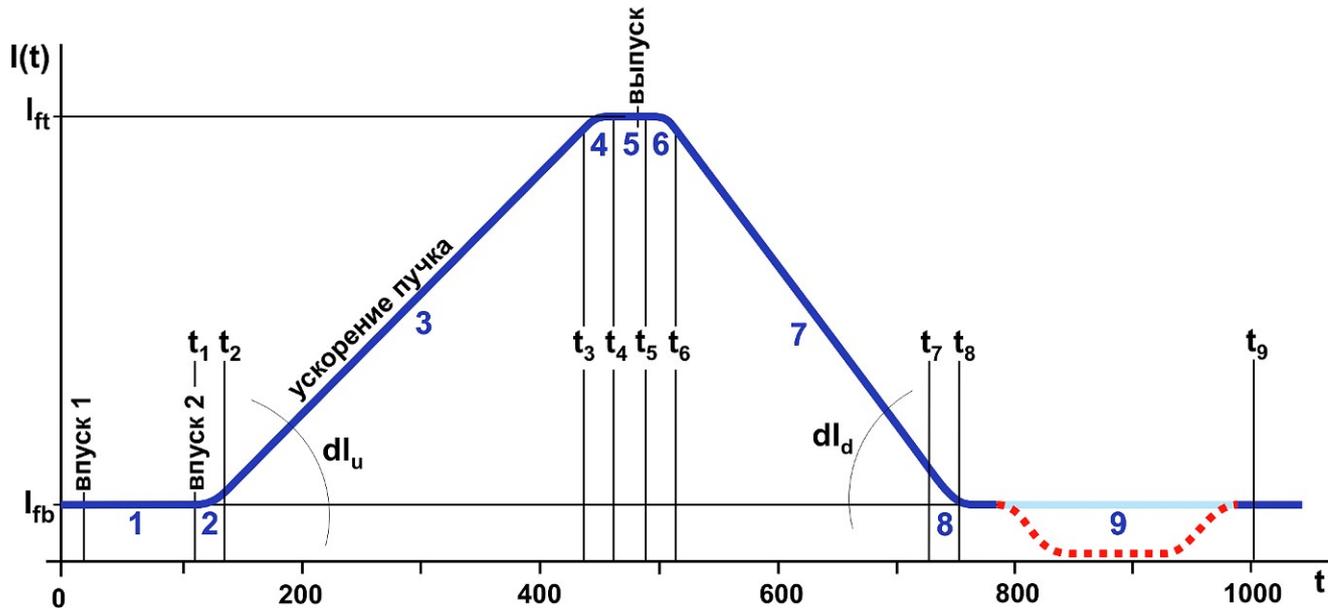


Рисунок 3.10: Разбивка основного управляющего сигнала на участки для кусочно-полиномиальной аппроксимации.

Основной сигнал управления (сплошная линия) делится на следующие участки:

- 1 → t_1 , горизонтальная прямая линия, соответствующая инжекции пучка,
- 2 $t_1 \rightarrow t_2$, полином, начальный участок ускорения,
- 3 $t_2 \rightarrow t_3$, прямой наклон, основной участок ускорения,
- 4 $t_3 \rightarrow t_4$, полином, конечный участок ускорения,
- 5 $t_4 \rightarrow t_5$, горизонтальная прямая линия (участок для выпуска пучка),
- 6 $t_5 \rightarrow t_6$, полином,
- 7 $t_6 \rightarrow t_7$, прямой наклон,
- 8 $t_7 \rightarrow t_8$, полином (6, 7, 8 - участки возврата на уровень инжекции),
- 9 $t_8 \rightarrow t_9$, горизонтальная прямая линия (до следующей инжекции пучка).

Формально функция управления на любом участке кривой может быть представлена единым образом в виде следующего выражения:

$$I(t) = a_i + b_i*(t-t_i) + c_i*(t-t_i)^3 + (t-t_i)^4 \quad (3.1)$$

Для внесения в управляющий сигнал локальных коррекций предусмотрено наложение на основной сигнал функций-бампов с гладкими фронтами в виде полиномов 4-го порядка и плоской средней части (см. рисунок 3.11). Любая требуемая коррекция управляющего сигнала с заданной точностью может быть представлена в виде суперпозиции таких дополнительных бампов.

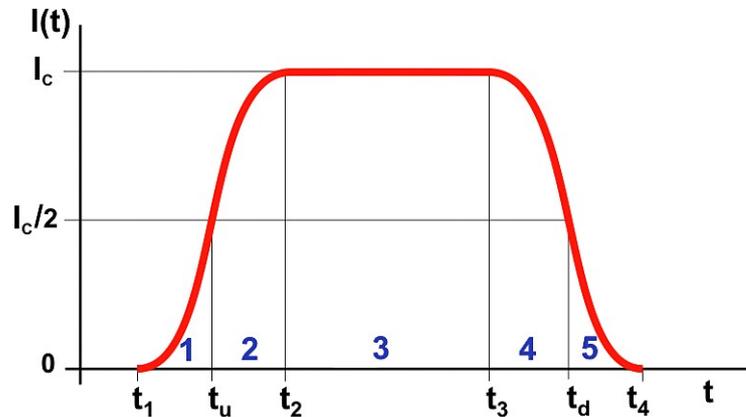


Рисунок 3.11: Разбивка корректирующего сигнала на участки для кусочно-полиномиальной аппроксимации.

Корректирующий бамп состоит из следующих участков:

- 1, 2 $t_1 \rightarrow t_u, t_u \rightarrow t_2$, полиномы, передний фронт (по сравнению с основным сигналом исключен прямой наклонный участок),
 - 3 $t_2 \rightarrow t_3$, горизонтальная часть коррекции, с амплитудой I_c ,
 - 4, 5 $t_3 \rightarrow t_d, t_d \rightarrow t_4$, полиномы, задний фронт,
- при этом $t_u - t_1 = t_2 - t_u$ и $t_d - t_3 = t_4 - t_d$, $I(t_u) = I(t_d) = I_c/2$.

На рисунке 3.10 представлен сигнал ЦАП для управления источником питания дипольных магнитов, составленный из основной компоненты (сплошная линия) и одного бампа (пунктирная линия), наложенного на горизонтальном участке основного сигнала после возврата тока источника питания на уровень впуска пучка. Данная коррекция сделана для перемагничивания железа магнитов в конце цикла работы бустера, что обеспечивает высокую стабильность и повторяемость поведения поля дипольных магнитов при впуске и ускорении пучка.

Коэффициенты a_i, b_i, c_i , и d_i полинома (3.1) вычисляются, исходя из следующих условий:

- равенство краевых значений и значений первых производных у соседних участков,
- равенство нулю вторых производных на краях участка,

при этом выражения для вычисления коэффициентов для всех участков записываются в виде, как показано в Таблице 3.5.

Таблица 3.5: Выражения для коэффициентов кусочно-полиномиальной кривой сигнала управления.

№	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Основной сигнал				
1	I_{fb}	-	-	-
2	I_{fb}		$dI_u / (t_2 - t_1)^2$	$-0.5dI_u / (t_2 - t_1)^3$
3	$I_{fb} + 0.5dI_u(t_2 - t_1)$	dI_u	-	-
4	$I_{fb} + dI_u(0.5(t_2 - t_1) + t_3 - t_2)$	dI_u	$[4(I_{fb} - I_{ft}) - dI_u(2(t_1 + t_2) - (t_3 + 3t_4))] / (t_3 - t_4)^3$	$[6(I_{fb} - I_{ft}) - dI_u(3(t_1 + t_2) - (2t_3 + 4t_4))] / 2(t_3 - t_4)^4$
5	I_{ft}	-	-	-
6	I_{ft}	-	$dI_d / (t_6 - t_5)^2$	$-dI_d / 2(t_6 - t_5)^3$
7	$I_{ft} + 0.5dI_d(t_6 - t_5)$	dI_d	-	-
8	$I_{ft} + 0.5dI_d(t_6 - t_5) + dI_d(t_7 - t_6)$	dI_d	$[4(I_{fb} - I_{ft}) - dI_d(2(t_5 + t_6) - (t_7 + 3t_8))] / (t_8 - t_7)^3$	$[dI_d(2(t_8 - t_7) + 3/2(t_6 - t_5) - 3(t_7 - t_6)) + 3(I_{ft} - I_{fb})] / (t_8 - t_7)^4$
9	I_{fb}	-	-	-
Корректирующий сигнал				
№	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
1	-	-	$8I_c / (t_2 - t_1)^3$	$-8I_c / (t_2 - t_1)^4$
2	$I_c / 2$	$2I_c / (t_2 - t_1)$	$-8I_c / (t_2 - t_1)^3$	$8I_c / (t_2 - t_1)^4$
3	I_c	-	-	-
4	I_c	-	$-8I_c / (t_4 - t_3)^3$	$8I_c / (t_4 - t_3)^4$
5	$I_c / 2$	$-2I_c / (t_4 - t_3)$	$8I_c / (t_4 - t_3)^3$	$-8I_c / (t_4 - t_3)^4$

С целью уменьшения числа параметров, задаваемых оператором через интерфейс приложения, с помощью которого формируется waveform

управляющего сигнала, на определение полинома основного сигнала накладывается следующее дополнительное ограничение: продолжения наклонных прямых участков должны пересекать горизонтальные линии, соответствующие уровням инжекции и выпуска пучка, в серединах промежутков, отведенных для полиномиальных участков кривой (см. рисунок 3.12).

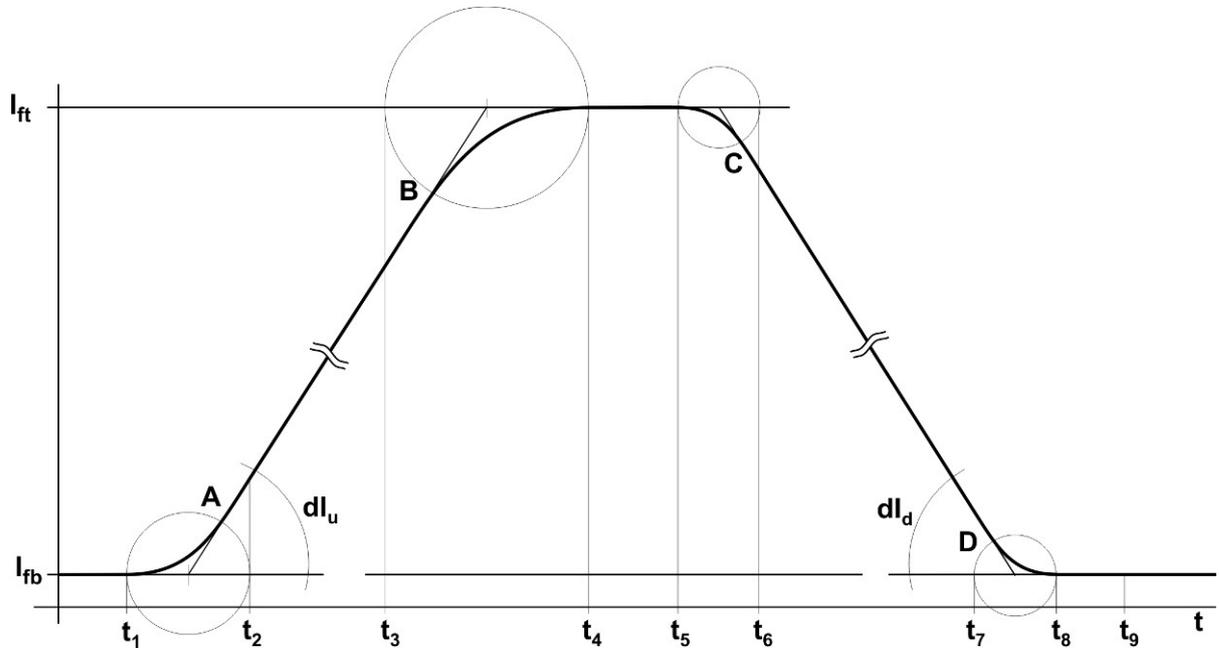


Рисунок 3.12: Определение наклонов рэмпа.

Таким образом, величины наклонов прямых участков вычисляются следующим образом:

$$dI_u = (I_{ft} - I_{fb}) / ((t_3 + t_4)/2 - (t_1 + t_2)/2), \quad (3.2)$$

$$dI_d = (I_{ft} - I_{fb}) / ((t_5 + t_6)/2 - (t_7 + t_8)/2). \quad (3.3)$$

Оператору для определения основного сигнала управляющей функции требуется задать девять значений времени и два значения для энергии впуска и выпуска.

3.5.2 Двухкомпонентная схема контроллеров: контроллер цифровых интерфейсов и контроллер аналоговых интерфейсов

Для питания элементов бустера используется 68 источников различного типа:

- источники постоянного тока с возможностью быстрой перестройки (рэмп) для магнитов, обеспечивающих циклическое обращение частиц в кольце бустера в процессе ускорения пучка,

- источник постоянного тока для доворотного магнита выпускного канала,

- источники импульсного тока для магнитов-септумов и выпускных отклоняющих магнитов,

- источники импульсного тока для “быстрых” магнитов-кикеров, отклоняющих пучок в течение одного оборота в бустере.

Типы и основные характеристики источников питания приведены в Таблице 3.6.

Таблица 3.6: Источники питания бустера.

Типы источников питания постоянного тока				
Источник питания	Кол-во	Макс. ток, А	Макс. напр., В	Точность, % впуск/ускор/выпуск
диполей ВF	1	900	±220	0.1 / 0.1 / 0.01
диполей ВD	2	750	±700	0.1 / 0.1 / 0.01
квадруполей	3	170	±175	0.1 / 0.1 / 0.1
корректора или секступоля	52	±6	±80	1 / 1 / 1
доворотного магнита	1	500	12	0.01
Типы импульсных источников питания				
Источник питания	Кол-во	Дл. имп. мкс	Макс. напр., кВ	Точность, %
			впуск/выпуск	
кикера	6	0.5	21 / 23	0.5 / 0.2
септума	2	100	0.2 / 0.7	0.05 / 0.02
отклоняющих магнитов	1	1500	0.9	0.05

Несмотря на существенно отличающиеся функции и параметры, все типы источников питания управляются одинаково: при помощи системы контроллеров, специально разработанной в BNL для проекта NSLS-II [114]. Система состоит из двух взаимодействующих друг с другом контроллеров: контроллера цифровых интерфейсов PSC (Power Supply Controller), который подключается к компьютеру по Ethernet, и контроллера аналоговых интерфейсов PSI (Power Supply Interface), располагающегося рядом с источником питания и соединенного с PSC через оптический линк с пропускной способностью 50 Мбит/с. Такая компоновка контрольно-измерительной электроники имеет следующие преимущества:

- близкое расположение аналоговой части с потребителем и источником аналоговых сигналов сокращает длину аналоговых трасс и, тем самым, уменьшает наводки на сигналы,
- выделение цифровой части в виде отдельного модуля позволяет, во-первых, разместить модули в месте, удаленном от силовых цепей и связанных с ними наводок, во-вторых, организовать размещение контроллеров в едином каркасе, что упрощает синхронизацию, подачу питания и подключение к сети.

Управляющий компьютер задает в PSC форму управляющего сигнала для источников питания диполей и квадруполей, которая определяет энергию пучка и темп ускорения. Величина управляющего сигнала для источников питания корректоров зависит от того, какую коррекцию нужно внести при помощи соответствующего магнита в каждый момент ускорения. Для DC источника питания доворотного магнита, входящего в систему магнитов бустера, в массив уставок всегда записывается постоянная величина. Аналогично, постоянная величина, которая задает уровень зарядного напряжения на накопителях энергии, записывается и в массивы для управления импульсными источниками. В случае режима работы с двойным впуском имеются особенности, которые рассмотрены далее в п. 3.5.4.

Чтобы обеспечить управление источниками питания в циклическом режиме для PSC была разработана специальная микропрограмма, учитывающая особенности работы бустера:

- необходимость использовать массивы значений (уставок), задающих форму сигнала ЦАП,
- возможность циклического получения массивов измеренных сигналов, отражающих поведение системы,
- возможность взаимной синхронизации отработки всех контроллеров.

Микропрограмма в PSC, разработанная для бустера, выполняет следующие функции:

- принимает от компьютера команды управления, массивы уставок для отработки и бинарные значения, записываемые в выходной регистр,
- по приходу стартового импульса начинает отработку цикла: с тактовой частотой 10 кГц высылает в PSI для занесения в ЦАП значения из вэивформы, выбранный для отработки,
- высылает измененные значения в регистр цифрового вывода PSI,
- принимает от PSI данные измерений АЦП, поступающие с тактовой частотой, и записывает их в память,
- принимает от PSI изменившиеся значения входного цифрового регистра,
- по приходу стартового импульса очередного цикла, высылает в компьютер данные измерений АЦП и значения входного цифрового регистра, полученные в процессе выполнения предыдущего цикла.

PSI бывает двух видов: одноканальный – с одним ЦАП, и двухканальный - имеющий два ЦАП. PSI осуществляет засылку кодов, полученных от PSC, в ЦАП и в выходной цифровой регистр, а также управляет измерениями всех каналов АЦП, выполняет чтение входного цифрового регистра и отправляет данные в PSC.

Блок-схема контроллеров представлена на рисунке 3.13. Платы контроллеров PSC размещаются в крейте, в который можно установить до 20 контроллеров. Каждая плата состоит из двух частей, соединяемых на панели

каркаса. PSC подключается к сети управления по Ethernet со скоростью передачи данных 100 Мбит/сек. Контроллер оснащен памятью размером до 1 Гбайта, что позволяет сохранять загружаемые вэйвформы уставок (всего для каждого канала ЦАП предусмотрено 16 вэйвформ), а также формировать массивы измерений, получаемых в ходе выполнения цикла.

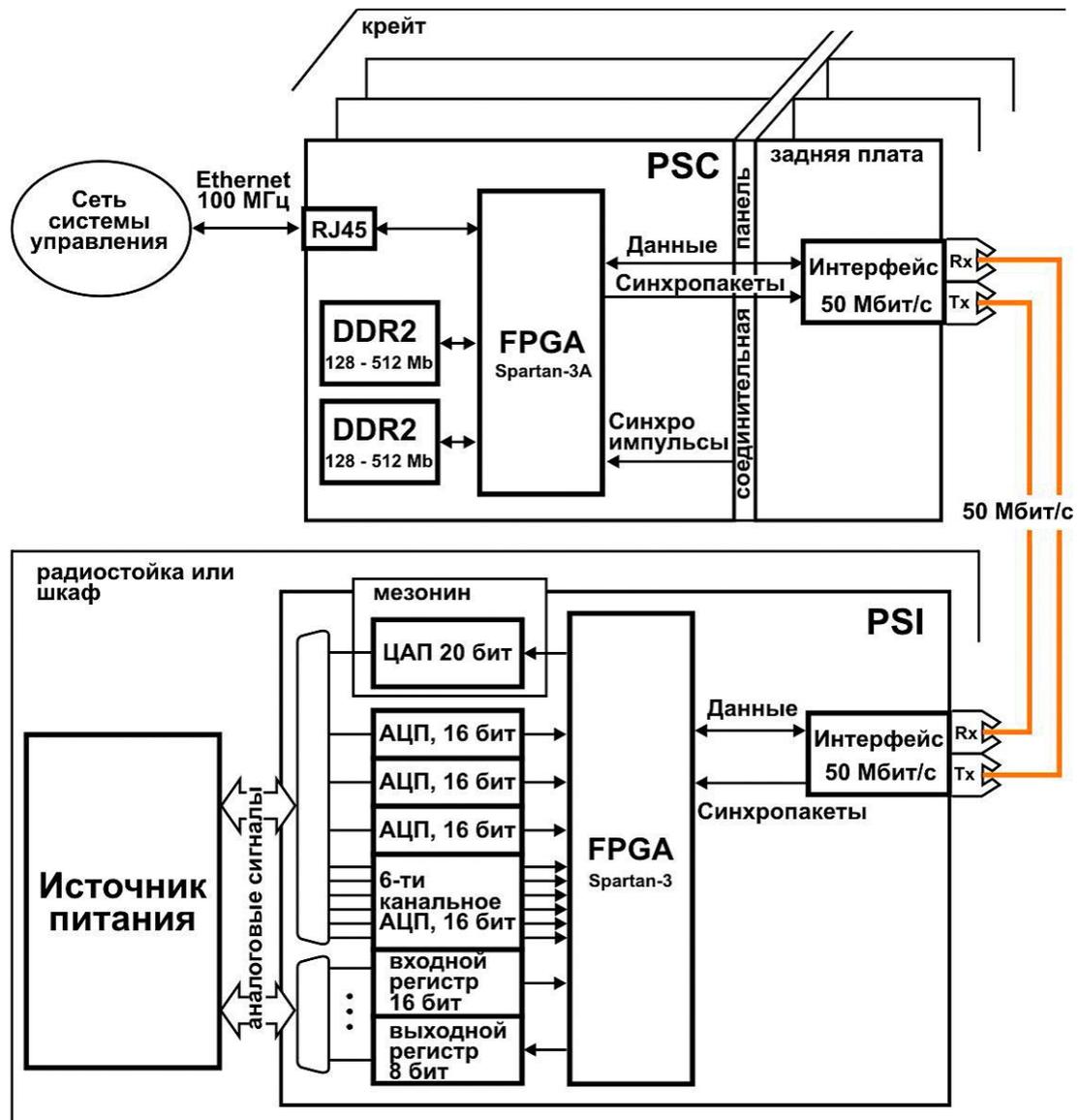


Рисунок 3.13: Блок-схема контроллеров PSC и PSI.

Через соединительную панель крейта на все PSC от системы синхронизации поступают синхроимпульсы: старт цикла и тактовая частота 10 кГц. Для синхронизации смены управляющих вэйвформ предусмотрен специальный запуск, также одновременно подаваемый на все контроллеры через соединительную панель.

Плата PSI смонтирована в отдельном корпусе евромеханики размером 1U, имеющем собственное питание от сети. Одноканальный PSI имеет один прецизионный 20-ти битный ЦАП, который выполнен на отдельной мезонинной плате, три прецизионных АЦП AD677KR разрядностью 16 бит, один 6-ти канальный АЦП AD7656-1Y разрядностью 16 бит, один 16-ти битный входной регистр и один 8-ми битный выходной регистр. В случае варианта двухканального PSI число ЦАП и АЦП, смонтированных в корпусе, удваивается. Частота сэмплирования всех АЦП задается по оптическому линку от PSC и равна 10 кГц, что позволяет с достаточным разрешением по времени измерять практически все сигналы, предусмотренные для диагностики всех типов источников питания.

Поскольку пропускная способность Ethernet-соединения PSC с компьютером ограничена величиной 100 Мбит/с, для уменьшения загрузки при передаче в компьютер массивов с измерениями в PSC предусмотрено десятичное прореживание данных, приходящих от всех АЦП. Для передачи в управляющий компьютер для каждого канала ЦАП в памяти PSC микропрограммой формируются два массива по 10150 значений, измеренных девятью АЦП. Первый массив содержит девять последовательно уложенных массивов прореженных измерений от всех АЦП длиной по 1014 значений. Второй массив содержит 10150 значений измерений для одного выбранного канала АЦП. Таким образом, в конце каждого цикла для каждого канала ЦАП PSC пересылает в компьютер синхронные измерения от всех АЦП, сделанные с интервалом в 1 мс, и измерения от одного выбранного канала, сделанные через 100 мкс.

Сигналы формата TTL, поступающие на 2-х байтный входной регистр, непрерывно контролируются контроллером PSI, который высылает в PSC значение регистра, если изменяется состояние какого-либо его входа. Кроме того, с разрешением по времени 10 нс PSI отслеживает последовательность входов регистра, изменившихся в данном цикле, отправляя в PSC биты изменившихся входов. По приходу старта нового цикла PSC высылает данные о состоянии входного регистра в прошедшем цикле в управляющий компьютер.

Выходной регистр PSI выдает на выход сигналы в формате TTL. Запись в выходной регистр происходит в течение такта 10 кГц после получения значения от управляющего компьютера. Предусмотрен режим работы выходного регистра, при котором бит, по команде от компьютера установленный в “1”, через заданное время будет сброшен контроллером в “0”. Этот режим работы распространяется сразу на весь регистр.

Внешний вид каркаса с PSC и каркасов PSI, расположенных в радиостойке RGC2, в которой также размещаются источники питания корректоров, представлен на рисунке 1 Приложения 3, на рисунках 2 – 4 показаны радиостойки с источниками питания корректоров, квадрупольных магнитов и импульсных устройств впуска/выпуска.

3.5.3 Управление источниками питания постоянного тока

Функциональная блок-диаграмма системы управления источниками питания приведена на рисунке 3.14.

Импульсы синхронизации подаются на крейты с PSC от специального размножителя импульсов TPI (Trigger Permit Interface), который размножает до 8-ми входных TTL сигналов в четыре 8-ми канальных выхода.

Три прецизионных канала АЦП (см. рисунок 3.13), фактически имеющие относительную точность измерения лучше, чем 10^{-4} , используются для измерения управляющего сигнала ЦАП и основного выходного параметра источника питания (тока или напряжения). Причем, для повышения надежности измерения тока в основных источниках питания (для диполей и квадрупольей) используются по два независимых бесконтактных измерителя тока [115]. Остальные шесть каналов АЦП, у которых реальная точность измерения в примерно три раза хуже, чем у прецизионных АЦП, используются для измерения различных диагностических сигналов: напряжения на нагрузке, зарядного тока, напряжения на емкостном накопителе и т.п. Для управления основными источниками питания (диполей и квадрупольей), имеющими много контролируемых сигналов, используются двухканальные PSI, что дает удвоение числа измерительных каналов АЦП.

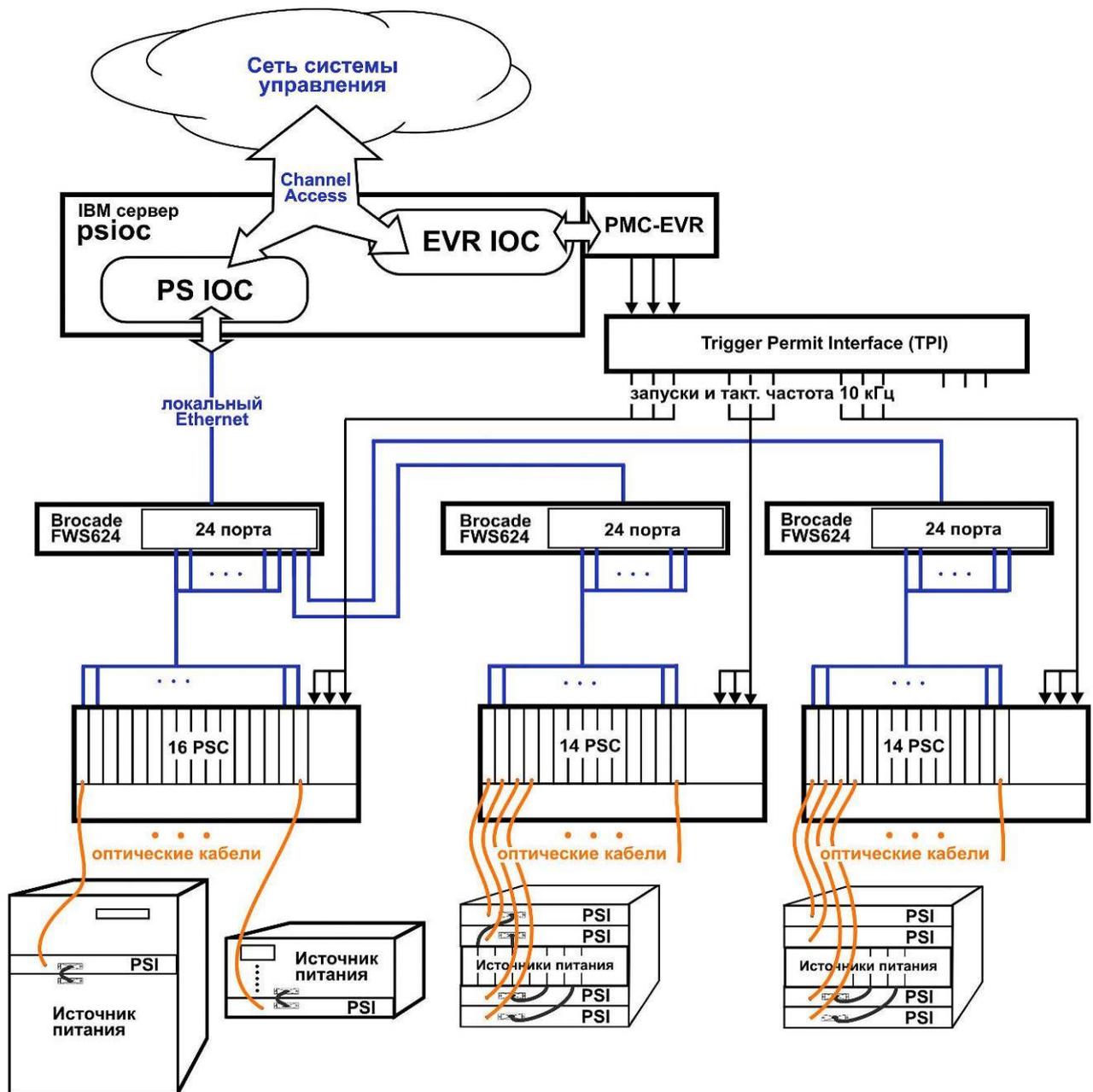


Рисунок 3.14: Функциональная диаграмма управления источниками питания.

В случае источников питания квадруполей для обеспечения требуемой точности отработки тока предусмотрено использование дополнительного управляющего сигнала второго ЦАП, работающего на упреждение управления и уменьшающего время реакции источника тока на изменение опорного напряжения. Дополнительный управляющий сигнал пропорционален производной опорного сигнала. Например, подача упреждающего сигнала, пропорционального сигналу, показанному на рисунке 3.15, позволяет в несколько раз улучшить точность отработки задания у источника питания квадруполя при ускорении пучка.

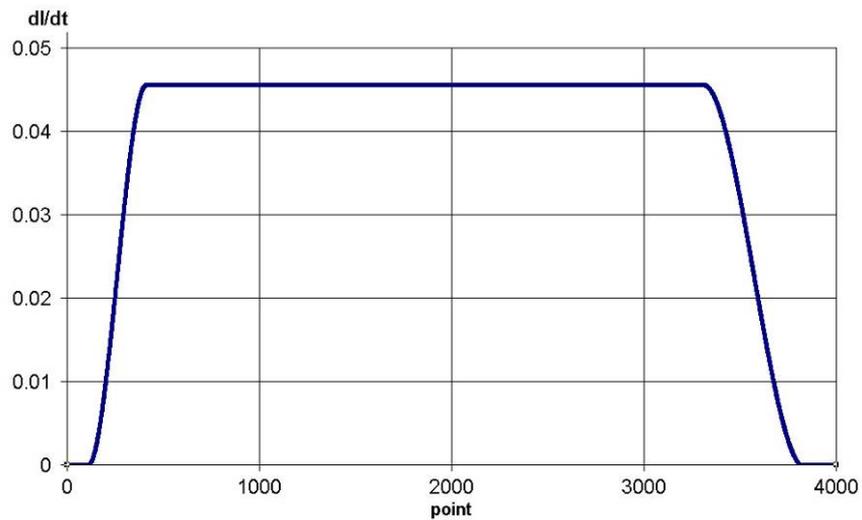


Рисунок 3.15: Упреждающий управляющий сигнал (feedforward) для источника питания квадруполя QF в режиме работы бустера 1 Гц.

Входной регистр PSI позволяет контролировать бинарные сигналы состояния источника питания («вкл/выкл», «заблокирован» и т.п.) и сигналы сработавших блокировок. Через выходной регистр PSI осуществляется управление состоянием источника питания: включение, выключение, сброс блокировок, сброс настроек контроллера источника питания.

В Таблицах 3.7 и 3.8 для примера приводятся списки и характеристики контрольно-измерительных сигналов для мощного источника питания дипольных магнитов и для пары шестиамперных источников питания корректоров, управляемых от двухканального PSI.

Таблица 3.7: Управляющие и измерительные сигналы для источника тока диполей.

	Сигнал	Требуемая точность (% от max)	канал PSI
Входные аналоговые сигналы (задания)			
1	Выходной ток	0.001	DAC0
Входные бинарные сигналы TTL: команды			
1	Включить источник питания		DO0
2	Выключить источник питания		DO1
3	Сбросить сработавшие защиты		DO3
Выходные аналоговые сигналы (измерения)			

1	Измерение выходного тока на DCCT1	0.002	ADC01
2	Измерение выходного тока на DCCT2	0.002	ADC16
3	Сигнал ошибки тока	1	ADC02
4	Выходное напряжения источника питания	0.1	ADC03
5	Ток утечки на землю	1	ADC04
6	Напряжение на батарее Н	0.1	ADC05
7	Зарядный ток батареи Н	0.1	ADC06
8	Напряжение ЦАП	0.002	ADC09
9	Напряжение на батарее L	0.1	ADC10
10	Зарядный ток батареи L	0.1	ADC11
Выходные бинарные сигналы TTL: индикация сработавших защит			
1	Превышение тока (DCCT)		DI00
2	Защита IGBT		DI01
3	Отсутствие входного напряжения		DI02
4	Нет воды, охлаждающей источник питания		DI03
5	Перегрузка источника питания по току		DI04
6	Неисправность регулятора		DI05
8	Перегрев источника питания		DI07
9	Перегрев нагрузки (внешняя блокировка)		DI08
12	Превышена допустимая утечка на землю		DI12
13	Открыта дверь источника питания или нажата кнопка аварийного отключения		DI13
Выходные бинарные сигналы TTL: состояние системы			
7	Состояние вводного контактора		DI06
10	Включено удаленное управление		DI10
11	Готовность источника питания к работе		DI11
14	Суммарная блокировка		DI14
15	Источник питания включен в рабочее состояние		DI15

Таблица 3.8: Управляющие и измерительные сигналы для пары источников тока корректирующих магнитов.

	Сигнал	Требуемая точность (% от max)	канал PSI
Входные аналоговые сигналы (задания)			
1	Выходной ток 1-го источника	0.1	DAC0
2	Выходной ток 1-го источника	0.1	DAC1
Входные бинарные сигналы TTL: команды			
1	Включение/выключение (1/0) второго источника		DO0
2	Включение/выключение (1/0) первого источника		DO1
Выходные аналоговые сигналы (измерения)			
1	Выходной ток первого источника	0.1	ADC00
2	Напряжение ЦАП первого источника	0.1	ADC01
3	Выходное напряжение первого источника	0.1	ADC02
4	Выходной ток второго источника	0.1	ADC00
5	Напряжение ЦАП второго источника	0.1	ADC01
6	Выходное напряжение второго источника	0.1	ADC02
Выходные бинарные сигналы TTL: индикация сработавших защит			
1	Перегрузка второго источника		DI00
2	Перегрузка первого источника		DI01

3.5.4 Управление импульсными системами

Импульсные системы в циклических ускорителях используются для создания сильных магнитных полей для кратковременного воздействия на пучок заряженных частиц с целью изменения траектории его движения, как правило, для впуска, выпуска или транспортировки частиц из одного ускорителя в другой. Использование импульсных магнитных систем для выполнения этих функций имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием систем на постоянном токе:

- за счет большого тока в импульсе возможно создавать сильные поля в конструкции с малыми габаритами,

- за счет скин-эффекта поле во время импульса тока не успевает распространяться за область конструкции магнита, что дает возможность размещать импульсные магниты, предназначенные для впуска/выпуска, очень близко к замкнутой орбите циркулирующего пучка с минимальным влиянием на движение частиц,
- благодаря большой скважности импульсные системы дают значительную экономию электроэнергии.

В тех же случаях, когда нужно однократно воздействовать на пролетающий пучок частиц, например, с целью одновременного выпуска его из циклического ускорителя, использование импульсной системы становится неизбежным. На бустере импульсными устройствами являются магниты-кикеры для однократного удара магнитным полем по инжектируемому или циркулирующему пучку, магниты-септумы для ввода/вывода пучка в/из вакуумной камеры бустера, а также корректоры для кратковременного (во избежание лишних потерь частиц) отклонения равновесной орбиты пучка в радиальном направлении перед выпуском.

Импульсный характер работы систем накладывает на управление ими дополнительное условие: требуется использование импульса запуска с управляемым временем задержки, а для магнитов-кикеров - синхронизация с движением пучка.

Стабильность работы импульсной системы зависит от многих параметров, например: температуры магнита, стабильности работы токового ключа, стабильности параметров накопителя энергии. В связи с этим при управлении импульсными магнитами возникает задача контролировать именно тот параметр, который, собственно, и влияет на движение частиц: интеграл магнитного поля в момент пролета пучка.

Для измерения интеграла импульсного поля используются специальные петли (катушки), охватывающие магнитный поток, размещенные и зафиксированные в апертуре магнитов. На измерительной петле переменное магнитное поле наводит напряжение, пропорциональное производной магнитного

поля, которое измеряется и интегрируется с помощью интегрирующего АЦП [100]. Измерительная электроника, соответственно, должна быть синхронизирована с движением пучка. Из-за короткого импульса поля в магнитах-кикерах (~ 500 нс) удаленно (длина подводящих сигнальных кабелей превышает 100 м) измерить сигнал с такой петли практически невозможно. Поэтому для автоматизированного контроля стабильности системы магнита-кикера выбран другой параметр – ток магнита, который измеряется токовым датчиком, расположенным после токового ключа (тиратрона). Сигнал с токового датчика оцифровывается с помощью АЦП [101] с частотой дискретизации 125 МГц.

Для управления импульсными источниками питания используются одноканальные PSI, которые позволяют правильным образом регулировать в течение цикла уровень напряжения на накопителях энергии (конденсаторных батареях или формирующих линиях). Сигналы, как и в случае постоянных источников питания, измеряются в течение всего цикла работы бустера при помощи АЦП с частотой 1 кГц, что обеспечивает непрерывный мониторинг всех сигналов импульсных источников питания, кроме тока (или поля) в нагрузке.

В случае работы бустера в режиме двойного впуска пучка требуется через 100 мс после первого впуска совершить второй запуск впускного септума. Учитывая особенности используемого зарядного источника UltraVolt [116] для обеспечения стабилизации требуемого уровня напряжения на конденсаторной батарее необходимо сначала в течение 70 мс форсировать процесс заряда, а затем вернуть опорное напряжение на заданный уровень. Ускорение процесса заряда приводит к тому, что источник зарядного тока быстрее заряжает батарею, а в оставшиеся 30 мс до второго запуска происходит релаксация уровня напряжения до требуемой точности (см. рисунок 3.16). Эта манипуляция осуществляется с помощью задания в контроллер PSC опорного напряжения соответствующей формы.

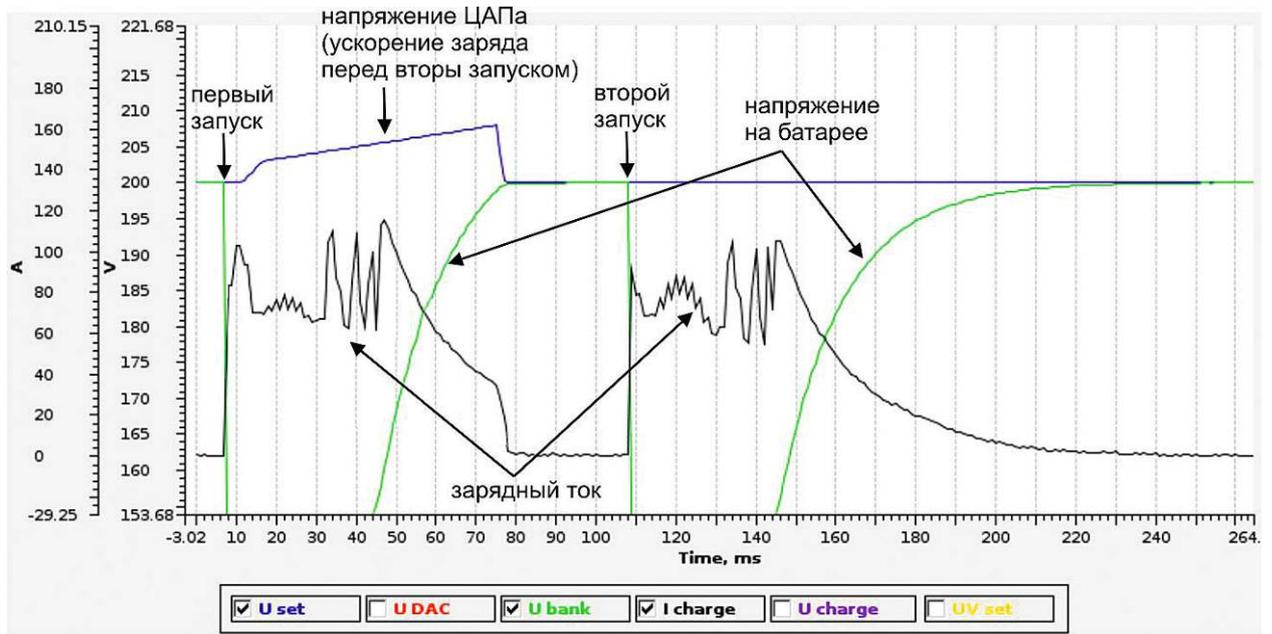


Рисунок 3.16: Графики управляющего напряжения ЦАП, зарядного тока и напряжения на конденсаторной батарее генератора инжекционного септума в режиме работы бустера с двойным впуском.

Импульсный генератор магнита-кикера [117] управляется следующим образом. От ЦАП подается опорное напряжение, которое регулирует величину зарядного напряжения на формирующей линии. Формирующая линия, заряженная до требуемого значения напряжения, в нужный момент разряжается через тиратронный ключ на магнит, обеспечивая необходимую форму импульса тока с полочкой в 300 нс. Чтобы уменьшить время присутствия высокого напряжения на элементах источника питания для режима однократного впуска пучка предусмотрена схема, обеспечивающая заряд формирующей линии непосредственно перед срабатыванием генератора, для чего используется дополнительный стартовый импульс, подаваемый за 500 мс до запуска генератора. Полное время заряда формирующей линии составляет примерно 300 мс. Оставшееся до запуска тиратрона время достаточно для затухания всех переходных процессов, что обеспечивает требуемую стабильность напряжения на формирующей линии в момент разряда.

При работе бустера в режиме двойного впуска требуется через 100 мс совершить второй запуск двух инжекционных кикеров: КИС3 и КИС4. В этом случае второе срабатывание совершается с меньшим напряжением на

формирующей линии, составляющим примерно 70 % от значения, установленного для первого впуска пучка. Управление зарядом формирующей линии осуществляется путем использования вэйвформы уставок, задающей сложную форму поведения напряжения на ЦАП (см. рисунок 3.17), учитывающую и необходимые уровни напряжения на формирующей линии и особенности работы зарядного устройства UltraVolt [116].

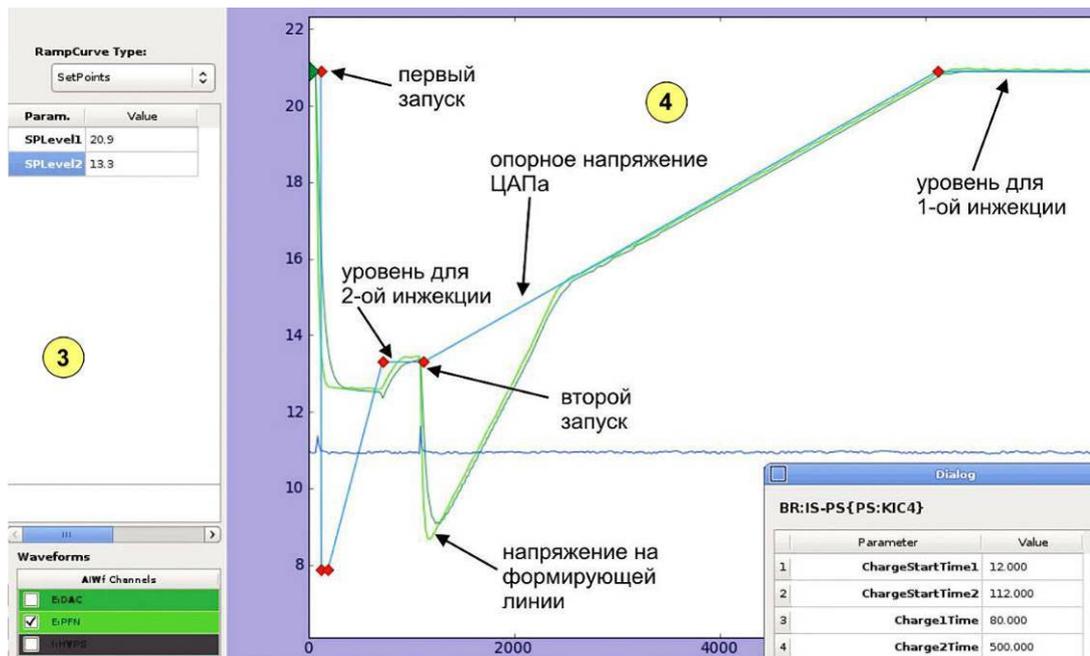


Рисунок 3.17: Графики управляющего и измеренного напряжений на формирующей линии генератора KIC4.

На графике видно, как спадает напряжение на формирующей линии после первого срабатывания. Затем изменением уровня сигнала ЦАП напряжение “подводится” к значению, требуемому для второго срабатывания. После второго срабатывания в течение 300 мс напряжение плавно выводится на исходный уровень для выполнения следующего цикла.

3.6 Управления вакуумной системой и системой защитных блокировок

Получение необходимого уровня вакуума в вакуумной камере синхротрона достигается с помощью 72-х магниторазрядных насосов Gamma TiTan Ion Pumps 45S производительностью 45 л/сек. Насосы равномерно распределены по всему периметру кольца бустера, что обеспечивает достаточно ровное распределение давления на всем пути движения пучка на уровне порядка 10^{-8} торр [118]. Для начальной откачки предусмотрено несколько портов, к которым подключаются форвакуумные насосы. Для питания и управления магниторазрядными насосами используются двухканальные контроллеры Varian 929-7011, обеспечивающие управление подачей высокого напряжения, включение/выключение и измерение тока насоса, значение которого пересчитывается в значение вакуума. Контроллеры подключаются к коммутатору Моха CN2650I по последовательной связи RS-232 и далее к управляющему компьютеру по сети Ethernet.

Для возможности измерения вакуума во всем диапазоне давлений на бустере используется два типа датчиков: датчики давления с холодным катодом (CCG – Cold Cathode Gage) [119] позволяют измерять уровень вакуума в диапазоне 10^{-2} – 10^{-11} торр, а резистивные вакууметры Пирани (TCG – Thermal Conductivity Gage) [120] измеряют вакуум от атмосферного давления до уровня 10^{-4} торр. Сигналы с вакуумных ламп обрабатываются трехканальными контроллерами MKS937B, которые, как и контроллеры насосов, подключены к коммутатору Моха по последовательной связи.

