ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

На правах рукописи

НОЗДРИН МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

КОМПЛЕКС АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЛИНАК-200 И ПРОТОТИПА ФОТОИНЖЕКТОРА ОИЯИ

Специальность: 01.04.20 — Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

> Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

> > Научные руководители:

доктор физико-математических наук, чл.-кор. РАН Ширков Григорий Дмитриевич

кандидат технических наук Минашкин Владимир Федорович

Дубна 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
ГЛАВА 1. Обзор использующихся на ускорителях систем управления	17
1.1 EPICS	. 17
1.2 TANGO	. 19
1.3 European XFEL	. 20
1.4 LHC	. 21
1.5 Коммерческие системы	. 22
1.6 Заключение	. 22
ГЛАВА 2. Линейный ускоритель электронов Линак-200	23
2.1 Структура и параметры ускорителя	. 23
2.2 Требования к системе управления. Постановка задачи	. 25
2.3 Организация системы управления ускорителем	. 26
2.4 Аппаратура электронной пушки	. 29
2.4.1 Катодная электроника	. 31
2.4.2 Плата контроллера	. 32
2.4.3 Программа тестирования контроллера	. 38
2.4.4 Программное обеспечение GunCtrl	. 39
2.5 Синхронизатор	. 44
2.6 Система термостатирования ускоряющих секций	. 47
2.7 Система радиационного контроля	. 52
2.7.1 Программное обеспечение RadCtrl	. 55
2.7.2 Калибровка системы	. 60
2.8 Система блокировок и сигнализаций	. 62
2.8.1 Система блокировок	. 62
2.8.2 Система сигнализации	. 64
2.8.3 Состав системы	. 64
2.8.4 Алгоритм работы системы	. 64
2.9 Заключение	. 66

ГЛАВА 3. Стенды фотопушки и фотоинжектора	67
3.1 Концепции «полого» и «прозрачного» фотокатодов	67
3.2 Стенд фотопушки	70
3.2.1 Создание стенда	70
3.2.2 Масс-спектрометрия	71
3.2.3 Лазерные драйверы	74
3.2.4 Текущее состояние	76
3.3 Стенд фотоинжектора	78
3.3.1 Оборудование стенда	78
3.3.2 Физический пуск	80
3.4 Заключение	81
ГЛАВА 4. Диагностика на ускорителе Линак-200 и стендах фотопушки и	
фотоинжектора	82
4.1 Система видеодиагностики и видеонаблюдения ускорителя	
Линак-200	82
4.2 Система видедиагностики стенда фотопушки	85
4.2.1 Программное обеспечение на основе Vimba SDK	87
4.2.2 Программное обеспечение AVINE	89
4.2.3 Оценка времени послесвечения люминофора	91
4.2.4 Проверка задержки срабатывания триггера и экспозиции	92
4.2.5 Диагностика электронного пучка	94
4.2.6 Поперечный эмиттанс электронного пучка	96
4.2.7 Диагностика лазерного пучка	98
4.2.8 Тестирование системы на Линак-200	101
4.3 Прочая диагностика на стендах	101
4.3.1 Измерение энергии лазерного излучения	101
4.3.2 Измерение температуры термокатода	102
4.4 Заключение	104
Заключение	105
Список литературы	107

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Современная физика высоких энергий характеризуется все возрастающей сложностью экспериментальных установок, все увеличивающимися размерами, все возрастающим временем разработки и постройки детекторов и ускорителей, все возрастающей стоимостью эксперимента. Создание и эксплуатация новых установок становится не под силу отдельным институтам и даже странам и стало основой широкого международного сотрудничества, что хорошо видно на примере постройки и работы Большого адронного коллайдера в CERN. Существующие сегодня крупные ускорители и детекторы строились в течение более десяти лет, а первые работы по подготовке проекта начались и того раньше. При этом, обсуждаемые сегодня новые проекты потребуют не только новых принципов ускорения, детектирования и обработки данных, но и поиска новых инженерных и конструкторских решений. Работа в этих направлениях будет совместно вестись в различных странах в рамках международного сотрудничества и, при осознании важности таких исследований, в ней нужно принимать участие на всех этапах этого длительного пути. Это будет иметь большой побочный технологический эффект, стимулирует развитие технологий и коммуникаций, а также, в силу масштабности проектов, способствовать техническому образованию в стране [1].

В ОИЯИ работа в этой области ведется в рамках проекта «Проектирование, изготовление и испытания прототипов элементов ускорителей и коллайдеров нового поколения для фундаментальных и прикладных целей», включающего в себя три направления:

- тестовый стенд с электронным пучком на основе линейного ускорителя Линак-200 с энергией до 200 МэВ,
- создание прототипа DC-фотоинжектора с энергией до 400 кэВ,
- создание на базе стенда линейного ускорителя комплекса лабораторных и практических работ.

Важными элементами вышеперечисленных установок являются системы управления и диагностики, о которых и пойдет речь в данной диссертации.