Управление вакуумной системой заключается в задании режима работы насосов, управлении состоянием автоматических шиберов, считывании данных о состоянии вакуума из контроллеров насосов и контроллеров вакуумных ламп, а также в получении информации из PLC о состоянии шиберов и о температуре элементов вакуумной камеры. Процесс получения данных о состоянии вакуумной системы никак не связан с циклом работы бустера.

Вакуумная камера кольца бустера разбита на 8 участков (4 арки и 4 прямолинейных промежутка), отсекаемых друг от друга при помощи

механических цельнометаллических вакуумных шиберов [121]. В прямолинейном промежутке с ускоряющей структурой установлен дополнительный шибер для отсечки секции резонаторов. Для управления вакуумными шиберами на бустере используется 4 шасси с PLC, смонтированные в выдвижных каркасах 5U, и размещающиеся в четырех радиостойках. Каждый PLC обслуживает оборудование одной арки и прилегающего по ходу пучка прямолинейного промежутка. Вид радиостойки с вакуумным оборудованием приведен на рисунке 5 Приложения 3. Шасси с вакуумным PLC включает несколько модулей цифрового ввода/вывода для приема блокировочных и аналоговых сигналов от контроллеров насосов и вакуумных ламп, а также выдачи управляющих команд на закрытие шиберов. Внутренняя компоновка каркаса с вакуумным PLC показана на рисунке 6 Приложения 3.

Четыре вакуумных PLC бустера и два PLC, управляющие вакуумным оборудованием каналов транспортировки пучка LTB и BTS, объединены в единую систему автоматического управления шиберами [122], блок-схема которой приведена на рисунке 3.18. Назначение схемы – выработка сигналов, разрешающих работу оборудования и выпуск пучка в случае готовности вакуумной системы бустера. При появлении блокировочных сигналов от контроллеров насосов и ламп, прилегающих к данному шиберу, возникающих из-за ухудшения вакуума, PLC либо отдает команду на закрытие соответствующего шибера, либо выдает сигнал “соседнему” PLC, который управляет этим шибером (красные линии на рисунке 3.18). Кроме того, каждый вакуумный PLC выдает сигнал о состоянии управляемых им шиберов в PLC системы защиты оборудования (EPS) (синие пунктирные линии на рисунке 3.18). PLC канала транспортировки BTS дополнительно обрабатывает сигналы, приходящие от контроллера быстро срабатывающего шибера [123] (время срабатывания < 10 мс), расположенного в канале транспортировки, и от PLC C30, обслуживающего вакуумное оборудование сектора основного кольца, куда впускается пучок. В PLC EPS сигналы о состоянии всех шиберов от всех вакуумных PLC обрабатываются в

соответствии с выбранным режимом работы инжектора, и затем суммарный сигнал подается на систему блокировки пушки линака.

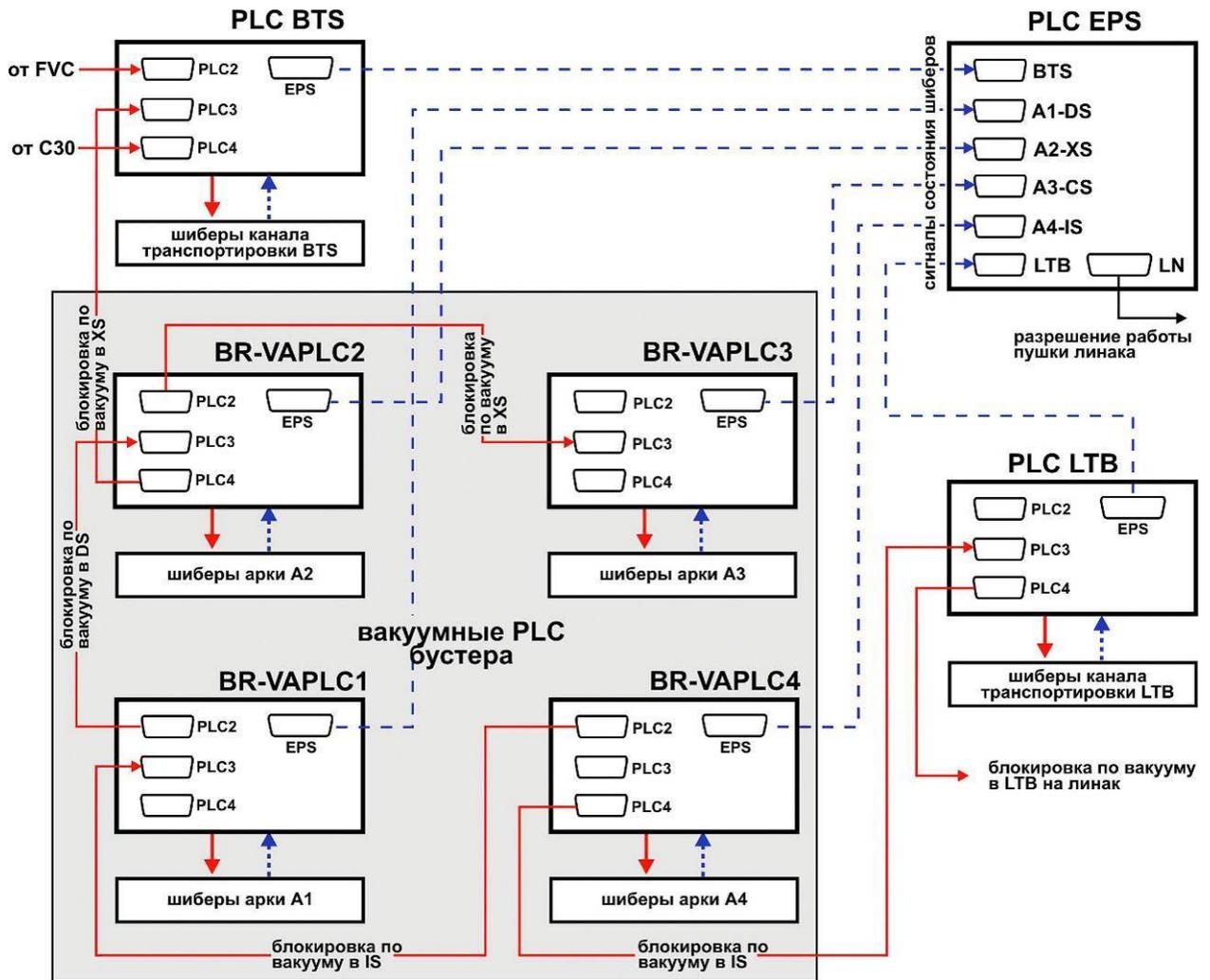


Рисунок 3.18: Схема блокировочных сигналов системы автоматического управления шиберами инжектора NSLS-II.

Для измерения температуры стенок вакуумной камеры, которые разогреваются от воздействия синхротронного излучения, испускаемого ускоренным пучком электронов, используется система резистивных температурных датчиков, подключенных к модулям 1769-IR6 [124], размещенным в шасси с вакуумными PLC. Датчики прикреплены к вакуумной камере бустера в критических местах, куда падает наиболее мощный поток излучения из поворотных магнитов. Датчики используются также для измерения температуры различных элементов в тоннеле бустера, в том числе, температуры импульсных магнитов системы впуска/выпуска пучка. Измерение температуры импульсных

магнитов позволяет рассчитывать поправки на задание зарядного напряжения накопителей энергии их источников питания.

На передней панели каждого каркаса с вакуумным PLC (см. рисунок 6 Приложения 3) смонтирован шестидюймовый сенсорный экран [125], на котором графически отображается состояние вакуумного оборудования и вакуума той части установки, которой управляет данный PLC. На экране можно выбрать для управления и просмотра значений текущих параметров любой элемент вакуумной системы, контролируемый данным PLC.

Для обработки внешних блокировочных сигналов, поступающих от различных датчиков, размещенных на оборудовании, и от других логических устройств, а также для выработки сигналов, защищающих оборудование от повреждения, используются два шасси с PLC:

- PLC TSW (ThermoSWitches) собирает и суммирует сигналы с релейных термоключей, смонтированных на водоохлаждаемых катушках дипольных и квадрупольных магнитов; суммарные сигналы подаются на основной PLC системы блокировок EPS (Equipment Protection System)
- PLC EPS выполняет функцию диспетчера блокировочных сигналов; он принимает все сигналы, приходящие от различных датчиков и логических устройств, касающиеся обеспечения безопасной работы бустера и его источников питания, и выдает сигналы, разрешающие работу, непосредственно на защищаемое оборудование

Важное внимание уделено обеспечению снижения радиационной нагрузки на оборудование. Система EPS запрещает включение пучка, если не обеспечен режим проводки пучка до одного из трех дампов, имеющих на инжекционном комплексе (BD1, BD2, BD, см. рисунок 2 Приложения 2), или до впуска в основное кольцо. Блок-диаграмма системы EPS приведена на рисунке 3.19.

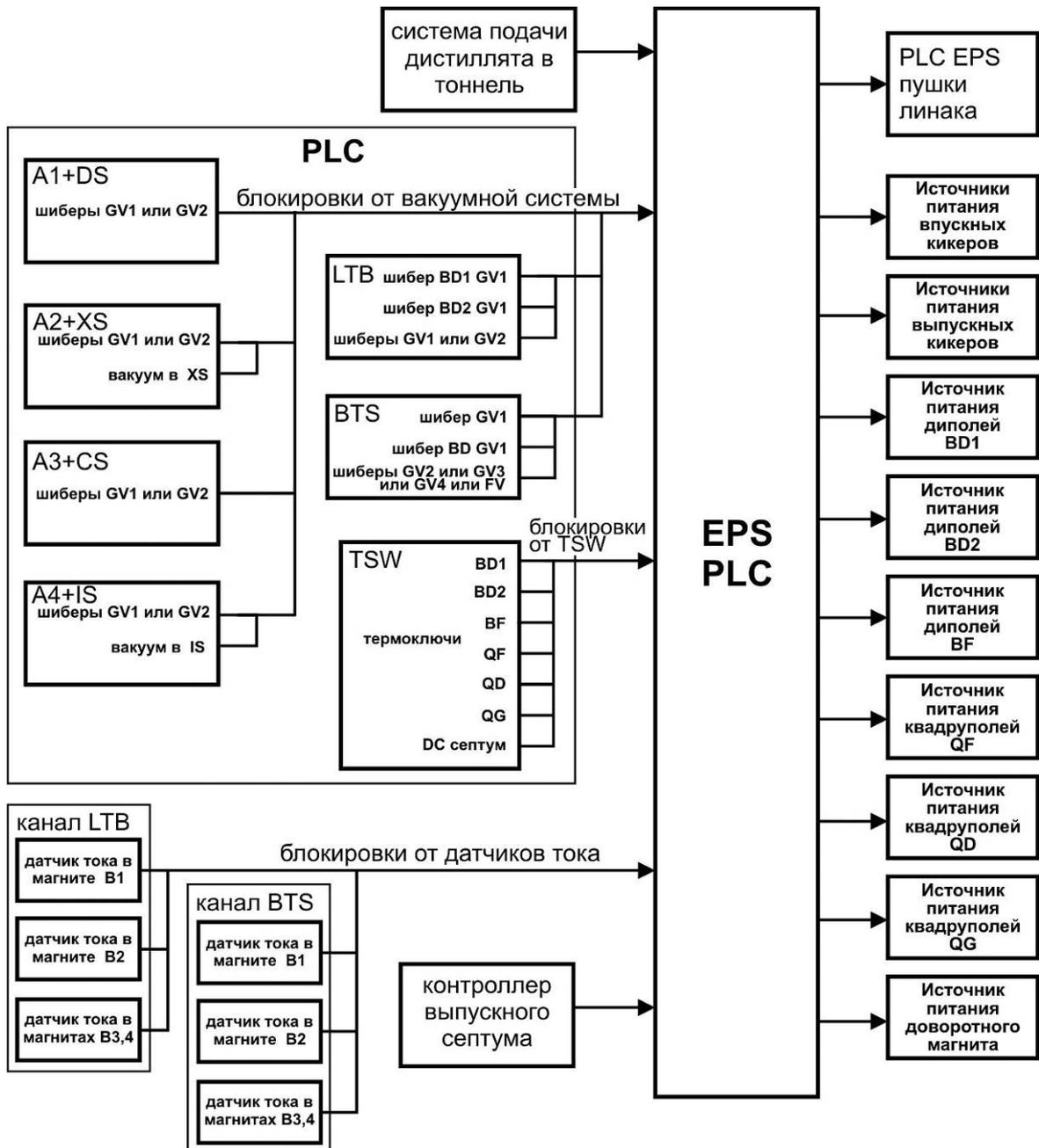


Рисунок 3.19: Блок-диаграмма интерфейсных сигналов PLC EPS.

Входными сигналами для EPS являются:

- двенадцать сигналов от всех вакуумных PLC, по состоянию которых в зависимости от режима работы инжекционного комплекса PLC EPS вырабатывает сигнал разрешения пушки линака; также по состоянию вакуума в промежутках впуска и выпуска бустерного кольца вырабатывается разрешение работы источников питания магнитов-кикеров;

- семь сигналов от TSW PLC, просуммированных для температурных датчиков (термоключей), размещенных на катушках возбуждения магнитов, для всех источников питания диполей, квадруполей и доворотного магнита;
- сигнал наличия охлаждающей воды в тоннеле бустера от системы подачи дистиллята;
- шесть сигналов от датчиков тока поворотных магнитов каналов транспортировки LTB и BTS, и сигнал готовности от контроллера источника питания выпускного магнита-септума бустера.

Выходные сигналы PLC EPS, разрешающие работу, подаются непосредственно в источники питания и на PLC, управляющий пушкой линака. Изображение экрана, показывающего состояние блокировок бустера, приведено на рисунке 6.8 п.6.3 Главы 6.

3.7 Оборудование и электроника для диагностики пучка

Измерение параметров пучка в ускорителе является важнейшей функцией системы управления. Поскольку ускоритель предназначен для получения пучка с заданными параметрами, то только измерение этих параметров полноценно характеризует качество работы установки. Сама по себе работа диагностического оборудования не является условием, достаточным для обеспечения качественного управления установкой. Параметры пучка, измеренные с использованием этого оборудования, должны быть оцифрованы и связаны с управляющими системами для обеспечения возможности влиять на эти параметры. Поэтому вопрос интеграции работы диагностического оборудования с оборудованием, управляющим элементами ускорителя, очень важен при построении системы управления. В бустерном синхротроне в процессе автоматической работы необходимо постоянно измерять и анализировать следующие параметры пучка:

- ток пучка в течение всего цикла ускорения;
- распределение частиц по отдельным сгусткам в многосгустковом режиме работы; этот параметр определяет возможность равномерного заполнения электронными сгустками основного кольца;

- энергию частиц пучка;
- орбиту пучка в процессе инжекции, ускорения и выпуска; особенно важно измерять орбиту перед выпуском электронов, т.к. этот параметр является одним из факторов, определяющих стабильность инжекции в основное кольцо;
- поперечные размеры пучка.

Кроме перечисленных параметров необходимо иметь инструменты для периодической проверки поперечного эмиттанса и энергетического разброса ускоренного пучка, т.к. эти параметры также определяют эффективность инжекции в основное кольцо.

На практике параметры большинства элементов бустера (например, магнитов) не соответствуют расчетным значениям, а свойства некоторых систем (например, ускоряющей структура резонаторов) не могут быть в достаточной мере изучены в плане обеспечения стабильного движения частиц. Поэтому для начальной, а также для периодической настройки и проверки работы бустера необходимо иметь возможность измерять положение (орбиту) пучка, бетатронные частоты и хроматизм в любой момент цикла ускорения. Без выполнения этого условия сложно обеспечить запуск установки, а затем дальнейшую успешную ее эксплуатацию.

Для диагностики параметров пучка на бустере установлен следующий набор оборудования [126, 127] (см. рисунок 3.20):

- 6 люминофорных флагов для измерения положения и размеров пучка на первом обороте,
- токовый датчик DCCT [128] для измерения суммарного тока пучка;
- токовый датчик FCT [129] для измерения распределения пучка по отдельным сгусткам;
- 36 комплектов пикап-электродов для определения пооборотной и усредненной координаты положения пучка; такое количество устройств определяется числом бетатронных колебаний на обороте, чтобы иметь не

менее 4-х пикапов на одном периоде колебаний и, тем самым, обеспечить информативное измерение орбиты пучка и бета-функций;

- 2 системы наблюдения синхротронного излучения, позволяющие в течение всего ускорения следить за координатой и определять поперечные размеры пучка;
- система измерения бетатронных частот, позволяющая измерять частоты с интервалом 1 мс в течение всего ускорения.

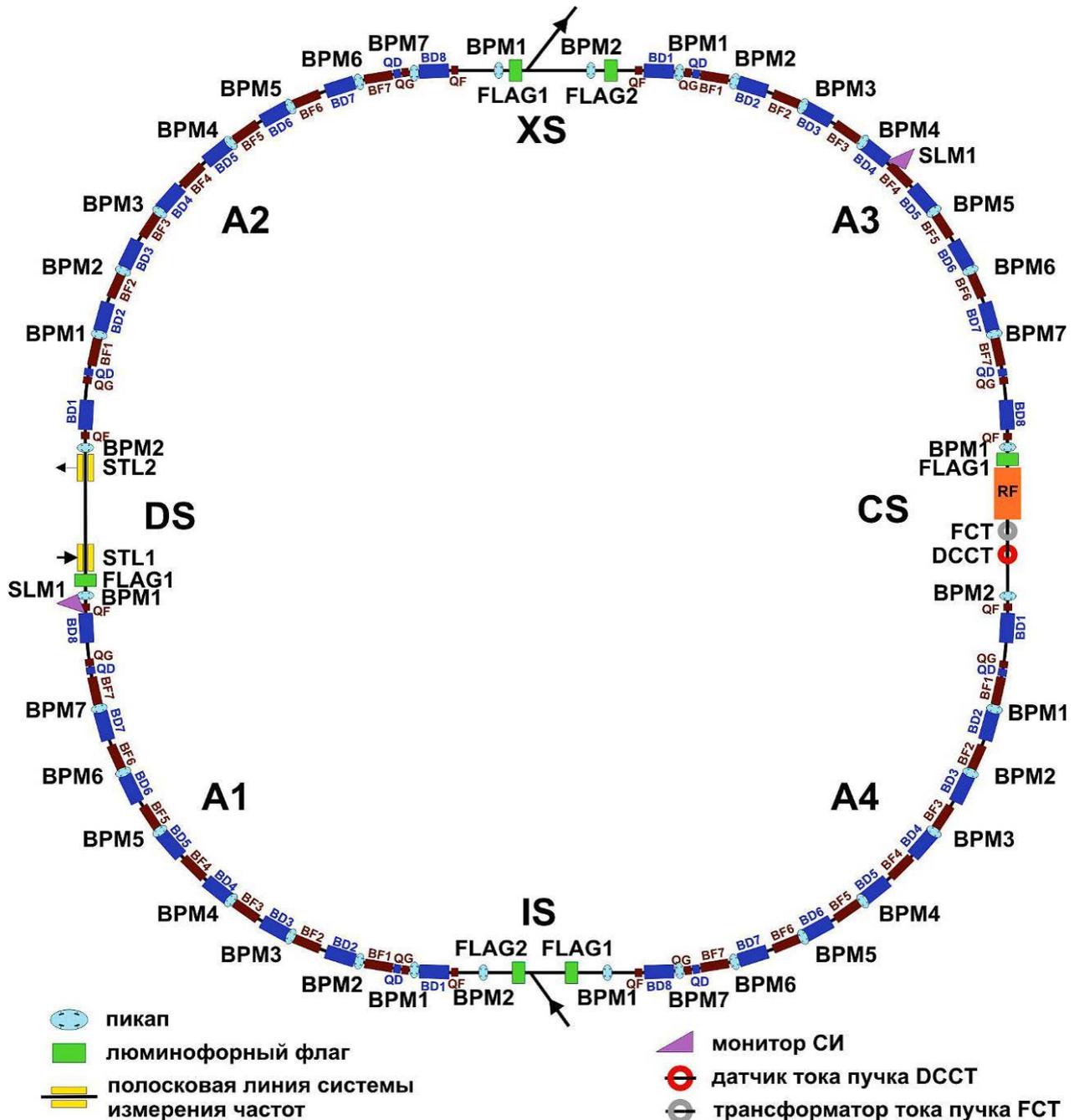


Рисунок 3.20: Схема размещения оборудования для диагностики пучка на кольце бустера NSLS-II.

Кроме того, для определения параметров выпущенного пучка используется диагностическое оборудование канала транспортировки BST: люминофорные флаги, пикап-электроды, цилиндр Фарадея в “дампе” пучка BD (см. рисунок 2 Приложения 2).

В системе диагностики пучка на бустере предусмотрено два способа измерения поперечного профиля и положения пучка.

Первый способ основан на использовании люминофорных пластин (флагов), расчерченных координатной сеткой, вводимых в апертуру вакуумной камеры поперек движения частиц. Этот способ полностью разрушает пучок, поэтому предназначен только для проводки частиц по кольцу бустера на первом обороте после впуска. Изображение светящегося следа, оставляемого пучком при попадании на люминофор, снимается камерой Prosilica GC1290, имеющей максимальное разрешение 1280 x 960 пикселей. Камера однократно запускается внешним импульсом от системы синхронизации, привязанным к моменту появления пучка. Все камеры подключены к управляющему компьютеру через 1 Гб Ethernet.

Второй способ измерения поперечного профиля пучка основан на использовании синхротронного излучения, которое через специальное прозрачное окно при помощи охлаждаемого медного зеркала выводится за пределы вакуумной камеры. Этот способ не разрушает пучок и позволяет наблюдать за его размерами в процессе ускорения частиц. Излучение от пучка, выводимое из вакуумной камеры, попадает на оптическую скамью и при помощи двух зеркал, регулирующих направление света в двух плоскостях, направляется на объектив камеры, сфокусированной на точку излучения, находящуюся в апертуре поворотного магнита. На кольце бустера установлено две оптические скамьи, оборудованные камерами Prosilica GC1290, которые во время ускорения пучка запускаются с интервалом 30 мс, что позволяет в течение процесса ускорения получить в компьютере 10 кадров полного разрешения с изображением поперечных размеров пучка.

В циклических ускорителях основным инструментом для измерения тока пучка служит трансформаторный датчик тока со сравнительно большой (десятки килогерц) полосой частот DCCT (Direct Current Current Transformer), предоставляющий возможность достаточно точно (доли микроампер) отслеживать величину полного тока пучка, циркулирующего в кольце. На бустере установлен DCCT разработки фирмы Bergoz [128], позволяющий измерять ток электронного пучка во всем диапазоне ожидаемой величины тока бустера (от 0 до 20 мА) с абсолютной точностью 1 мкА. Для измерения напряжения сигнала, приходящего с электроники датчика тока, используется АЦП ICS-710A-8 разработки фирмы GE с дискретностью 24 бита, работающий с частотой 100 кГц.

Поскольку инжектор NSLS-II рассчитан на ускорение пучка, состоящего из множества сгустков (до 150), то кроме величины полного тока необходимо знать побанчевую структуру пучка. Для этой цели на кольце бустера установлен быстрый токовый трансформатор FCT (Fast Current Transformer) разработки фирмы Bergoz [129] с полосой пропускания до 2 ГГц, позволяющий получать от пучка сигнал, содержащий наводку от каждого сгустка. Этот сигнал оцифровывается при помощи одноканального АЦП U1065A-001 разработки фирмы Agilent с дискретностью 10 бит и частотой дискретизации 8 ГГц.

На кольце бустера установлены 36 четырехэлектродных электростатических датчиков (пикапов), конструктив которых был разработан в ИЯФ. Сигналы с пикап-электродов через коммутационные платы, разделяющие земли бустерного кольца и электроники, поступают на пикап-станции (BPM-ресиверы), специально разработанные в BNL для проекта NSLS-II, расположенные в 4-х радиостойках в ISA [130]. Для каждого пикапа используется свой BPM-ресивер. В BPM-ресиверах выполняется аналого-цифровая обработка сигналов, затем данные, содержащие информацию о положении пучка, по 1 Гбит Ethernet передаются на серверные компьютеры. Для привязки к циклическому движению пучка на каждый BPM-ресивер от EVR подается частота обращения пучка в бустере. От системы синхронизации в ресиверы по оптической связи поступают тактирующие пакеты, содержащие события, связанные с циклом работы бустера, а также

тактирующая частота 10 кГц, привязанная к частоте обращения. В ВРМ-ресивер задается код события, по приходу которого в контроллере ресивера начинается обработка сигналов с пикап-электродов. Имеется встроенный генератор задержки, позволяющий задержать начало обработки на заданную величину, кратную периоду обращения в бустере. Вид радиостойки с девятью ресиверами и VME крейтом с аппаратурой синхронизации показан на рисунке 7 Приложения 3, вид пикапа, установленного на кольце бустера, показан на рисунке 8.

На мировом рынке электроники для ускорительных комплексов имеется аппаратура для обработки сигналов с пикап-электродов [131], которая широко используется на существующих и строящихся источниках СИ. Но для проекта NSLS-II в BNL были созданы специальные пикап-станции, соответствующие задачам, поставленным для коррекции орбиты в основном кольце NSLS-II: точность измерения 0.1 мкм, частота измерения 10 кГц [132]. Благодаря этому обстоятельству (качество аппаратуры и возможность модифицировать встроенное ПО) для диагностики пучка в бустере удалось разработать аппаратно-программный инструмент (см. п. 4.8 Главы 4), позволяющий получать данные об орбите пучка в on-line режиме в течение всего ускорения для каждого цикла бустера с частотой 10 кГц. Кроме того, в режиме on-line можно получать пооборотные измерения, что позволяет в каждом цикле с высокой точностью вычислять бетатронные частоты и оптические функции для любого заданного момента в течение ускорения пучка.

Для измерения бетатронных частот на бустере используется разработанная в ИЯФ специализированная система [133], состоящая из:

- контроллера, реализующего логику управления системой (в том числе - раскачкой пучка), обработку сигналов с измерительных пластин и обеспечивающего взаимодействие с управляющим компьютером по сети Ethernet,
- 2-х усилителей мощности для раскачки пучка (по двум измерениям: горизонтали и вертикали),

- трансформатора-разветвителя, сигналы с которого поступают либо непосредственно на пластины раскачки, либо на дополнительные нагрузки,
- двух комплектов четырехполосковых линий STL1 и STL2, нагруженных на 50 Ом, установленных в диагностическом промежутке бустера (см. рисунок 3.20 и рисунок 8 Приложения 3); один комплект пластин используется для раскачки, с другого снимаются сигналы, наведенные пролетающим пучком.

Сигналы с пластин подаются на переходную плату с пассивными фильтрами, обеспечивающую гальваническую развязку контроллера с вакуумной камерой бустера.

Контроллер системы измерения бетатронных частот имеет два циклических рабочих режима:

- режим “сканирование”, в котором измерения бетатронных частот выполняются методом сканирования раскачкой по частоте в широком заданном диапазоне (фиксируется максимум амплитуды отклика пучка),
- режим “измерение”, состоящий из серии однократных измерений, для каждого из которых частота раскачки определяется по результату предыдущего измерения.

Для синхронизации системы измерения бетатронных частот используются два сигнала, поступающие от EVR (см. п. 3.4.2): запуск, привязанный к старту цикла бустера и частота обращения пучка в бустере.

В процессе ускорения пучка используется режим работы “измерение”, в котором контроллер способен выполнить до 512 измерений. Минимальный интервал между измерениями равен 1 мс. Массивы данных, содержащие измеренную частоту и амплитуду бетатронных колебаний из контроллера поступают в управляющий IBM-сервер, где привязываются к времени цикла бустера и становятся доступными для пользовательских приложений.

Глава 4

Реализация алгоритмов управления бустером на уровне базового ПО

4.1 Использование EPICS. Иерархия уровней ПО бустера

Программная платформа EPICS [11] предоставляет надежные, развитые базовые средства для работы с широким спектром оборудования, реализуемые через программный контроллер ввода-вывода IOC (Input/Output Controller) [62], а также сетевой протокол Channel Access (CA) [67] обмена данными между клиентскими приложениями и IOC. IOC формируют серверный уровень ПО. Главное достоинство EPICS заключается в возможности использования для разработки ПО системы управления программно-модульного подхода, означающего четкое разделение функциональности, и использование единого протокола обмена данными. Это предоставило возможность для независимой разработки различных частей программных систем, а также для создания и интеграции специализированных инструментов, реализующих особенности управления бустера.

В мире насчитывается несколько десятков крупных научных установок [134], где EPICS используется для построения систем управления. Поэтому EPICS предоставляет возможность использовать много готовых программных инструментов операторского уровня, ранее разработанных для управления другими установками. Ниже перечислены несколько программных систем, использовавшихся при создании ПО системы управления бустера:

- **CSS BOY** - Control System Studio, Best OPI, Yet [135] – среда для разработки и запуска операторских приложений, имеющих возможность напрямую достигать к данным в EPICS. Использование CSS позволяет оперативно создавать приложения, выполненные в едином стиле, с применением эффективных графических средств и стандартной навигации;

- ***Control System Studio Archive System*** [136] - система архивирования, позволяющая архивировать в заданном режиме значения любых параметров;
- ***Alarm Handler*** [137] - система сигнализации сбойных состояний, обеспечивающая отслеживание сбойных ситуаций, возникающих в системе управления, означающих недопустимое отклонение значения рассматриваемого параметра.

Основной структурной единицей в EPICS является программный контроллер ввода-вывода IOC (Input-Output Controller), который осуществляет взаимодействие с оборудованием, выполняет обработку данных и другие функции, возможно, не связанные ни с каким реальным устройством (т.н. программный IOC – SoftIOC).

Значения параметров установки в системе управления выражаются в виде численных данных различного типа. В EPICS данные описываются в текстовых файлах конфигурации в виде специальных структур – “рекордов” (record) [113], определяющих с помощью свойств - “полей” (field) тип и характеристики данных, а также алгоритмы их обработки. Каждый параметр системы описывается своим экземпляром рекорда с уникальным именем, обозначающим переменную PV (Process Variable), создаваемую в IOC при его инициализации. Рекорды также могут содержать вызовы дополнительных функций для обработки значений своих входных параметров. После инициализации IOC рекорды формируют базу данных (Database), в которой содержатся значения всех параметров, доступных по протоколу CA. IOC включает следующий обязательный набор компонентов, составляющих ядро контроллера:

- ***Database*** – база данных EPICS, представляющая собой структуры рекордов с данными,
- ***Database Access*** – подпрограммы, обеспечивающие внутри IOC доступ к базе данных другим сервисам,
- ***Channel Access*** – часть IOC, обеспечивающая доступ к базе данных по сети; предоставляет северные и клиентские службы доступа,

- **Database Monitors** – подпрограммы, обеспечивающие оповещение сервера Channel Access в случае обновления базы данных,
- **Scanners** – подпрограммы, инициирующие выполнение рекорда в том случае, когда это требуется.

Эти компоненты неизменны для конкретной версии EPICS и обязательно присутствуют в любом ИОС. Состав остальных компонент ИОС может меняться в зависимости от функционального назначения контроллера, но именно эти компоненты обеспечивают выполнение управляющих функций:

- **Record Support** – сервис, обеспечивающий обработку и выполнение рекордов; каждый тип рекорда имеет свой набор подпрограмм, учитывающих специфику данного типа рекорда; подпрограммы Record Support взаимодействуют с базой данных через Database Access, а также могут напрямую достигаться до специфических полей рекорда; подпрограммы Record Support для взаимодействия с аппаратурой используют сервис Device Support,
- **Device Support** – сервис, обеспечивающий взаимодействие с устройствами; может взаимодействовать с устройством напрямую, а может использовать модули драйверов; подпрограммы Device Support взаимодействуют с базой данных через Database Access, а также могут, как и подпрограммы Record Support, напрямую достигаться до специфических полей рекорда,
- **Drivers** – программные модули для взаимодействия с оборудованием.

ИОС посредством заложенного в него механизма сканирования рекордов выполняет их обработку: вызывает периодическое или событийное выполнение процедур, синхронизирует обработку связанных рекордов и т.п. Например, изменение одного PV может вызвать обработку PV, описанного в другом рекорде. В ИОС заложена функция автоматического сохранения изменившихся значений PV на диск, что предотвращает потерю данных и настроек системы в случае аварийной ситуации с компьютером.

СА является одним из ключевых элементов EPICS. СА обеспечивает клиентским приложениям унифицированный доступ к данным, распределенным

по серверам ИОС, работающим в различных компьютерах системы управления. Сами ИОС помимо серверной части имеют также клиентскую часть СА, что обеспечивает возможность обмена данными между ними. Кроме того, в инструментарии СА имеется API, так называемый Portable Channel Access Server, позволяющий разрабатывать серверные приложения, которые могут взаимодействовать с иными (не EPICS) базами данных и управляющими системами.

Для клиентских приложений использование СА дает следующие преимущества:

- унифицированный обмен данными в сегменте локальной сети,
- независимость от изменений, вносимых в систему управления,
- конверсия данных в случае различной архитектуры компьютеров,
- комбинирование запросов при отправке их через сеть.

Основные функции, выполняемые с помощью СА, следующие: запись значения в PV, чтение значения из PV, мониторинг изменения значения PV, когда в случае изменения, клиентское приложение автоматически получает новое значение PV. Эти функции реализованы в виде библиотечных процедур для большинства современных языков программирования (C, C++, Python, Java), а также для широко используемых научно-инженерных пакетов (например, MatLab) и могут быть использованы при разработке сложных клиентских приложений.

Для внедрения в стандартную базовую инфраструктуру EPICS новых устройств, разработанных специально для проекта NSLS-II, потребовалась создание подпрограмм сервиса Device Support (включая драйверы устройств) и наборов рекордов, содержащих все необходимые PV. Была добавлена поддержка для электроники, разработанной в ИЯФ: модулей измерения импульсных параметров устройств впуска/выпуска пучка [100, 101], выполненных в формате VME, и контроллера системы измерения бетатронных частот (см. п. 3.7 Главы 3). Для бустера также была модифицирована поддержка для аппаратуры разработки BNL: специализированных контроллеров PSC-PSI для управления источниками

питания (см. п. 3.5.2 Главы 3) [138] и ВРМ-ресиверов для обработки сигналов с пикап-электродов (см. п. 3.7 Главы 3) [130].

В ходе разработки ПО системы управления бустером четко отслеживался принцип иерархичности: была создана цельная сбалансированная трехуровневая структура ПО, схематично представленная на рисунке 4.1, в которой максимально использован модульный подход и оптимизированы потоки данных между уровнями.

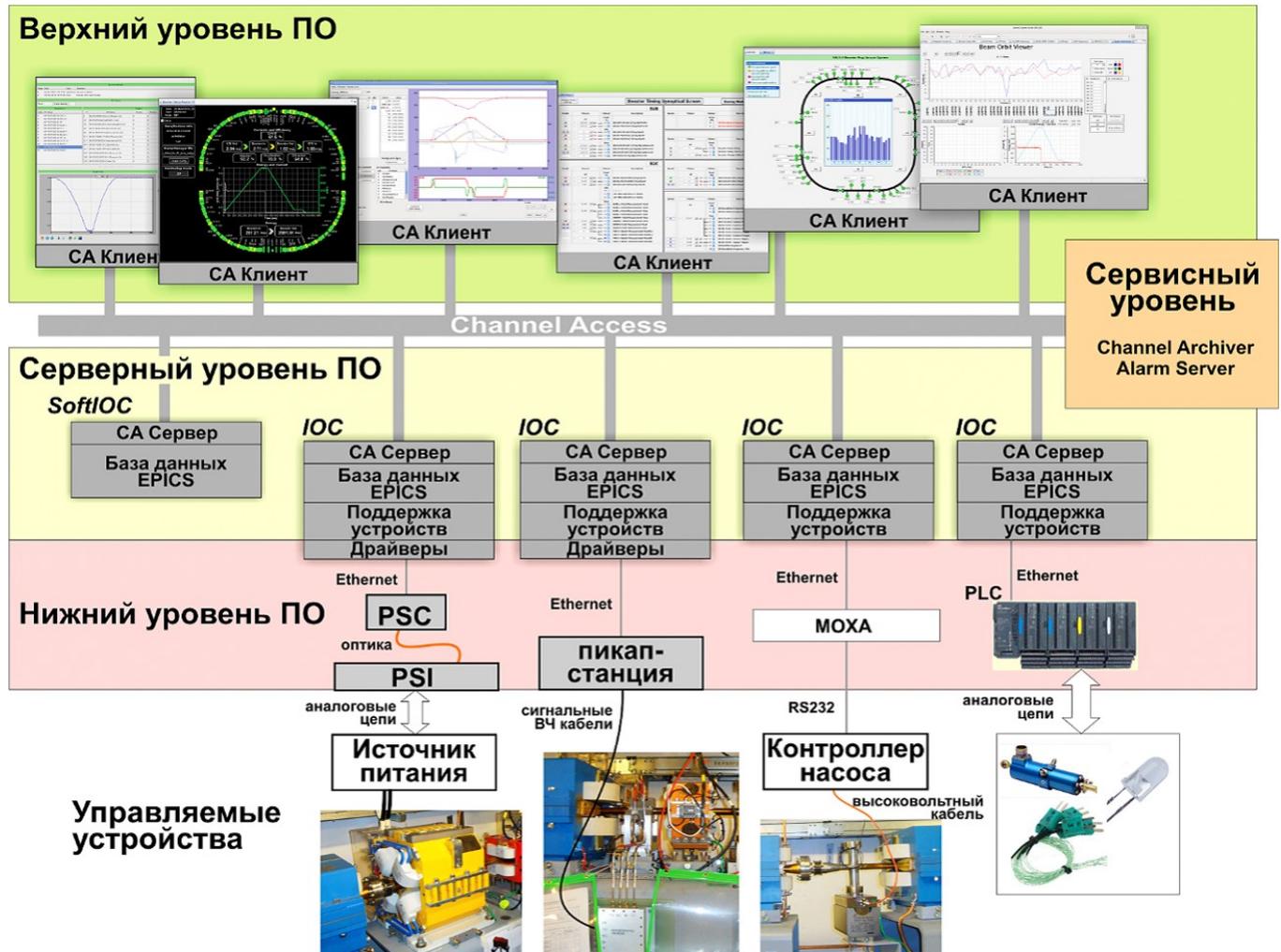


Рисунок 4.1: Структура ПО системы управления бустером.

4.2 Конфигурация ИОС

Управляющие компьютеры (серверы) системы управления, в которых работает средний уровень ПО - программные контроллеры ИОС, распределены по функциональному назначению: обслуживание источников питания, пикап-станций, вакуумной системы и т.д. (см. рисунок 3.3 Главы 3). В свою очередь, ИОС, работающие в серверных компьютерах, распределены по типам оборудования: разные типы устройств обслуживаются разными ИОС. В случае сложных устройств (например, контроллер пикап-станции) каждый ИОС обслуживает одно устройство. Для выполнения различных задач по обработке данных и обеспечения межпрограммного взаимодействия разработаны специализированные программные ИОС (SoftIOС), которые распределены по тем же серверным компьютерам.

Такой модульный подход упрощает разработку, конфигурирование и сопровождение ИОС. Блок-диаграмма распределения ИОС в компьютерах системы управления бустера, работающих с оборудованием, приведена на рисунке 4.2.

Почти все компьютеры, указанные на рисунке, работают в бустерном сегменте локальной сети управления NSLS-II (Ethernet 1 Гбит) (см. рисунок 3.4 Главы 3), в котором также работает большинство контроллеров оборудования с интерфейсом Ethernet (пикап-станции, контроллер шаговых двигателей систем наблюдения пучка, камеры Prosilica). Структура сегмента Ethernet бустера обеспечивает для ИОС доступ ко всем устройствам напрямую всего через один коммутационный свич. Таким образом, все компьютеры и устройства оказываются включенными по схеме так называемой плоской одноранговой сети [139], что обеспечивает минимальные задержки при передаче данных между любыми элементами системы.

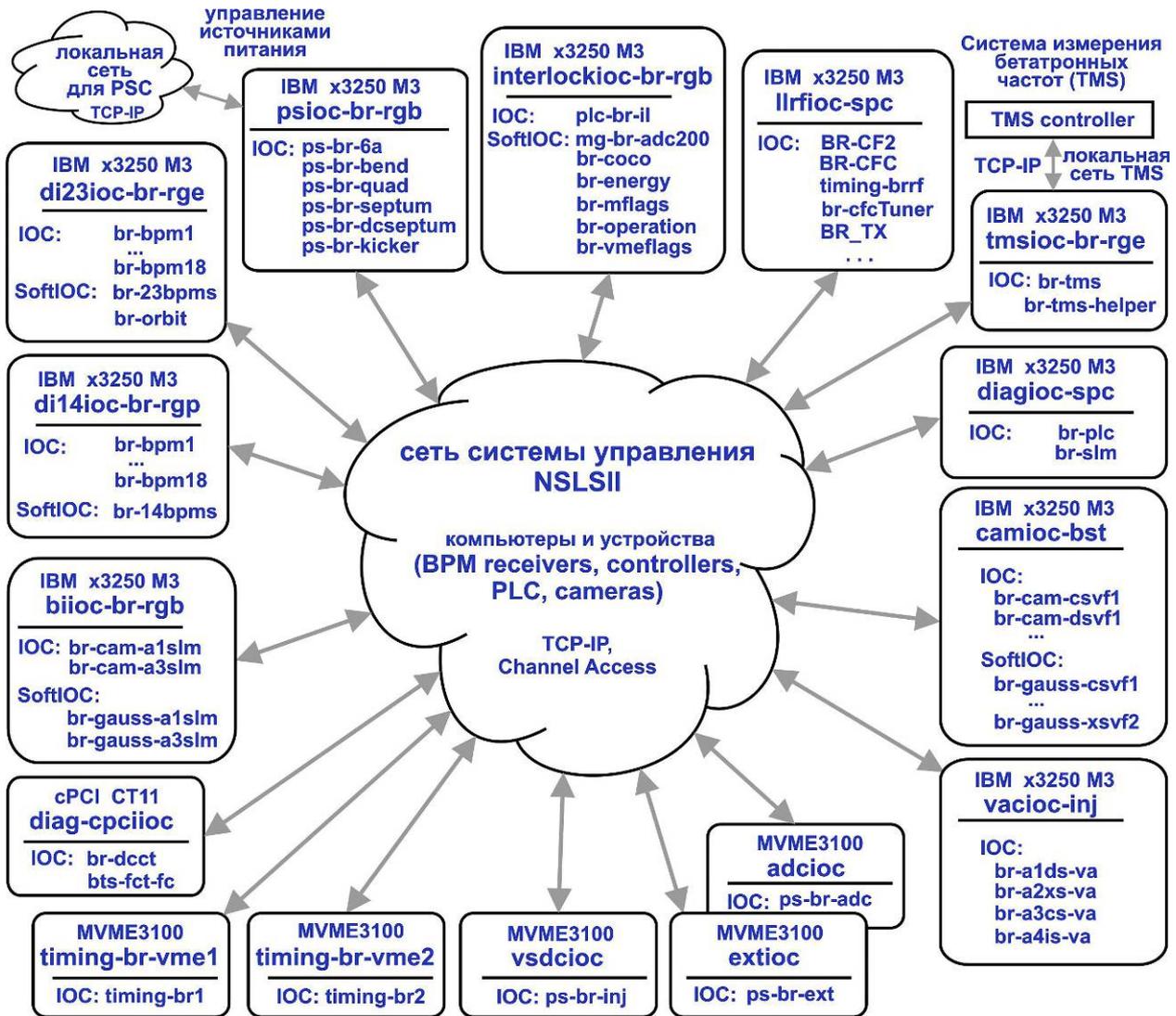


Рисунок 4.2: I/O системы управления бустера, работающие в компьютерах, взаимодействующих с оборудованием.

В IBM сервере **psioc-br-rgb** (см. п. 3.3.2 Главы 3), используемом для управления источниками питания, работает 6 однотипных I/O, каждый из которых управляет группой устройств одного вида: источники питания диполей, квадруполь, корректоров и т.д. Все I/O имеют идентичные стартовые скрипты и выполняют одинаковые функции: обмен данными с контроллерами PSC, обработку управляющих вэйвформ перед загрузкой в PSC и обработку вэйвформ с измерениями, прочитанными из PSC.

В двух IBM серверах **di14ioc-br-rgp** и **di23ioc-br-rge** работают по 18 I/O, каждый из которых обслуживает по одной пикап-станции. Кроме того, в этих

серверах работают SoftIOC, выполняющие вычисление орбиты пучка и бетатронных частот.

IBM серверы **biios** и **camios** предназначены для работы с двумя мониторами синхротронного излучения (SLM) и люминофорными флагами (FLAG), предназначенными для отображения положения пучка (см. рисунок 3.20 Главы 3): в них функционируют IOC для взаимодействия с камерами Prosilica, а также IOC, выполняющие обработку изображений, прочитанных с камер. Кроме того, часть функций этих систем выполняется в IBM сервере **diagioc-spc**, где работают еще два IOC: *br-plc* - для управления механизмами ввода/вывода люминофорных флагов и подсветкой камер, а также *br-slm* – для настройки положения зеркал.

В IBM сервере **interlockioc** работает один IOC, взаимодействующий со всеми PLC: с шестью вакуумными PLC (см. п. 3.6 Главы 3), с PLC TSW, обрабатывающим сигналы от защитных термоключей, расположенных на обмотках основных магнитов, а также с PLC EPS, выполняющим диспетчеризацию всех блокировочных сигналов бустера. Кроме того, в сервере **interlockioc** размещаются несколько SoftIOC, выполняющих функции обработки данных, а также содержащих PV для управления взаимодействием между различными программными системами:

- *mg-br-adc200* обрабатывает массивы измерений токов кикеров, прочитанные из АЦП ADC200,
- *br-vmeflags* вырабатывает сигналы, характеризующие отклонения измерений, прочитанных с помощью измерительных модулей VME,
- *br-energy* вычисляет энергию и ток пучка бустера,
- *br-mflags* вычисляет модифицированные флаги для системы мониторинга (см. п. 6.5.3 Главы 6),
- *br-operation* используется для управления с помощью PV режимами работы ПО,
- *br-coco* служит для управления режимами работы приложения *coco*, корректирующего замкнутую орбиту бустера (см. п. 6.6 Главы 6).

IBM сервер **tmsioc** обеспечивает взаимодействие с контроллером системы измерения бетатронных частот (TMS) и обработку прочитанных из него данных. В нем функционируют два ИОС: *br-tms* и *br-tms-helper*.

В каждом VME-контроллере под управлением операционной системы RTEMS работает по одному ИОС, реализующему взаимодействие с оборудованием, размещенном в соответствующем VME-крейте:

- ИОС *timing-br** в двух одинаковых крейтах **timing-br-vme*** обеспечивают взаимодействие с аппаратурой для синхронизации двух групп пикап-станций,
- ИОС *ps-br-inj* в контроллере **vsdcioc** осуществляет взаимодействие с EVR системы синхронизации и модулями VsDC, оцифровывающими сигналы магнитных полей импульсных магнитов,
- ИОС *ps-br-ext* в контроллере **extioc** взаимодействует с EVR и двумя мезонинными платами ADC200, оцифровывающими сигналы с токовых датчиков кикеров,
- ИОС *ps-br-adc* в контроллере **adcioc**, расположенном в VME-крейте **exitioc** (см. рисунок 3.3 Главы 3), взаимодействует с двумя мезонинными платами ADC200 [101], также оцифровывающими сигналы с токовых датчиков кикеров.

В sPCI-контроллере **pcioc** работают два ИОС, взаимодействующие с АЦП, оцифровывающими сигналы с датчиков тока пучка: DCCT и FCT. Эти ИОС выполняют чтение данных и настройки АЦП.

Поскольку производительность VME-контроллеров значительно ниже производительности IBM серверов, вся обработка данных, прочитанных из аппаратуры, работающей в VME-крейтах, по возможности, вынесена в ИОС, работающие в IBM серверах.

Всего в системе управления бустера задействовано около 120 ИОС, обеспечивающих взаимодействие с аппаратурой и первичную обработку данных. Все данные представлены в виде PV, которые доступны в сети системы управления NSLS-II по протоколу CA.

4.3 Взаимодействие с PSC

Взаимодействие между ИОС и контроллерами источников питания PSC выполняется посредством подпрограмм *device support* (см. п. 1.9.2 Главы 1), которые обеспечивают разбивку загружаемой управляющей вэйвформы на пакеты и их доставку в PSC, прием посылаемых из PSC пакетов с измерениями и формирование из них вэйвформ, а также передачу бинарных данных.

Управление источниками питания бустера осуществляется путем задания в контроллер источника питания PSC функции управления в виде массива уставок (вэйвформы) длиной 10150 значений, формирующего управляющий сигнал ЦАП для всего цикла бустера.

Для обеспечения в источниках питания различных переключений в PSC имеется 8-ми битный выходной регистр. Каждый бит выходного регистра определен в ИОС как отдельное бинарное PV, изменение которого вызывает немедленное обновление значения в регистре PSC.

После прихода очередного импульса старта цикла PSC высылает в управляющий компьютер пакеты с измерениями, выполненными в предыдущем цикле. *Device support* формирует из принятых пакетов вэйвформы длиной по 10150 значений, которые записываются в промежуточные PV, по две вэйвформы на каждый ЦАП (см. п. 3.5.2 Главы 3).

4.3.1 Контроль формы и амплитуды функции управления

Перед загрузкой новой функции управления (вэйвформы) в PSC ИОС выполняет цепочку операций и преобразований связанных PV, которая включает в себя:

- проверку правильности амплитуды и формы задаваемого физического сигнала,
- вычисление актуального значения управляющего сигнала напряжения ЦАП с учетом пересчетного коэффициента $CoeffPS$ и смещения $OffsetPS$, измеренных для данного источника питания,

- пересчет значения управляющего сигнала в значение для загрузки в ЦАП с учетом калибровочного коэффициента $CoeffDAC$ и смещения $OffsetDAC$, измеренных для данного ЦАП,
- проверку амплитуды и формы управляющего сигнала напряжения, предназначенного для загрузки в ЦАП.

Все источники питания имеют ограничения как по величине задаваемого тока или напряжения, так и по скорости его изменения. Поэтому в ИОС, чтобы избежать загрузки некорректной вэйвформы, выполняется проверка амплитуд и знака для всех значений загружаемой вэйвформы, а также проверяется величина разности между всеми соседними значениями. Все параметры ограничений для каждого типа источников питания задаются в виде PV.

Также для вэйвформы проверяются граничные условия: конечное и начальное значения должны совпадать. В случае несоответствия перечисленным условиям новая вэйвформа в PSC не загружается, а в соответствующее PV восстанавливается предыдущее значение.

Кроме того, в случае необходимости для предотвращения скачков в управлении выходным параметром источника питания при переключении с текущей вэйвформы на новую проверяется величина разности между начальным значением задаваемой и конечным значением текущей вэйвформ. При наличии разности, превышающей допустимое значение, выполняется вычисление переходной кривой, обеспечивающей плавный переход от текущей вэйвформы к новой (см. п. 4.3.2).

4.3.2 Формирование переходной функции

В случае несовпадения конечного значения текущей и начального значения новой вэйвформ для выполнения плавного перехода разработан механизм использования переходной функции, которая в этом случае формируется в ИОС и загружается в PSC перед загрузкой новой вэйвформы. Переходная функция содержит текущую вэйвформу, конечная часть которой заменяется полиномиальной кривой пятого порядка, обеспечивающей гладкий переход от

заданного значения текущей вэйвформы к первому значению загружаемой вэйвформы. Для вычисления кривой используются следующие граничные условия: первая производная равна наклону стыкуемого отрезка вэйвформы, вторая производная равна нулю.

Переходная вэйвформа обрабатывается в PSC один раз перед началом исполнения новой вэйвформы. Индекс элемента массива, в котором происходит стыковка текущей вэйвформы с переходной кривой задается в PV, содержащейся в SoftIOC *br-operation* (IBM-сервер **interlockioc-br-rgb**), предназначенного для управления работой других ИОС и пользовательских приложений.

4.3.3 Размагничивание корректоров

Модульная структура организации ИОС позволяет в отдельных случаях использовать специальные рекорды для обеспечения реализации особых алгоритмов работы источников питания. Так, для обеспечения повторяемости значения магнитного поля корректоров в момент впуска пучка вне зависимости от хода изменения поля на участке ускорения пучка используется функция, автоматически замещающая вторую половину управляющей вэйвформы размагничивающей синусоидой (см. рисунке 4.3).

При этом к началу нового цикла в корректорах стирается магнитная память, которая возникает, например, в случае работы приложения автоматической подстройки орбиты в процессе ускорения, когда приложение в каждом цикле может заносить в корректор различные значения тока, что приводит к различному замагничиванию железа в конце ускорения и оказывает влияние на величину магнитного поля в начале нового цикла. Управление работой этого механизма (переключение, параметры синусоиды и момент ее наложения) осуществляется с помощью набора PV, содержащихся в SoftIOC *br-operation*.

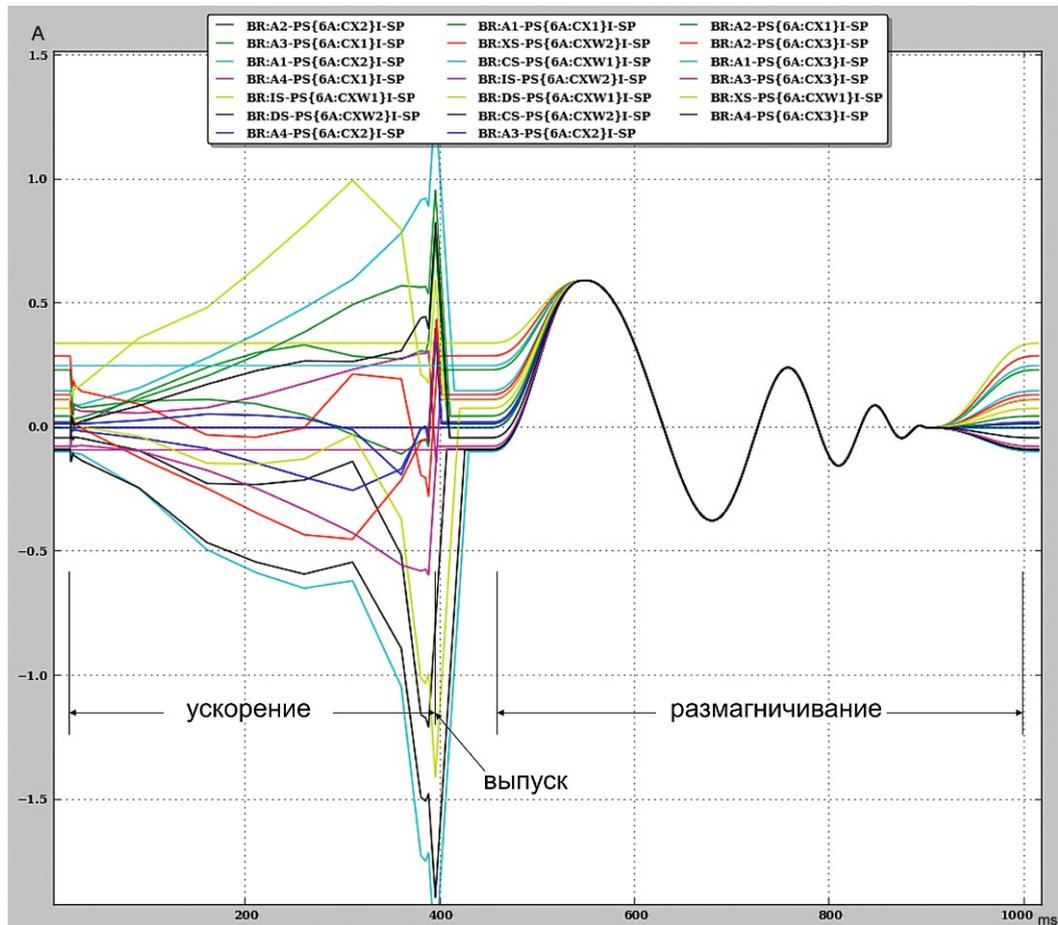


Рисунок 4.3: Графики токов в корректорах орбиты пучка в случае применения размагничивающей функции (затухающей синусоиды). Первая часть графиков отражает результат работы приложения *soco* в процессе ускорения.

4.4 Мониторинг значений параметров источников питания.

Индикатор состояния параметра

Восемнадцать каналов АЦП и двухбайтный входной регистр, размещенные в одном каркасе PSI, обеспечивают возможность организовать непрерывное согласованное наблюдение за поведением параметров рэмповых источников питания магнитной системы бустера. На рисунке 4.4 приведен пример экрана со всеми измерениями параметров источника питания квадрупольных линз, сделанными в течение цикла.

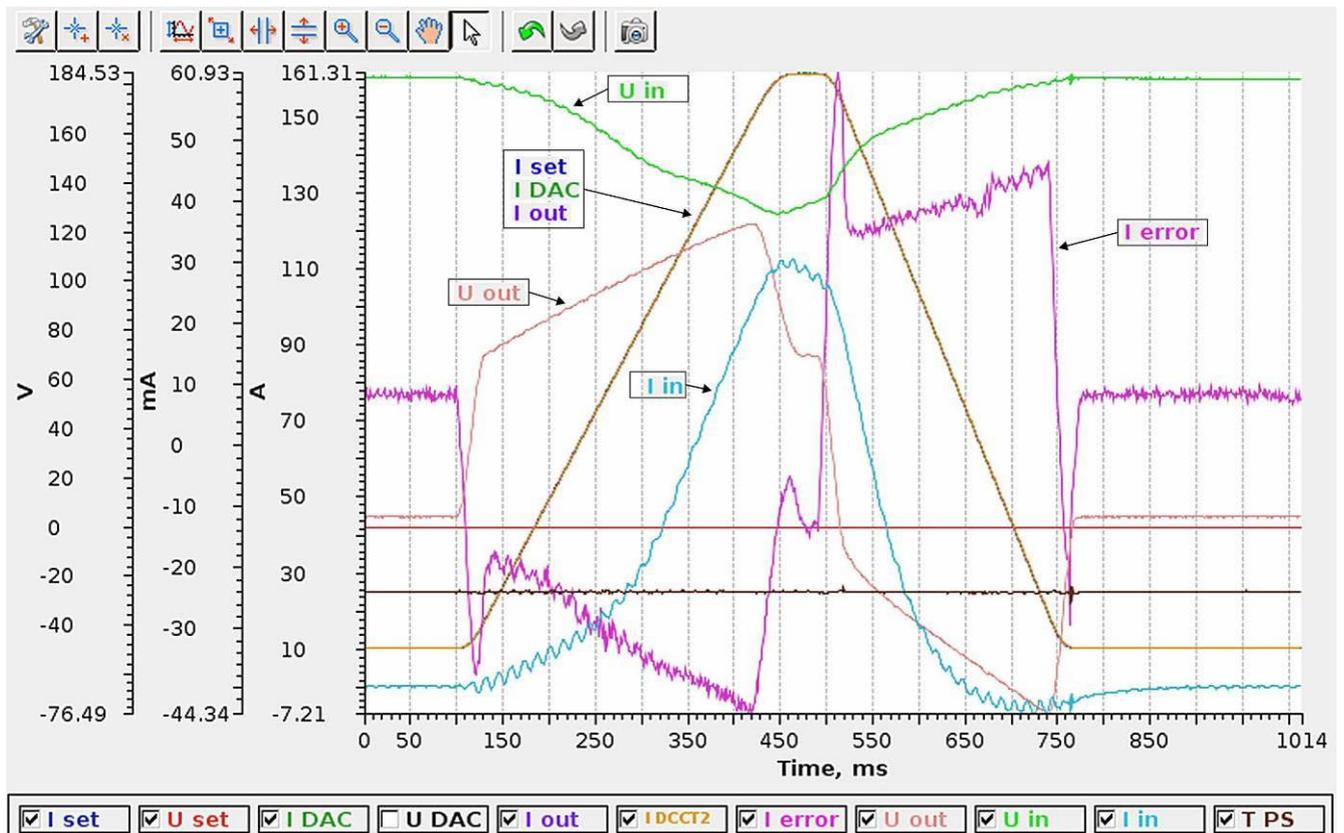


Рисунок 4.4: Экран инженерного приложения с измерениями всех сигналов источника питания квадрупольных магнитов. Сигналы I_{set} , I_{DAC} , I_{out} в масштабе шкалы тока (А), выбранном на данном экране, совпадают.

Получив новые измеренные данные из PSC, ИОС распределяет массивы измерений девяти АЦП из составных вэйвформ (см. п. 4.3 выше) по отдельным PV. Для всех PV, связанных с измерениями АЦП, предусмотрена математическая обработка, которая выполняется в каждом цикле: усреднение сигнала и быстрое преобразование Фурье. Усреднение сигнала позволяет отфильтровать шумы и помехи (например, от сети питания), а преобразование Фурье дает возможность определить спектр низкочастотных помех. Управление усреднением сигнала осуществляется с помощью PV, задающего величину усреднения для каждого измеряемого параметра. Значения битов входных регистров PSI распределяются по отдельным PV.

Для синхронизации данных всем PV, обновившимся в текущем цикле работы бустера, задается метка времени прошлого цикла (см. п. 3.4.4 Главы 3). Т.к. измерения всех АЦП во всех контроллерах синхронизируются импульсами

тактовой частоты 10 кГц, поступающими от системы синхронизации, то в результате все вэйвформы, содержащие измерения, поэлементно синхронизированы, что предоставляет возможность выполнять поэлементно различные операции с любыми измерениями, полученными в одном цикле.

Для отслеживания состояния устройств (мониторинга) в ИОС, обслуживающих контрольно-измерительную аппаратуру, заложен автоматический механизм сравнения текущих значений параметров с опорными значениями [140].

В зависимости от режима работы установки (штатная работа или настройка) предусмотрено два режима сравнения и два способа определения опорного значения. Режим сравнения задается при помощи специального единого PV, размещенного в ИОС *br-operation*.

В первом случае подразумевается, что установка работает в штатном настроенном состоянии, не требующем какого-либо вмешательства со стороны оператора. Опорные значения как для параметров управления, так и для измерений, записываются в соответствующие “опорные” PV приложением восстановления режима работы бустера в процессе выполнения процедуры загрузки в устройства управления значений, запомненных по набору уставок и соответствующих им измерений, отвечающих определенному состоянию установки (см. п. 6.1.1 Главы 6). Этот режим задания опорных значений обозначается “Reference”.

Во втором случае, когда выполняется настройка работы бустера, изменяемые при этом уставки уже нет смысла сравнивать с какими-то запомненными значениями, и сами уставки становятся опорными значениями для соответствующих измерений. Таким образом контролируется правильность отработки уставки устройством. Этот режим работы механизма сравнения обозначается “SP”.

ИОС при обработке обновленного значения PV вычисляет разность текущих и опорных значений для всех уставок и измерений, имеющих опорные значения. В случае превышения допустимого значения разности для какого-либо параметра

в специальное PV индикатора состояния данного параметра устанавливается ненулевое значение: если модуль разности превышает допустимое значение, в индикатор состояния устанавливается “1”, а при значительном превышении – “2”. Допустимые величины для разности текущего и опорного значений для каждого параметра загружаются в соответствующие PV (*tolerance PV*) в ИОС из конфигурационных файлов. Причем, для каждого режима сравнения (“Reference” и “SP”) загружается свое допустимое значение. Степень значимости превышения для каждого параметра задается индивидуальным коэффициентом, содержащемся в отдельном PV. По умолчанию величина коэффициента равна 10, и в дальнейшем может быть настроена отдельно для каждого параметра.

Вычисление разности делается для всех типов PV: бинарных, скалярных и вэйвформ. В случае вэйвформ вычисление разности выполняется поэлементно. Если в текущем цикле работы бустера вычисленная разность не превышает допустимое значение, то индикатор состояния параметра зануляется.

4.5 Оптимизация архивирования значений переменных

Архивирование текущих значений в системах управления необходимо для последующего анализа состояния установки, восстановления истории и режимов ее работы. В идеальном случае для сложных систем со множеством зависимых параметров нужно сохранять все имеющиеся измерения и уставки по мере их обновления. Общее число измеряемых параметров различных систем бустера, изменяющихся каждый цикл, превышает 1000, и из них около 350 – это массивы измерений размером по 1000 значений. Таким образом, объем данных, обновляемых каждую секунду в режиме работы 1 Гц, превышает 1 МБ, что составляет около 100 ГБ за сутки работы бустера. Для уменьшения объема сохраняемых данных без потери значимой информации разработан механизм прореживания архивируемых данных для записи его стандартной системой архивирования EPICS Channel Archiver [141].

ИОС в каждом цикле вычисляет разность обновленного текущего значения (измерения или уставки) и последнего значения, сохраненного системой

архивирования, содержащегося в специальном PV (*archived PV*). В случае превышения разностью допустимого значения в *archived PV* заносится текущее значение, и изменившееся значение *archived PV* автоматически сохраняется с помощью Channel Archiver.

Этот механизм позволяет сохранять только существенные изменения параметра. При этом величина допустимого отклонения для каждого параметра определяется значением, содержащемся в его *tolerance PV* (см. п. 4.4).

4.6 Выборки сигналов

В системе управления бустера большая часть значений сигналов, измеряемых контрольно-измерительной аппаратурой, считывается в ИОС из устройств в виде вэйвформ. Для визуализации и анализа состояния бустера в определенные моменты цикла (например, моменты впуска и выпуска пучка) необходимы скалярные значения сигналов. Скалярные значения, например, позволяют вывести на дисплей в численном выражении значения энергии и тока пучка, тока в импульсном магните и т.д. Такие значения необходимы для наблюдения стабильности параметров от цикла к циклу в заданные моменты времени.

Для получения скалярных значений разработан механизм выборки значений из вэйвформы. В ИОС в отдельные скалярные PV сохраняются значения, взятые из соответствующих элементов всех вэйвформ. Индексы элементов задаются при помощи специальных PV, что позволяет оперативно изменять момент выборки каждого значения. Для вэйвформ, содержащих измерения параметров источников питания, предусмотрено три момента выборки на весь цикл бустера. Для вэйвформ, содержащих данные, прочитанные из аппаратуры диагностики пучка (пикапов, системы измерения бетатронных частот), предусмотрено 40 моментов для выборки. Эти индекс используются в системе измерения и коррекции орбиты пучка (см. п. 4.8 и п. 6.6 Главы 6).

4.7 Измерение импульсных сигналов

VME-модуль VsDC3 [61] с частотой 300 кГц оцифровывает напряжение входного сигнала, поступающего с измерительной петли, размещенной в апертуре магнита, и одновременно интегрирует измеренные значения. В процессе измерения в памяти модуля заполняется массив значений, отражающий форму входного сигнала (производную импульсного магнитного поля), и вычисляется интеграл, соответствующий значению поля в текущий момент времени. Задание начального и конечного моментов измерений осуществляется с помощью внешних импульсов “старт” и “стоп”, поступающих от системы синхронизации.

Рабочий цикл ИОС позволяет выполнять измерения в двух режимах работы бустера: с одинарным и двойным впуском пучка. Во втором случае данные, прочитанные из модуля VsDC3, распределяются по двум комплектам PV, соответствующим первой и второй инжекции. По окончании очередного измерения после появления прерывания от модуля VsDC3 в ИОС запоминается текущее время и проверяется интервал, прошедший после момента предыдущего измерения. Если интервал не превышает 100 мс, то считается, что произошла вторая инжекция пучка и прочитанные данные (значение интеграла и вэйвформа входного напряжения) помещаются в PV, соответствующие второй инжекции, иначе, считается, что данные соответствуют первой инжекции, и в этом случае зануляются PV для второй инжекции. Обновленные PV каждый раз получают метку времени, соответствующую текущему циклу бустера (см. п. 3.4.4. Главы 3).

Для случая измерения сигналов токов в магнитах-кикерах значение имеют не только амплитуда и форма сигнала, но и его положение относительно движения пучка в кольце бустера. Чтобы обеспечить привязку момента измерения сигнала к пролету пучка для тактирования ADC200 используется тактовая частота системы синхронизации 125 МГц. При этом интервал измерения АЦП составляет 8 нс, что оказывается вполне достаточно для контроля стабильности токового импульса в магнитах-кикерах длительностью 500 нс с требуемой точностью порядка единиц нс.

Алгоритм работы ИОС реализует “многостраничный” режим функционирования ADC200: цикл из одного или двух измерений в зависимости от режима однократного или двойного впуска пучка в бустер. Соответственно, один или два внешних запуска формируют в памяти модуля одну или две страницы данных заданной длины. После завершения цикла измерений данные считываются в ИОС, и содержимое каждой страницы помещается в соответствующее PV. Это позволяет в каждом цикле работы бустера в случае двойной инжекции получить в ИОС значения двух сигналов токов, следующим друг за другом через 100 мс (см. рисунок 4.5). Оба последовательных измерения с помощью внешнего запуска синхронизированы друг с другом и с пролетом пучка с точностью ~ 20 пкс.

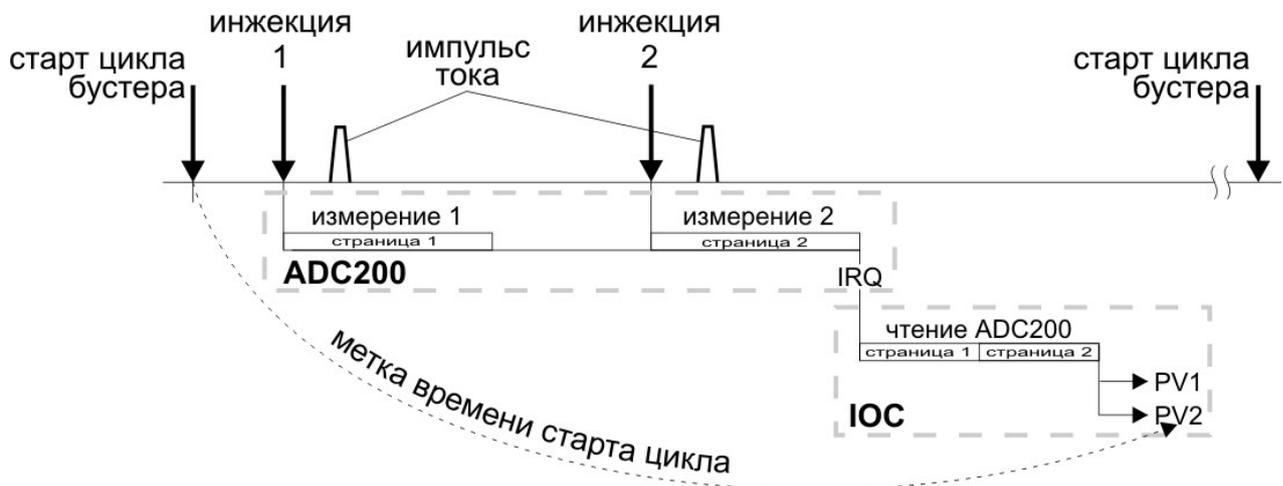


Рисунок 4.5: Алгоритм работы ADC200 и ИОС при измерении сигналов тока в магнитах-кикерах в режиме двойной инжекции.

4.8 Обработка измерений с пикапов

Взаимодействие с каждым из 36 BPM-ресиверов бустера осуществляется с помощью индивидуального ИОС. ИОС распределены по двум IBM-серверам: **di14ioc** и **di23ioc** (см. рисунок 3.3 Главы 3). Кроме этих ИОС для обработки данных используются еще три SoftIOС, в которых выполняется вычисление орбиты пучка и бетатронных частот. Блок-схема взаимодействия всех ИОС для обработки данных с пикап-электродов показана на рисунке 4.6.

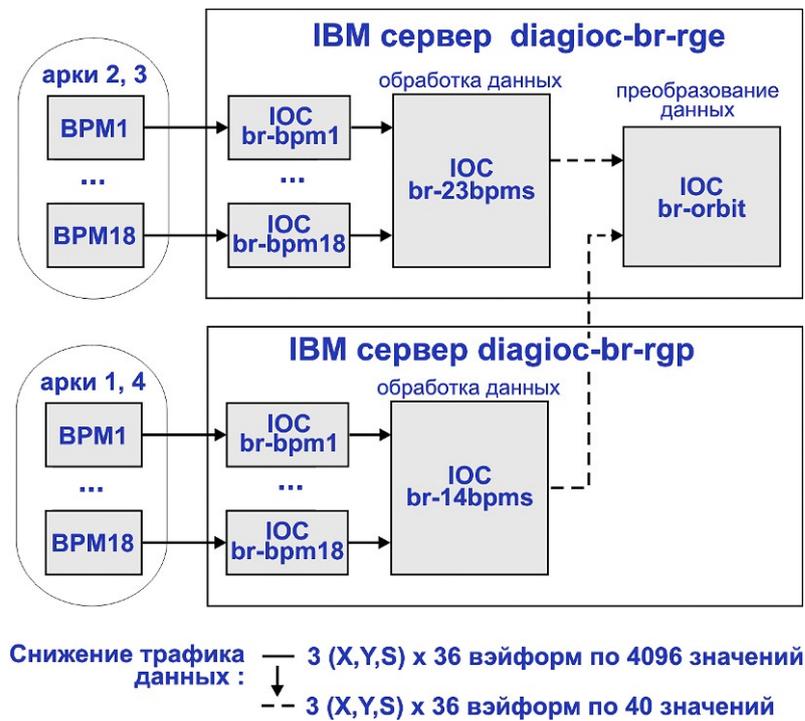


Рисунок 4.6: Диаграмма связей между ИОС, используемыми для чтения и обработки данных с пикап-электродов.

Максимальная продолжительность времени существования пучка в бустере (инжекция и ускорение) не превышает 400 мс. Поэтому из BPM-ресиверов, обслуживающих пикап-электроды, в соответствующие ИОС каждый цикл вычитываются три вэйвформы длиной по 4096 точек, содержащие в зависимости от режима работы BPM-ресивера либо измерения координат положения усредненной орбиты пучка X, Y (режим измерения орбиты), сделанные с частотой 10 кГц, либо пооборотные измерения координат пучка (режим пооборотных измерений), а также суммарные значения сигналов (S) со всех четырех пластин, соответствующие величине тока пучка.

После получения вэйвформ из восемнадцати BPM-ресиверов в каждом IBM-сервере данные переключаются в специальные ИОС (*br-14bpms* и *br-23bpms*) для дальнейшей обработки: выборки из каждой вэйвформы сорока измерений в соответствии с индексами, заданными для диагностических выборок (см. п. 4.6). Алгоритм обработки сигналов для режима пооборотных измерений представлен на рисунке 4.7. В случае пооборотных измерений в каждом из этих ИОС также выполняются преобразования Фурье исходных координатных массивов, и для

каждого пикапа вычисляются значения бетатронных частот и амплитуд колебаний. Для надежного выявления значений частоты и амплитуды по X и по Y в виде PV запоминаются две пары значений с наибольшими амплитудами гармоник.

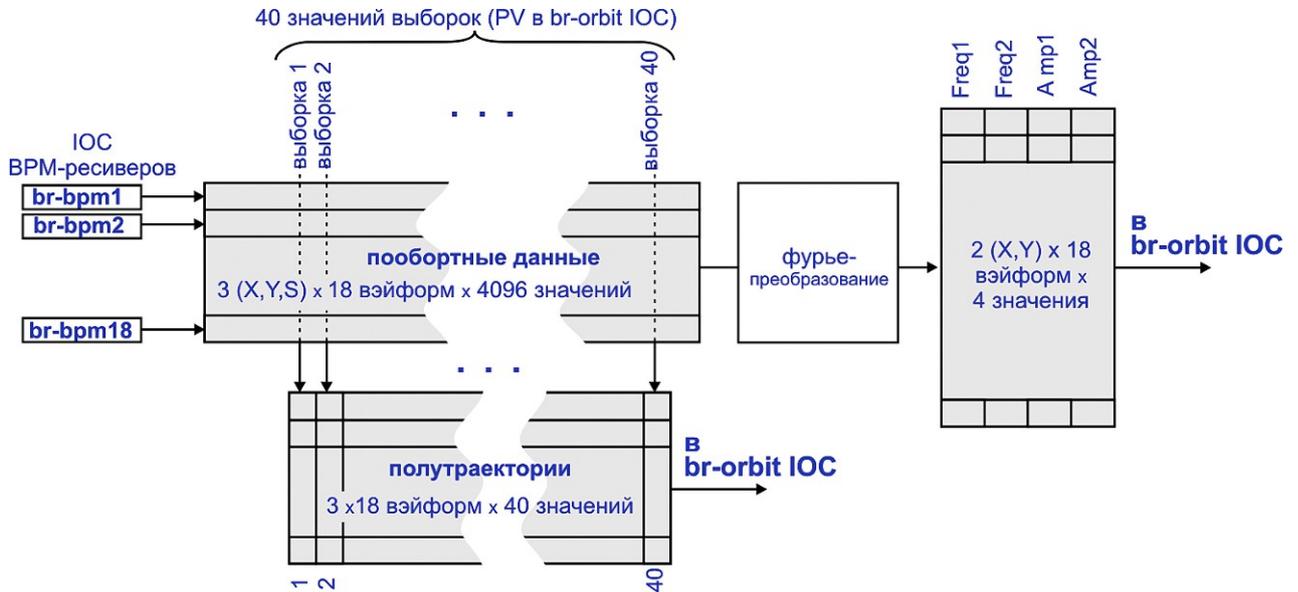


Рисунок 4.7: Алгоритм обработки данных, прочитанных их BPM-ресиверов в режиме пообортных измерений.

Из восемнадцати массивов по сорок значений формируется сорок массивов по восемнадцать значений, соответствующих половинкам траекторий (или в случае измерения орбиты - орбит) пучка. Далее данные передаются в IOC *br-orbit*, в котором выполняется их слияние и подготовка для отображения в графическом приложении (см. п. 6.6 Главы 6): в дополнительные вэйвформы, доступные в виде PV, соответствующие орбитам, добавляется по одному (тридцать седьмому) значению противоположного крайнего пикапа чтобы линия орбиты на графике могла быть представлена в законченном виде.

Сценарий измерений, передачи и обработки данных в BPM-ресиверах и IOC пикап-диагностики (см. рисунок 4.8) организован таким образом, что результаты становятся доступными для приложений верхнего уровня еще до окончания текущего цикла работы бустера, что дает возможность использовать их в приложениях для подготовки следующего цикла.

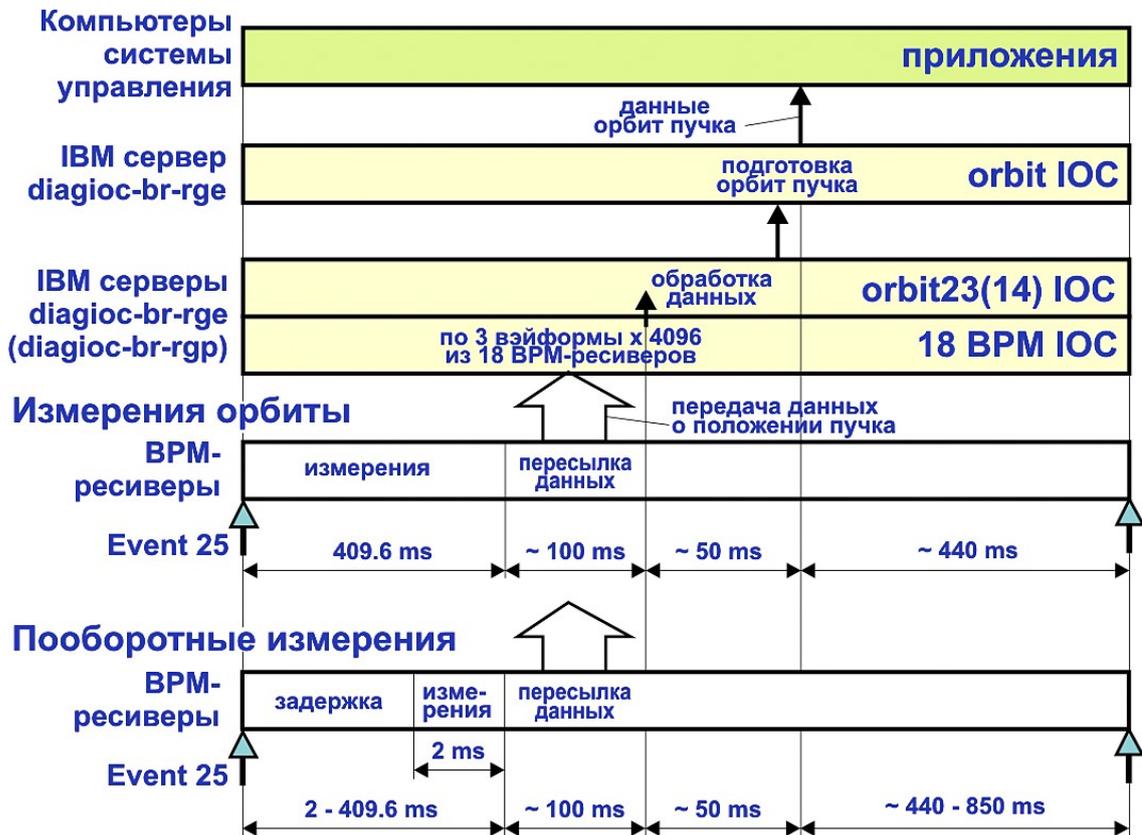


Рисунок 4.8: Диаграмма получения и обработки данных в ИОС пикап-диагностики.

В режиме пооборотных измерений время получения данных в BPM-ресивере занимает две миллисекунды (4096 оборотов пучка в бустере). Для обеспечения возможности проведения измерений в любое время в течение ускорения пучка в каждом BPM-ресивере предусмотрена регулируемая задержка относительно старта цикла бустера.

4.9 Работа с промышленными контроллерами

В системе управления бустера используется три типа промышленных контроллеров (контроллер вакуумного насоса Varian 929-7011, контроллер вакуумных ламп MKS937B и модули PLC серии 1769 производства фирмы Allen Bradley (см. п.п. 3.6 Главы 3). Для этих устройств поставщик предоставляет драйверы, обеспечивающие работу оборудования в системе EPICS.

Взаимодействие с вакуумными контроллерами обеспечивается с помощью ИОС, функционирующих в IBM-сервере **vacioc-inj** (см. рисунок 4.2) и реализующих все контрольно-измерительные параметры аппаратуры в виде

скалярных PV. В ИОС реализованы механизмы циклического опроса измеряемых параметров и возможность занесения в устройства управляющих кодов для настройки контроллеров. Визуализация данных осуществляется с помощью операторских окон, отображающих как общее состояние, так и детали работы вакуумной системы (см. п. 6.2 Главы 6).

Для работы со всеми девятью PLC, применяющимися в системе блокировок и для управления вакуумными шиберами, используется всего один ИОС *plc-br-il*, работающий в сервере **interlock-br-rgb** и предоставляющий PV, содержащие значения входных и выходных сигналов модулей PLC. Программа, работающая в контроллерах PLC, реализует логику управления устройствами, используя как данные, поступающие в PV из приложений и серверов, так и значения внешних сигналов, поступающих на входы цифро-аналоговых модулей PLC. Для визуализации данных используются специальные операторские экраны, схематично отображающие состояние блокировок.

Глава 5

Инженерные и операторские приложения для управления элементами бустера

5.1 Упорядочивание доступа к пользовательским приложениям.

Главное меню запуска

Для разработки ПО прикладного уровня были использованы инструменты, интегрированные с EPICS: пакет CSS [135] – как основа для создания операторских приложений, требующих преимущественно простого ввода/вывода данных, язык программирования Python – для создания приложений, использующих математическую обработку и графическое отображение информации (библиотека PyQT).

Число приложений, с которыми нужно работать операторам и инженерно-техническому персоналу, в крупных системах управления составляет многие десятки. Для упорядочивания и ускорения поиска нужных приложений с целью их запуска необходимо выработать подход, систематизирующий приложения по функциональному назначению, по их востребованности, по подсистемам установки. С этой целью разрабатываются специальные приложения – меню запуска, которые предоставляют персоналу возможность простой и наглядной навигации по множеству приложений с помощью кнопок, выпадающих списков и подгружаемых меню. Для большей функциональности экран меню, кроме кнопок для навигации и вызова приложений, должен, по возможности, содержать данные об основных параметрах установки, (например, энергию частиц, ток и время жизни пучка и т.п.), а также графическую информацию, привязывающую кнопки вызова приложений к схеме или системам установки. Пример экрана приложения-меню (главное меню для системы управления NSLS-II) приведен на рисунке 5.1.

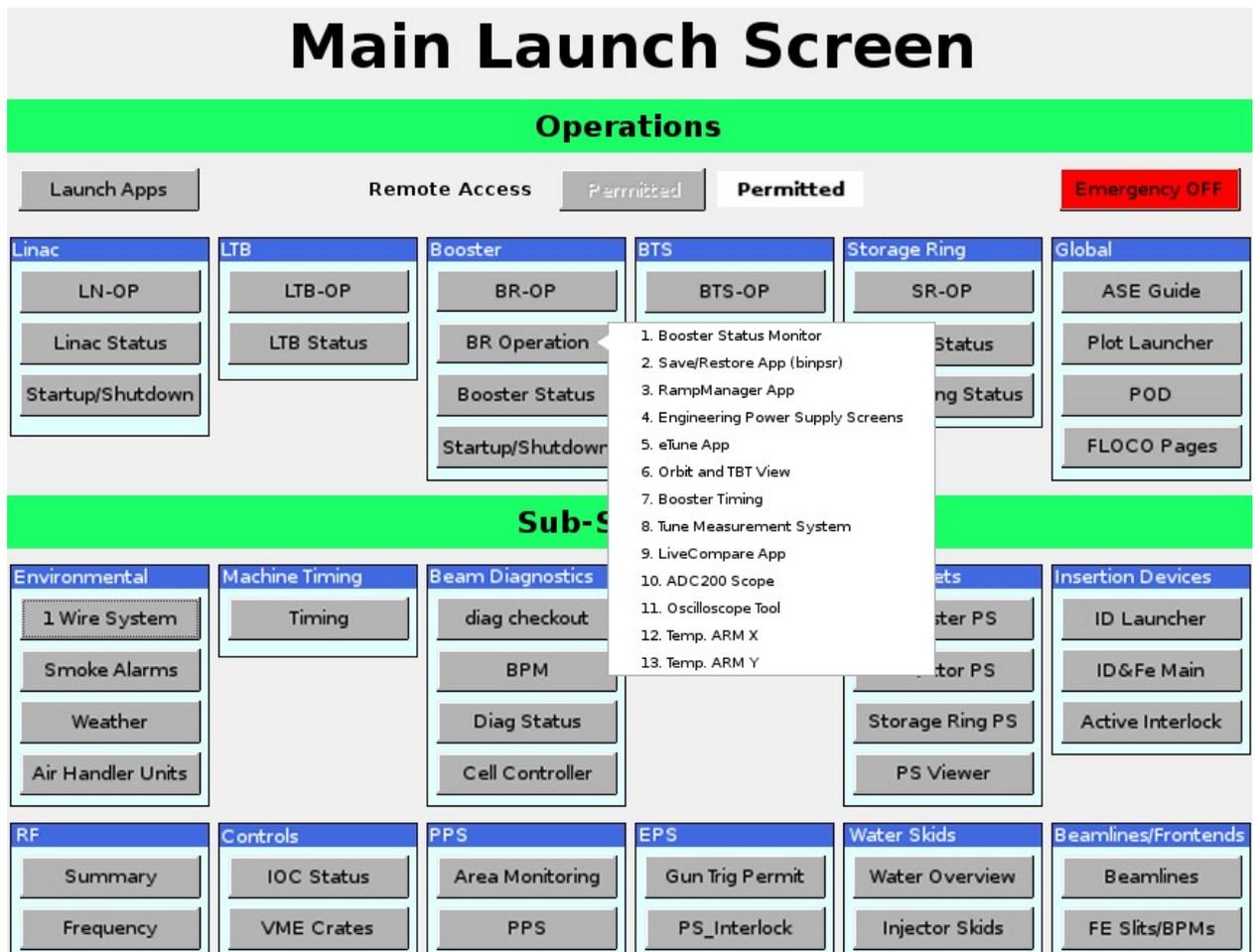


Рисунок 5.1: Фрагмент главного меню для запуска приложений системы управления комплекса NSLS-II.

На экране все рабочие приложения системы управления комплекса NSLS-II разбиты на две большие группы: приложения для оперативной работы и приложения для работы с системами. Приложения для оперативной работы, в свою очередь, разбиты на группы по установкам: линак, бустер, каналы транспортировки, основное кольцо. При нажатии на какую-либо кнопку загружается соответствующее приложение, либо появляется список для выбора приложений, доступных для запуска (на рисунке 5.1 - кнопка “*BR Operation*”).

5.2 Приложения для диагностики оборудования и систем

Для каждого типа электронного устройства (контроллер оборудования, АЦП, модуль синхронизации и т.п.) и для каждого типа управляемого элемента оборудования (крейт, источник бесперебойного питания, и т.п.), от которых зависит работоспособность системы управления, разрабатываются

диагностические (тестовые) приложения. С помощью этих приложений обеспечивается возможность оперативного доступа (чтения/записи) до всех регистров и адресов электронных устройств, а также возможность задания и отображения значений всех параметров контролируемого оборудования. Тестовые приложения разрабатываются даже в том случае, если поставщик электроники или оборудования предоставляет свои аналогичные приложения. Таким способом электроника и оборудование полностью интегрируются в инфраструктуру системы управления. В случае специализированных разработок электроники для каждой конкретной системы тестовые приложения создаются с использованием программной инфраструктуры системы управления, при этом разработка устройства сопровождается разработкой самой программной инфраструктуры (в случае EPICS – это алгоритмы работы и рекорды в IOC). Для электроники системы управления бустера было создано три диагностических приложения для следующих электронных устройств: системы контроллеров PSC-PSI и модулей VsDC и ADC200. Тестовые приложения не выполняют обработку данных, а служат только для их ввода/вывода, поэтому для разработки был использован пакет CSS, что позволило для всех приложений использовать однотипные интерфейсные экраны. Всего же для системы управления NSLS-II разработано более десятка подобных тестовых приложений. Некоторые из них (например, приложение для настройки и тестирования системы измерения тока пучка при помощи DCCT, см. рисунок 6.14 п. 6.5 Главы 6) используются при регулярной работе с пучком. Приложения для настройки и тестирования оборудования системы пикап-диагностики (BPM-ресиверов) обеспечивают единообразный способ работы с устройствами как для бустера, так и для основного кольца и каналов транспортировки пучка.

В случае, когда управляемое оборудование и модули контрольно-измерительной электроники составляют единую систему и работают во взаимосвязи друг с другом для целей проверки и настройки необходимы приложения, работающие со всей системой в целом, которые позволяют не только контролировать настройки отдельных устройств, но предоставляют возможность

управлять физическими параметрами системы. Эти приложения позволяют настраивать системы в рабочий режим, который затем может быть сохранен и использован для работы с пучком. Подобная система может представлять собой комплекс оборудования, способный выполнять свою функцию вне связи с другими системами установки (например, ВЧ система, система блокировок), либо состоять из набора однотипных элементов, выполняющих одинаковые функции (например, набор VME-крейтов, у которых нужно контролировать питание, или набор однотипных ИОС, у которых контролируется их работоспособность). Приложения для тестирования систем разрабатываются таким образом, чтобы структура окна приложения отражала структуру тестируемой системы. Ввиду возможной сложности такой системы, для работы с ней могут служить не одно, а несколько приложений или окон одного приложения, охватывающих разные аспекты функционирования системы.

На рисунке 5.2 представлено главное окно для работы с ВЧ системой бустера. Система ВЧ включает несколько сложных электронных устройств, доступ к которым предоставляется на экране нажатием соответствующей кнопки, по которому запускается соответствующее управляющее окно. Рисунок в основном окне приложения выполнен в виде мнемосхемы, отражающей блок-схему системы ВЧ. Схема содержит цифровые и цветовые индикации, поля ввода данных и кнопки переключения состояния, на ней также размещены кнопки запуска дополнительных приложений для проверки и выполнения определенных функций системы: выполнения сценария включения, задания вэйвформ для управления напряжением и фазой ВЧ в контроллер, сохранения текущих параметров и т.д.