Основные цели работы

- 1. Анализ требований к системе управления линейного ускорителя электронов Линак-200, разработка и создание на этой основе системы управления, удовлетворяющей этим требованиям.
- 2. Разработка и создание стенда для проведения исследования термо- и фотокатодов.
- Разработка и создание систем диагностики электронного пучка для ускорителя Линак-200 и стендов фотопушки и фотоинжектора, и лазерного пучка для стенда фотопушки.

Научная новизна

- Разработана концепция минимального и достаточного набора подсистем управления для запуска линейного ускорителя электронов Линак-200 взамен устаревших либо избыточно сложных аналогов ускорителя MEA, создано недостающее оборудование для этих подсистем и оригинальное программное обеспечение.
- 2. При непосредственном участии автора разработан, создан и используется стенд для исследования термо- и фотокатодов, на котором в настоящий момент проводятся поисковые исследования по одной из основных задач в области фотокатодных разработок — созданию фотокатода, не требующего для работы сверхвысокого вакуума, но при этом обладающего приемлемыми квантовым выходом (10⁻³ и выше) и временем жизни (не менее года). Фотокатодная сборка с предложенным в ОИЯИ «прозрачным» фотокатодом интегрирована в ускоряющую структуру фотоинжектора, осуществлен физический пуск прототипа фотоинжектора.
- 3. Разработанная система диагностики электронного пучка на основе высокочувствительной видеокамеры Prosilica позволила впервые в ОИЯИ получить изображение поперечного профиля электронного пучка с разрешением до 35 пикселей на мм и изображение лазерного пучка на виртуальном катоде с аналогичным разрешением.

Практическая значимость работы

- 1. Созданная система управления ускорителя Линак-200 позволила обеспечить:
 - (а) физический запуск ускорителя Линак-200: запущены все ускорительные станции, импульсный ток пучка на выходе ускорителя составил 1,5 мА, энергия электронов на выходе составляет 200 МэВ, что соответствует проектному значению; ток на пользовательском выводе пучка (энергия 22 МэВ) составил 15 мА в импульсе;
 - (б) получение генерируемого пучком электронов инфракрасного излучения на ондуляторе (длина волны 13,7 мкм, мощность 30 мВт);
 - (в) бесперебойную работу ускорителя, в частности, работу на экспериментальное исследование кристаллических сцинтилляторов для новых детекторов частиц на выведенном электронном пучке предельно низкой интенсивности; исследование радиационной стой-кости полупроводниковых материалов для создания калориметра малых углов для будущих электрон-позитронных коллайдеров в рамках международной коллаборации FCAL.
- 2. Созданный стенд фотопушки позволил проводить исследовательские работы по развитию и оптимизации DC-фотоинжектора с энергией электронов в пучке до 30 кэВ на базе предложенного «прозрачного» для лазерного луча фотокатода; по разработке и совершенствованию фотокатодов с целью увеличения квантового выхода, времени жизни и снижения требования к вакуумным условиям. Создаваемый полномасштабный стенд фотоинжектора позволит проводить эти исследования с новым лазерным драйвером и пучком электронов с энергией до 400 кэВ.
- Системы диагностики электронного пучка на ускорителе Линак-200 и стенде фотопушки предоставили возможность регистрации профиля, размеров и распределения интенсивности пучка электронов (а на стенде фотопушки — и лазерного луча).

Личный вклад автора

Непосредственно автором разработано программное обеспечение для систем управления электронной пушкой, радиационного контроля и контроллера системы термостабилизации ускорителя Линак-200, плата контроллера электронной пушки (электроника и программное обеспечение микроконтроллера платы), системы видеодиагностики для Линак-200 и стенда фотопушки, и система измерения эмиттанса для стенда фотопушки. Личный вклад автора в получение остальных защищаемых результатов также является определяющим.

Положения, выносимые на защиту

- 1. Концепция новой системы управления линейного ускорителя электронов Линак-200, основанная на обособленных подсистемах управления с минимальными временными и финансовыми затратами при создании.
- 2. Основные компоненты системы управления ускорителем:
 - (a) Система управления электронной пушки, выполненная на базе аппаратуры катодной электроники инжектора ускорителя MEA с новой платой контроллера и оригинальным программным обеспечением под MS Windows XP.
 - (б) Концепция системы синхронизации с использованием разработок ОИЯИ в стандарте КАМАК.
 - (в) Система радиационного контроля ускорителя Линак-200, основанная на оборудовании НПО «Аспект» и оригинальное программное обеспечение для нее.
 - (г) Система блокировок и сигнализаций, выполненная на базе промышленной аппаратуры ABB с целью повышения отказоустойчивости.
 - (д) Система термостабилизации ускоряющих секций ускорителя Линак-200, выполненная на базе промышленного оборудования и программного обеспечения OBEH.
- Концепция и аппаратура стенда для проведения исследования термо- и фотокатодов.

- 4. Система видеодиагностики и видеонаблюдения ускорителя Линак-200, позволяющая осуществлять диагностику профиля пучка электронов и дистанционное видеонаблюдение за обстановкой в зале ускорителя.
- 5. Диагностический пост для стенда фотопушки, позволяющий определять различные параметры пучка (профиль, размеры, эмиттанс и т.д.), включая оригинальное программное обеспечение для расчета эмиттанca.