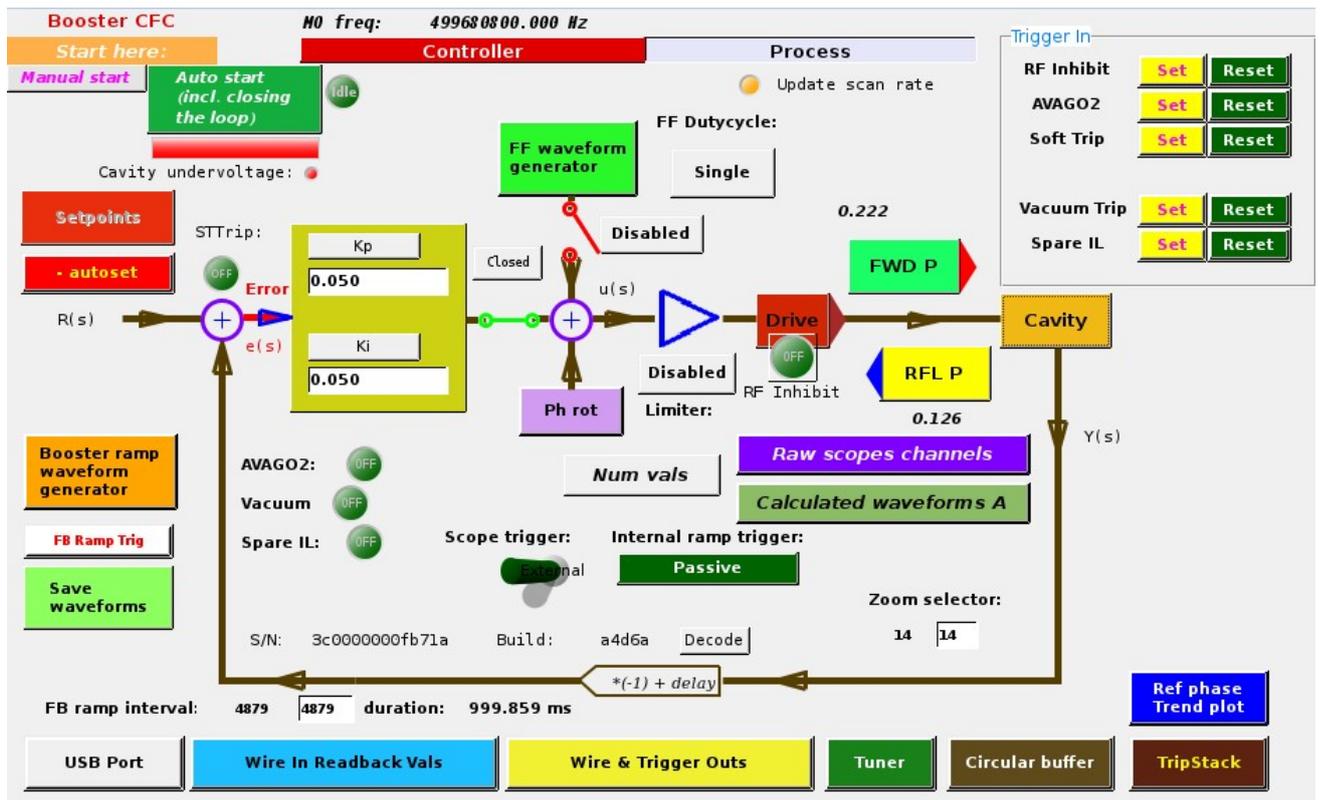


Рисунок 5.2: Основное окно комплекса приложений для работы с ВЧ системой бустера.

На рисунке 5.3 показано окно приложения, относящегося к системе синхронизации и предназначенного для настройки задержек всех триггеров, используемых для запуска и управления работой систем бустера. Данное приложение является примером интеграции на одном экране информации о значении управляемых параметров, их взаимосвязи и коммутации сигналов, что дает ясное представление о том, как устроена система синхронизации бустера. Окно позволяет одновременно видеть и управлять значениями всех задержек (поля ввода в колонках **Pulsers**), и изменять номер события, запускающего отработку задержки каждого выходного триггера (значения в колонке **Events**). Кроме того, на экране представлены распределения сигналов по модулям EVR и импульсов по выходам модулей, имена PV, содержащие информацию об управляемых устройствах, а также типы и назначения выходных сигналов.

Экран приложения практически соответствует детальной схеме синхронизации бустера, отображает величины задержек запусков импульсных элементов и предоставляет возможность для их взаимной настройки.

При разработке этих приложений в полной мере были использованы принципы унификации и модульности. Благодаря одинаковому способу управления всеми типами источников питания удалось создать интерфейсный экран универсального вида, на котором для всех типов источников питания единым образом размещены поля ввода/вывода, индикаторы, графические окна и кнопки для запуска дочерних приложений. Для каждого типа источника питания создан свой шаблон, который используется при запуске приложения для управления конкретным источником.

Для поддержки эффективной среды разработки и использования приложений, для обработки данных, а также для обеспечения правильного алгоритма работы с источниками питания в приложениях используются следующие модули и механизмы:

- макросы для конфигурирования загружаемых приложений,
- вызываемые Python-модули для выполнения определенных функций (сохранение данных, статистическая обработка, управление выводом графиков),
- встроенный Python-модуль для управления свойствами виджетов,
- правила (rules) и операции (actions) CSS,
- вспомогательные “внутренние” PV,
- внешнее приложение для загрузки управляющих вэйвформ.

Для запуска всех приложений разработан экран-селектор, на котором источники питания бустера сгруппированы по типам и упорядочены по местоположению на кольце бустера (см. рисунок 5.4).

На экране селектора также имеется кнопка для запуска специального операторского приложения для работы со всеми источниками питания в DC-режиме. Кроме того, есть выпадающее меню для управления процессом автоматического размагничивания корректоров.

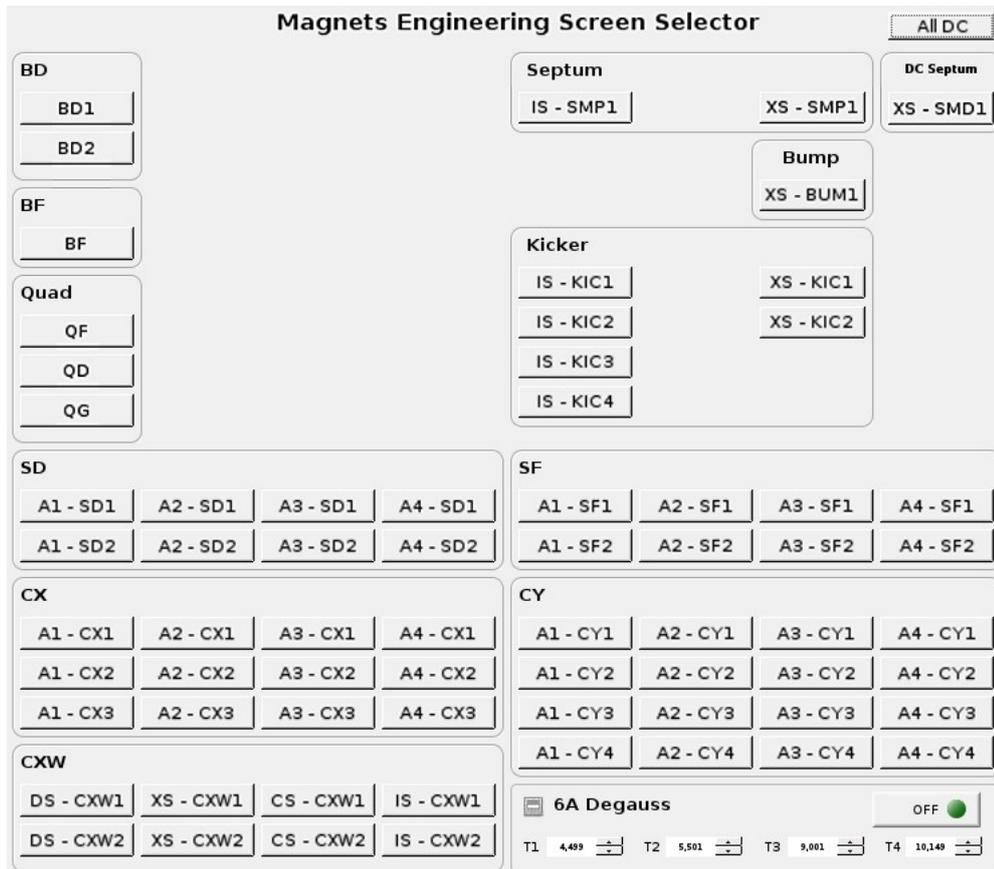


Рисунок 5.4: Экран-селектор для запуска приложений, работающих с источниками питания.

5.3.2 Основной экран, визуализация текущих значений параметров

На рисунке 5.5 на примере источника питания дипольного магнита ВФ представлено основное окно приложения. Окно поделено на несколько зон, стандартных для всех типов источников питания.

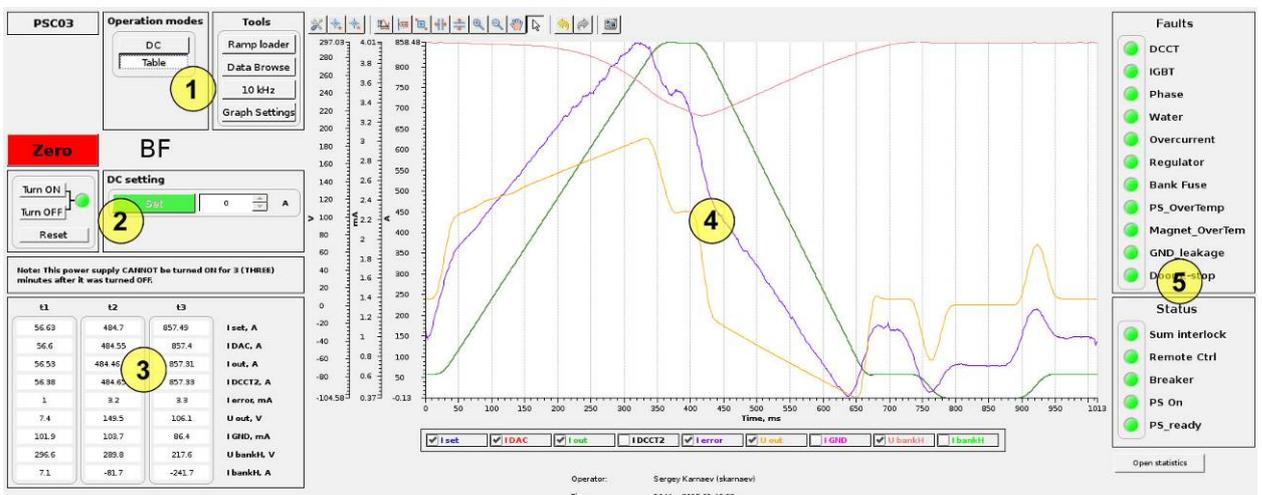


Рисунок 5.5: Основной экран инженерного приложения для работы с дипольным магнитом.

Зона (1) содержит кнопки управления режимом задания опорного напряжения и загрузки дочерних приложений, в ней также отображается имя PSC, управляющего данным источником питания. В приложении реализовано два режима задания опорного напряжения в PSC: режим отработки постоянного напряжения (кнопка *DC*) и режим отработки управляющей вэйвформы (кнопка *Table*). Нажатие одной из четырех кнопок (*Ramp loader*, *Data Browse*, *10kHz*, *Graph Settings*) запускает в отдельном окне соответствующее дочернее приложение: *Ramp loader* - для загрузки управляющей вэйвформы, *Data Browse* - для долговременного наблюдения за выбранными значениями измеренных вэйвформ, *10kHz* - для отображения осциллограмм вэйвформ выбранных сигналов, измеренных с частотой 10 кГц, и *Graph Settings* - для изменения настроек измерений.

Зона (2) содержит инструменты для управления источником питания: кнопки включения/выключения и сброса защит, а также поле ввода для управления напряжением ЦАП для работы в режиме DC. Красным цветом выделена кнопка *Zero*, при нажатии которой в PSC немедленно загружается нулевая уставка.

В поле зоны (3) выводятся скалярные значения для всех измеряемых сигналов, имеющихся у данного типа источника питания (см. п. 4.6 Главы 4).

Зона (4) содержит график, отображающий все измеренные вэйвформы. В нижней части под графиком размещается панель управления выводом треков в графическом поле. Предусмотрено три шкалы физических единиц (V , mA , A), в масштабах которых выводятся измеренные вэйвформы, каждая из которых закреплена за своей шкалой.

В зоне (5) отображается состояние блокировок (*Faults*) и статусных индикаторов (*Status*). Сработавшие блокировки и нештатные статусные состояния отмечаются красным цветом, нормальное состояние – зеленым. В нижней части под статусными индикаторами размещена кнопка *Open statistics*, нажатие на которую открывает область основного экрана, где в режиме on-line выполняется

статистическая обработка двух любых значений, выбранных из колонки t1 таблицы, размещенной в зоне (3) (см. п. 5.3.7).

5.3.3 Долговременные наблюдения измерений

Нажатие в основном окне кнопки *Data Browse* вызывает приложение для долговременного наблюдения за отдельными значениями из измеренных вэйвформ, выбранными в определенные моменты цикла бустера (см. рисунок 5.6).

График в окне *Data Browse* позволяет одновременно выводить до 20 скалярных значений различных сигналов. Максимальное время наблюдения – 24 часа. Значения для каждой вэйвформы могут выводиться в трех точках цикла. Конфигурационное меню, содержащее все сигналы для данного источника питания, возможные для отображения на графике, позволяет простым нажатием кнопки подключать и отключать вывод соответствующего значения на график.

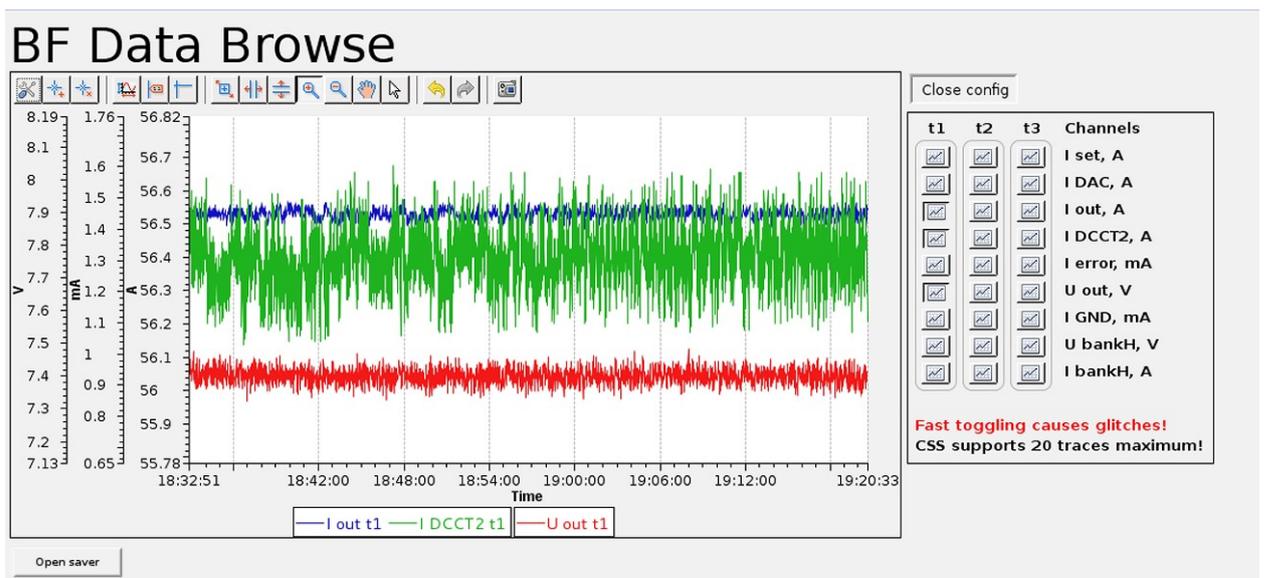


Рисунок 5.6: Экран наблюдения за значениями сигналов источника питания в заданные моменты цикла бустера.

5.3.4 Особенности работы с импульсными источниками питания

По сравнению с источниками постоянного тока импульсные источники питания имеют дополнительные контрольно-измерительные каналы для синхронизации и измерения импульсных параметров. Для ввода и отображения значений этих параметров в основном окне приложения добавлены еще две зоны (см. рисунок 5.7): зона (6) содержит поля для ввода значений необходимых задержек и поля для вывода величин измеренных параметров, а в зоне (7) отображается график, на котором выводятся данные, прочитанные из АЦП, измеряющих импульсные параметры.

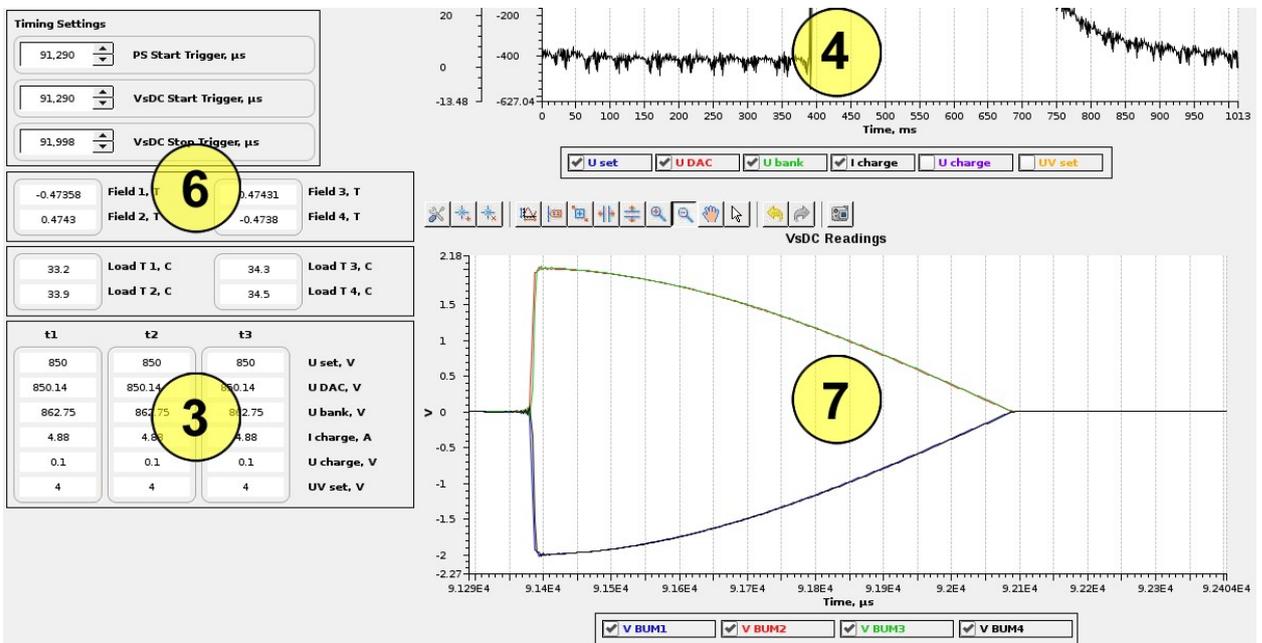


Рисунок 5.7: Фрагмент основного экрана для управления источником питания выпускных импульсных корректирующих магнитов.

5.3.5 Функции по обработке и сохранению данных

В приложениях для работы с источниками питания предусмотрена функциональность для обработки и сохранения данных: конфигурация измерений, статистическая обработка измеренных сигналов, экспорт графических данных в текстовый файл.

Окно для конфигурации измерений вызывается из основного окна (рисунок 5.5) нажатием кнопки *Graph Settings*. Расположенная в окне таблица позволяет

конфигурировать пересчетные коэффициенты, моменты времени выборки скалярных значений, коэффициенты усреднения для всех измеряемых сигналов.

Область для управления экспортом графических данных в файл (см. рисунок 5.8) открывается в окнах *Data Browse* и *10kHz* нажатием кнопки *Open saver* (см. рисунок 5.6). Эта функциональность позволяет сохранять данные в текстовом формате с целью последующего использования их для обработки с помощью различных математических и статистических пакетов.

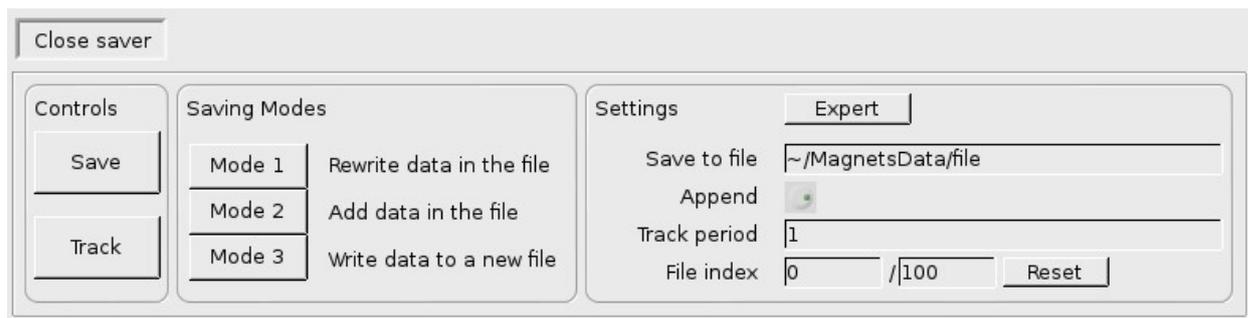


Рисунок 5.8: Область экрана для управления сохранением графических данных в текстовый файл.

Предусмотрено три режима сохранения данных: перезапись (*Mode 1*) и дописывание (*Mode 2*) файла, а также запись в новый файл (*Mode 3*), при которой к имени файла, введенном в поле *Settings*, будет добавлен очередной индекс. Кнопки в поле *Controls* позволяют либо сделать разовую запись (нажатие кнопки *Save*), либо запустить режим периодического автоматического сохранения (нажата кнопка *Track*) с заданными параметрами: период записи и максимальное число записей. Использование этих параметров позволяет избежать появления как чрезмерно больших файлов, так и большого количества файлов в случае потери контроля над операцией сохранения.

При каждой операции записи данные записываются в файл в виде строки
 date time data1 data2 ... dataN,

где data* – значения измерений выбранных параметров. В случае работы в окне *10kHz* за одну операцию записи будут сохраняться все значения выбранных вэйвформ, т.е. в файл будет записано 10150 строк указанного формата.

Область для on-line статистической обработки двух выбранных значений измеренных сигналов (см. рисунок 5.9) открывается в главном окне приложения нажатием кнопки *Open statistics* (см. рисунок 5.5).

Statistics for:		I out	
2399	N		
56.52556	Mean		
0.01608	Std		

Statistics for:		I error	
2972	N		
0.98405	Mean		
0.05249	Std		

t1 Statistics Select		
Stat1	Stat2	
0	0	OFF
1	1	I set
2	2	I DAC
3	3	I out
4	4	I DCCT2
5	5	I error
6	6	U out
7	7	I GND
8	8	U bankH
9	9	I bankH

Рисунок 5.9: Область окна для on-line статистической обработки сигналов.

Для статистической обработки доступны только значения сигналов, выбранные из вэйвформ в момент выборки t_1 . Задавая момент t_1 , можно обрабатывать соответствующий сигнал в нужный момент времени цикла. В полях результатов выводятся: число обработанных измерений, среднее значение и дисперсия. При нажатии кнопки выбора сигнала статистика сбрасывается, и обработка начинается заново.

5.4 Приложение для управления элементами бустера

Для решения задачи формирования управляющих функций (вэйвформ), которые затем согласованно заносятся в управляющие контроллеры и задают поведение управляемых элементов в течение цикла работы бустера разработано специальное универсальное приложение *rampmanager*. Приложение обеспечивает формирование и редактирование управляющих функций для всех элементов магнитной системы, систем впуска/выпуска и ВЧ, выполнение операций по загрузке управляющих функций в PV, а также отображение текущего состояния управляемых элементов. Поскольку *rampmanager* в отличие от инженерных

приложений выполняет различные операции обработки данных, то для его создания был использован язык Python.

5.4.1 Требования на разработку приложения

Для разработки приложения *ramptanager* были определены следующие общие требования:

- обеспечение универсального интерфейса для всех типов устройств,
- группировка элементов по функциональному назначению,
- отображение всех управляемых и измеряемых параметров, связанных с выбранным элементом,
- одновременное отображение управляемых параметров группы элементов,
- возможность групповой работы с элементами по формированию функции управления и занесению ее в устройства: копирование, масштабирование,
- учет ограничений на задаваемую функцию: ограничения величины значения параметра, его первой и второй производных,
- возможность журналирования и возврата по цепочке выполненных операций,
- возможность сохранения и восстановления всех конфигурационных параметров и параметров управления.

Кроме требований, перечисленных выше, в *ramptanager* были реализованы следующие возможности, определяемые спецификой работы бустера:

- задание функции управления как в виде параметризованных гладких функций, так и в виде таблицы узловых значений с линейной интерполяцией,
- добавление специальных программных модулей для управления отдельными элементами бустера без нарушения общности интерфейса.

5.4.2 Инструменты главного окна

При запуске приложение *rampmanager* прочитывает данные из своих конфигурационных файлов и открывает основное окно (см. рисунок 5.10), в верхней части которого выводится имя файла, из которого были прочитаны значения настроек и уставок. Имя файла с уставками берется по предыдущему сеансу работы с приложением. Если имя файла для чтения уставок не было указано, то значения управляющих вэйвформ берутся из стандартного конфигурационного файла. В верхней части окна отображается имя управляемого элемента, а также размещаются селектор для выбора способа задания управляющей функции (см. п. 3.5.1 Главы 3) и флаговая кнопка для включения/отключения вывода треков управляющих вэйвформ на график.

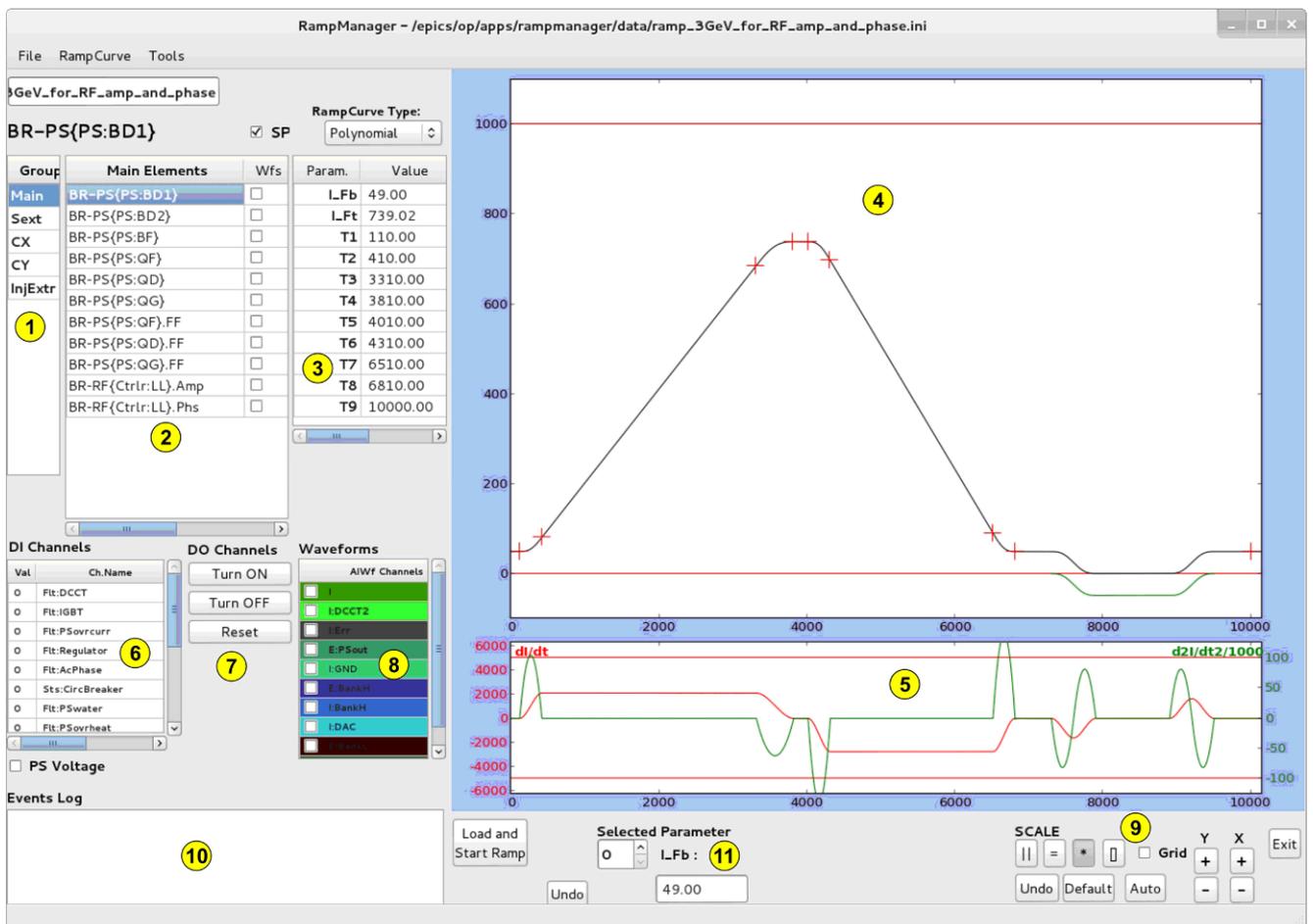


Рисунок 5.10: Основное окно приложения *rampmanager*.

Основное окно делится на несколько рабочих зон.

В зоне (1) расположена таблица групп элементов. Для упорядочивания (упрощения) поиска все элементы бустера разбиты на следующие группы:

- основные элементы (сюда входят диполи, квадрупольные и ВЧ система),
- секступольные корректоры,
- корректоры орбиты по горизонтали,
- корректоры орбиты по вертикали,
- элементы впуска/выпуска (источники питания септумов и кикеров).

Список элементов выбранной группы отображается в таблице в зоне (2). Как и для таблицы групп элементов (1) выбор элемента в таблице (2) для редактирования управляющей вэйвформы осуществляется по двойному клику. При этом выбранная строка таблицы окрашивается в голубой фон.

Справа от имен элементов расположены флаговые кнопки. Если в таблице (2) уставлен флажок у невыбранного элемента, то для него вэйвформы с текущими измеренными значениями, отмеченные в таблице, расположенной в зоне (8), будут также выводиться на график (4) вместе с вэйвформами, отмеченными для выбранного элемента. Это дает возможность выводить на одном графике значения измеряемых параметров, относящихся к разным элементам.

В зоне (3) размещается таблица для задания основной функции управления. Таблица изменяет вид в зависимости от выбранного способа задания: использования узловых точек или полиномов (см. п. 3.5.1 Главы 3). Соответственно, в таблицу заносятся либо моменты времени цикла (индексы массива управляющей вэйвформы) и значения узловых точек, либо моменты времени цикла для вычисления коэффициентов полиномов. В примере окна, приведенном на рисунке 5.10, выбран режим аппроксимации с использованием полиномов, и в таблице заданы девять моментов времени цикла, а также значения тока на энергии впуска и выпуска.

Зона (4) основного окна содержит график, на котором отображаются треки выбранных вэйвформ, относящихся к данному элементу, а также к элементам, отмеченным флажком в таблице зоны (2). На графике также отображаются

коррекции основного управляющего сигнала, а также нижний и верхний пределы для значения управляющего сигнала. График оснащен инструментами навигации и масштабирования, размещенными в зоне (9).

В зоне (5) размещается график, отображающий первую и вторую производные редактируемого управляющего сигнала. Наличие этого графика позволяет наглядно отслеживать правильность ввода значений параметров полинома с точки зрения ограничений на величины производных. На графике также отображаются пределы на первую производную, заданные в конфигурационном файле для данного типа источника питания.

Зона (6) содержит таблицу значений измеряемых параметров бинарного типа, а зона (7) – кнопки задания значений управляемых параметров бинарного типа для выбранного элемента.

В зоне (8) расположен список измеряемых параметров для выбранного элемента, читаемых из PSC в виде вэйвформ длиной 1014 точек. При переводе флаговой кнопки в активное состояние трек соответствующей вэйвформы будет выводиться на график (4).

Зона (10) представляет собой текстовое окно, в которое *rampmanager* выводит сообщения о результатах своих операций по записи/чтению PV, файлов и т.п.

Зона (11) содержит два отдельных окна для заполнения выбранной строки в таблице (2). При вводе значений приложение делает проверки величин как самого управляющего сигнала, так и его производной. В зоне (11) находится “главная” кнопка приложения - *Load and Start Ramp*, нажатие на которую инициирует загрузку указанных управляющих вэйвформ в PV. В зонах (9) и (11) находятся кнопки *Undo*, позволяющие по цепочке отказаться от последних операций, выполненных инструментами, размещенными в этих зонах.

5.4.3 Реализация функций приложения

В верхней части основного окна расположено меню, содержащее три вкладки: *File*, *RampCurves*, *Tools*.

Во вкладке *File* реализованы различные операции с данными и файлами:

- создание нового набора управляющих вэйвформ для всех элементов (по умолчанию значения берутся из конфигурационного файла *types_config.cfg*),
- чтение из файла сохраненного набора вэйвформ,
- запись набора вэйвформ из памяти приложения в файл.

Вкладка *RampCurves* предоставляет доступ к инструментам, выполняющим масштабирование, копирование, сохранение/восстановление и экспорт/импорт вэйвформ.

Функция масштабирования обеспечивает одновременное масштабирование нескольких выбранных управляющих вэйвформ. В приложении реализовано два способа масштабирования: относительно нулевого значения и относительно значения в указанной точке вэйвформы. Второй способ позволяет масштабировать только ту часть сигнала, которая находится над заданным уровнем, что необходимо, например, в случае масштабирования участка ускорения при фиксированном значении энергии впуска.

Функция копирования выполняет копирование вэйвформы выбранного элемента в другой или другие элементы с использованием индивидуальных пересчетных коэффициентов.

Подпрограммы для сохранения и восстановления отдельных вэйвформ позволяют записать/прочитать уставки для выбранных элементов в/из указанный файл с данными.

Во всех процедурах для работы с управляющими вэйвформами выбор элементов осуществляется в отдельном окне в таблице с помощью флаговых кнопок. В этом же окне также предусмотрены возможности для работы с группами элементов и задание индивидуальных и групповых пересчетных коэффициентов.

Для обеспечения возможности работы с вэйвформой в других приложениях предусмотрен ее экспорт в текстовый файл в простом строковом формате: номер точки управляющей вэйвформы, значение. Также предусмотрен импорт вэйвформы из текстового файла. При импорте между точками делается линейная интерполяция. Окно приложения для импорта позволяет просмотреть график

импортируемой вэйвформы и выбрать элемент, в который она будет записана в памяти приложения.

Вкладка *Tools* в меню основного окна содержит инструменты, позволяющие в отдельных окнах выполнять различные дополнительные операции с вэйвформами и элементами:

- выбор треков управляющих вэйвформ для вывода их на графике в основном окне приложения дает возможность одновременно отобразить на графике (4) в индивидуальном масштабе множество управляющих вэйвформ, что позволяет детально сравнивать управляющие сигналы для различных элементов,
- выбор элементов для записи управляющей вэйвформы из памяти *rammanager* в PV, что позволяет загружать в устройства значения только для выбранных элементов,
- синхронизацию изменения моментов времени цикла в режиме полиномиальной аппроксимации для всех элементов основной группы,
- редактирование бампов (добавление, изменение, удаление) для коррекции управляющей вэйвформы в режиме полиномиальной аппроксимации,

для некоторых элементов также доступны следующие возможности:

- просмотр и редактирование дополнительных параметров для задания управляющей вэйвформы для отдельных элементов (см. п. 5.4.4),
- просмотр значений измеряемых параметров (скаляров и вэйвформ), которые читаются не из PSC, а из другой аппаратуры; на рисунке 5.11 показано дополнительное окно, отображающее график тока тиратрона источника питания магнита-кикера, измеренный при помощи ADC200, в таблице также выводятся значения тока, зафиксированные в заданный момент времени.

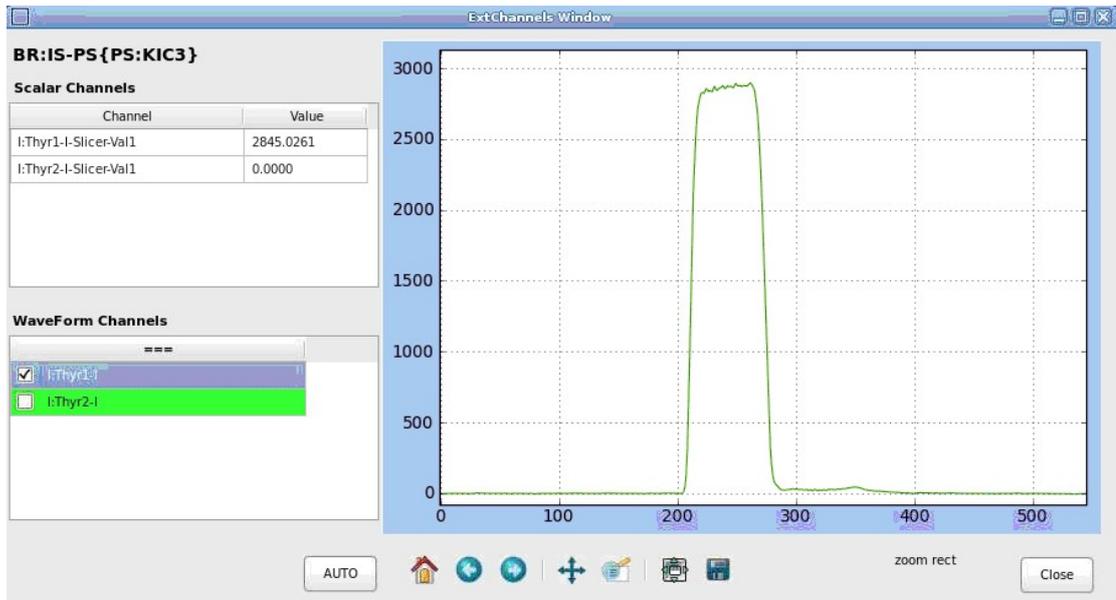


Рисунок 5.11: Окно для вывода значений дополнительных измеряемых параметров.

5.4.4 Специальные возможности для управления отдельными элементами

В режиме работы бустера с повторным впуском пучка, следующим через 100 мс после первого впуска, для отдельных элементов системы инжекции (септума и двух кикеров) требуется формирование управляющего сигнала специальной формы (см. п. 3.5.4 Главы 3). Для обеспечения этой возможности в *rampmanager* предусмотрены специальные инструменты, появляющиеся в виде дополнительных окон при выборе соответствующих элементов. В дополнительном окне вводятся параметры, определяющие форму изменения напряжения ЦАП в промежутке между первой и второй инжекциями.

Особый алгоритм работы реализован для управления напряжением ВЧ бустера. Специфика работы с контроллером CFC (Cavity Field Controller), использующимся для управления ВЧ системой, состоит в следующем:

- управляющие вэйвформы, загружаемые в контроллер CFC, содержат не 10150, а 512 значений,
- вэйвформы по времени соответствуют не всему циклу бустера (1 сек), а первым 850 мс,

- для перехода к новой управляющей вэйвформе в контроллер CFC необходимо загрузить и один раз выполнить промежуточную переходную функцию, плавно переводящую конечное значение старой вэйвформы в начальное значение новой.

В случае работы с ВЧ-системой *rampmanager* преобразует управляющие вэйвформы для ВЧ в стандартный вид (10150 точек), и интерфейс для пользователя остается таким же, как и для остальных элементов. Команда на загрузку новой управляющей вэйвформы инициирует выполнения специального сценария в форме транзакции, состоящей из последовательности нескольких операций по чтению/записи в различные PV для управления ВЧ системой. Ход выполнения сценария отображается в текстовом окне (10) на главном экране приложения (рисунок 5.10).

5.4.5 Сохранение/восстановление данных и загрузка режима в устройства

Для хранения данных конфигурации элементов и уставок выбран INI-формат файлов. Простая структура этого формата позволяет легко обрабатывать данные программно и имеет понятный вид для чтения и изменения в текстовом редакторе. Все конфигурационные данные, касающиеся элементов, содержатся в трех файлах: *types_config.cfg*, *ElementsList.cfg*, *CommonCfg.cfg*.

Файл *types_config.cfg* включает в себя секции, описывающие типы элементов бустера, где содержатся общие характеристики элемента данного типа и списки PV с их параметрами (тип контрольно-измерительного канала, минимальные и максимальные значения и т.п.). Файл *ElementsList.cfg* содержит полный список всех управляемых элементов бустера в виде секций, обозначенных именами элементов. Каждая секция включает единственное ключевое поле, указывающее на тип элемента. Файл *CommonCfg.cfg* состоит из секций, описывающих параметры, характерные для определенной группы элементов.

Приложение *rampmanager* при запуске прочитывает конфигурационные файлы и формирует списки элементов и групп элементов со всеми необходимыми

для работы значениями параметров, которые отображаются в таблицах и на графиках в основном окне приложения.

Значения управляющих вэйвформ для выбранных элементов из памяти приложения также сохраняются в INI-файлах. *Rampmanager* может прочитать значения уставок из выбранного INI-файла, а затем, после возможной редакции, либо снова сохранить и уставки, и информацию о способе их редактирования в файл, либо записать значения в PV для загрузки в управляющие контроллеры. В случае одновременной записи в PV значений уставок для всех элементов, т.е. при загрузке режима работы установки, при выполнении условия, что предварительно данные были сохранены в INI-файле, в специальную PV BR{OperSetName} заносится имя этого INI-файла, обозначающее имя режима. Таким образом решается задача согласования режима, редактируемого с помощью *rampmanager*, и режимов, сохраненных с помощью приложения *binspr* (см. п. 6.1.6 Главы 6).

5.5 Управление группами элементов

При настройке режима работы ускорителя возникает задача одновременного масштабирования функций управления несколькими элементами, например: при настройке прохождения пучка по кольцу бустера требуется одновременного изменять значений сразу в трех источниках питания диполей или, другой случай, для настройки секступольной компоненты (хроматизма) кольца нужно изменять ток сразу нескольких секступольных корректоров. Для решения таких задач разработано универсальное Python-приложение *adjuster*, которое позволяет:

- с индивидуальными весами изменять масштабы управляющих вэйвформ сразу у нескольких элементов,
- выбирать группы элементов из заранее сконфигурированных списков,
- сравнивать текущее и изначальное значения параметра,
- возвращаться к предыдущим значениям.

Список элементов для управления задаётся в конфигурационном INI-файле, прочитываемым приложением при запуске. В INI-файле элементы перечисляются в виде секций с указанием параметров, отображаемых в окне приложения

(см. рисунок 5.12): активность данного параметра, относительный масштаб изменения параметра, а также имя PV. Шаг однократного занесения для всех параметров задается в “%” относительно текущего состояния.

Name	<input checked="" type="checkbox"/>	Coef	Live	Reference	Ratio
BF	<input checked="" type="checkbox"/>	1.00	56.63	56.63	0.0 %
BD2	<input checked="" type="checkbox"/>	1.00	49.0001	49.0001	0.0 %
BD1	<input checked="" type="checkbox"/>	1.00	49.0001	49.0001	0.0 %

Рисунок 5.12: Окно приложения *adjuster* для масштабирования управляющих вэйвформ нескольких элементов.

Приложение *adjuster* позволяет управлять параметрами бустера, зависящими от пропорционального изменения значений нескольких элементов. Таким образом, например, с помощью конфигурации связей токов двух квадрупольных линз, фокусирующих пучок в горизонтальной и вертикальной плоскостях, организуется регулировка бетатронных частот.

5.6 Управление энергией ускоренного пучка

Для настройки впуска пучка как в бустер, так и в основное кольцо NSLS-II необходимо иметь возможность в небольшом диапазоне перестраивать у бустера энергию впуска и выпуска.

Энергия циклического ускорителя (т.е. энергия частиц, движущихся в нем по замкнутой равновесной траектории) задается магнитной жесткостью $B \cdot R$, где B – средняя величина индукции магнитного поля, R – средний радиус траектории частиц. В релятивистском случае выражение для энергии циклического ускорителя записывается в следующем простом виде [25]:

$$E[\text{МэВ}] = 300 \times B[\text{Т}] \times R[\text{м}].$$

Выражение для вычисления энергии бустера можно записать в общем виде следующим образом:

$$E = \frac{300}{2\pi} \sum_i (B_i \times L_i), \quad (2)$$

где i – число дипольных магнитов,

B – поле магнита [Т], L – длина магнита [м], E – энергия [МэВ].

Для вычисления энергии бустера через значения токов в магнитах выражение (2) записывается так:

$$E(t) = \frac{300}{2\pi} (N_{BD1} \times L_{BD} \times I_{BD1}(t) \times c_{BD1}(t) + N_{BD2} \times L_{BD} \times I_{BD2}(t) \times c_{BD2}(t) + N_{BF} \times L_{BF} \times I_{BF}(t) \times c_{BF}(t)),$$

где N_{BD1} , N_{BD2} , N_{BF} – число дипольных магнитов, подключенных, соответственно, к источникам питания BD1, BD2 и BF,

L_{BD} , L_{BF} – длины диполей типа BD и BF [м],

I_{BD1} , I_{BD2} , I_{BF} – токи источников питания BD1, BD2 и BF [А],

c_{BD} , c_{BF} – коэффициенты пересчета тока в поле [Т/А].

Магнитные измерения диполей, выполненные после изготовления магнитов в ИЯФ СО РАН [142], дают оценку коэффициентов пересчета тока в поле, которая приведена в Таблице 5.1.

Таблица 5.1. Коэффициенты пересчета для определения величины поля для основных диполей бустера.

	Инжекция, E=200 МэВ	Выпуск, E=3000 МэВ
c_{BD}	0.075Т/48.7А=1.5400E ⁻³	1.127Т/742А=1.5189E ⁻³
c_{BF}	0.031Т/56А=5.4965E ⁻⁴	0.46Т/863.7А= 5.3259E ⁻⁴

Выражения и зависимости, приведенные выше, реализованы в графическом Python-приложении для подстройки энергии бустера и канала транспортировки пучка в основное кольцо.

Простой интерфейс приложения, представленный на рисунке 5.13, позволяет вносить относительное изменение в расчётную энергию бустера, затем по нажатию кнопки *Apply* пропорциональные изменения уставок источников

питания дипольных магнитов заносятся в соответствующие PV. При вычислении значения энергии бустера учитывается поправка пересчетного коэффициента тока в поле в соответствии с измерениями магнитного поля [143].

Опционально доступна подстройка энергии канала транспортировки пучка в основное кольцо BTS, для которого тоже учитывается эффект насыщения магнитов.

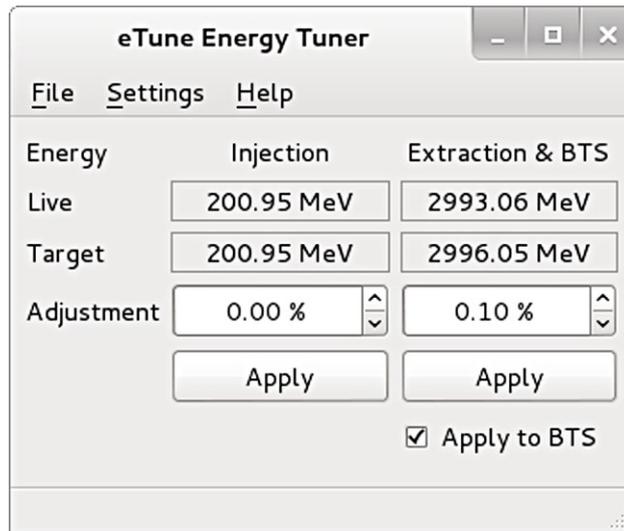


Рисунок 5.13: Окно приложения для подстройки энергии.

Меню *Settings* вызывает окно для задания моментов цикла бустера, в которые происходит вычисление энергии на впуске и выпуске. Заданные значения сохраняются в специальных PV, размещенных в ИОС *br-energy*, работающем в сервере **interlockio-br-rgb**.

5.7 Автоматизация управления бустером

5.7.1 Приложение для автоматической коррекции замкнутой орбиты

Ввиду наличия разброса параметров поворотных магнитов и линз, определяющих геометрию и величину магнитного поля, а также случайных неточностей выставки магнитных элементов на кольце в циклических ускорителях возникает задача коррекции замкнутой орбиты пучка. Как правило, для этого используются относительно небольшие отдельные магниты, отклоняющие частицы в горизонтальном или вертикальном направлении, или дополнительные обмотки, заложенные в основные магниты. Кроме того, в

процессе работы возникает необходимость локального искажения замкнутой орбиты, например, в случае инъекции или выпуска пучка, когда нужно сместить положение равновесной орбиты с целью уменьшить угол изменения траектории выпускаемых или выпускаемых частиц.

На кольце бустера для коррекции орбиты установлено 20 корректирующих магнитов горизонтального и 16 - вертикально направления. Для питания этих магнитов используются индивидуальные источники, позволяющие независимо управлять токами корректоров в течение всего цикла бустера.

В процессе ускорения пучка изменяются поля и их соотношения в основных магнитах, что приводит к динамическому изменению положения равновесной орбиты. В случае бустера задача настройки коррекции орбиты усложняется тем, что за малое время 300 мс в процессе ускорения пучка необходимо выполнить несколько измерений положения орбиты и вычислить новые уставки токов для корректирующих магнитов.

Работа приложения коррекции орбиты основана на использовании информации о нормированном отклонении положения орбиты пучка во всех местах ее измерения, возникающем при изменении тока отдельно в каждом корректоре. Набор таких измеренных отклонений, выполненных для всех корректоров, называется матрицей откликов корректоров. Соответственно, для эффективного управления орбитой нужно на кольце иметь достаточное число измерителей положения орбиты пучка – пикапов (см. п. 3.7 Главы 3), желательно, расставленных, как минимум, через четверть периода бетатронных колебаний.

Измерение положения орбиты в различные моменты рэмпа выполняется программной системой на базе ИОС, описанной в п. 4.8 Главы 4. Эта система после ускорения пучка выдает сорок PV в виде вэйвформ, содержащих орбиты, измеренные в заданные моменты времени рэмпа.

Для коррекции орбиты в бустере разработано приложение *soso*, которое использует методику итераций для достижения конечного результата, отлаженную и проверенную на комплексе ВЭПП-4. Зная измеренное текущее положение пучка в нескольких моментах ускорения и используя матрицу

откликов корректоров, *coco* вычисляет добавки для значений токов всех или некоторой выбранной части корректоров.

После подачи команды на обработку коррекции *coco* автоматически цикл за циклом начинает выполнять итерации по подстройке текущей орбиты к орбите цели. В процессе каждой итерации вычисляются добавки тока в корректоры в точках рэмпа, в которых измеряется орбита. Добавки заносятся в управляющие вэйвформы и записываются в PV. В следующем цикле работы бустера новые значения обрабатываются, и новые измерения пикапов используются для следующей итерации. Число шагов для обработки ограничивается при помощи специального PV. Таким образом, за несколько шагов *coco* подгоняет текущую орбиту пучка к орбите цели. Для обеспечения гибкости управления в течение ускорения орбита цели для каждого момента коррекции задается индивидуально.

Управляющие вэйвформы для всех корректоров, полученные после обработки *coco*, показаны на первой половине графика на рисунке 4.3 Главы 4. На графиках вэйвформ видно, как увеличиваются токи корректоров с ростом энергии пучка и как резко в соответствующих корректорах они возрастают перед моментом выпуска, когда в прямолинейном промежутке бустера XS, где расположены импульсные элементы для выпуска пучка, непосредственно перед выпуском делается локальное искажение орбиты, подводящее пучок в горизонтальной плоскости вплотную к магниту-септуму.

Управление и мониторинг работы приложением *coco* осуществляется через PV, размещенные во вспомогательном softIOC *br-coco*, работающем в сервере **intrlockioc-br-rgb**. Для доступа к этим PV разработано специальное окно, находящееся на главном экране программы наблюдения орбиты пучка (см. рисунок 6.17 Главы 6).

Интерфейс позволяет задавать режим работы *coco* (режим коррекции орбиты или режим измерения матрицы откликов) и останавливать приложение во время обработки (кнопка *Off*). В окне также задаются следующие параметры: коэффициент для занесения расчетных добавок, минимальная и максимальная энергии, ограничивающие диапазон работы *coco*. Приложение в процессе своей

работы пишет в соответствующие PV свой статус, номер очередной итерации и информационные сообщения, которые выводятся в окне в поле *Message*.

5.7.2 Система автоматической подстройки параметров элементов синхротрона

Стабилизация отработки большей части управляемых параметров синхротрона (токов в магнитах, напряжения ВЧ и т.п.), влияющих на пучок, осуществляется по следующей схеме: ЦАП с требуемой точностью задает опорное напряжение, определяющее поведение управляемого параметра, а источник или система питания с требуемой точностью обрабатывают это опорное напряжение. В случае изменения условий работы оборудования (в основном это связано с изменениями температуры нагрузки или силовых и высоковольтных узлов источника питания) система стабилизации источника питания обеспечивает требуемую точность отработки.

Управление импульсными элементами бустера не соответствует схеме, изложенной выше: управляемым параметром является величина напряжения на накопителе энергии, которая однозначно не обеспечивает заданную величину тока в нагрузке. В случае изменения температуры нагрузки или момента запуска ключа, коммутирующего ток в нагрузку, происходит изменение величины тока в нужный момент времени, и это изменение никак не может быть скорректировано системой стабилизации источника питания.

Для решения проблемы стабилизации полей импульсных элементов впуска/выпуска пучка, разработано Python-приложение *autotune*, в котором использованы методики стабилизации, отлаженные в схемах управления импульсными системами комплекса ВЭПП-4 (см. п.п. 2.2.3, 2.2.5 Главы 2). Приложение изменяет значение управляемого параметра (напряжения на накопителе энергии), обеспечивая стабилизацию параметра, влияющего на движение пучка (ток или поле в магните в момент пролета пучка).

Приложение *autotune* использует следующие входные данные:

- конфигурационные параметры, определяющие работу алгоритма (величина усреднения, максимальное допустимое значение уставки, максимальная величина единовременной коррекции, вес вносимой коррекции, порог отклонения измерения от опорного значения, при выходе за который будет осуществляться подстройка и т.п.) и имена PV для ввода/вывода,
- текущие параметры, значения которых содержатся в PV, вычисляются и используются в процессе выполнения цикла алгоритма,
- измеренные и уставленные значения, необходимые для вычислений.

Цикл работы приложения определяется обновлением значений PV, используемых в процессе подстройки. Все значения, которые используются в процессе выполнения цикла работы алгоритма коррекции делятся на две группы: стабильные значения и циклически меняющиеся значения. Стабильные значения (уставки) в процессе работы изменяются редко или вовсе не меняются. Изменение стабильных значений приводит к старту цикла усреднения. Циклически меняющиеся значения могут быть использованы в процессе вычислений только после их обновления. По окончании выполнения заданного числа усреднений в PV управляемого параметра заносится новая уставка, соответственно, цикл усреднения начинается заново.

После выполнения очередного шага подстройки для каждого управляемого параметра *autotune* также обновляет (устанавливает в исходное состояние) значение PV соответствующего счетчика в softI/OС *br-mflags* обработки флагов системы мониторинга, чем подтверждает функционирование автоподстройки. Схема взаимодействия системы автоподстройки с системой мониторинга состояния бустера рассмотрена в п. 6.5.3 Главы 6.

Конфигурационные данные хранятся в INI-файле *algorithms.cfg* в виде отдельных секций для каждого алгоритма автоподстройки. При загрузке приложения для каждой секции создается соответствующий набор классов, работающих со своими параметрами.

Простой графический интерфейс основного окна *autotune* (см. рисунок 5.14) отображает состояние подстроек элементов: в левой части окна расположены флаговые кнопки включения механизмов подстройки, в средней части - индикаторы, показывающие активность каждого механизма в виде окрашенной полоски, длина которой соответствует фазе вычисления усреднения. Справа от индикатора для каждого регулируемого элемента расположена кнопка *Details*, нажатие на которую вызывает запуск дочернего окна, в котором на графике отображаются значения параметров, задействованных в процессе регулировки.

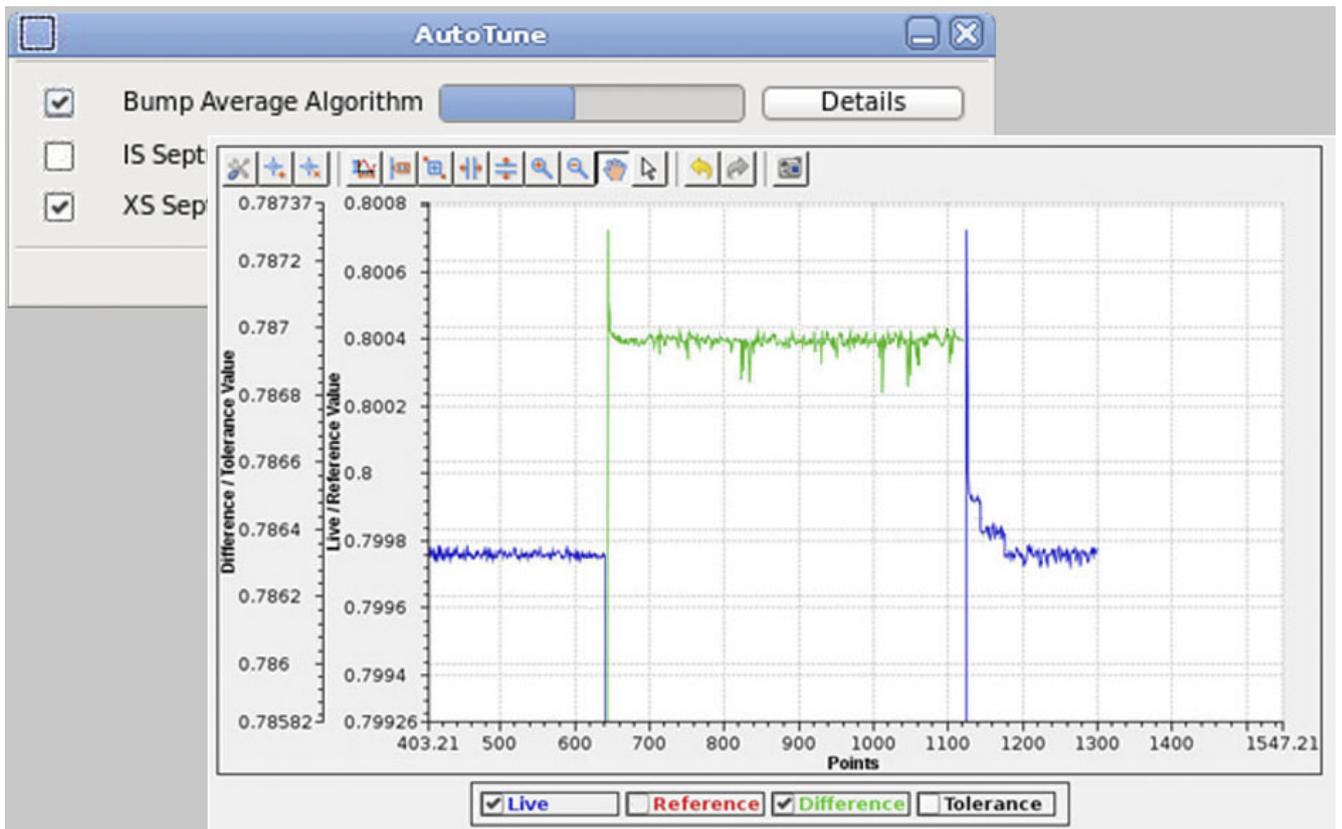


Рисунок 5.14: Главное окно приложения *autotune* и окно, отображающее изменение параметров в процессе подстройки.

График имеет две шкалы: в масштабе одной из них отображаются измеренное и опорное значения регулируемого параметра, а в масштабе другой - разность значений и точность подстройки. На графике, показанном на рисунке 5.14, отображена история процесса регулировки поля в инжекционном магните-септуме в ситуации, когда работавший источник питания магнита был выключен, оставался выключенным в течение примерно 500 секунд, а затем был включен. При этом поле в магните за счет снижения температуры железа

возросло на относительную величину примерно 10^{-3} , что недопустимо для успешной инъекции пучка. После включения источника питания приложение *autotune* первым же действием сразу понизило уставку напряжения на конденсаторной батарее таким образом, что величина отклонения поля уменьшилась до 10^{-4} . Следующие итерации привели к установлению точного режимного значения поля.

Изменяющиеся условия работы импульсных систем (изменение температуры различных компонентов устройств, изменение параметров компонентов устройств, изменение температуры в тоннеле бустера) могут приводить к заметным отклонениям значений полей в импульсных магнитах при фиксированной уставке опорного напряжения ЦАП. Например, в случае докапливания пучка в основном кольце по сценарию импульсные элементы бустера должны периодически включаться на короткое время (несколько выстрелов). Из-за недостатка времени для прогрева магнитов значения полей в них не будут успевать выходить на стабильный уровень. В этой ситуации приложение *autotune* при включении накопления сразу подстроит, а затем стабилизирует значения полей и токов, и тем самым обеспечит высокую эффективность накопления пучка в основном кольце NSLS-II.

5.8 Интеграция сторонних приложений

Важной характеристикой ПО системы управления является его совместимость (т.е. возможность обмена данными) с приложениями, разработанными для моделирования и управления различными процессами в других системах управления. Примером таких приложений, применение которых может быть востребовано для изучения и настройки бустера, являются программные пакеты для моделирования оптики и диагностики с использованием пучка: *Elegant* [144] и *LOCO* [145].

Система управления бустера, базирующаяся на использовании EPICS, через интерфейс Channel Access, имеющий реализацию практически для всех языков программирования, предоставляет возможность для обмена данными с любыми

сторонними приложениями, в том числе, с приложениями, написанными с использованием языка инженерного программирования Matlab, для которого имеются соответствующие библиотечные процедуры [146].

В качестве примера возможности реализации расчетов в разработанной системе управления можно привести пример коррекции бетатронных частот в процессе ускорения пучка. В период запуска бустера были выполнены эффективные процедуры коррекции, основанные на использовании измерений бетатронных частот, выполняемых специально разработанной системой (см. п. 3.7 Главы 3). Вычисление поправок для управляющих вэйвформ источников питания квадрупольных линз выполнялось с помощью приложения, написанного на Mathcad, результаты каждой итерации с помощью Python-скрипта заносились в PV для отработки. После нескольких итераций было достигнуто ускорение 95 % электронов, инжектируемых в бустер [147].

Глава 6

Сервисные операторские приложения системы управления бустера

6.1 Приложение для сохранения/восстановления режимов

Для управления большим комплексом устройств, включающих множество управляемых и измеряемых параметров, важнейшую роль играет система сохранения и воспроизведения настроенных режимов работы как всего комплекса в целом, так и отдельных его систем. Режим работы представляет собой некий набор согласованных значений контрольно-измерительных параметров, который характеризует состояние установки или системы.

Основные функции, требуемые от программной системы сохранения/восстановления режимов, следующие:

- сохранение согласованных значений управляемых и измерительных параметров установки,
- просмотр, сравнение и анализ наборов сохраненных значений,
- восстановление сохраненных значений в устройствах управления.

Система сохранения/восстановления становится востребованной уже на самом раннем этапе создания установки – при монтаже и начальной отладке работы оборудования, когда регулярно возникает потребность сохранять и восстанавливать режимы работы для отдельных устройств, переключаться между различными настроенными режимами работы, отслеживать и анализировать изменения различных параметров.

6.1.1 Функциональные возможности, заложенные в разработку системы сохранения/восстановления режимов

Основное требование к системе сохранения/восстановления параметров бустера заключается в том, что она должна обеспечивать сбор и сохранение согласованных данных, т.е. данных, относящихся к одному циклу ускорения пучка в синхротроне. Система управления бустером имеет следующие особенности:

- циклическая работа, что приводит к периодическому обновлению данных и их доступности для обработки только в период времени, равный продолжительности цикла,
- поведение многих параметров бустера в течение цикла описывается массивами значений, т. е. система управления оперирует с большим количеством массивов данных,
- данные в системе управления обновляются с разной периодичностью и в разные моменты цикла, и требуют согласования друг с другом. Например, измеренные данные о состоянии источников питания появляются только после завершения цикла работы бустера, данные о токе пучка доступны в процессе выполнения цикла, а обновление информации о состоянии вакуума вообще с циклом работы не связано.

Чтобы обеспечить согласованность данных используется система привязки времени обновления переменных к времени старта цикла, описанная в п. 3.4.4 Главы 3.

Новым свойством, заложенным в систему сохранения/восстановления данных бустера, является возможность восстановления не только значений управляемых параметров, но и измерений. Кроме восстановления значений параметров управления, управляемые и измеренные значения восстанавливаются еще в так называемые PV опорных значений, которые используются для работы системы мониторинга (см. п. 6.5).

Третье свойство системы сохранения/восстановления параметров - гибкость конфигурации сохраняемых и восстанавливаемых параметров. Выполнение этого свойства реализовано с помощью списков имен PV и правил, по которым выполняется восстановление (см. п. 6.1.2).

Одна из функций, заложенных в систему – это обеспечение возможности оперативного запоминания и восстановления текущего состояния установки. Эту операцию удобно использовать в случае настройки работы бустера, когда при выполнении пошаговых действий для фиксации новых настроек нужно часто запоминать текущее состояние установки.

Важным требованием к интерфейсу системы является обеспечение возможности удобного просмотра и сравнения как сохраненных значений, так и значений, прочитанных из аппаратуры. Это предоставляет гибкие возможности для оперативной диагностики и анализа режимов работы бустера.

На момент создания системы управления бустера ни одна из нескольких существующих разработок по сохранению/восстановлению данных, реализованных на базе EPICS, полностью не удовлетворяла перечисленным выше требованиям. Были проанализированы системы, разработанные и используемые в различных ускорительных лабораториях [148 - 150], в том числе и в BNL [151], и на основе этого анализа и изложенных выше требований было создано приложение *binpsr*, описанное в данном разделе.

Операторский интерфейс приложения *binpsr* разработан с использованием Python и графической библиотеки PyQt. Т.к. большая часть параметров бустера представлено в виде вэйвформ, приложение *binpsr* при визуализации данных, в первую очередь, ориентировано на возможность работы с вэйвформами (просмотр и сравнение треков на графиках).

6.1.2 Списки имен PV и сохраненных режимов. Главное окно приложения

Для обеспечения возможности гибкого конфигурирования сохраняемых и восстанавливаемых значений параметров вводятся следующие понятия: “список параметров” (список имен PV) и “правила восстановления”.

При сохранении режима списки параметров определяют те PV, значения которых должны быть сохранены. Соответственно, для каждого списка PV в процессе работы формируется свой набор сохраненных режимов (состояний параметров). Для формирования списков PV используются текстовые конфигурационные файлы INI-формата.

Правила для восстановления сохраненных значений содержатся в начальной части каждого файла со списком PV. Правила представляют собой перечень регулярных выражений, включающих алгоритмы действий для различных имен PV. Например, выражение вида

$$^{(*)}\text{-SP\$} = *, *_\text{Ref}$$

обозначает, что значения всех PV, имена которых заканчиваются на -SP (аналоговые уставки) и на -Cmd (бинарные уставки), при восстановлении будут записаны в самих себя, а также в PV с теми же именами, но еще имеющими постфикс _Ref (PV, содержащие опорные значения).

Для сохранения значений всегда используется единственное правило: сохранять значение PV с собственным именем. Система может сохранять как просто текущие значения PV, так и согласованные значения, т.е. относящиеся к одному циклу бустера.

При запуске приложение *binpsr* открывает главное окно (см. рисунок 6.1), в котором есть три функциональных зоны: зона выбора списка PV (1), зона выбора сохраненного режима (2) и зона выполнения операций (3).

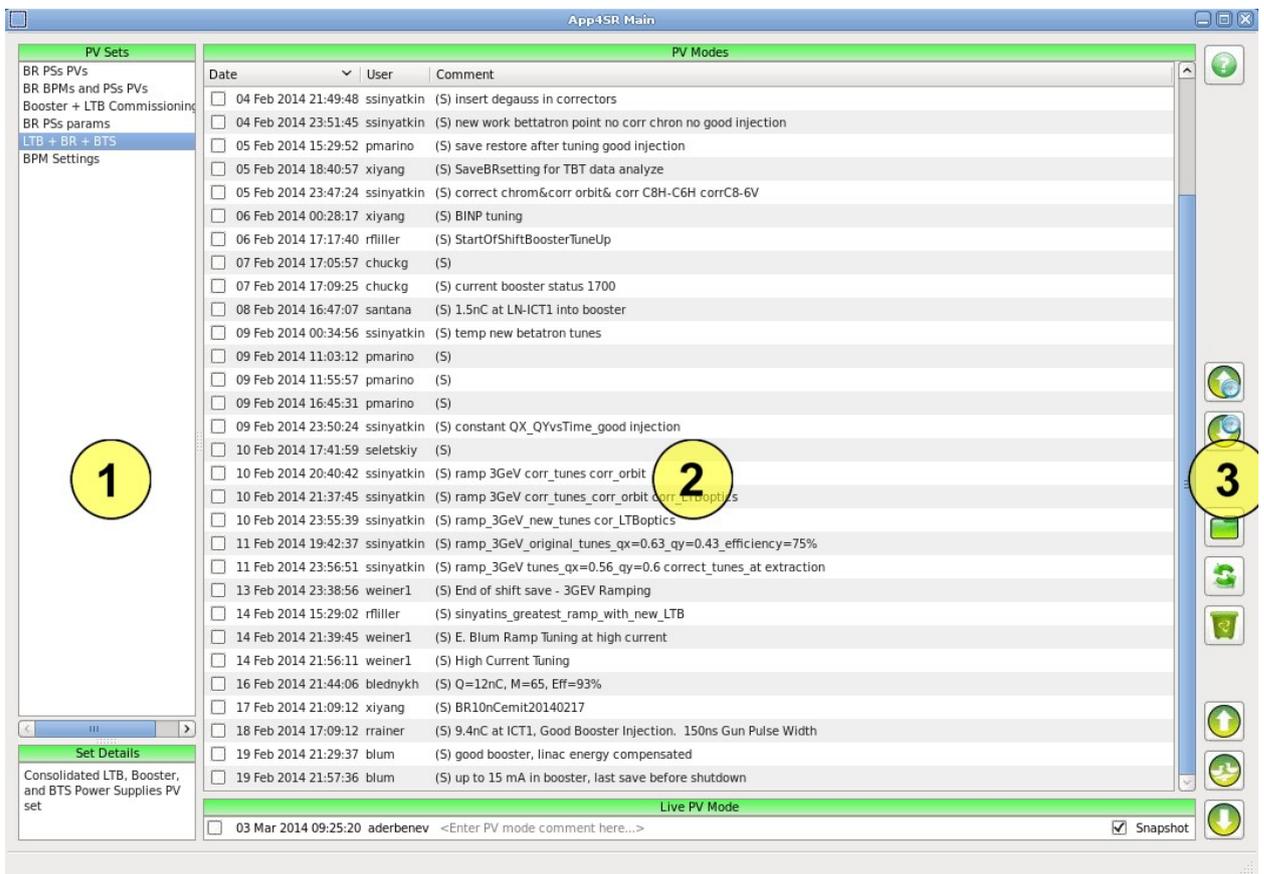


Рисунок 6.1: Главное окно приложения *binpsr*.

В нижней части зоны (1) размещается окно для вывода комментария, относящегося к выбранному списку PV.

В основной части зоны (2) размещается список имеющихся сохраненных режимов, относящихся к списку PV, отмеченному в зоне (1), с флаговыми

кнопками для выбора, а в нижней части зоны находится флаговая кнопка для выбора текущего состояния бустера. Здесь же в нижней части зоны (3) расположена флаговая кнопка *Snapshot*, активное состояние которой соответствует режиму сбора данных без согласования с циклом бустера.

В средней части зоны выполнения операций (3) сверху вниз расположены пять кнопок-иконок, обеспечивающих работу с режимами и списками PV.

Две верхние кнопки реализуют т.н. оперативное восстановление и сохранение режима, когда текущее состояние параметров запоминается только в оперативной памяти приложения. Нажатие второй кнопки вызывает запоминание текущего состояния, при этом запомненное состояние сразу же восстанавливается в устройства, приводя к обновлению всех референсных значений. В результате этой процедуры возникает новое “опорное” состояние бустера, являющееся отправной точкой для дальнейшей настройки. Нажатие же верхней кнопки приводит к восстановлению предварительно запомненного режима. Описанная функциональность введена для того, чтобы избежать необходимости сохранения множества промежуточных режимов при выполнении пошаговой настройки бустера.

Третья сверху кнопка предназначена для перехода к другой рабочей директории с файлами (при запуске приложения директория выбирается стандартным образом).

Нажатие четвертой кнопки инициирует прочтение файлов с описанием наборов PV и перерегистрацию в приложении записанных режимов. Это действие может понадобиться по следующим причинам:

- был добавлен новый набор PV,
- был изменен какой-либо набор PV,
- были сохранены новые режимы, но с помощью другого приложения.

Наконец, пятая сверху кнопка предназначена для уничтожения режима, выбранного в списке.

В нижней части зоны (3) расположены три кнопки-иконки, управляющие основной функциональностью приложения:

- восстановлением выбранного сохраненного режима,
- визуализацией и сравнением выбранных режимов,
- сохранением текущего состояния в файл.

При нажатии кнопок восстановления и сохранения выполняются действия, описанные в п. 6.1.3. Нажатие кнопки сравнения вызывает соответствующие дочерние приложения: в случае выбора единственного режима из списка, представленного в зоне (2) главного окна, запускается приложение просмотра режима (см. п. 6.1.4), в случае выбора нескольких режимов – приложение сравнения режимов (см. п. 6.1.5). При этом в качестве просматриваемого/сравниваемого режима может быть выбрано текущее состояние бустера (флаговая кнопка в нижней части зоны (2) главного окна).

6.1.3 Процедуры сохранения и восстановления

При сохранении значений уставок приложение *binpsr* может работать в двух режимах: просто чтение текущих значений PV и чтение согласованных значений PV, когда приложение дожидается, чтобы значения всех PV из выбранного списка соответствовали одному циклу. При выполнении процедуры сохранения все собранные значения в сериализованном формате записываются в новый файл, имя которого стандартно формируется с использованием даты и времени сохранения, в указанную директорию.

При выполнении восстановления значений приложение расшифровывает правила, содержащиеся в выбранном списке, анализирует сам список имен PV и имена PV, содержащиеся в файле с сохраненными значениями. Результаты проверки выводятся в окне подтверждения запроса на восстановление. В случае, если возникнут расхождения между списком и сохраненными значениями, приложение при подтверждении действия по восстановлению, восстановит только значения тех PV, имена которых присутствуют и в списке, и среди сохраненных значений.

6.1.4 Просмотр режима

Окно просмотра режима приложения *binpsr* разбито на четыре зоны (см. рисунок 6.2): (1) зона вывода треков выбранных вэйвформ, (2) зона выбора вэйвформ для просмотра, (3) зона вывода скалярных и бинарных значений и (4) зона команд.

В зоне (1) в графическом виджете PyQt выводятся треки всех выбранных вэйвформ. Над графиком отмечены имена всех PV, треки значений которых выведены, и указан цвет соответствующего трека. На графике выведены три вэйвформы, отображающие поведение ЦАП для трех источников питания квадрупольных магнитов. Первая часть графика (до 400 мс) отображает период цикла бустера, в котором происходит ускорение пучка, вторая часть – процесс возврата поля с переманчиванием.

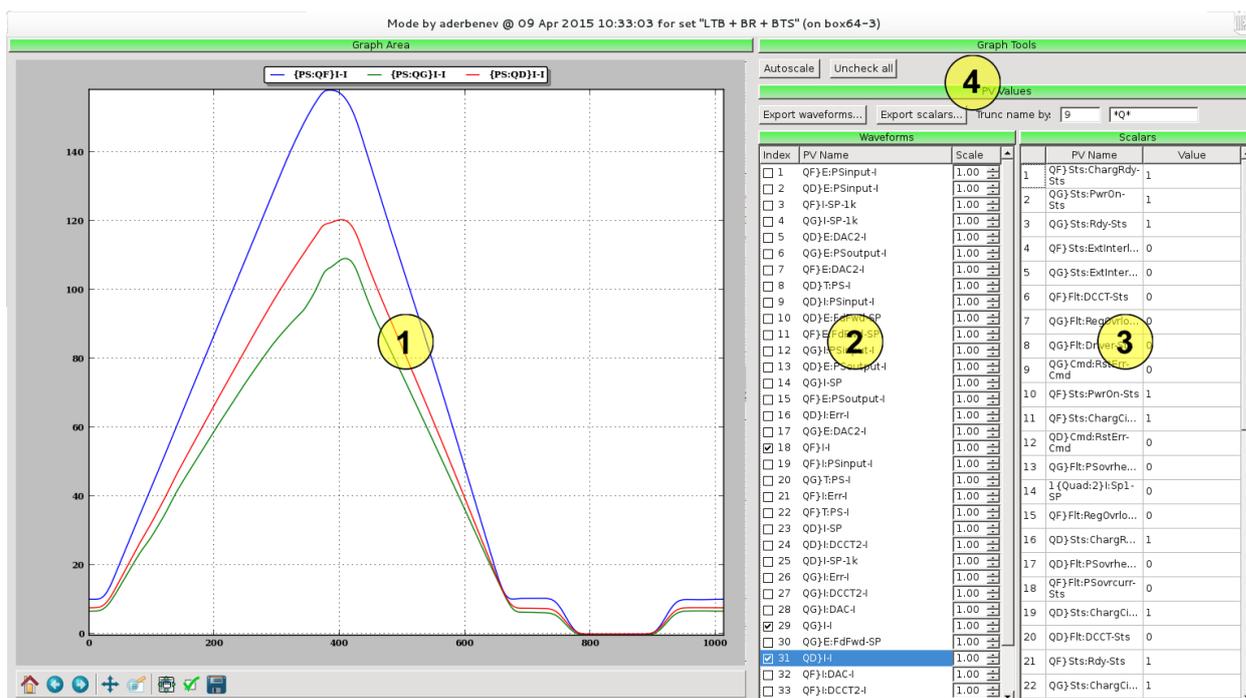


Рисунок 6.2: Окно приложения *binpsr* для просмотра выбранного режима.

В зоне (2) выводится перечень PV, имеющих формат вэйвформ, соответствующий списку, выбранному в зоне (1) в главном окне. В левой части перечня PV находятся флаговые кнопки для выбора, а в правой части – масштабирующие коэффициенты, позволяющие наблюдать и сравнивать на

одном графике сигналы с существенно различающимися амплитудами. В зоне (3) отображается список скалярных PV и их значений.

В зоне (4) расположены различные функциональные кнопки: *Autoscale* для автомасштабирования графика, *Uncheck all* – для снятия активации со всех флаговых кнопок, *Export waveforms* и *Export scalars* – для экспорта выведенных данных в текстовый файл. Здесь же расположены два поля ввода для обработки списка имен PV:

- для ввода числа символов, удаляемых слева при выводе имени в перечне PV; использование этого параметра позволяет, отбросив символы, отражающие общую информацию о размещении элемента, укоротить имя PV, и оставить только часть, касающуюся функциональности параметра; при этом появляется возможность сузить поля (2) и (3), расширив при этом область графиков,
- для ввода шаблона имени с использованием квантификаторов * и ?, что позволяет выводить список только интересующих имен; например, на рисунке 6.2 с помощью шаблона “*Q*” выведены имена всех PV, относящихся к источникам питания квадрупольных магнитов.

6.1.5 Сравнение режимов

Дочернее приложение для сравнения режимов позволяет работать с двумя или тремя wybranными режимами. Первый выбранный режим считается опорным, и значения переменных в остальных режимах сравниваются со значениями опорного режима. Если в качестве одного из режимов выбрано текущее состояние бустера, то оно автоматически рассматривается в качестве опорного режима. Окно приложения для сравнения режимов представлено на рисунке 6.3.

Index	Date	User	Comment
1	03 Mar 2014 09:27:36	aderbenev	Current condition
2	11 Feb 2014 19:42:37	ssinyatkin	ramp_3GeV_original_tunes_qx=0.63_qy=0.43_efficiency=75%
3	19 Feb 2014 21:57:36	blum	up to 15 mA in booster, last save before shutdown

Index	PV Name	Mode 1	Mode 2	Diff 2-1	Diff 2-1 (%)	Mode 3
1	BR:IS-PS{PS:KIC3}Sts:EmergButton-Sts	0	0	0	-	0
2	BR-PS{PS:BD1}Sts:CircBreaker-Sts	0	0	0	-	0
3	BR:A3-PS{6A:SD2}Cmd:PwrOn-Cmd	0	1	1	-	1
4	BR:A2-PS{6A:SD2}Cmd:PwrOn-Cmd	0	1	1	-	1
5	BR:A1-PS{6A:SD2}Cmd:PwrOn-Cmd	0	1	1	-	1
6	BR:IS-PS{PS:KIC2}Sts:TrigUnitRdy-Sts	0	1	1	-	0
7	BR:IS-PS{PS:KIC2}Cmd:RstErr-Cmd	0	0	0	-	0
8	BR-PS{PS:BD2}Fit:GNDleak-Sts	0	0	0	-	0
9	LTB-MG{Cor:2}I:Sp1-SP	0	0	0	-	0
10	BTS-MG{Quad:4}I:Sp1-SP	0	0	0	-	0
11	BR:XS-PS{PS:KIC2}Fit:HVPsovrvoltage-Sts	0	0	0	-	0

Рисунок 6.3: Окно приложения *binpsr* для сравнения режимов.

В окне имеются три зоны: зона, отображающая список выбранных режимов с комментариями (1), зона, содержащая список PV (2) и зона (3), в которой в табличном виде выводятся скалярные значения выбранных режимов и разности со значениями опорного режима, выраженные в абсолютных и относительных единицах.

Выше зоны (2) расположены поля ввода для обработки списков PV, работа которых описана в п. 6.1.4.

При выборе PV из списка (2) открывается дочернее окно, содержащее график с треками вэйвформ из выбранных режимов для этого PV, и треками разностей.

6.1.6 Запись операций

Для контроля и анализа действий персонала предусмотрена запись всех операций, связанных с сохранением и восстановлением различных режимов работы. Запись выполняется в специальный текстовый log-файл с указанием даты, времени, имени пользователя и выполненного действия.

Чтобы обеспечить передачу информации о загруженном режиме между различными приложениями предусмотрен набор специальных PV строкового

формата, содержащихся в SoftIOC *br-operation*, работающем в сервере **interlockioc-br-rgb** (см. п. 4.2 Главы 4). В этих PV содержатся данные, записанные как приложением *binpsr*, так и другими приложениями о времени операции с режимами, имени оператора, имени загруженного режима. Например, в приложение для редактирования управляющих вэйвформ *rampmanager* (см. п. 5.4.5 Главы 5) в специальное PV записывает имя файла, в который сохраняет управляющие вэйвформы загруженные им в устройства. Это имя сохраняется приложением *binpsr* вместе с режимом работы бустера, и в дальнейшем при необходимости может быть использовано для коррекции управляющих вэйвформ этого режима с помощью приложения *rampmanager*.

6.2 Операторские экраны отображения состояния бустера и его систем

Одной из основных задач визуализации при создании ПО является задача разработки экрана, отображающего общее состояние установки с индикацией основных ее параметров, в том числе – параметров пучка. При этом информация должна быть представлена как в численной, так и в графической форме в виде графиков изменения основных параметров за некоторый интервал времени. В окне также должно быть представлено состояние основных элементов и систем установки, что отражает основные детали ее функционирования. При оформлении такого окна желательным условием является использование схемоориентированного подхода к размещению информации, при котором используется привязка обозначений элементов и вывода данных к схеме, отражающей структуру установки. Важно, чтобы информация была сгруппирована по функциональному назначению. Пример основного статусного окна бустера, отображающего состояние всех его систем, приведен на рисунке 6.4.

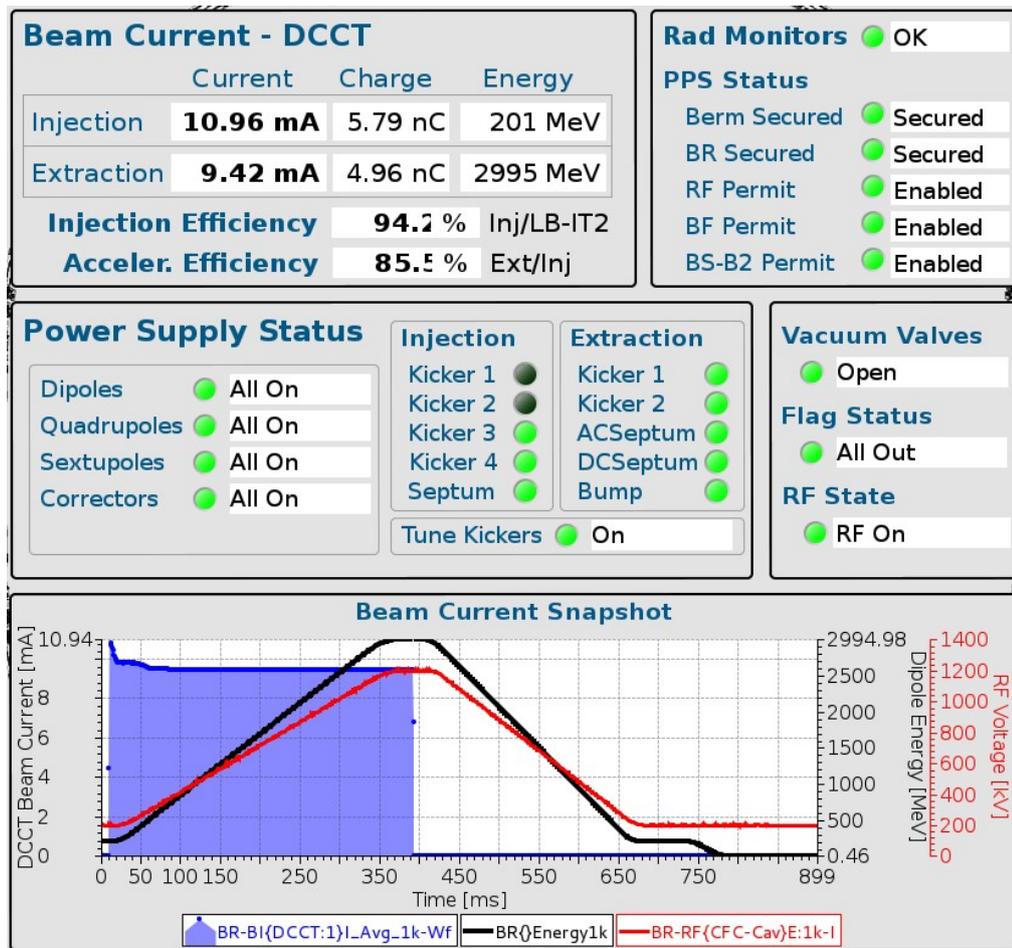


Рисунок 6.4: Основное окно отображения состояния бустера.

В верхней части окна отображаются основные параметры пучка: ток (заряд) пучка на впуске и выпуске, а также энергия частиц. Ниже выводятся значения эффективностей захвата и ускорения пучка. Справа с помощью цветовой индикации обозначается состояние систем блокировок, определяющих возможность работы с пучком. В средней части окна отображаются суммарные индикации работоспособности источников питания. В нижней части окна самые важные параметры для наглядности выводятся в графическом виде: ток пучка, энергия частиц и ускоряющее напряжение на резонаторах.

Важную задачу визуализации состояния установки выполняют окна, отображающие состояние защитных блокировок, отключающих элементы оборудования в случае неприемлемых условий для их работы. Структура этих окон отображает причинно-следственную связь срабатывания блокировок, а также предоставляет наглядное схематичное изображение объектов защиты и датчиков.

На бустере система защитных блокировок охватывает основные источники питания и оборудование вакуумной системы (см. п. 3.6 Главы 3). Данные в формате бинарных PV отображаются в окнах двух приложений.

Одно их приложений отображает сработавшие термоключи, защищающие от перегрева магниты бустера, обмотки которых охлаждаются водой. На рисунке 6.5 представлено окно, в котором в виде схемы бустера изображены все охлаждаемые магниты, а также соответствующие источники питания. В приведенном примере показано, что сработал термоключ на магните A3-BD7, и поэтому запрещена работа источника питания BD2, от которого запитан этот магнит.

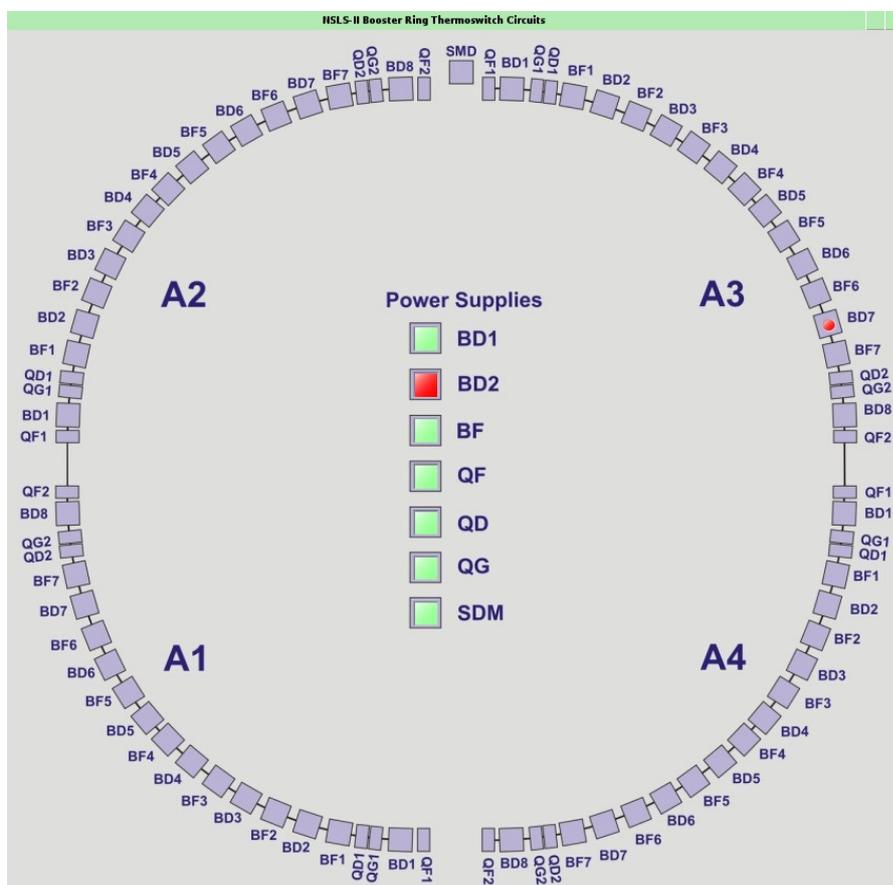


Рисунок 6.5: Окно отображения сработавших защитных термоключей.

Другое приложение отражает логику работы контроллера PLC EPS, отвечающего за обработку сигналов, поступающих от всех контроллеров системы блокировок бустера, а также от других систем блокировок (подачи охлаждающей воды, системы контроля токов, питающих диполи каналы транспортировки).

Окно приложения (см. рисунок 6.6) отображает все входные сигналы, поступающие на PLC EPS, и все выходные сигналы, подаваемые из него на защищаемое оборудование. Отсутствие любого разрешающего сигнала на экране отмечается красным цветом. Красным цветом на рисунке показано, что уровень вакуума в инжекционной промежулке плохой. В этом случае, чтобы предотвратить возможные электрические пробой на внутренней поверхности керамической вакуумной камеры, вставленной внутрь магнитов-кикеров, PLC EPS не выдает сигнал разрешения на работу источников питания инжекционных кикеров.

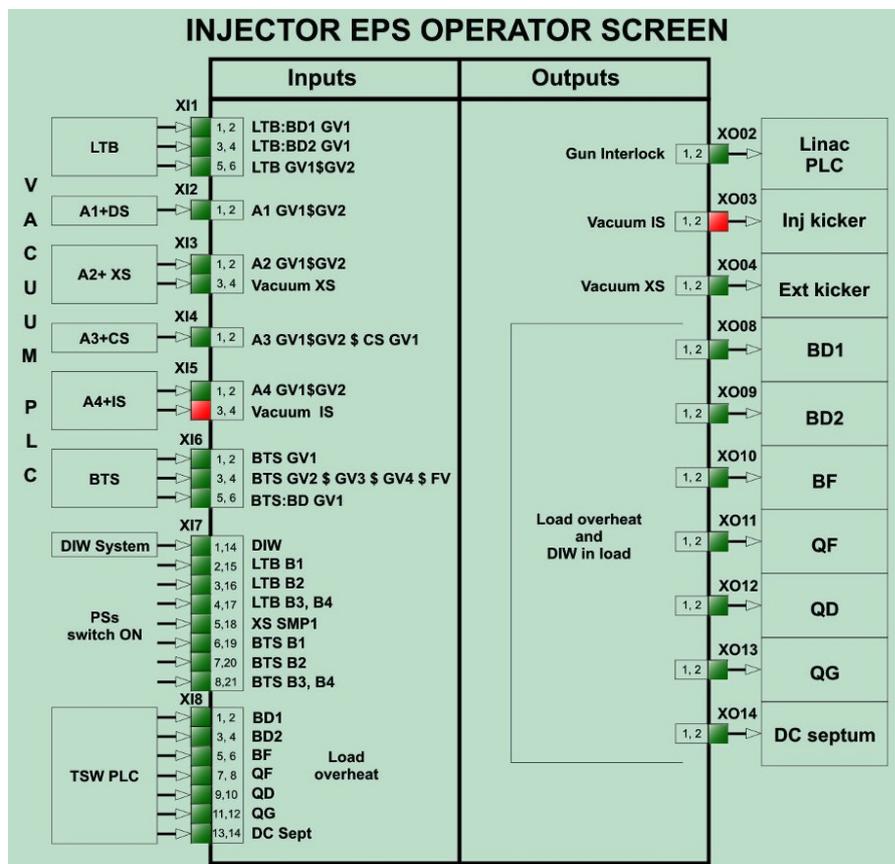


Рисунок 6.6: Окно отображения суммарных блокировок бустера.

Для визуализации и мониторинга состояния вакуума и управления состоянием шиберов разработана группа приложений, отображающих состояние вакуума и элементов различных частей вакуумной системы бустера. Для просмотра общего состояния вакуумной системы и упорядочивания запуска “вакуумных” приложений разработано стартовое окно (см. рисунок 6.7), в котором в численном и графическом виде отображаются значения усредненного

вакуума в секторах вакуумной камеры. Любые отклонения измерений или состояния устройств от нормальных рабочих значений на экране будут отмечены соответствующим цветом (легенда в левом верхнем углу окна). В окне также отображается состояние примыкающих к бустеру частей каналов транспортировки пучка. Нажатие на кнопку, обозначающую сектор вакуумной камеры, вызовет дочернее приложение, отображающее детали, касающиеся этого сектора, а нажатие кнопки, обозначающей шиббер – приложение для управления состоянием шиббера.

В правой части основного окна размещены кнопки запуска следующих приложений:

- *Settings Download* – приложение для конфигурирования пороговых значений для мониторинга состояния вакуума и режима работы устройств,
- *RTD Monitor* – приложение для отображения температур элементов вакуумной системы,
- *BR Pressure History* – приложение для долговременного наблюдения за состоянием параметров вакуума.

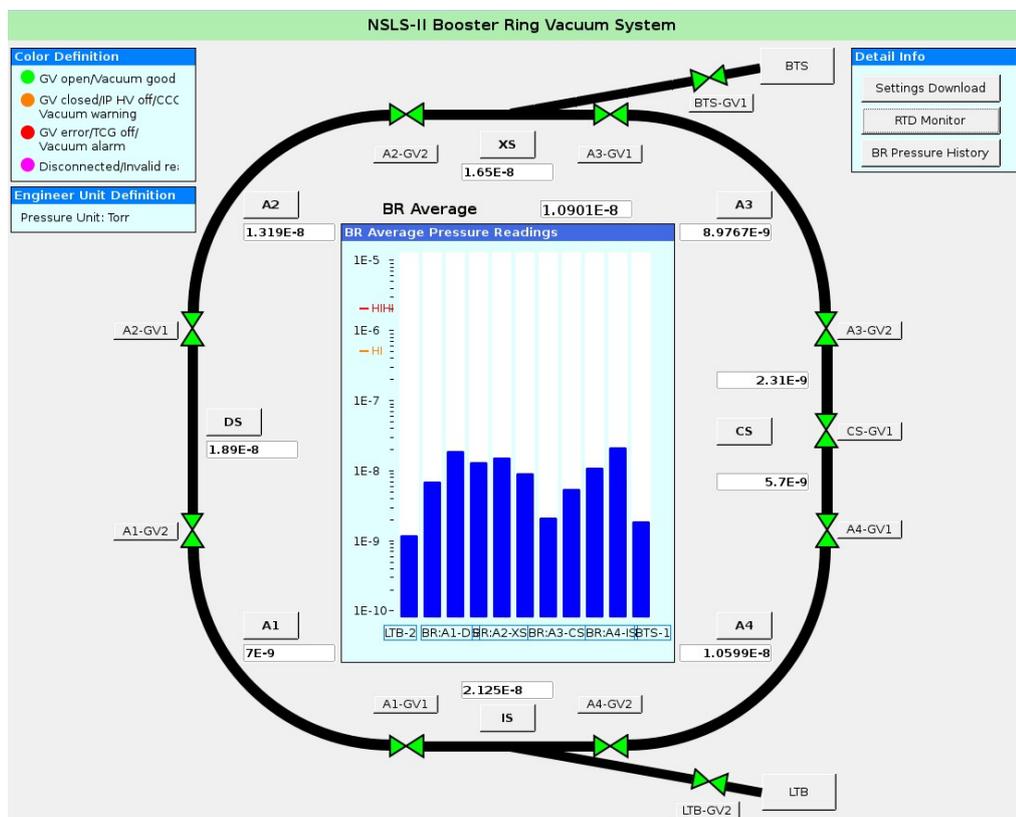


Рисунок 6.7: Основное окно отображения состояния вакуумной системы бустера.

6.3 Приложение для визуализации и сравнения значений параметров бустера

Для изучения поведения и взаимного влияния различных параметров бустера разработано Python-приложение *livecompare*, позволяющее на одном графике отображать и сравнивать с любой степенью подробности текущие значения двух произвольных параметров бустера. Окно приложения представлено на рисунке 6.8.

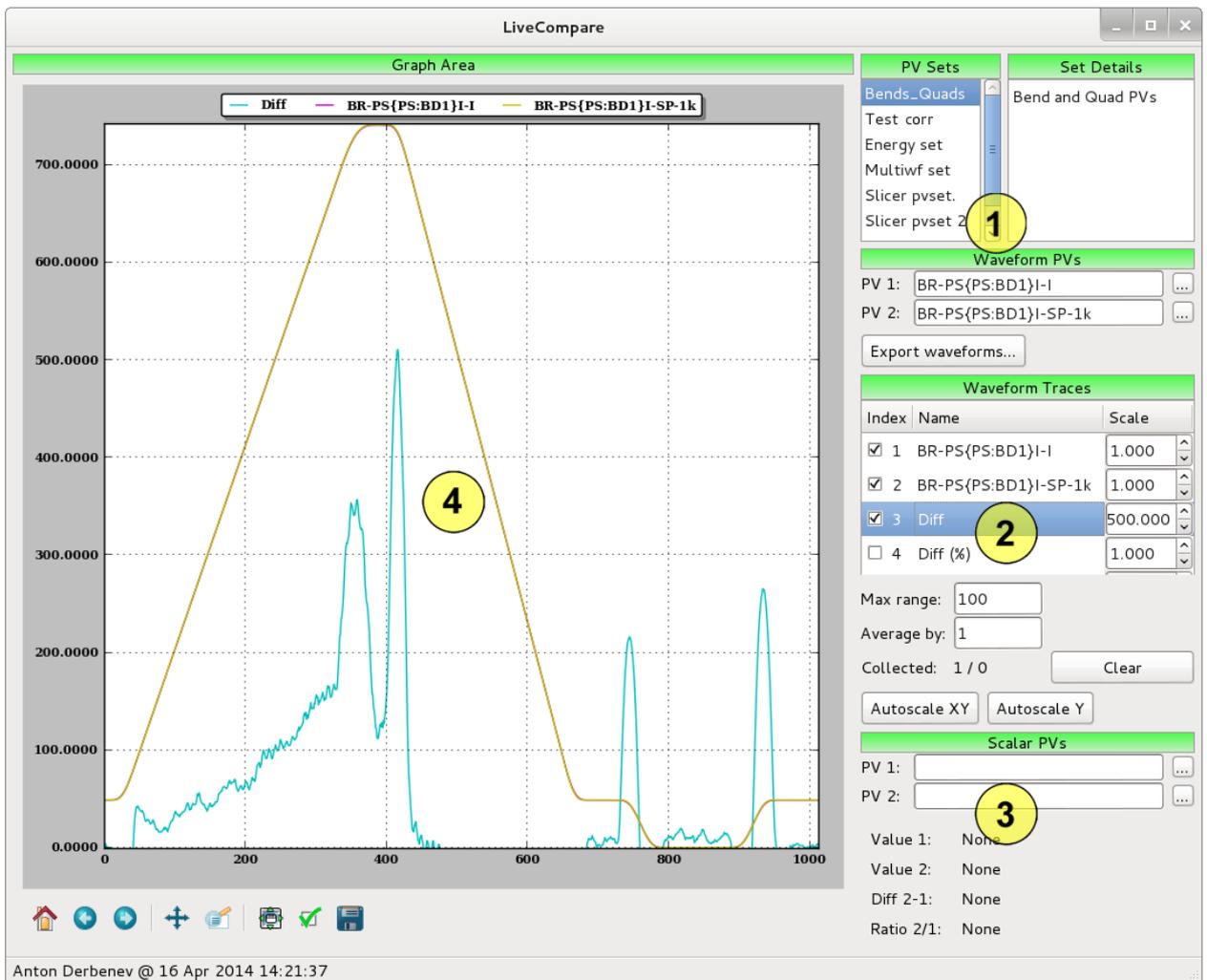


Рисунок 6.8: Окно приложения *livecompare*.

Окно приложения разделено на 4 зоны.

Зона (1) предназначена для ввода имен PV, имеющих формат вэйвформ. Для упрощения поиска имена предварительно формируются в списки согласно решаемым задачам. Формат списков аналогичен формату списков PV системы сохранения/восстановления режимов (см. п. 6.1.2), и списки системы сохранения/восстановления режимов могут быть использованы для приложения

livecompare. В зоне (1) также располагается стандартная для разработанных приложений кнопка запуска сервиса экспорта графической информации в текстовый файл (см. п. 5.3.5 Главы 5).

Зона (2) содержит поля ввода параметров для обработки и отображения сигналов, а также кнопки для выполнения автомасштабирования графика в двух режимах: полное масштабирование по обеим координатам с приведением горизонтальной шкалы к продолжительности цикла бустера и масштабирование только по вертикали. С помощью флаговых кнопок можно выбирать для вывода на график (4) треки вэйвформ и их разностей, а с помощью коэффициента *Scale* задавать масштабирующий коэффициент для вывода каждой вэйвформы, что позволяет на одном графике в сравнимом масштабе отображать вэйвформы с существенно отличающимися величинами значений.

Зона (3) предназначена для ввода имен скалярных PV, значения которых требуется сравнить. Здесь же, в зоне (3), выводится текущая разница значений выбранных PV.

В зоне (4) размещается PyQt-виджет с гибкой системой навигации и масштабирования для отрисовки треков вэйвформ.

Приложение *livecompare* оказалось эффективным инструментом при выполнении работ, связанных с отладкой источников питания, и при проведении наладки режимов работы бустера. Оно также использовалось для детальной проверки работы электроники. Например, с его помощью на раннем этапе запуска оборудования был выявлен скрытый дефект в обработке данных в контроллере PSC, заключающийся в неправильной упаковке пар 16-битных измеренных значений, пересылаемых из PSC в ИОС в формате 32-х разрядного слова. График с обнаруженным дефектом представлен на рисунке 6.9. Ошибка микропрограммы приводила к появлению колебаний вычисленной разности сигналов при изменяющейся величине самих сигналов. В окне с увеличенным масштабом зеленые точки соответствуют истинной разности сигналов, а красные и голубые точки ошибочно переставлены местами.

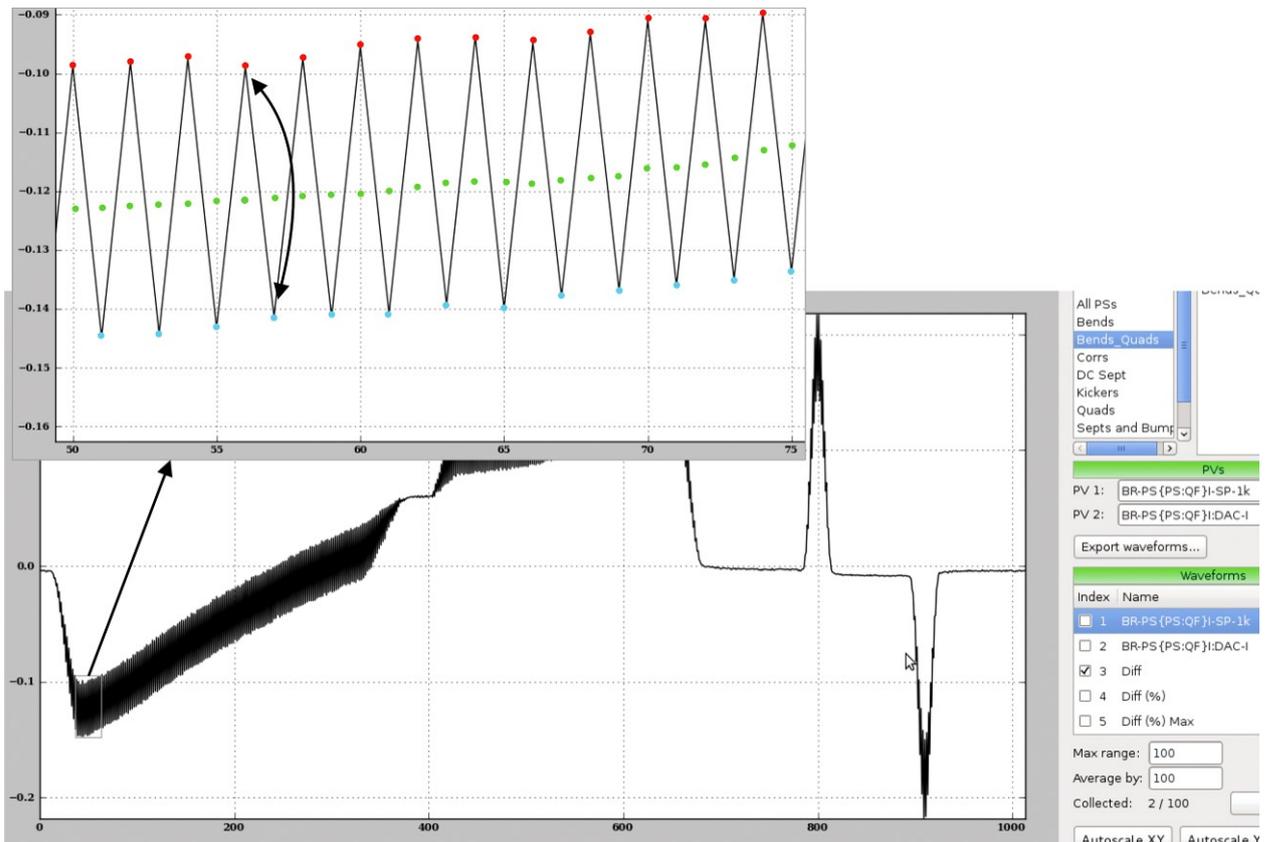


Рисунок 6.9: Эффект от неправильной компоновки измеренных данных при передаче из PSC в IOC.

6.4 Мониторинг параметров элементов бустера

6.4.1 Сигнальный статус параметра в EPICS

Каждый рекорд базе данных EPICS, описывающий контрольно-измерительный параметр системы управления, содержит поля для характеристики текущего состояния этого параметра, т.н. сигнального статуса (alarm). Условия для вычисления сигнального статуса параметра задаются двумя пороговыми уровнями верхних (HINI, HIGH) и двумя пороговыми уровнями нижних (LOLO, LOW) значений [113]. Кроме того, в описании параметра в базе данных есть поля для определения и фиксации случившегося кратковременного отклонения параметра.

Сигнальный статус обновляется каждый раз, когда в IOC обрабатывается рекорд. Инициация обработки рекорда в основном связана с изменением значения параметра. При этом обновившееся значение сигнального статуса становится

доступным всем приложениям, которые подписаны на это обновление. Разработано приложение для отображения сигнальных статусов Alarm Handler [137], которое отслеживает изменившиеся статусы и в виде иерархического списка отображает текущее состояние параметров (см. рисунок 6.10). Структура иерархии задается в конфигурационном файле и соответствует структуре управляемой установки. Alarm Handler сигнализирует об изменившемся состоянии параметра при помощи цветовой индикации, предоставляет оператору инструкции, как действовать в сложившейся ситуации, а программная система, работающая на комплексе NSLS-II, также сопровождает изменения голосовыми сообщениями.

The screenshot displays the Alarm Handler interface. On the left is a hierarchical tree view of the system structure. The right pane shows the 'Alarm Table' with the following data:

PV	Description	Alarm Time	Current	Current	Alarr	Alarm S	Alarm \
SR:C02-VA	MAJOR alarm: Cell 02 arc Av	2015/08/13 15:26:00	OK	NO_AL	MAJOR	HIHLA	0.1250
BR:XS-PS{PS	MAJOR alarm: Booster Extrac	2015/08/13 14:17:00	OK	NO_AL	MAJOR	STATE_	Trip
BR:XS-PS{PS	MAJOR alarm: Booster Extrac	2015/08/13 14:20:00	OK	NO_AL	MAJOR	STATE_	Trip
BR:IS-PS{PS	MAJOR alarm: Booster Injecti	2015/08/13 14:34:00	OK	NO_AL	MAJOR	STATE_	Trip
BR:IS-PS{PS	MAJOR alarm: Booster Injecti	2015/08/13 14:34:00	OK	NO_AL	MAJOR	STATE_	Trip
SR:C19-VA	MINOR alarm: Cell 19 arc Av	2015/08/13 14:33:00	OK	NO_AL	MINOR	HIGH_A	5.5821
SR:C16-VA	MINOR alarm: Cell 16 arc Av	2015/08/13 15:37:00	OK	NO_AL	MINOR	HIGH_A	6.0648

Below the table, there is a section for 'Acknowledged Alarms (0)' with a similar header structure.

Рисунок 6.10: Экран Alarm Handler.

Такая схема сигнальных состояний надежно и информативно работает в случае, когда в процессе работы в штатной ситуации значения параметров стабильны или меняются в небольших пределах внутри диапазона, заданного пороговыми значениями, или когда значение параметра изменяется дискретно в небольших пределах (например, 0 или 1 в случае бинарного сигнала). В случае бустера значительная часть параметров представлена в виде вэйвформ, для которых неприменимо понятие допустимого уровня значения, т.к. в силу

большого диапазона изменения энергии пучка в процессе ускорения диапазон значений вэйвформы может быть очень большим по сравнению с допустимыми отклонениями сигнала в каждой точке вэйвформы. Для обеспечения функционирования стандартного для EPICS механизма сигнальных статусов для бустера на уровне ИОС была разработана схема вычисления индикатора состояния параметра (см. п. 4.4 Главы 4), которая входит в систему мониторинга параметров бустера, описанную в данном разделе.

6.4.2 Задачи и структура системы мониторинга бустера

Поскольку даже самые незначительные отклонения отработки источников питания приводят к потерям ускоряемых частиц, то очень важно непрерывно отслеживать правильность отработки в течение всего времени существования пучка в бустере. Это позволяет обнаруживать нежелательные отклонения, возникающие в любой момент процесса ускорения, вносить определенные корректирующие поправки в управление и контролировать их выполнение. Системы управления синхротронами, аналогичными бустеру NSLS-II [85, 95], не предоставляют возможности одновременно получать непрерывные измерения параметров многих источников питания в ходе ускорения. Это приводит к сложностям в поиске неисправностей, особенно, если они возникают, а затем исчезают в процессе ускорения пучка. Методика измерений параметров источников питания, разработанная для бустера NSLS-II, позволяет получать измерения всех параметров с частотой 1 кГц в ходе выполнения цикла бустера, что дало возможность разработать тотальную систему мониторинга параметров. В данной системе впервые в практике управления подобными ускорительными установками был реализован механизм непрерывного согласованного измерения множества параметров с предоставлением всех данных на уровень, доступный пользовательским приложениям. Это предоставило широкие возможности по созданию приложений для анализа состояния установки и позволило внедрить в систему управления сложные автоматизированные процессы по настройке режима функционирования синхротрона: коррекцию орбиты пучка и бетатронных частот в процессе ускорения, стабилизацию систем впуска и выпуска частиц.

Система мониторинга бустера предназначена для выявления отклонений значений параметров в любой момент процесса выполнения цикла бустера. Процесс мониторинга предполагает, что “текущее” значение параметра на уровне ИОС сравнивается с предварительно заданным “опорным” значением (см. п. 4.4 Главы 4), и в случае, если разница между ними превышает заданную величину, формируется соответствующее значение индикатора состояния параметра, которое доступно в виде PV. Также в виде отдельного PV сохраняется вычисленная разница между текущим и опорным значениями. Для параметра, представленного в виде вэйвформы, сравнение выполняется для каждого значения.

Система мониторинга включает несколько механизмов и процессов, работающих как в ИОС, так и в приложениях верхнего уровня. Диаграмма взаимодействия процессов приведена на рисунке 6.11.

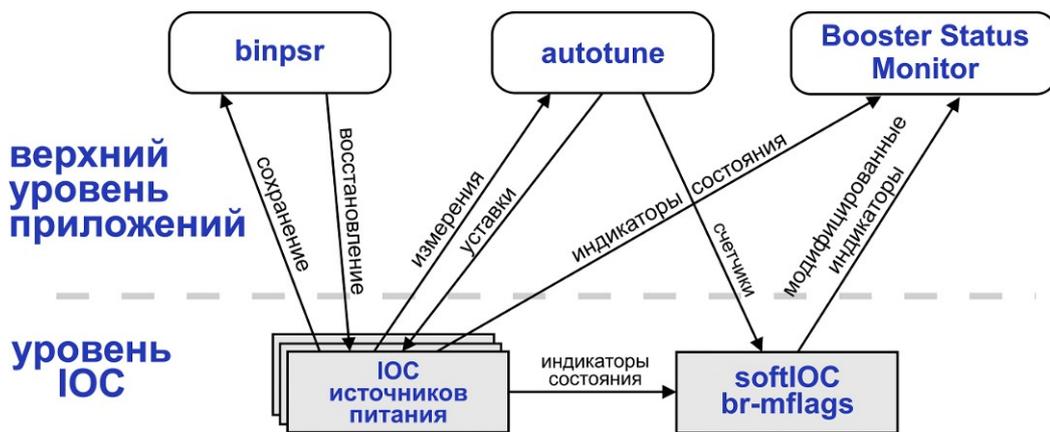


Рисунок 6.11: Взаимодействие процессов при работе системы мониторинга.

В системе мониторинга задействовано приложение восстановления режимов работы бустера *binpsr*, которое обеспечивает задание опорных значений для вычисления индикаторов состояния. Сами индикаторы состояния вычисляются в ИОС, обслуживающих источники питания.

В некоторых случаях логика работы системы заставляет изменить алгоритм работы с вычисленным значением индикатора состояния: например, вообще не учитывать его значение. Для правильной обработки таких случаев на уровне ИОС разработан механизм модификации индикаторов состояния и применяются дополнительные модифицированные индикаторы, значения которых в штатной

ситуации дублируют значения самих индикаторов состояния, но могут быть изменены в соответствии со текущей ситуацией в системе управления. Например, существенное отклонение текущего значения параметра от опорного не всегда означает неправильный режим работы устройства. Приложение *autotune* (см. п. 5.7.2 Главы 5), выполняя подстройку значения поля в импульсном магните, при этом изменяет значение уставленного напряжения на накопителе энергии импульсного генератора, и это изменение не относится к неисправности.

Вычисление модифицированных индикаторов состояния реализовано в отдельном softIOС *br-mflags*, работающем в сервере **interlockioc-br-rgb**, а также в IOС, обслуживающих источники питания.

Значения модифицированных индикаторов состояния используются приложениями верхнего уровня для визуализации состояния параметров установки.

Таким образом, механизм мониторинга параметров бустера состоит из следующих основных частей: механизма вычисления индикаторов состояния параметров, работающего автоматически во всех IOС, обслуживающих устройства управления, механизма модификации индикаторов состояния, учитывающего особенности работы компонентов системы управления (см. п. 6.4.3), и графического интерфейса, отображающего текущее состояние установки.

6.4.3 Система модификации индикаторов состояния параметров

Разработанная система включает три способа модификации индикаторов состояния, учитывающих, различные факторы и особенности работы приложений.

Первый способ модификации предназначен для учета отклонений значений параметров, возникающих при работе приложений автоматической настройки (например, *autotune*). Такие приложения служат для стабилизации величины какого-либо измерительного параметра к опорному значению путем внесения поправок в значение соответствующего управляемого параметра. При этом в случае нормального режима регулировки возможна ситуация, когда отклонение

управляемого параметра может превысить допустимое значение. В этом случае система мониторинга не должна подавать сигнал о неисправности, что достигается путем задания нуля в модифицированный флаг соответствующего управляемого параметра.

Для обозначения функционирования приложения автоподстройки используется специальный счетчик, значение которого периодически восстанавливается приложением в процессе его работы до заданной величины. При ненулевом значении счетчика ИОС зануляет соответствующий модифицированный индикатор состояния (что соответствует правильной работе системы автоподстройки) и уменьшает значение счетчика на единицу. В случае прекращения работы приложения автоподстройки система мониторинга после зануления счетчика автоматически перейдет в обычный режим работы.

Второй способ модификации используется для задержки отображения неправильного значения параметра, т.е. занесения в ИОС ненулевого значения в соответствующий индикатор состояния, например, в случае нестабильных или сбойных измерений.

В этом случае используется параметр задержки реакции на появление ненулевого значения индикатора. Модифицированный индикатор будет изменен в ненулевое значение только в случае, когда ненулевое значение индикатора состояния параметра повторится подряд такое число раз, которое превысит заданное значение задержки.

Третий способ модификации позволяет отключить мониторинг параметра в случае, когда отслеживать значение этого параметра по какой-то причине не имеет смысла. Например, если оператором осознанно изменяется управляемый параметр, то не нужно сравнивать его отклонение с опорным сигналом. Как правило, в этой ситуации также не нужно проверять отклонения других параметров, значения которых определяются значением изменяемого управляемого параметра.

Значению модифицированного флага присваивается ноль, если заданный текущий режим сравнения для мониторинга MODE (“Reference” или “SP”, см.

п. 4.4 Главы 4) не совпадает с режимом сравнения PV_MODE, который в конфигурационном файле ИОС модификации флагов определен для данного индикатора состояния.

Рассмотрим пример использования данного механизма модификации. Пусть в состоянии штатного режима работы, когда режим сравнения с опорным значением установлен в “Reference”, оператор для настройки бустера решит регулировать величину тока какого-либо источника питания. В первую очередь для правильного мониторинга ему нужно переключить режим сравнения с опорным значением на “SP”. В этом случае значение управляемого параметра будет сравниваться с соответствующим текущим измерением отработки, а остальные параметры, характеризующие работу источника питания, с помощью системы модификации будут отключены от мониторинга (см. пример в п. 6.4.4). После окончания настройки оператор может сохранить текущий набор уставок и измерений в виде нового режима работы бустера. При загрузке нового режима в устройства будут записаны новые опорные значения, и мониторинг в режиме сравнения “Reference” будет снова работать правильно.

6.4.4 Монитор состояния элементов бустера

Для визуализации состояния бустера разработано CSS-приложение *BSM* (Booster Status Monitor), которое в схематической форме с помощью цветовой индикации отображает состояние всех элементов бустера, а также выводит информацию об энергии и токе пучка во время выполнения цикла.

Основное окно *BSM* содержит условную схему размещения элементов магнитной системы и системы впуска/выпуска на кольце бустера (см. рисунок 6.12), на которой цветом обозначается интегральное соответствие заданному режиму работы для каждого элемента: зеленый цвет соответствует нормальному (заданному) состоянию элемента, желтый – незначительному отклонению элемента от заданного режима работы, красный – значительному отклонению, как правило, приводящему к потере пучка.

В центре основного окна расположен график, на котором выводятся треки энергии и тока пучка. Здесь же выводятся величины подведенного к бустеру (*LTV*

Out), захваченного (*Booster In*), ускоренного (*Booster Out*) и выпущенного (*BTS In*) тока пучка, а также энергия впускаемых и выпускаемых частиц. По этим величинам токов вычисляются коэффициенты захвата, ускорения и выпуска для тока пучка. В соответствии с получившимися значениями коэффициентов в соответствующий цвет (зеленый, желтый и красный) окрашиваются стрелки, обозначающие эффективность прохождения пучка.

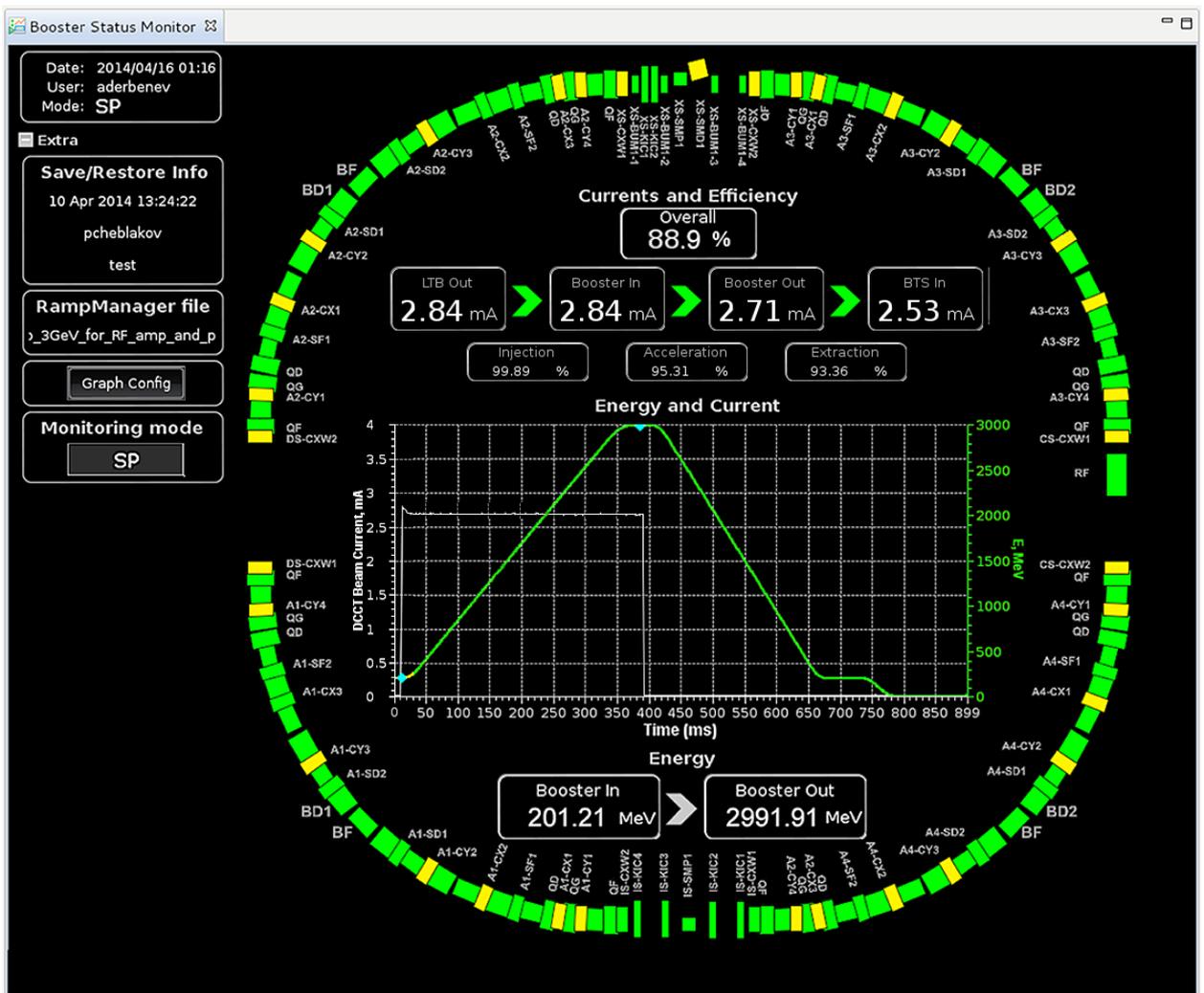


Рисунок 6.12: Основное окно приложения *BSM*.

В левой части основного окна *BSM* расположены поля для вывода информации об операторе, загруженном режиме и режиме работы системы мониторинга. Кнопка *Graph Config* позволяет выбрать моменты времени, в которые вычисляются значения ввпущенного и выпущенного токов.

Интегральное состояние каждого элемента складывается из состояния всех его контролируемых и измеряемых параметров. При нажатии на элемент

открывается статусное окно, содержащее списки управляемых, измерительных и бинарных параметров этого элемента, где также цветом обозначено состояние каждого параметра. Пример статусного окна для источника питания дипольных магнитов BD1 приведен на рисунке 6.13.

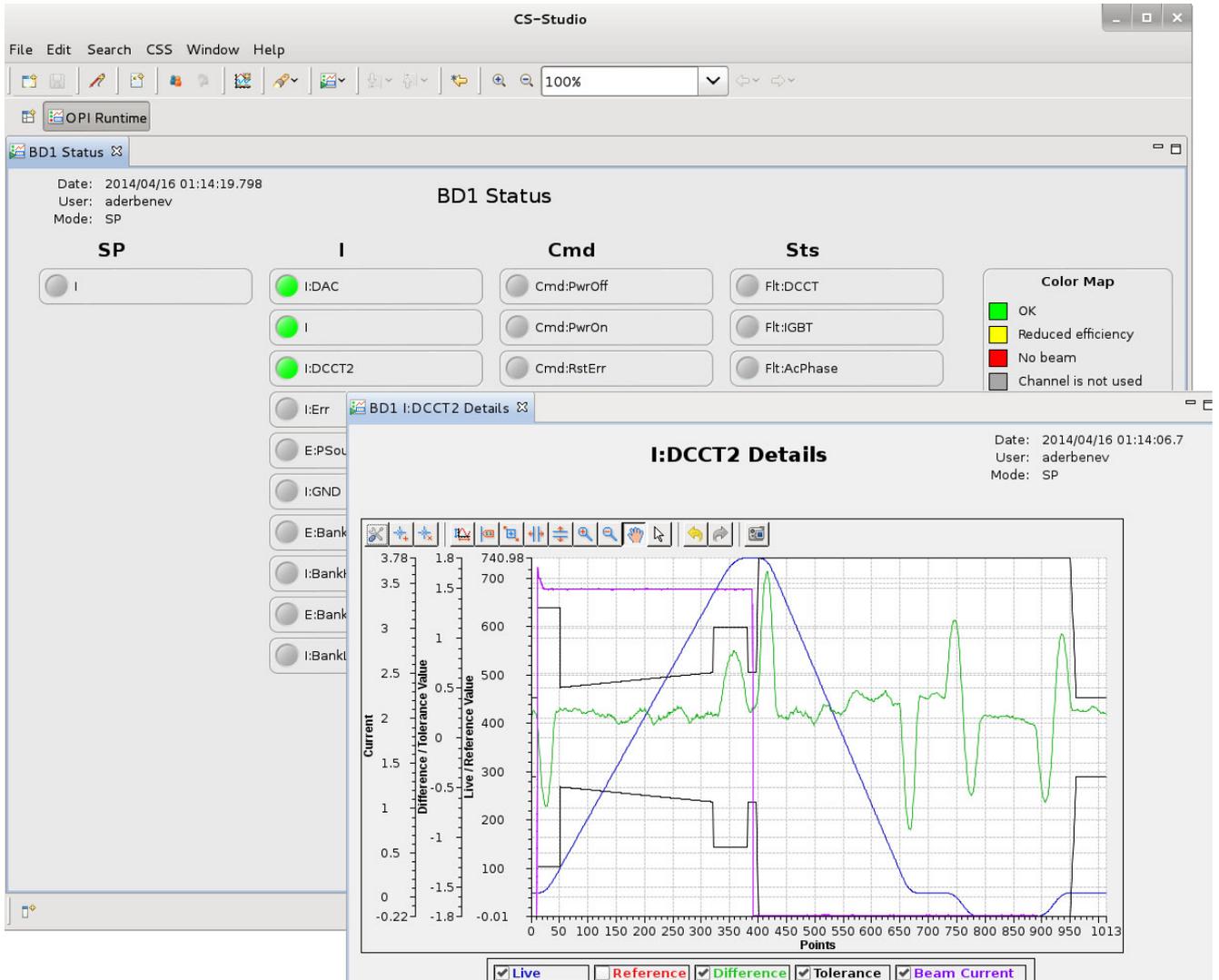


Рисунок 6.13: Статусное окно и окно детализации для элемента BD1 и его канала измерения тока I:DCCT2.

В статусном окне используется расширенная цветовая индикация состояния параметров элемента, включающая обозначение не только состояния самого параметра, но и условий работы с ним. Разъяснение индикации размещено в правой части экрана. Кроме трех цветов (зеленого, желтого и красного), обозначающих состояние параметра, используются еще следующие цвета:

- серый - параметр в настоящий момент выключен из мониторинга; это может быть, например, из-за несоответствия режима мониторинга данного параметра текущему режиму мониторинга системы (см. п. 6.4.3),
- коричневый - отсутствует или не соответствует своему значению заданная величина допустимого отклонения параметра,
- голубой - мониторинг данного параметра полностью отсутствует,
- белый цвет - состояние данного параметра не определено.

В примере статусного окна, приведенного на рисунке 6.13, режим мониторинга системы уставлен в состояние “SP”, что для данного типа источника питания означает наличие мониторинга только заданного тока путем сравнения его с измеренными значениями, которых в данном случае три: значение напряжения ЦАП, пересчитанное в ток ($I:DAC$) и два независимых измерения тока с двух бесконтактных токовых шунтов ($I, I:DCCT2$).

При нажатии в статусном окне на любой из параметров запускается окно детализации (см. рисунок 6.13), отображающее графики текущего сигнала в сравнении с опорным значением, а также разности сигнала и опорного значения в сравнении с допустимым отклонением. В случае, если сигнал представлен в виде вэйвформы, то в окне отображаются периодически обновляющиеся треки, а в случае скалярного или бинарного сигнала – график долговременного наблюдения. На графике детализации используется три шкалы: для вывода значений текущего и опорного сигналов, для вывода разности сигналов и допустимого отклонения, а также для вывода величины тока пучка. Вывод сигнала тока пучка на графике полезен для отслеживания влияния поведения параметров на процесс ускорения пучка в бустере.

На рисунке 6.13 показан пример использования сложной формы для допустимого отклонения тока источника питания от уставки. Сложная форма допустимого отклонения позволяет учесть свойства каждого конкретного источника питания. Например, на участках с ненулевой второй производной возникает повышенный уровень отклонения отработываемого тока от

управляющего сигнала, что может быть учтено в каждой точке цикла для каждого источника питания.

6.5 Приложения для диагностики пучка

К группе диагностики пучка относятся приложения, работающие как с системами, непосредственно измеряющими различные параметры пучка (ток, наполнение по сепаратрисам, поперечные и продольные размеры и т.п.), так и с системами, использующими пучок в качестве источника сигнала для измерения параметров ускорителя (в случае бустера - это замкнутая орбита, бетатронные частоты, хроматизм). Эти приложения предоставляют оператору данные и инструменты для диагностики и настройки параметров ускорителя, а также графический интерфейс для визуализации этих параметров.

Для измерения тока пучка, циркулирующего в бустере в процессе ускорения, установлено две системы: DCCT для измерения величины тока и FCT для наблюдения распределения пучка по сепаратрисам (см. п. 3.7 Главы 3). Для обслуживания этих систем разработано многоуровневое приложение, которое обеспечивает задание всех параметров, необходимых для правильной работы электроники, взаимодействие с АЦП, обработку массивов данных, а также вывод результатов в цифровом и графическом виде. Изображение главного окна приложения, которое имеет вид, типичный для многочисленных приложений диагностики пучка, представлено на рисунке 6.14.

В окне приложения отображены два графика: обработанный сигнал с FCT с измерениями заполнения пучка по сепаратрисам и обработанный сигнал с DCCT с измерением тока пучка в процессе ускорения. Для FCT предусмотрен также вывод графика пооборотного измерения тока в выбранной сепаратрисе.

В верхней части окна размещается кнопочная панель, позволяющая открыть дополнительные окна для настройки систем измерения тока пучка (DCCT и FCT), а также запустить основные окна приложений для других систем диагностики пучка: системы измерения бетатронных частот, люминофорных пробников, монитора синхротронного излучения и системы пикап-диагностики.

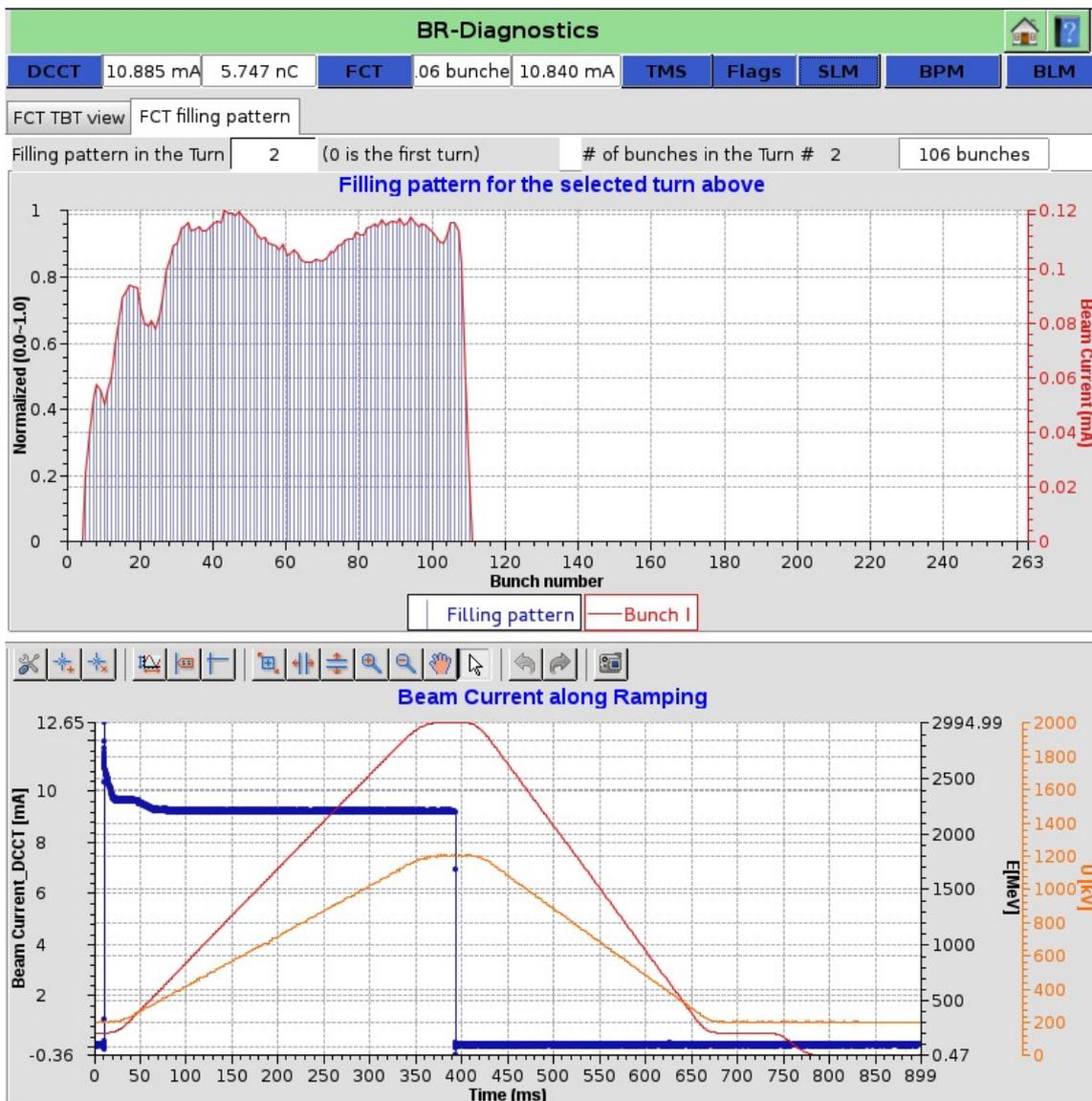


Рисунок 6.14: Окно приложения для отображения измерений параметров тока пучка.

Наблюдение положения и профиля пучка в поперечных координатах является важной задачей для настройки любой системы транспортировки пучка, например: канала для перепуска частиц из одной установки в другую, кольца циклического ускорителя. Измерение положения центра тяжести пучка позволяет скорректировать его траекторию, а соотношение вертикального и горизонтального размеров пучка, измеренных как в одной, так и в разных точках траектории, дает возможность оценить фокусирующие свойства системы. Как правило, все ускорители и каналы транспортировки частиц оснащаются люминоформными пробниками, которые, будучи введенными на пути движения

пучка, позволяют непосредственно по форме и силе свечения пятна, оставленного на люминофоре, измерить положение и поперечный профиль пучка частиц. Этот способ имеет важное значение, т.к. позволяет начинать настройку ускорительной системы с нуля, когда невозможны или затруднительны другие методы, использующие для измерения электромагнитное поле пучка. На бустере установлено шесть люминофорных пробников, для работы с которыми используется универсальное приложение, которое также применяется для аналогичных пробников, размещенных на линейном ускорителе (линаке) и каналах транспортировки пучка из линака в бустер (ЛТВ) и из бустера в основное кольцо (ВТС).

При наличии циркулирующего пучка, захваченного в бустер, появляется возможность использовать СИ для измерения положения и профиля пучка. Например, такой способ измерения положения пучка для определения замкнутой орбиты используется на накопителе ВЭПП-2000 в ИЯФ СО РАН [152]. Мощность СИ зависит от энергии частиц, как четвертая степень, поэтому в процессе ускорения за 300 мс интенсивность излучения сильно меняется, что делает затруднительным оценку тока пучка. Но положение и профиль пучка можно определять в любой момент ускорения. Для отображения профиля пучка разработано приложение, окно которого выглядит аналогично окну приложения для наблюдения за профилем пучка на люминофорных флагах. Дополнительно в этом окне размещаются инструменты для управления положением двух зеркал, выводящих свет от пучка электронов из вакуумной камеры на ПЗС-камеру. Приложение также позволяет отображать одновременно 10 кадров, снятых в процессе ускорения пучка.

Система пикап-диагностики использует электронику (ВРМ-ресиверы), специально разработанную в BNL для проекта NSLS-II [130]. Данные считываются из ВРМ-ресиверов и обрабатываются с помощью комплекса ЮС (см. п. 4.8 Главы 4) и предоставляются пользовательским приложениям в виде готовых вэйвформ со значениями замкнутых орбит и однооборотных треков. Для управления ВРМ-ресиверами разработано универсальное инженерное

приложение, позволяющее выполнять любые проверки и настройки контроллеров, включая первичную обработку и отображение данных. Для запуска приложения используется стартовая панель, на которой можно выбрать любой BPM-ресивер комплекса NSLS-II.

Актуальные значения PV (вэйвформы орбит, бетатронные частоты и т.п.) становятся доступны в ИОС в течение цикла работы бустера. Для отображения орбиты и оперативного переключения режима работы BPM-ресиверов разработано CSS-приложение, примеры экранов которого представлены на рисунках 6.15 и 6.16.

На рисунке 6.15 отображено окно приложения для режима измерения замкнутой орбиты пучка, когда BPM-ресиверы выдают массивы с измеренным положением орбиты. Передача данных в ИОС выполняется сразу по окончании ускорения пучка в бустере. Массивы заполняются измерениями в BPM-ресиверах с интервалом 100 мкс. Всего в течение одного цикла выполняется 4096 измерений. Эти данные обрабатываются в ИОС, при этом формируются вэйвформы, содержащие замкнутые орбиты для сорока моментов времени процесса ускорения (таблица *FA slicers*). Эта таблица моментов времени используется всем комплексом серверных и пользовательских приложений, работающих с орбитой пучка: комплексом ИОС для обработки измерений орбиты и приложением коррекции орбиты *coco*.

В правой части экрана расположены панели для конфигурирования отображения данных и измерений. Вверху с помощью флаговых кнопок можно выбрать орбиту для отображения на графике: текущую или запомненную орбиты, а также предусмотрена возможность вывода разности орбит. Ниже отображается панель для управления приложением коррекции замкнутой орбиты *coco*. Внизу располагается панель для управления работой серверных ИОС и BPM-ресиверов. В случае выбора режима пооборотных измерений на левом нижнем графике будут выводиться бетатронные частоты и амплитуды колебаний пучка в вертикальном и радиальном направлениях, вычисленные в интервале 4096 оборотов пучка, что составляет примерно 2 мс.

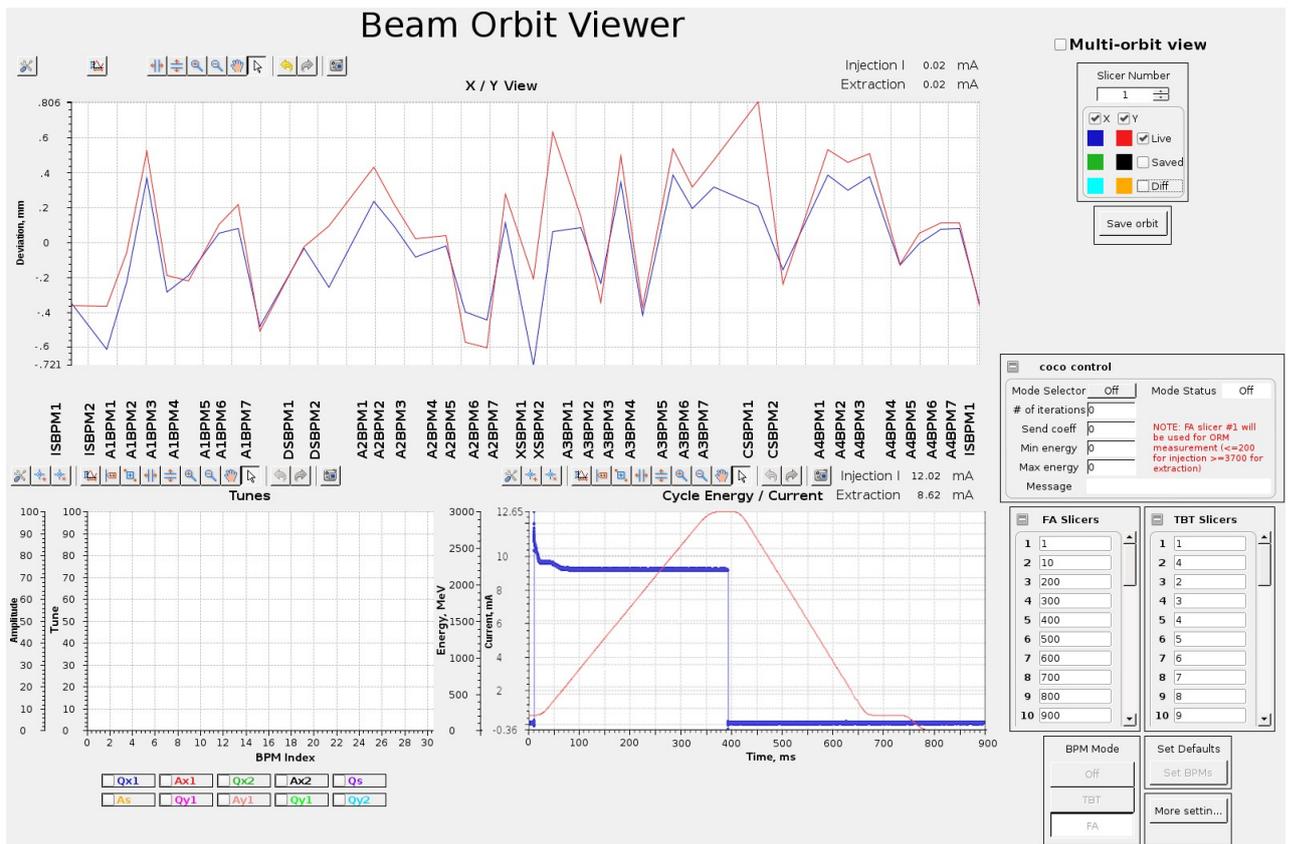


Рисунок 6.15: Экран вывода измерений замкнутой орбиты пучка.

На правом нижнем графике для справки выводятся энергия частиц и ток пучка.

На рисунке 6.16 показано окно в случае переключения приложения в режим вывода многих орбит в разные моменты ускорения. Одновременно на графике можно вывести до 20 орбит.

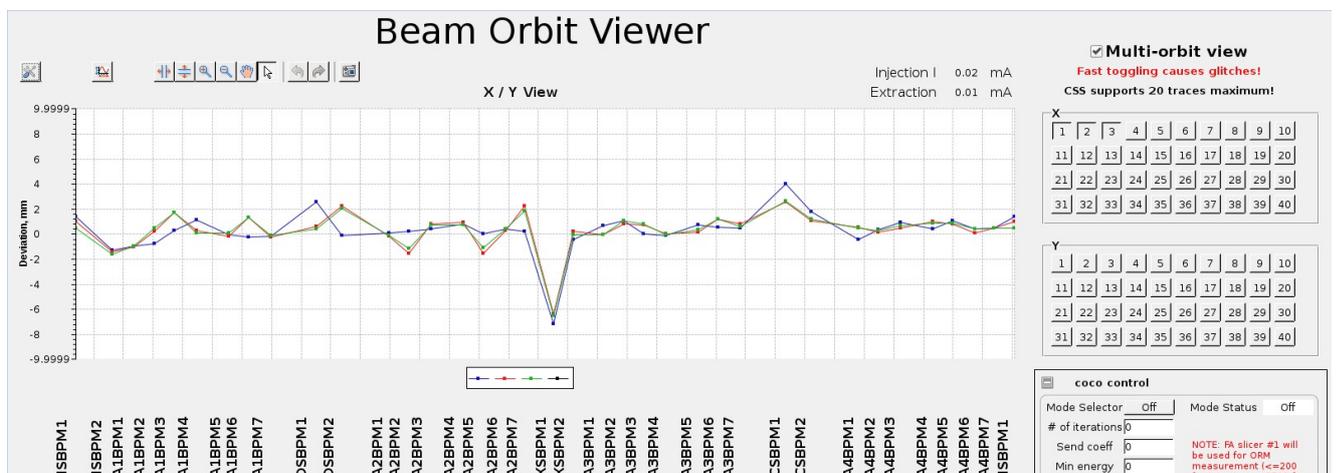


Рисунок 6.16: Экран в режиме вывода орбит в разные моменты ускорения пучка.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы следующие:

1. Разработана и реализована система управления ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4. Разработка включает компоновку контрольно-измерительной аппаратуры и создание ПО, в котором автором написана определяющая часть кода. Созданная система успешно эксплуатируется на протяжении многих лет, обеспечивая эффективную согласованную работу установок комплекса, направленную, прежде всего, на проведение экспериментов.
2. Впервые предложены и реализованы методы управления ускорительными установками комплекса ВЭПП-4. Достигнутый уровень автоматизации управления ускорительным комплексом ВЭПП-4 обеспечил возможность для успешного проведения экспериментов по физике высоких энергий с детектором КЕДР, экспериментов по ядерной физике и исследований с использованием СИ. При создании и продолжительной эксплуатации системы управления ВЭПП-4 автором данной диссертации и при его участии были разработаны методики по организации управления оборудованием, обработке и визуализации данных, применимые и для управления современными ускорительными установками, подтверждением чему является успешное создание системы для управления бустером NSLS-II.
3. Создано программное обеспечение, реализующее выполнение всех функций и операций, связанных с управлением установками комплекса ВЭПП-4.
4. Сформулированы требования к современной системе управления ускорительным комплексом. Сформулированные требования касаются основных компонентов системы управления, определяющих эффективность ее работы: системы синхронизации, системы управления источниками питания и системы диагностики пучка. Рассмотрены принципы построения программного обеспечения современной системы управления.
5. На основе анализа технических возможностей электроники и вычислительной техники предложена и реализована схема распределенной системы управления

бустера NSLS-II, включающая в себя как специфические, специально разработанные устройства для управления и диагностики, так и средства промышленной автоматизации. Создана полнофункциональная, открытая для расширения и модернизации система управления.

6. Создано ПО системы управления бустера, включая необходимые базовые системные программные средства и набор инженерных и операторских приложений. Программные решения по взаимодействию с оборудованием реализованы на основе модульного и функционального подходов построения ПО. Разработанный комплекс приложений не только удовлетворяет всем потребностям управления бустером, но и обеспечивает дальнейшее расширение и развитие инженерного и физического ПО для решения новых задач по эксплуатации установки. Пакет инженерных и операторских приложений, разработанный для бустера, содержит решения по конфигурации и визуализации данных, которые были успешно применены в программном обеспечении для управления другими системами комплекса NSLS-II. Принципы и алгоритмы, разработанные для приложений автоматической настройки параметров бустера, обеспечивших его эффективный запуск и поддерживающие стабильную работу, могут быть использованы в любых системах автоматизации сложных установок.
7. Исходя из анализа возможностей аппаратных и программных ресурсов, а также требований и особенностей управления бустером NSLS-II, предложены и реализованы алгоритмы для работы специализированного оборудования и обработки данных. Схема управления источниками питания синхротрона содержит методы, которые могут быть применены для любых систем, требующих в процессе работы непрерывного точного контроля сложных быстро протекающих процессов.
8. Впервые создана система полного непрерывного мониторинга в течение цикла работы бустера, автоматически выявляющая отклонения любых параметров и обеспечивающая визуализацию процесса. Разработанная схема мониторинга

может быть применена для контроля любых сложных многопараметрических систем.

9. Разработана гибкая универсальная система сохранения, восстановления и сравнения значений параметров бустера, позволяющая запоминать, а затем использовать для загрузки в аппаратуру или для взаимного сравнения значения любых управляющих и измеренных сигналов по заданным правилам в заранее описанной конфигурации. Система оперирует как со скалярными значениями, так и массивами значений сигналов, описывающими поведение параметров в течение всего цикла работы бустера. Решения и ПО для сохранения/восстановления режимов работы синхротрона и для оптимизации архивирования могут быть использованы как универсальная и гибкая система, обеспечивающая стабильную воспроизводимость работы крупных установок и систем.

В заключение автор выражает глубокую признательность всем коллегам, с которыми он на протяжении многих лет работал и работает на комплексе ВЭПП-4, коллегам из Лаборатории 6 ИЯФ, создавшим инфраструктуру системы управления и поддерживающим ее работоспособность, а также всем, кто участвовал в работах по созданию бустера NSLS-II. В тесном взаимодействии с физиками-ускорительщиками и инженерами-разработчиками при поддержке специалистов из BNL за три года сравнительно небольшим коллективом программистов и инженеров-электронщиков была создана система управления, позволившая в кратчайший срок менее одного месяца запустить в эксплуатацию бустер, и давшая много полезных решений для дальнейшего развития управления ускорительными установками. Создание системы управления в целом и ее отдельных частей тесным образом связано с созданием и эксплуатацией всех устройств и систем самой ускорительной установки. Именно эффективное сотрудничество на этапе разработки и тестирования различного оборудования ускорителя и управляющей электроники послужило основой для успешной разработки компонентов системы управления.

Опыт и знания, полученные при выполнении диссертационной работы, а также наработанные методики могут быть с успехом применены для построения систем управления любыми сложными инженерно-физическими установками и системами.

Автор выражает искреннюю благодарность старшим коллегам Ю.И. Эйдельману, И.Я. Протопопову, С.И. Мишневу, чей вклад оказал значительное влияние на развитие и реализацию идей по автоматизации установок комплекса ВЭПП-4, коллегам А.Н. Алешаеву, Е.А. Симонову, Д.Н. Шатилову, А.Н. Дубровину, А.И. Науменкову, в тесном взаимодействии с которыми была создана система управления комплексом.

За плодотворное сотрудничество и творческий вклад в создание системы управления бустера автор выражает глубокую признательность своим коллегам Павлу Чеблакову и Антону Дербеневу, представивших результаты своей работы к защите кандидатских диссертаций, Евгению Симонову, Станиславу Середнякову, Евгению Бехтеневу, Дмитрию Шатилову, Руслану Кадырову и Виталию Мамкину, а также всем коллегам и соавторам из BNL, постоянное взаимодействие с которыми определило ряд принципиальных моментов и помогло решить много технических вопросов, в том числе: Юку Тиану, Майку Дэвидсэйверу, Тимуру Шафтану.

Автор благодарен А.М. Батракову за высказанные замечания и конструктивную критику, а также Е.Б. Левичеву за помощь и поддержку в подготовке диссертационной работы.

Список сокращений

ВЧ, СВЧ	высокая частота, сверхвысокая частота – частоты возбуждения ускоряющих систем (резонаторов, линака).
ПЛК	Периферийный контроллер с программируемой логикой. Используется в системах промышленной и технологической автоматизации.
ПО	Программное Обеспечение.
API	Application Programming Interface – определение функционала программного компонента, входных и выходных данных независимо от внутренней реализации.
binpsr	Budker Institute of Nuclear Physics Save/Restore – приложение для сохранения и восстановления режима работы бустерного синхротрона, разработанная сотрудниками ИЯФ.
BNL	Brookhaven National Laboratory - MR национальная лаборатория, США, Лонг-Айленд, Нью-Йорк. Подчиняется департаменту энергетики США.
BPM	Beam Position Monitor – устройство для регистрации электрического сигнала от пролетающего пучка, состоящее из комбинации изолированных от корпуса электродов (чаще всего – 4-х “пятакон”), расположенных вокруг пространства, где движутся заряженные частицы.
BPMR	BPM Receiver – электронное устройство для обработки сигналов, поступающих от BPM, с целью вычисления положения центра тяжести пучка относительно позиции BPM.
BSM	Booster Status Monitor – CSS-приложение, отображающее состояние всех элементов бустера.
BTS	Booster To Storage – канал транспортировки пучка из бустерного синхротрона в накопительное кольцо.
CA	Channel Access – протокол сетевого взаимодействия для обмена и синхронизации данных в EPICS между клиентскими программами и серверами на базе IOC.
CFC	Cavity Field Controller – контроллер управления ВЧ системой бустера.
coco	Close Orbit COrrrection – приложение коррекции замкнутой орбиты, разработанное в ИЯФ.
CSS	Control System Studio – программный графический пакет для разработки и запуска пользовательских приложений для систем управления, базирующихся на EPICS, TANGO,

TINE. Пакет разработан на базе Eclipse.

- DCCT** Direct Current Current Transformer - измеритель тока пучка разработки фирмы Bergoz [128].
- EPICS** Experimental Physics and Industrial Control System – свободно распространяемый пакет программного обеспечения для создания распределенных систем управления.
- EPS** Equipment Protection System – система, вырабатывающая блокировочные сигналы для защиты оборудования от повреждения в случае условий, неприемлемых для работы.
- EVG** EVent Generator - модуль в формате VME разработки фирмы Micro-Research Finland Oy [105], формирующий последовательность событий отправляемых по оптическому кабелю в виде цифрового кода.
- EVR** EVent Receiver - модуль в формате VME или cPCI разработки фирмы Micro-Research Finland Oy [105], принимающий стартовые сигналы (либо цифровые сигналы, приходящие по оптическому кабелю, либо входные электрические импульсы) и формирующий на выходах задержанные импульсы заданной длительности.
- FCT** Fast Current Transformer - быстрый измеритель тока пучка разработки фирмы Bergoz [129].
- IOC** Input/Output Controller - программный контроллер (сервер) ввода/вывода; основная часть программного обеспечения, составляющего базу данных EPICS; обеспечивает ввод/вывод данных в/из устройств, обработку данных и предоставляет сетевой доступ к значениям параметров системы (PV) через протокол Channel Access (CA).
- IOT** Inductive Output Tube или клистрод – устройство для усиления ВЧ мощности, основанное на использовании модулированного электронного пучка. IOT имеет меньшие размеры и больший к.п.д. по сравнению с клистроном.
- LTV** Linac To Booster – канал транспортировки пучка из линейного ускорителя в бустерный синхротрон.
- NSLS-II** National Synchrotron Light Source, новый (второй по счету) источник синхротронного излучения третьего поколения, построенный в Брукхейвенской национальной лаборатории США в 2014 году.
- PLC** Programmable Logic Controller - программируемый логический контроллер – компьютерная составляющая магистрального устройства, содержащего набор аналого-цифровых и цифро-аналоговых модулей, используемого в

качестве автономного средства для промышленной автоматизации.

- PSC** Power Supply Controller – устройство, обеспечивающее прием и обработку данных, поступающих от компьютера и PSI, работает по циклическому сценарию, выполняя засылку кода для отработки ЦАП в PSI. Работа PSC синхронизируется либо внешними сигналами, либо внутренним таймером. Связь с PSI осуществляется через оптический кабель.
- PSI** Power Supply Interface – устройство, обеспечивающее ввод/вывод аналоговых сигналов и их обработку. Работа PSI синхронизируется сигналами от PSC.
- PV** Process Variable – значение параметра, описываемого рекордом в EPICS. Значение хранится в памяти сервера IOC и доступно по сети при помощи инструментов, использующих протокол Channel Access (CA).
- TANGO** Свободно распространяемый пакет объектно-ориентированного программного обеспечения для создания распределенных систем управления устройствами. Используется более, чем в 20 лабораториях, среди которых ESRF, Soleil, Elettra, DESY and ALBA.
- TINE** Three-fold Integrated Networking Environment - пакет программного обеспечения системы управления, разработанный и используемый в DESY.
- TMS** Tune Measurement System - система измерения бетатронных частот на бустере NSLS-II.
- softIOC** IOC, не связанный с контрольно-измерительным оборудованием, а выполняющий только обработку данных и предоставляющий сетевой доступ к значениям параметров системы (PV) через протокол Channel Access (CA).
- TSW** ThermoSWitches – система обработки состояния релейных термоключей, входящая в систему блокировок бустера NSLS-II.

Список терминов

- бустер:** Бустерный синхротрон – синхротрон, предназначенный для ускорения пучка, который по достижении заданной энергии перепускается в другой циклический ускоритель, как правило, накопительное кольцо.
- вэйвформа:** Waveform, в тексте диссертации – численный массив измерений или уставок (заданий), прочитанный из или записанный в электронное устройство. Вэйвформа может быть представлена также в виде символьного массива.
- одренок** Интеллектуальный КАМАК-контроллер, реализующий систему команд машин Одра-1300; в системе управления ВЭПП-4 используется в качестве управляющей ЭВМ.
- приложение:** Компьютерная программа.
- рэмп:** Ramp - в тексте диссертации означает процесс изменения магнитного поля или какого-либо другого параметра в течение цикла работы бустера.
- уставка:** Значение, заданное или подготовленное к заданию в устройство. В зависимости от задачи уставка может быть выражена или в единицах выходного напряжения ЦАП (Вольт) или в физической величине (Ампер, Гаусс, Вольт и т.п.), соответствующей управляемому параметру.
- alarm:** Сигнальный статус какого-либо контрольно-измерительного параметра в EPICS. Alarm определяется при выполнении сценария рекорда (record) согласно текущему значению параметра и заданным значениям соответствующих полей (свойств) рекорда.
- fan-out:** Разветвитель оптических сигналов, модуль в формате VME или 6U cPCI разработки фирмы Micro-Research Finland Oy [105], принимающий по оптическому кабелю цифровые сигналы и транслирующий их в 12 оптических выходов.
- Record (рекорд):** EPICS record – программный объект, размещающийся в базе данных EPICS (в IOC), который обладает уникальным именем, определенным типом и поведением, параметрами, значения которых доступны в системе, связью с параметрами других рекордов, связью с оборудованием.

Литература

1. A. Aleshaev, et al., VEPP-4 Control System // ICALEPCS'95, Chicago, October 1995.
2. A. Aleshaev, S. Karnaev, et al., VEPP-4 Control System Upgrade // ICALEPCS'97, Beijing, China, Proceedings, p.34-36, Published: 1997.
3. A. Bogomyagkov, et al., Automation of operations on the VEPP-4 Control System // ICALEPCS'05, 10-14 November, 2005, Geneva, Switzerland.
URL:https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ica05/proceedings/pdf/P1_072.pdf
4. А.Н. Алешаев и др., Ускорительный комплекс ВЭПП-4 // Препринт ИЯФ 2011-20, 136 стр.
5. V. E. Blinov, et al., The status of VEPP-4 // Physics of Particles and Nuclei Letters, September 2014, Volume 11, Issue 5, pp 620-631.
6. В.В. Нейфельд, В.В. Петров, Инжектор "Позитрон" для ВЭПП-4, история и состояние // Препринт ИЯФ 2015-15, 67 стр.
7. Сибирский Центр Синхротронного и Терагерцового Излучения.
URL:<http://ssrc.inp.nsk.su/СКР/beamlines.html>
8. С.М. Гуров и др., Состояние работ по бустеру для NSLS-II // Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования", № 4, стр. 3-6, 2012 // Status of NSLS-II booster // Problems of Atomic Science and Technology, 2012 N4 (2012), pp. 3-6.
9. V. Kiselev for the BINP and BNL teams, The NSLS-II Booster Development and Commissioning // RuPAC2014, Obninsk, Russia.
URL:<http://epaper.kek.jp/rupac2014/papers/thcb01.pdf>
10. NSLS-II Home Page.
URL:<http://www0.bnl.gov/ps/nsls2/about-NSLS-II.php>
11. EPICS Home Page.
URL:<http://www.aps.anl.gov/epics/>
12. В.В. Смалюк, Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях // Новосибирск: Параллель, 2009, 294 с. с ил.
[URL:http://lib.inp.nsk.su/books/4359/4359.Smaluk-Diagnostika_Puchkov_Zarjzhennih_Chastic_v_Uskoriteljah.pdf](http://lib.inp.nsk.su/books/4359/4359.Smaluk-Diagnostika_Puchkov_Zarjzhennih_Chastic_v_Uskoriteljah.pdf)
13. N. S. Vorobiev et al., Picosecond streak-cameras for bunch diagnostics in accelerators // Proc. SPIE 10328, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, 103280N (February 20, 2017).
14. L. Mestre, et al., A Pragmatic and Versatile Architecture for LHC Controls Software // ICALEPCS'2005, Geneva, October 2005.
URL:https://icalepcs2005.web.cern.ch/icalepcs2005/Presentations/PostDocs/TU1_3-5O-2.pdf.

15. J. Corbett, et al., Accelerator Control Middle Layer // Proceedings of Particle Accelerator Conference (PAC 03), Portland, OR, 12-16 May 2003.
URL:<http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-10724.pdf>
16. GE Intelligent Platforms.
URL:<http://www.ge-ip.com/products/programmable-logic-controller/c552>
17. SIMATIC Industrial Automation Systems.
URL:<http://w3.siemens.com/mcms/programmable-logic-controller/en/Pages/Default.aspx>
18. Allen-Bradley, CompactLogix Control Systems.
URL:<http://ab.rockwellautomation.com/Programmable-Controllers/CompactLogix>
19. J. Tang, et al., SNS Vacuum Control System: Software Design Strategy and Commissioning Experience // Proceedings of ICALEPCS2003, Gyeongju, Korea.
URL:<http://epaper.kek.jp/ica03/PAPERS/WP567.PDF>
20. E. Kadokura, et al., PLC-Based Beam Charge Interlock System for Radiation Safety in the KEKB Injector LINAC // Proceedings of ICALEPCS07, Knoxville, Tennessee.
URL:<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ica07/PAPERS/TPPA28.PDF>
21. ITER PLC Software Engineering Handbook.
URL:http://www.iter.org/doc/www/content/com/lists/websitetext/attachments/94/sd10_v1_3.pdf
22. TANGO Home Page.
URL:<http://www.tango-controls.org/>
23. A.V. Akimov, et al., Status of Injection Complex VEPP-5: Machine Commissioning and First Experience of Positron Storage // Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany.
24. Брук Г., Циклические ускорители заряженных частиц // Москва: АтомИздат, 1970.
25. Alexander Wu Chao, Maury Tigner, Handbook of accelerator physics and engineering // Singapore: World Scientific, 1999.
26. Gramolin A. V. et al., Measurement of the Two-Photon Exchange Contribution in Elastic ep Scattering at VEPP-3 // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl., 2012, v. 225-227, p. 216-220.
27. S.A. Belomestnykh, M.M. Brovin, V.N. Litvinenko, N.A. Vinokurov, P.D. Vobly, The up-grades of VEPP-3 storage ring for OK-4 XUV FEL // Proceedings of 11th National Conference on Charged Particle Accelerators, 1988, Dubna, 1989. Vol. 1, p. 410.
28. Shevchenko O.A., Arbuzov V.S., Vinokurov N.A., et al., Novosibirsk Free Electron Laser: Recent Achievements and Future Prospects // Radiophysics and Quantum Electronics, 28 February 2017, Pages 1-8.

29. Кезерашвили, Г. Я., Обратный комптон-эффект на электрон-позитронных пучках в накопителях: Методика, эксперименты, новые возможности // 01.04.16, диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Новосибирск-1994.
30. Мучной Николай Юрьевич, Комптоновское рассеяние в прецизионных экспериментах на электрон-позитронных коллайдерах // 01.04.20, диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Новосибирск-2011.
31. Blinov, V. E.; Bogomyagkov, A. V.; Cherepanov, V. P.; и др., High precision energy calibration with resonant depolarization at the VEPP-4M collider // 37th International Conference on High Energy Physics (ICHEP), Valencia, SPAIN, JUL 02-09, 2014 // Nuclear and Particle Physics Proceedings, том: 273, стр.: 210-218, 2016
32. V.V Anashin, et al., Status of the KEDR detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 478, Issues 1–2, 1 February 2002, Pages 420–425.
33. V.S. Bobrovnikov, D.N. Grigoriev, V.V. Kaminskiy, V.N. Kudryavtsev, N.Yu Muchnoi, O.L. Rezanova, L.I. Shekhtman, V.N. Zhilich, The energy calibration system of the KEDR tagger // DOI: 10.1088/1748-0221/9/10/C10017, JINST 9 (2014) 10, C10017.
URL:<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/9/10/C10017/pdf>
34. V.E.Blinov et al., Beam energy and energy spread measurement by Compton backscattering of laser radiation at the VEPP-4M collider // ICFA Beam Dyn.Newslett. 48, 2009, 195-207.
35. Piminov, P. A.; Baranov, G. N.; Bogomyagkov, A. V.; и др., Synchrotron radiation research and application at VEPP-4, Proceedings of the International Conference Synchrotron and Free Electron Laser Radiation: Generation and Application // SFR-2016, JUL 04-07, 2016 // Серия книг: Physics Procedia, Том: 84, Стр.: 19-26.
36. Barnyakov A. Yu., et al., Focusing Aerogel RICH for Particle Identification and Momentum Measurement // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 639. P. 290-293.
37. Смалюк Виктор Васильевич, Подавление коллективных неустойчивостей пучка в электрон-позитронных накопителях // 01.04.20, диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Новосибирск-2010.
38. Мешков Олег Игоревич, Методы оптической диагностики электрон-позитронных пучков и взаимодействия плазмы с сильноточным электронным пучком // 01.04.08, 01.04.20, диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Новосибирск-2010.
39. Г.С.Пискунов, С.В.Тарарышкин, Двадцатичетырехразрядная ЭВМ в стандарте КАМАК // Автометрия, 1986, 4, с.32-38.

40. Козак Виктор Романович, Распределенные системы управления и контроля ускорительными комплексами ИЯФ СО РАН // 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Новосибирск-2012.
41. Батраков Александр Матвеевич, Аналого-цифровая аппаратура автоматизированных систем контроля и управления экспериментальными физическими установками // 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Новосибирск-2011.
42. А.Н.Алешаев, Базовое программное обеспечение систем управления ускорительно-накопительными комплексами // 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новосибирск-1995.
43. Карнаев Сергей Евгеньевич, Разработка и реализация системы управления ускорительно-накопительным комплексом ВЭПП-4 // 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новосибирск, 1996.
44. A. Aleshaev, S. Karnaev, S. Mishnev, N. Muchnoi, D. Shatilov, E. Simonov, S. Smirnov, V. Smaluk, A. Veklov // Integration of PCs into the VEPP-4 Control System, The 5th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls, 22-25 march 2005, GUAS (Hayama), Japan.
45. E.Goman, S. Karnaev, O. Plotnikova, E. Simonov, The Database of the VEPP-4 Accelerating Facility Parameters // 7th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls, 20-23 October 2008, Ljubljana, Slovenia.
46. M.G.Fedotov, S.E.Karanev, V.A.Kiselev, N.Y.Muchnoi, A.N.Selivanov, E.I.Zinin, Optical Measurements of the Beam Parameters of the VEPP-4M Storage Ring // PAC'2001, Chicago, Il., USA.
URL:<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p01/PAPERS/WPAN318.PDF>
47. V.Kaplin, S.Karnaev, A. Kvashnin, I.Morozov, O.Plotnikova // The precise temperature measuring system of the VEPP-4M electron-positron collider, Proc. of RuPAC 2006, Novosibirsk.
48. V. Kaplin, S. Karnaev, et al., PC-based innovations in the VEPP-4 obsolete control system // The 6th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls, 24-27 October 2006, Newport News, Virginia, USA.
49. А.Н. Алешаев, В.Р Козак. Программное обеспечение для микроЭВМ одренок. Центральная ЭВМ // Препринт ИЯФ СО АН СССР 88-48.
50. Dement'ev, E.N., et al., Commissioning feedback systems at VEPP-4M electron-positron collider // Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 7, No. 7, pp. 466–472, 2010.

51. E.A. Bekhtenev, G.V. Karpov, Upgrade of BPM System at VEPP-4M Collider // Proceedings of RuPAC2014, Obninsk, Russia.
52. А.Н.Алешаев, Р.В.Басалаев, И.В.Белоусов, С.Е.Карнаев, В.Р.Козак и др., Сетевое обеспечение системы управления ВЭПП-4 // 17-е Совещание по ускорителям заряженных частиц, ГНЦ РФ, Ин-т физики высоких энергий, Протвино, 17-20 октября 2000, Протвино, т.1, с.180-183.
53. В.В.Каргальцев, А.В.Репков. Интерфейс локальной сети (B0612) // Препринт ИЯФ 88-104.
54. А.Н. Алешаев. Программное обеспечение для микроЭВМ “Одренок” // Операционная система ОДОС. Препринт ИЯФ СО АН СССР 89-67.
55. Леденев, Анатолий Викторович, Прецизионные измерительные и управляющие системы для ускорителей заряженных частиц // 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новосибирск, 1988.
56. Каргальцев В.В., Купер Э.А., Блок для измерения импульсных параметров БИИП-4 (Ц0640) // Препринт ИЯФ СО АН СССР 82-48.
URL:http://irbiscorp.sppl.nsc.ru/fulltext/prepr/1982/p1982_48.pdf
57. Ю.В.Заруднев, С.Е.Карнаев, Б.В.Левичев и др., Управление магнитной системой накопителя ВЭПП-4М // XIV Совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1994.
58. MIL-STD-1553 Designer’s Guide, Sixth Edition, 2003.
URL:<http://www.ddc-web.com/Documents/dguidehg.pdf>
59. С. Тикадзуми, Физика ферромагнетизма, магнитные свойства вещества // пер. с японского, М. “МИР”, 1983 г.
60. В.Р.Козак, Набор устройств с интерфейсом CANbus в евромеханическом стандарте // Препринт ИЯФ 2008-18.
61. А. М. Батраков, И.В. Ильин, А.В. Павленко, Прецизионные цифровые интеграторы сигналов с точной синхронизацией // Автометрия, 2015, т. 51, №1, стр. 62-69.
62. Martin R. Kraimer, EPICS Input/Output Controller (IOC) Application Developer’s Guide // Argonne National Laboratory, Advanced Photon Source, June 1998.
URL:http://www.ing.iac.es/~docs/external/epics/epicsCD/docs/appdevguide3_13_0b12.pdf
63. V.E. Blinov, et al., Absolute calibration of particle energy at VEPP-4M // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research; A; 2002 494(1-3), pp. 81-85.
64. В. И. Каплин и др., Программируемый 32-канальный контроллер температуры с управляемыми реле // Препринт ИЯФ 2013-1.
65. A. N. Aleshaev, et al., Developing a System for the 2D Stabilization of SR Beams in the VEPP-3 Storage Ring // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics, 2015, Vol. 79, No. 1, pp. 1–4.

66. Журавлев Андрей Николаевич, Развитие оптической диагностики пучков заряженных частиц на комплексе ВЭПП-4М // 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Новосибирск, 2009.
67. Channel Access Reference Manual.
URL:<http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/12-docs/CAref.html>
68. Dmitry Bolkhovityanov, Pavel Cheblakov, Fedor Emanov, CXv4, a Modular Control System // Proceedings of ICALEPCS2015, Melbourne, Australia.
URL:<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ICALEPCS2015/papers/wepgf093.pdf>
69. Aulchenko, et al., Study of the BELLE CsI calorimeter prototype with the BINP tagged photon beam // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, v. 379 (1996), pp. 491-494V.
70. Anchugov O.V., et al, Experiments on the Physics of Charged Particle Beams at the VEPP-4M Electron-Positron Collider // Journal of Experimental and Theoretical Physics, Vol. 109, No. 4 (2009), p. 590-601.
71. Anchugov, O. V.; et al., Use of the methods of accelerator physics in precision measurements of particle masses at the VEPP-4 complex with the KEDR detector // Instruments and Experimental Techniques (ИТЭ), v. 53, iss.1, p.15-28, Published: Jan 2010.
72. V.V. Anashin, et al., Search for narrow resonances in $e^+ e^-$ annihilation between 1.85 and 3.1 GeV with the KEDR Detector // Physics Letters B, 703 (2011) 543-546.
73. V.M.Aulchenko, et al., New precision measurements of the J/Ψ and Ψ' meson masses // Physics Letters B, 2003, v.B573, p.63-79, hep-ex/0306050.
74. Anashin V.V., et al., Measurement of the tau lepton mass at KEDR detector // JETP Letters, Vol. 85, No. 8, 2007 Springer. JETP Letters ISSN 0021-3640 p. 347 Письма в ЖЭТФ, 85 (2007) 429-434.
75. V.V. Anashin, et al., New precise determination of the tau lepton mass at KEDR detector // Nucl.Phys. B Proc.Suppl.169 (2007) 125-131.
76. V.V. Anashin, et al., Tau lepton mass determination at KEDR // Nuclear Physics B Proceedings Supplements, 218:155-159, 2011.
77. V.E.Blinov, et al., Reviw of beam energy measurements at VEPP-4M collider // Nucl. Instr. And Meth., A598(2009)23.
78. A.V. Bogomyagkov, et al., Study of the Energy Stability in the VEPP-4M Storage Ring // Proceedings of EPAC 2002, Paris, France.
79. V.E. Blinov, et al., New Experiments with Polarized Beams at VEPP-4M // Proceedings of EPAC 2002, Paris, France.
80. V.V. Anashin, et al., Measurement of $\psi(3770)$ parameters // Physics Letters B, 711 (2012) 292-300.

81. Aulchenko, et al., Measurement of the ratio of the lepton widths $\Gamma(ee)/\Gamma(\mu\mu)$ for the J/ψ meson // Physics Letters B, v. 731, pp. 227-231, published Apr 4 2014.
82. V.V. Anashin, et al., Measurement of D^0 and D^+ meson masses with the KEDR Detector // Physics Letters B, 686 (2010) 84-90.
83. Anashin, V. V.; et al., Measurement of R_{uds} and R between 3.12 and 3.72 GeV at the KEDR detector // PHYSICS LETTERS B, V 753, pp. 533-541, Feb 2016.
84. S.Sinyatkin, A.Dubrovin, S.Gurov, E.Levichev, Yu.Pupkov, E.Rouvinsky, A.Sukhanov, Design of NSLS-II Booster Dipoles with Combined Functions Magnetic Field // Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China.
URL:<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ipac2013/papers/thpme029.pdf>
85. A.Ludeke, Application of digital regulated Power Supplies for Magnet Control at the Swiss Light Source // PSI, Switzerland.
URL:<http://arxiv.org/pdf/cs.SE/0111019>
86. R. Li, et al., Ramping Power Supplies for the SSRF Booster // Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy.
87. M. T. Heron, et al., The Diamond Light Source Control System // EPAC06, Edinburgh, UK, 26-30 June, 2006.
88. Pascal Gros, et al., The 3Hz Power Supplies of the Soleil Booster // Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland.
89. J.A. Carwardine, S.V. Milton, and D.G. McGhee, Performance of the Ramping Power Supplies for the APS Booster Synchrotron // May 1-5, 1995, Dallas, Texas, USA.
90. C.-Y. Yao, et al., Recent Improvement of the APS Booster Synchrotron // Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China.
91. B. Šolar, Beam Position Monitor Digital Signal Conditioning // ICALEPCS'05, Geneva, 10 - 14 Oct.
92. M.G. Abbott, et al., The Diamond Light Source Control System Interface to the Libera Electron Beam Position Monitors // ICALEPCS2009, Kobe, Japan.
93. M. Boge, First Operation of the Swiss Light Source // Proceedings of EPAC 2002, Paris, France.
URL:https://www.researchgate.net/publication/237822258_FIRST_OPERATION_OF_THE_SWISS_LIGHT_SOURCE?ev=pub_cit_inc
94. Y.Papaphilippou, et al., Chromaticity Measurements in the ESRF Booster // PAC2003, Portland, Oregon, USA, May 12-16.
95. M. Lonza, et al., Implementation and Operation of the Elettra Booster Control System // Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy.

96. D. Beltran, et al., The Design of the ALBA Control System: a Cost-Effective Distributed Hardware and Software Architecture // ICALEPCS2011, Grenoble, France.
97. Richard Farnsworth, et al., Outsourcing, Insourcing, and Integration of Control Systems in the Australian Synchrotron // ICALEPCS07, Knoxville, Tennessee, USA.
98. URL:<http://defense.ge-ip.com/products/ics-710/p2036>
99. URL:<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-7443EN.pdf>
100. A. Pavlenko et al., Electronics for Precise Measurements of Accelerator Pulsed Magnets // Proceedings of IPAC'2013.
URL:<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2013/papers/thpea033.pdf>
101. A.M.Batrakov, Waveform Digitizer ADC200ME-PCI // Technical description, BINP, Novosibirsk, 2011.
102. URL:<https://www.bnl.gov/isd/documents/88764.pdf>
103. T. Korhonen, Review of Accelerator Timing Systems // ICALEPCS'99, Trieste, Italy.
104. F. Lenkszus, R. Laird, The APS Event System // ICALEPCS'95, Chigago, June 1995.
105. Jukka Pietarinen, Timing System Modules // EPICS Collaboration Meeting, Argonne, June 2006.
URL:<http://www.mrf.fi/pdf/presentations/MRF.EPICS.2006.ANL.pdf>
106. C. Serrano, et al., Timing of the ALS Booster Injection and Extraction // ICALEPCS'13, San Francisco, CA, USA.
107. H. Kaji, et al., Upgrade of Event Timing System at SuperKEKB // ICALEPCS'13, San Francisco, CA, USA.
108. C. Y. Wu, et al., Status of the TPS Timing System // ICALEPCS'13, San Francisco, CA, USA.
109. Y.Chernousko et al., The Timing System for Diamond Light Source // EPAC2006, Edinburgh, Scotland.
110. URL:<http://www.mrf.fi/index.php/timing-system/71-event-generator>
111. URL:<http://www.mrf.fi/index.php/vme-products/75-vme-event-receiver-rf-vme-evr-230rf>
112. URL:<http://www.mrf.fi/index.php/vme-products/77-vme-optical-fan-out>
113. EPICS 3-14 Record Reference Manual.
URL:https://wiki-ext.aps.anl.gov/epics/index.php/RRM_3-14
114. Y. Tian, W. Louie, J. Ricciardelli, L.R. Dalesio, G. Ganetis, Power Supply Control System of NSLS-II // ICALEPCS2009, Kobe, Japan.
115. LEM Ultrastab.

- URL:http://www.lem.com/hq/en/component/option,com_catalog/task,displaymode/1/id,71.24.69.100.0/
- URL:http://www.lem.com/hq/en/component/option,com_catalog/task,displaymode/1/id,71.36.44.000.0/
116. URL: <http://www.advanced-energy.com/en/ASeries.html>
117. A. Korepanov, A. Akimov, A. Pachkov, A. Panov, Pulse Power Supplies for Kicker Magnets Of NSLS-2 Booster Ring // Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China.
<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2013/papers/mopwa027.pdf>
118. А.М. Семенов, В.В. Анашин, С.М. Гуров, А.А. Краснов, Статус и описание вакуумной системы бустера NSLS-II // Известия РАН, серия физическая, 2015, том 79, №1, с. 58-62.
119. URL:<http://www.mksinst.com/product/Product.aspx?ProductID=456>
120. URL:<https://www.mksinst.com/product/Category.aspx?CategoryID=72>
121. URL:http://www.vatvalve.com/en/products/catalog/A/482_1_V
122. P. Cheblakov, A. Derbenev, R. Kadyrov, S. Karnaev, S. Serebnyakov, E. Simonov, NSLS-II Booster Interlock System // Proceedings of ICALEPCS13, 06-11 October, San-Francisco, USA.
123. URL:http://www.vatvalve.com/en/products/catalog/F/752_1_V
124. URL:http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1769-um005_-en-p.pdf
125. URL:<http://ab.rockwellautomation.com/Graphic-Terminals/2711P-PanelView-Plus-6-Terminals>
126. V. Smaluk, et al., Beam Diagnostics for the NSLS-II Booster // Proceedings of DIPAC2011, Hamburg, Germany.
URL:<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/DIPAC2011/papers/mopd01.pdf>
127. V. Smaluk, et al., Status of Beam Diagnostics for NSLS-II Booster // Proceedings of IBIC2013, Oxford, UK.
128. URL:http://www.bergoz.com/index.php?option=com_content&view=article&id=35&Itemid=48
129. http://www.bergoz.com/index.php?option=com_content&view=article&id=23&Itemid=28
130. K. Vetter, et al., NSLS-II RF Beam Position Monitor // PAC'11, New York, USA.
131. Libera Main Page.
URL:<http://www.i-tech.si/>
132. K. Ha, Y. Tian, et al., Commissioning of National Synchrotron Light Source-II (NSLS-II) Fast Orbit Feedback System // ICALEPCS 2015, Melbourne, Australia, October 17-23, 2015.

133. E.A. Bekhtenev, et al., Fast Tune Measurement System // RuPAC'12, Saint-Petersburg, Russia.
134. URL:<http://aps.anl.gov/epics/sites.php>
135. Best OPI, Yet (BOY).
URL:<https://github.com/ControlSystemStudio/cs-studio/wiki/BOY>
136. Control System Studio Archive System Description.
URL:<http://cs-studio.sourceforge.net/docbook/ch11.html>
137. Alarm Handler.
<http://www.aps.anl.gov/epics/EpicsDocumentation/ExtensionsManuals/AlarmHandler/alhUserGuide-1.2.35/ALHUserGuide.html>
138. А.А. Дербенев, С.Е. Карнаев, А.В. Макеев, П.Б. Чеблаков, Базовое программное обеспечение для управления магнитной системой бустерного синхротрона NSLS-II // Вестник НГУ, Серия: Физика, 2014, том 9, выпуск 3, стр. 88-98.
URL:http://www.phys.nsu.ru/vestnik/catalogue/2014/03/Vestnik_NSU_14T9V3_p88_p98.pdf
139. Нестуля Р. В. и др., Масштабируемая отказоустойчивая среда управления сложными технологическими объектами на основе одноранговой распределённой архитектуры // Автометрия, 2013, Т. 49, № 6, с. 70–78.
140. Дербенев А.А., Карнаев С.Е., Симонов Е.А., Чеблаков П.Б., Методика мониторинга параметров бустера для источника синхротронного излучения NSLS-II // Автометрия, Т. 51, №1, 2015, стр. 106-114.
141. Channel Archiver Manual.
URL:<http://www.slac.stanford.edu/grp/lcls/controls/global/sw/epics/extensions/ChannelArchiver/manual.pdf>
142. Sinyatkin, et al., Magnetic Measurement Results of NSLS-II Booster Dipole Magnets // Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China.
URL:<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2013/papers/thpme030.pdf>
143. I. Okunev, et al., Ramped Magnetic Measurement of NSLS-II Booster Dipoles // Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China.
URL:<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ipac2013/papers/thpme031.pdf>
144. M. Borland, Elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation // Advanced Photon Source LS-287, September 2000 // ICAP2000, September 11-14, 2000, Darmstadt, Germany.
URL:<http://www.aps.anl.gov/Science/Publications/lsnotes/ls287.pdf>
145. James Safranek, et al., LOCO with Constraints and Improved Fitting Technique // SLAC-PUB-13686, June 2009.
URL:<http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-13686.pdf>
146. Andrei Terebilo, Channel Access Client Toolbox for MATLAB // SLAC-PUB-9339.

- URL:<http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-9339.pdf>
147. S.Gurov et al., Commissioning of NSLS-II Booster // Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany.
URL:<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2014/papers/mopro088.pdf>
148. Mooney T. M. synApps: EPICS Application Software for Synchrotron Beamlines and Laboratories // Proc. of PCaPAC 2010. Saskatoon, Canada. P. 106-108.
URL: <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pcapac2010/papers/thcoma02.pdf>
149. Проект BURT: Back Up and Restore Tool.
URL:<http://www.aps.anl.gov/epics/extensions/burt/>
150. J. Galambos, et al., A Save, Compare, and Restore Application for Snapshotting Machine Settings // Proc. of ICALEPCS07. Knoxville, USA. P. 656-658.
URL: <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ica07/PAPERS/RPPB23.PDF>
151. Archiver Appliance.
https://slacmshankar.github.io/epicsarchiver_docs/details.html
152. Yu. A. Rogovsky et al., Beam Measurements with Visible Synchrotron Light at VEPP-2000 Collider // Proceedings of DIPAC2011, Hamburg, Germany.
<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/DIPAC2011/papers/mopd40.pdf>

Приложение 1

Список программ системы управления ВЭПП-4

Представлен краткий перечень основных программ (в одрятах) и приложений (в РС), которые в настоящее время обеспечивают функционирование комплекса ВЭПП-4. В списке не приведены многочисленные серверные приложения (ИОС) и CSS-скрины, которые обслуживают взаимодействие с новой электроникой, внедренной в последнее время: пикап-станции, система измерения бетатронных частот на ВЭПП-3. Также в списке не приведены приложения, в настоящее время обеспечивающие управление впускной частью канала транспортировки пучка из ИК в ВЭПП-3, и приложения, сохраняющие данные о состоянии комплекса ВЭПП-4 в базу данных PostgreSQL. Всего для управления комплексом используется более 200 программ и приложений.

Программы, постоянно работающие в одрятах

Одренок UPO (управление инжектором “Позитрон”)

BANK* ³	взаимодействие с аппаратурой, формирование цикла работы инжектора, синхронизация обменов данными
LIPU*	синхронизация работы с интегрирующими АЦП
PAUK*	межпроцессорный обмен данными через stp (см. п. 2.2.2 Гл. 2)
STOR*	мониторинг параметров источников питания, отображение состояния источников питания в графическом виде с использованием цвета, автоподстройка параметров элементов к заданным значениям
ZAGR*	загрузчик режима работы инжектора
DWER*	отключение импульсных источников питания
ROLL*	ручное управления элементами инжектора

³ * - помечены программы, написанные лично автором

KORD* отслеживание параметров различных элементов

SPEK* снятие зависимостей от изменения параметров

Одренок IPO (измерение параметров элементов инжектора “Позитрон”)

BINK* взаимодействие с аппаратурой, синхронизация обменов данными

LIP1* синхронизация работы с интегрирующими АЦП

BELD* отображение значений основных параметров инжектора и пучков

Одренок MSV3 (управление магнитной системой ВЭПП-3)

BANK взаимодействие с аппаратурой, синхронизация устройств при ускорении

CONT измерение токов и напряжений источников питания, отображение состояния источников питания в графическом виде с использованием цвета

PREP управление процессом ускорения пучка и перемагничивания кольца ВЭПП-3

VMSR управление стабилизацией орбиты при работе пользователей с СИ

COCB прием управляющих команд и значений от программ, работающих в РС

VEPP ручное управление элементами ВЭПП-3

SEPA управление переключением сепаратрисы при накоплении пучка

Одренок RFV3 (управление ВЧ-системой ВЭПП-3)

BANK взаимодействие с аппаратурой управления ВЧ

SCAL отображение значений основных параметров ВЧ-системы, а также состояния температур, затворов СИ, подстройки положения пучка

Одренок BEAMV3 (диагностика пучка на ВЭПП-3)

CUER измерение тока и времени жизни пучка

UCHE,
SMEN статистика работы накопителя ВЭПП-3

SCAN	автоподстройка бетатронных частот в режиме выпуска пучка
GOST	мониторинг подъема энергии пучка

Одренок CHAN (управление каналом перепуска пучка из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М)

BANK*	взаимодействие с аппаратурой, формирование цикла работы канала перепуска, синхронизация обменов данными
RCV3*	межпроцессорный обмен данными через star
CONT*	мониторинг параметров источников питания, отображение состояния источников питания в графическом виде с использованием цвета, автоподстройка параметров элементов к заданным значениям
PROC*	управление процессом перепуска пучка
ZAGR*	загрузчик режимов работы канала транспортировки
DWER*	отключение импульсных источников питания
ROLL*	ручное управления элементами канала
TUKI*	автоматизация ударов по пучку в коллайдере
CINJ*	переключение режима работы инфлекторов ВЭПП-4М и дефлектора ВЭПП-3

Одренок MSVEPP-4 (управление коллайдером ВЭПП-4М)

BANK*	взаимодействие с аппаратурой, синхронизация устройств при ускорении
BINK*	работа с интегрирующими АЦП
PROC*	управление процессом ускорения пучка и перемагничивания кольца коллайдера ВЭПП-4М
PROS*	управление впуском пучка, автоматическая подстройка светимости, сканирование по энергии, задание режимов работы другим установкам комплекса
CONT*	мониторинг параметров источников питания и ВЧ, отображение состояния источников питания в графическом виде с использованием цвета

VEP4*	ручное управления элементами коллайдера
UFPO, SCRU*	управление подавителем фона (скрепером)
COCB	прием управляющих команд и значений от программ, работающих в РС
SVED*	управление сведением пучков
UDA4*	управление ударами по сгусткам для измерения бетатронных частот и выбивания пучка
CHRO*	измерение хроматизма
BETA*	измерение бета-функции в линзах финального фокуса
ELOF*	переключение электростатики
CNTR*	подробная проверка состояния источников питания

Одренок BEAMV-4 (диагностика пучка на ВЭПП-4М)

CUEP	измерение тока и времени жизни пучка
PAUK	передача данных о состоянии орбиты, межпроцессорный обмен данными через star
ORBI	управление параметрами для измерения орбиты

Одренок CONTROL (управление вакуумной системой и системой термостабилизации)

VVMB	измерение вакуума на ВЭПП-3 и ВЭПП-4М по показаниям вакуумных ламп
VACM	измерение вакуума на ВЭПП-3 и ВЭПП-4М по токам магниторазрядных насосов
KLAP*	авторегулировка температуры воды, охлаждающей магниты ВЭПП-4М
SCRN*	отображение состояния установок комплекса ВЭПП-4
FLOW	контроль протока охлаждающей воды

Программы для конфигурирования системы

EDBS*, EDSS*	конфигурирование аппаратуры и элементов управления
REBA	конфигурирование аппаратуры и элементов управления ВЭПП-4М
EDDT*	набор программ для конфигурирования режимов работы установок
EDPR*	конфигурирование процессов ускорения для ВЭПП-4М
EDST*	архивирование режимов работы ВЭПП-4М

Основные инженерные программы в одрятах

TEBL*	тестирование КАМАК-аппаратуры
SPIT	работа с источниками питания ВЭПП-3
PULS, COMS	проверка пульсаций источников тока ВЭПП-3
DERG	изучение переходных процессов источников питания ВЭПП-3
RISE, COME	мониторинг тока в процессе ускорения на ВЭПП-3
VODA*	работа с источниками питания ВЭПП-4М
FIPS*	проверка пульсаций источников питания магнитной системы ВЭПП-4М
PULS*	вывод графиков измерений различных сигналов элементов ВЭПП-4М
BROV*	проверка источников питания в стойках коррекции ВЭПП-4М
OLEG*	проверка элементов электростатики ВЭПП-4М
TECA*	работа с ЦАПИ (см. п. 2.2.6 Гл. 2)

Серверные приложения, работающие в РС

server	загрузка и файловая система одрят, обеспечение системы межпроцессорного обмена stap
stapserver	сохранение состояния stap в файл
kadrserver	сохранение данных из программ, работающих в одрятах, в файлы в РС

Приложения, работающие в РС

lorb	отображение орбиты пучков в ВЭПП-3 и ВЭПП-4М
vpic	отображение параметров впуска пучка в ВЭПП-4М (вывод координат и частот колебаний на пикапах)
ccd	вывод формы и поперечных размеров пучков в ВЭПП-3 и ВЭПП-4
coco	коррекция орбиты пучков в ВЭПП-3 и ВЭПП-4М, а также бета-функций в кольцах
nmrst, nmr	измерение и стабилизация ЯМР в основных магнитах ВЭПП-3 и ВЭПП-4М
tmbf	подавление поперечных колебаний пучка в ВЭПП-4М
luna	измерение светимости на ВЭПП-4М
v3_orbi	измерение орбиты в ВЭПП-3
v3_sep	распределение тока в ВЭПП-3 по сепаратрисам
scan	измерение бетатронных частот в ВЭПП-3
icm, draw	измерение и вывод орбиты в канале транспортировки ВЭПП-3 – ВЭПП-4М
termo	вывод графиков температур охлаждающей воды на комплексе
twidget	мониторинг измерений температур на комплексе
progress, plot	измерение и вывод фазовых колебаний пучка на ВЭПП-4М

Приложение 2

Схемы комплекса источника СИ NSLS-II

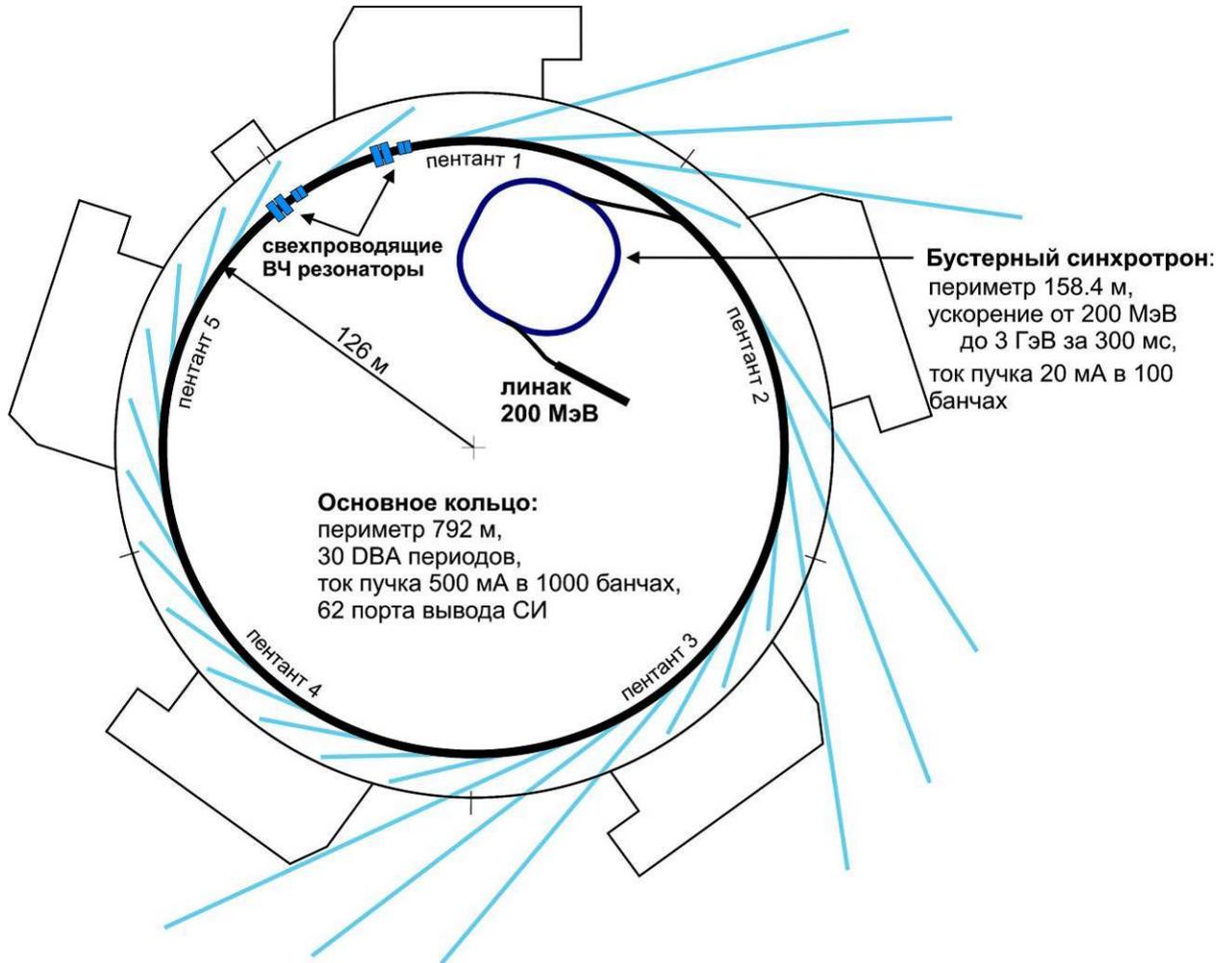


Рисунок 1: Схема комплекса NSLS-II.

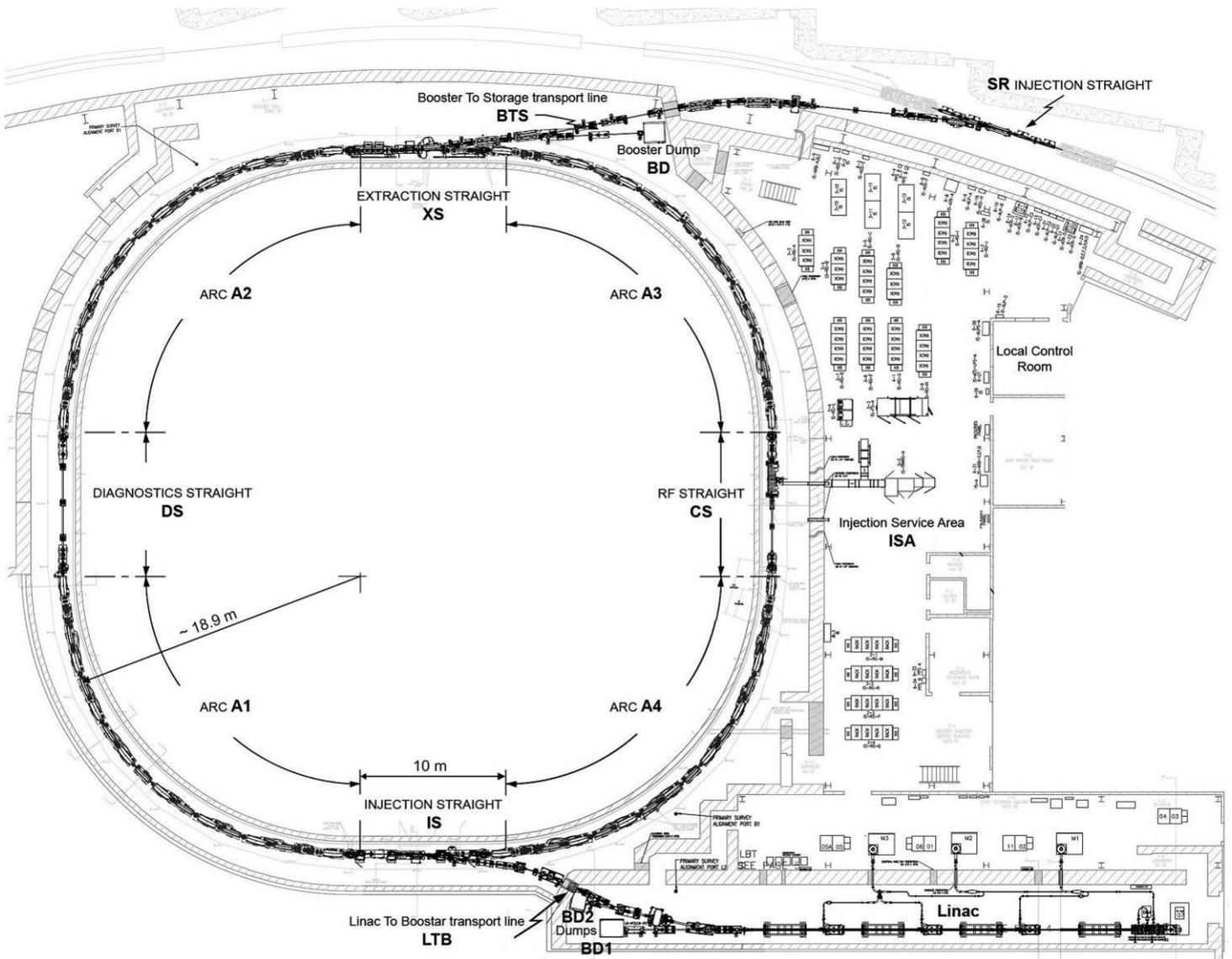


Рисунок 2: Схема инжектора NSLS-II.

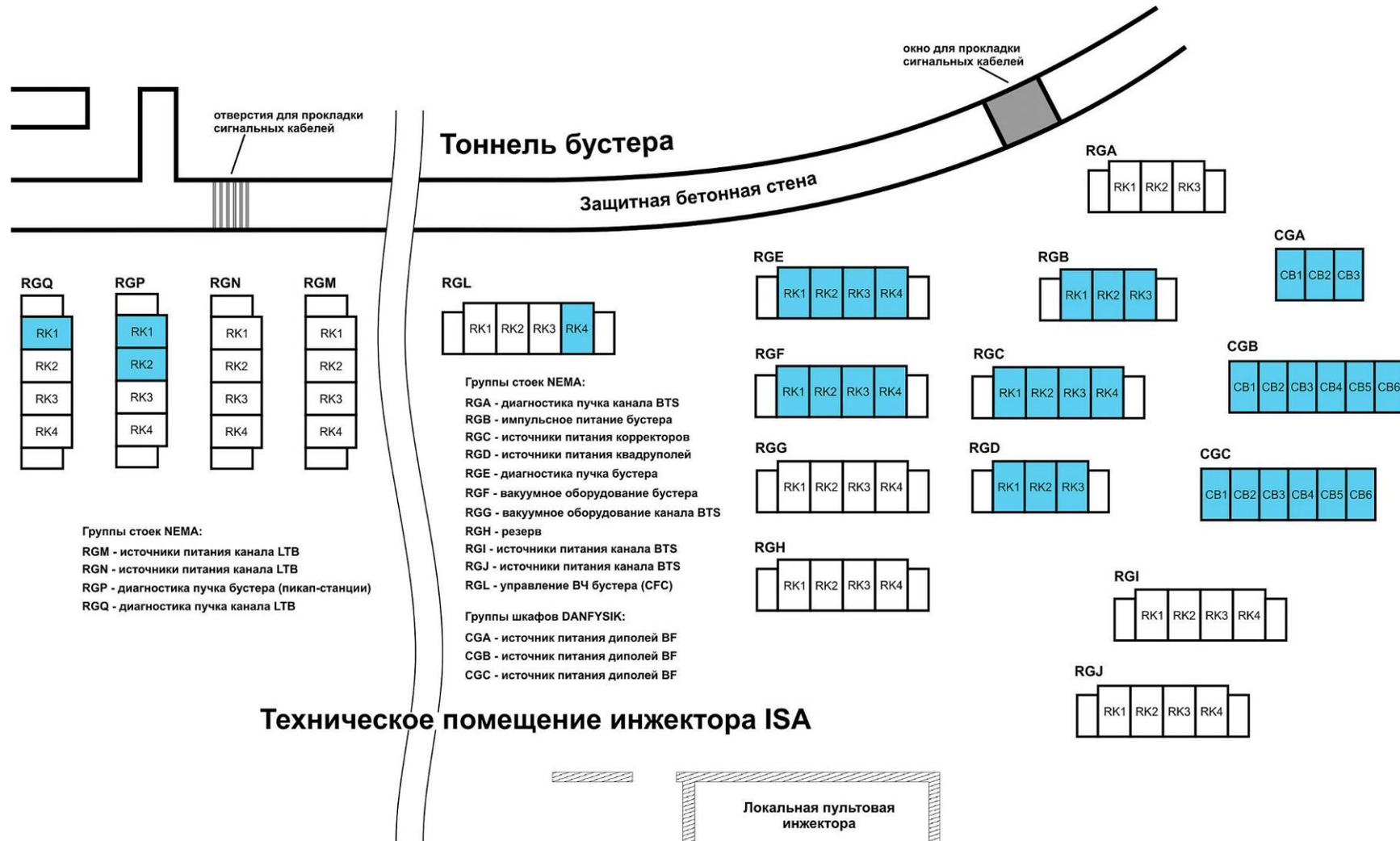


Рисунок 3: Схема размещения радиостоек и шкафов с электроникой и источниками питания в ISA. Голубым цветом выделены радиостойки, относящиеся к бустеру.

Приложение 3

Оборудование системы управления бустера

Таблица 1. Список контроллеров и электроники, использующейся в системе управления бустерным синхротроном NSLS-II.

	Устройство	Назначение	Кол.
Компьютеры и контроллеры			
1.	IBM System x3250 M3	2 6-ти ядерных процессора Xeon 5600 3.6 ГГц, до 288 Гбайт оперативной памяти, до восьми жестких дисков общим объемом 8 Тбайт, аппаратный рэйд, два порта 1 Гбит Ethernet, два слота расширения PCI Express, два источника питания, стоечный формат 1U	10
2.	MVME3100 6E-1152	Бездисковый VME контроллер: процессор PowerPC e500 833 МГц, 512 Мбайт оперативной памяти, два порта 1 Гбит Ethernet, два слота расширения PMC-X	5
3.	CT11T7C10 KL1	Одноплатный бездисковый контроллер сPCI крейта 6U, Intel Core 2 Duo 2.16 ГГц, до 4 Гбайт оперативной памяти, два порта 1 Гбит Ethernet, два слота расширения PMC	1
Электроника PLC			
4.	1769-L32E	PLC контроллер, LAN, память 1.5 Мбайта, поддержка выполнения 8 программ, обслуживание до 30-ти модулей	7
5.	1769-ECL	Терминатор коммутационной шины для контроллера 1769-L32E (левый)	4
6.	1769-ECR	Терминатор коммутационной шины для контроллера 1769-L32E (левый)	3
7.	1769-CRR1	Расширитель коммутационной шины	4
8.	1769-IQ32T	32-х канальный модуль ввода, опорное напряжение 24 В	13
9.	1769-IR6	6-ти канальный модуль измерения температуры с помощью резистивных датчиков	8

10.	1769-OW8I	8-ми канальный релейный AC/DC модуль вывода, рабочее напряжение 265 В (AC) / 125 В (DC), коммутируемый ток 2.5 А на канал (16 А на модуль)	15
11.	1769-IF8	Входной 8-ми канальный 16-ти битный аналогово-цифровой модуль. Диапазон входных сигналов: ± 10 В, 0 – 10 В DC, 4 – 20 мА, 0 – 20 мА	4
12.	1769-PB2	Источник питания коммутационной шины: 2 А, 5 В (DC); 1 А, 24В (DC)	11
13.	1769-OF8V	8-ми канальный 16-ти битный ЦАП ± 10 В или 0 – 10 В DC	1
14.	1769-OG16	16-ти канальный модуль с выходными сигналами в формате TTL	1
15.	1606-XLS240E	Внешний источник питания 24 В, 10 А	8
Электроника синхронизации			
16.	VME-EVR230-RF	Обработчик сигналов (событий), поступающих на оптический и TTL входы, и генератор выходных сигналов, привязанных к входным событиям. 3 выхода CML, до 20 выходов TTL	5
17.	VME-FOUT12	Размножитель оптических сигналов. 12 выходов	5
18.	PMC-EVR	Обработчик сигналов (событий), поступающих на оптический и TTL входы, и генератор выходных сигналов, привязанных к входным событиям. 3 выхода TTL	6
Электроника для управления источниками питания			
19.	PSC	Модуль цифровой обработки вэйвформ загружаемых от компьютера и прочитанных из устройств (PSI). Управляет работой аналогового устройства PSI. Плата устанавливается в специальный крейт 3U	44
20.	PSI Dual	2-х канальное аналоговое устройство: 2 канала ЦАП (20 бит), 2 x 9 каналов АЦП (16 бит), 16-ти битный входной регистр TTL, 8-ми битный выходной регистр TTL, стоечный формат 1U	34

21.	PSI Single	Одно-канальное аналоговое устройство: 1 канал ЦАП (20 бит), 9 каналов АЦП (16 бит), 16-ти битный входной регистр TTL, 8-ми битный выходной регистр TTL, стоечный формат 1U	10
Аналого-цифровая электроника			
22.	U1065A-001	Одноканальный АЦП: 10 бит, полоса 2 ГГц, частота дискретизации – до 8 ГГц, память до 2 Гбайт, входное сопротивление 50 Ом, диапазон входного сигнала 50 мВ - 5 В, 6U CompactPCI	1
23.	ICS-710A-8	32-х канальный АЦП с дифференциальными входами: 24 бит сигма-дельта АЦП, частота дискретизации одновременно по всем каналам - до 216 кГц, отношение сигнал/шум 90 дБ, 6U CompactPCI	1
24.	VsDC3	2-х канальный измеритель с численным интегрированием входного сигнала от старта до стопа: АЦП 24 бит, полоса 100 кГц, частота дискретизации одновременно по двум каналам 312.5 кГц, память 32 Мбайт, входное сопротивление 120 Ом/10 МОм, диапазон входного сигнала ± 2 В, плата VME, минимальная продолжительность интегрирования - 5 мкс	4
25.	ADC200	2-х канальный АЦП: 12 бит, частота дискретизации одновременно по двум каналам 200 МГц, входное сопротивление 50 Ом/1 кОм, диапазон входного сигнала ± 4 В, плата PMC	4
Коммутационное оборудование			
26.	CN2650I-16-2AC	16-ти портовый сервер-коммутатор RS-232/422/485 в Ethernet	5
27.	Brocade FCX648	Управляемый сетевой коммутатор: 48 портов 10/100/1000 Мбит, 2 порта 10 Гбит, 2 порта для стэкинга 64 Гбит	3
28.	Brocade FWS624	Управляемый сетевой коммутатор: 24 порта 10/100/1000 Мбит	3
29.	CN2650I-16	16-ти канальный терминальный сервер Ethernet - RS232/422/485	4

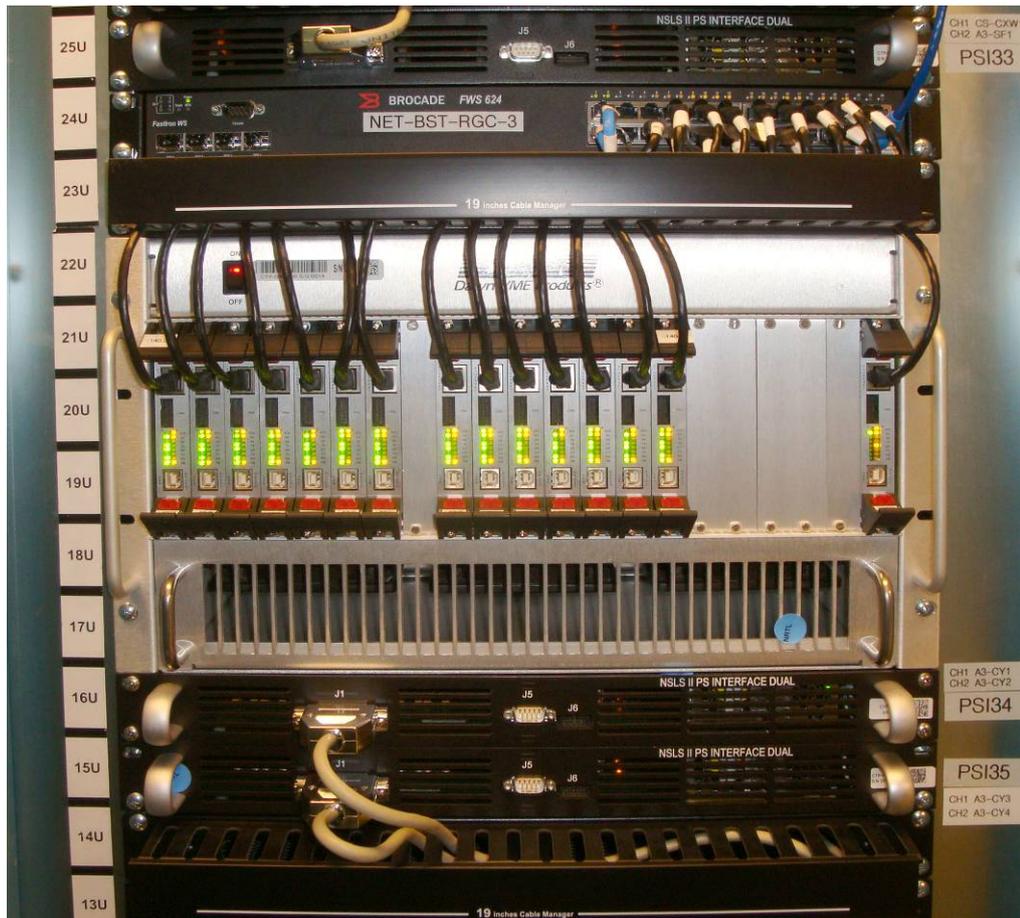


Рисунок 1: Крейт с PSC и три каркаса с двухканальными PSI. Вид с передней стороны стойки RGC2.



Рисунок 2: Радиостойки RGC2, RGC3, RGC4 с источниками питания корректоров:

- 1 – корзины с источниками питания,
- 2 – крейт с PSC,
- 3 – каркасы PSI,
- 4 – кондиционер, подающий охлажденный воздух в две стойки.

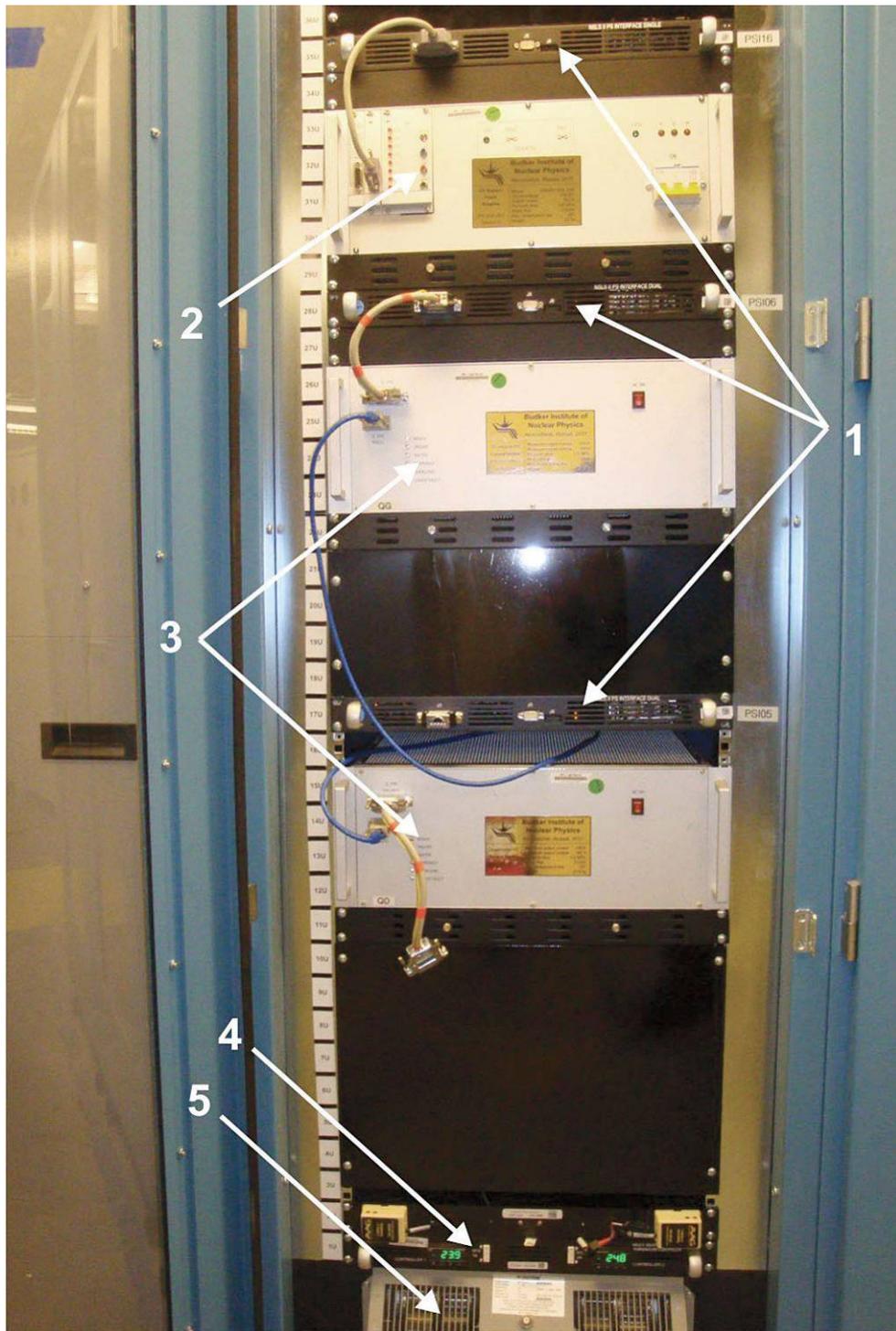


Рисунок 3: Радиостойка RGD1 с источниками питания квадруполей и доворотного магнита канала транспортировки из бустера в основное кольцо:

- 1 – каркасы PSI,
- 2 – источник питания доворотного магнита,
- 3 – источники питания квадруполей,
- 4 – контроллер температуры в стойке,
- 5 – приточный вентилятор.

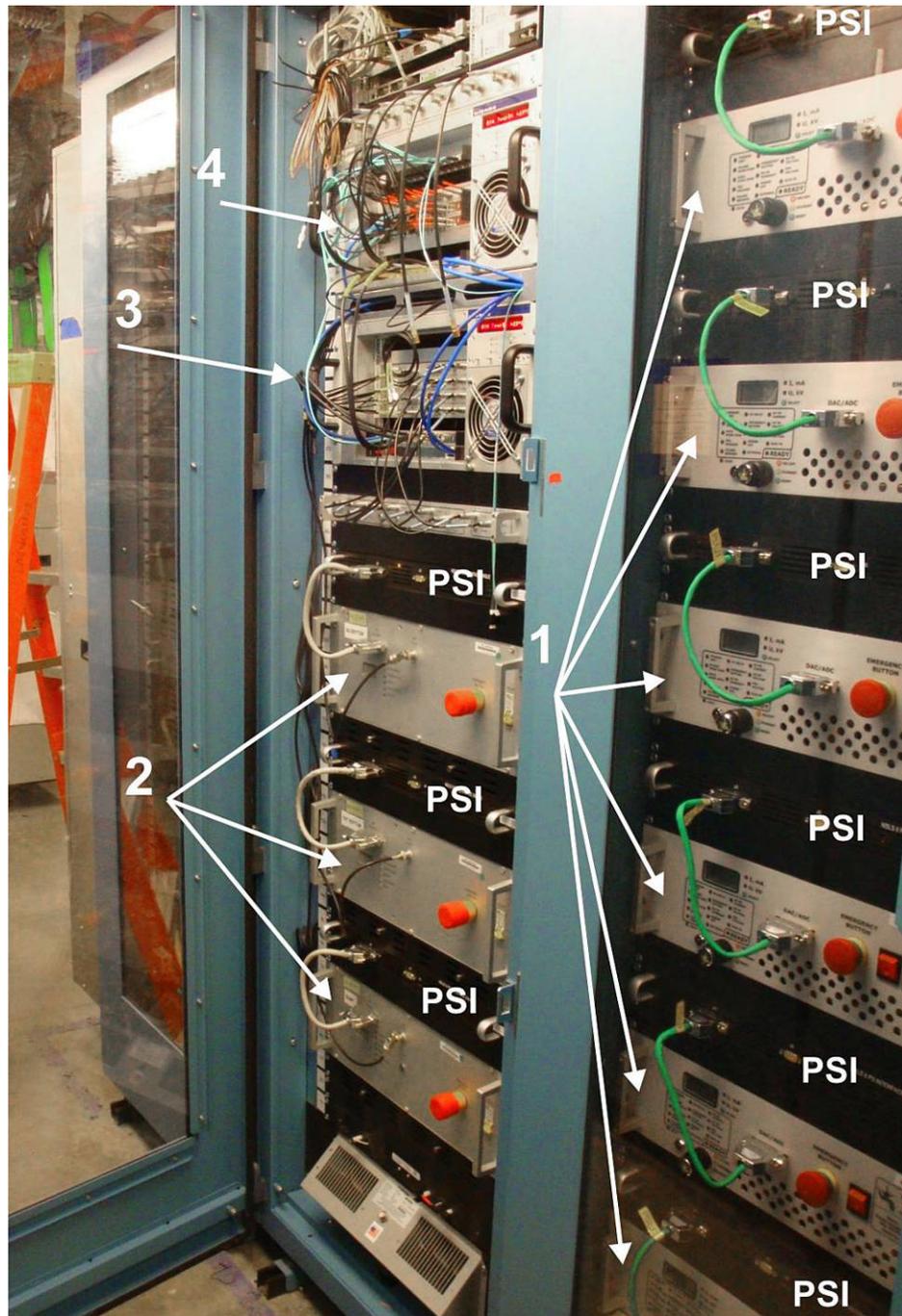


Рисунок 4: Радиостойки RGB2, RGB3 с оборудованием для управления импульсными источниками питания:

- 1 – зарядные устройства для источников питания кикеров,
- 2 – зарядные устройства для источников питания импульсных магнитов,
- 3 – VME-крейт **vsdcioс** с АЦП для измерения импульсных полей и аппаратурой системы синхронизации,
- 4 – VME-крейт **extioс** с АЦП для оцифровки коротких импульсных сигналов и с аппаратурой системы синхронизации.

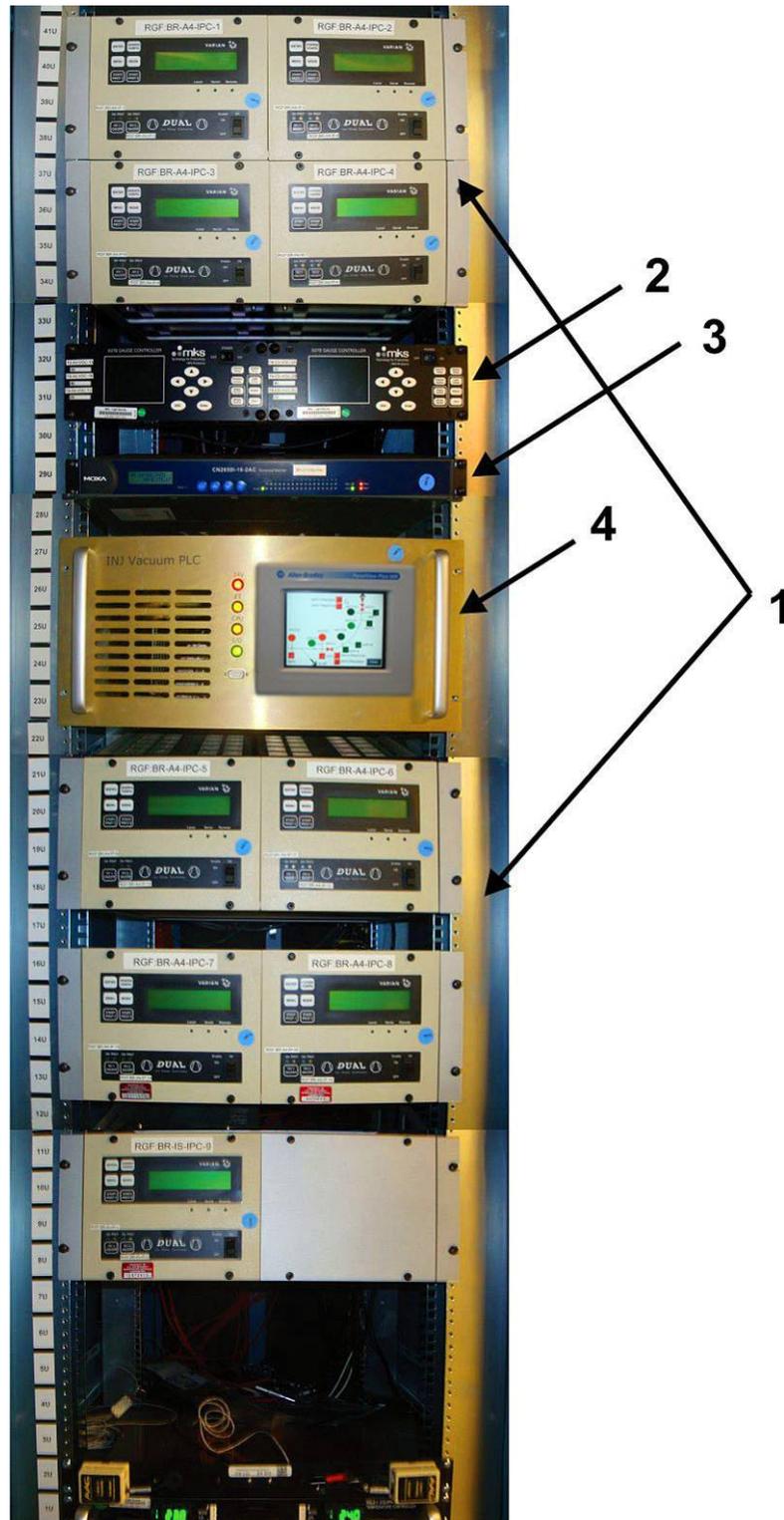


Рисунок 5: Радиостойка RGF4 с вакуумным оборудованием:

- 1 – двухканальные контроллеры магниторазрядных насосов Varian 929-7011,
- 2 – трехканальные контроллеры вакуумных ламп MKS937B,
- 3 – коммутатор RS232<->Ethernet Moxa CN2650-16,
- 4 – каркас с шасси PLC.

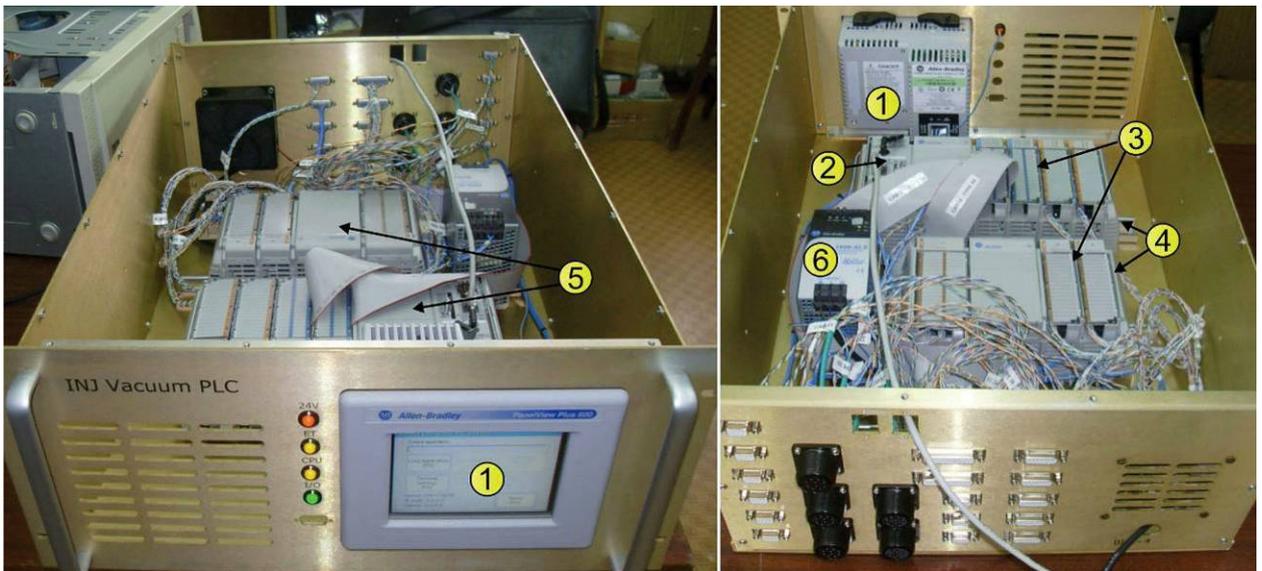


Рисунок 6: Каркас с шасси вакуумного PLC (вид спереди и вид сзади):
 1 – сенсорная панель 2711PC-T6C20D,
 2 – контроллер 1769-32E,
 3 – I/O модули,
 4 – расширитель шины,
 5 – источник питания 1769-PB2,
 6 – внешний источник питания 1606-XLS240E.

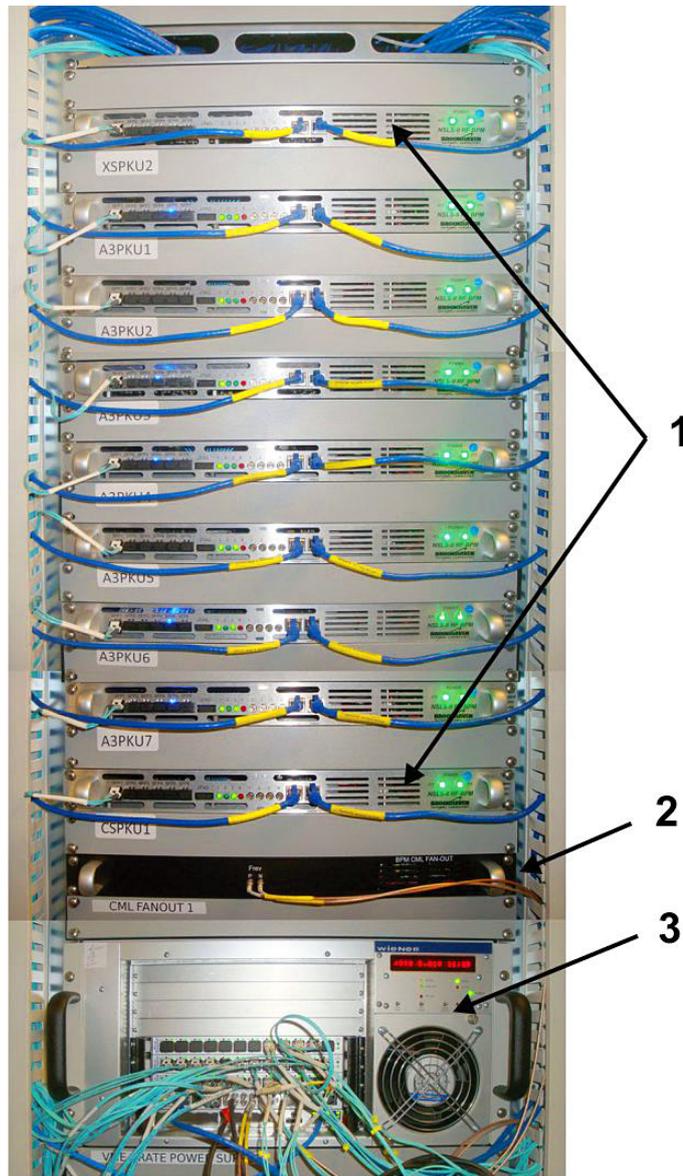


Рисунок 7: Радиостойка RGE1 с пикап-станциями:

- 1 – пикап-станции (ВРМ-ресиверы),
- 2 – размножитель сигнала частоты обращения пучка в бустере,
- 3 – VME-крейт с аппаратурой синхронизации (EVR для генерации сигнала частоты обращения в бустере, три модуля Fan-out для размножения оптических сигналов, поступающих от EVG).

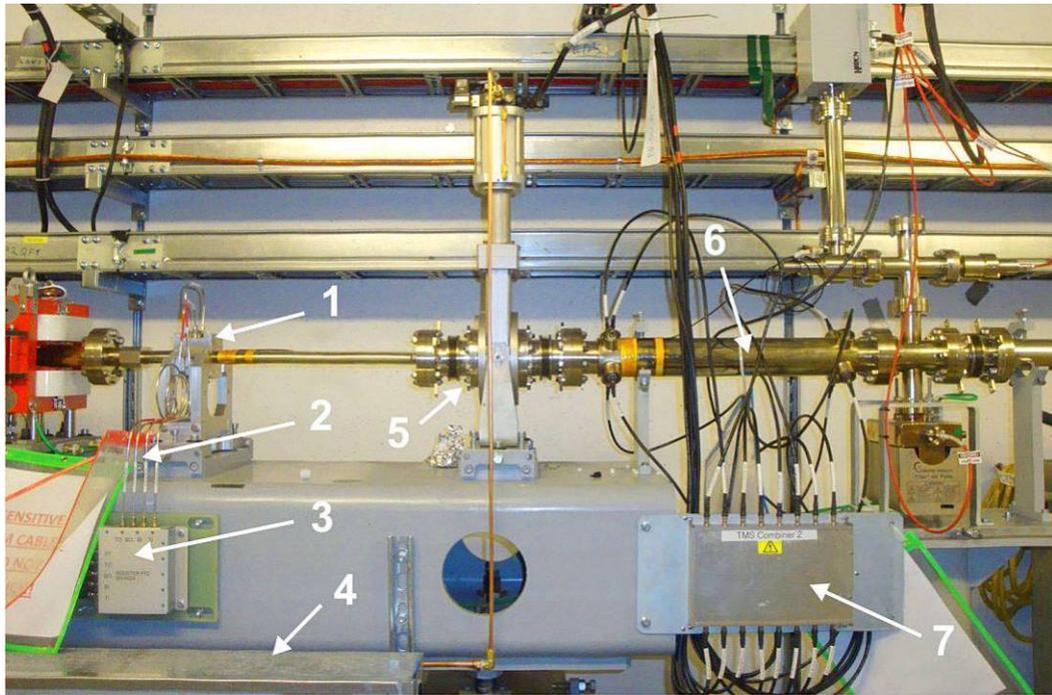


Рисунок 8: Участок диагностического промежутка бустера:

- 1 – пикап,
- 2 – радиационно-стойкие кабели из нержавеющей стали с силиконовым наполнителем,
- 3 – коммутационная плата (Pilot Tone Combiner),
- 4 – экранированный короб для прокладки сигнальных кабелей до пикап-станций,
- 5 – автоматический вакуумный шибер,
- 6 – камера с полосковыми пластинами для приема сигнала от пучка (система измерения бетатронных частот),
- 7 – коммутационная плата с пассивными фильтрами.