Апробация работы

Результаты работы были опубликованы в реферируемых научных журналах [2—8], трудах конференций [9—17] и Сообщениях ОИЯИ [18], а также докладывались автором на следующих российских и международных научных семинарах и конференциях:

- 1. Научная сессия ОФН РАН «Современные проблемы фотоинжекторов электронных пучков с предельной яркостью», 2017 (Москва, Россия).
- 2. 19-я и 20-я международные летние школы по вакуумным, электронным и ионным технологиям (VEIT), 2015–2017 (Созополь, Болгария).
- 3. 9-й и 10-й международные семинары по персональным компьютерам и управлению ускорителями заряженных частиц (PCaPAC), 2014 (Калькутта, Индия) и 2016 (Кампинас, Бразилия).
- 4. Совещания коллаборации PITZ (Photo Injector Test facility in Zeuthen), 2015–2016 (Цойтен, Германия).
- 5. VIII, IX и XI международные семинары по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П.Саранцева, 2009–2015 (Алушта, Крым).
- 6. Международная конференция по вакуумным электронным источникам (IVESC), 2014 (Санкт-Петербург, Россия).
- 7. I, II и III школы-конференции молодых ученых и специалистов (ОМУС Алушта), 2012–2014 (Алушта, Крым).
- 8. XV и XVIII научные конференции молодых ученых и специалистов (ОМУС), 2011–2014 (Дубна, Россия).

- 9. 33-я и 37-я сессии Программно-консультативного комитета по физике частиц ОИЯИ, 2010-2012 (Дубна, Россия).
- 10. XXII и XXIII всероссийские конференции по ускорителям заряженных частиц (RuPAC), 2010 (Протвино, Россия) и 2012 (Петергоф, Россия).
- Научный семинар в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ (отчетный доклад лауреата стипендии им. В.И. Векслера), 2012 (Дубна, Россия).
- 12. 10-й европейский семинар по диагностике пучка и оборудованию для ускорителей частиц (DIPAC2011), 2011 (Гамбург, Германия).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 115 страниц, включая 64 рисунка и 14 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 83 наименования.

Основное содержание работы

Во введении раскрывается актуальность темы исследования, описываются основные цели работы, научная новизна, практическая значимость работы, личный вклад автора, приводятся положения, выносимые на защиту, и апробация результатов.

В главе 1 приводится обзор существующих систем управления ускорителей, описываются различные подходы к созданию таких систем и аргументируется выбор подхода с созданием отдельной подсистемы управления для каждой системы ускорителя.

В главе 2 описывается ряд систем управления ускорителем Линак-200. В разделе 2.1 дается информация об ускорителе, описываются его структура и параметры. Линак-200 представляет собой линейный ускоритель электронов на энергию до 200 МэВ с отводом пучка с энергией 22 МэВ, базирующийся на оборудовании линейного ускорителя МЕА, переданного в ОИЯИ институтом NIKHEF. В разделе 2.2 приводятся требования к системе управления Линак-200 и постановка задачи. В разделе 2.3 описывается организация системы управления ускорителем и обосновываются принятые решения по созданию новой системы управления. Оборудование и программное обеспечение

системы управления МЕА было разработано в 80-х и начале 90-х гг., т.е. на момент начала активной работы над ускорителем Линак-200 (середина 2000х) существенно устарело и не поддерживалось производителем. Используемая операционная система CENIX и программное обеспечение систем управления, кроме того, были разработаны NIKHEF для внутреннего использования, результатом чего стало практически полное отсутствие документации (а имеющийся минимум был на голландском языке). В связи с этим было принято решение о разработке собственной системы управления. Другим фактором, повлиявшим на это решение, была ограниченность финансовых и человеческих ресурсов. Поэтому базовой задачей было обеспечение получения пучка электронов ценой минимальных вложений времени и финансов. Это обусловило децентрализационный подход, при котором обособленные подсистемы управления создаются по мере возникновения необходимости в них. В конце раздела приводится состав текущего варианта системы управления.

Раздел 2.4 посвящен описанию аппаратуры электронной пушки. Особое внимание уделено катодной электронике и новой плате котроллера пушки. Плата состоит из контроллера, четырех каналов ЦАП, 16 каналов для измерения напряжения с последовательным опросом, входного регистра на 8 входов и выходного регистра также на 8 выходов (уровни TTL). Описывается порядок обмена информацией между управляющим компьютером и платой контроллера через последовательный порт и соответствующее программное обеспечение: разработанная для тестирования и настройки платы контроллера программа TestBoard и две версии программы GunCtrl для управления электронной пушкой. Первая версия была написана на языке Pascal под операционную систему MS DOS и работала с последовательным портом напрямую, через предопределенный массив Port. Вторая версия (используемая в настоящее время) была написана в среде Borland Delphi на языке Object Pascal и работает под управлением Windows XP. Основными отличиями от предыдущей версии стали новый интерфейс с использованием стандартных элементов Windows, работа с портом средствами WinAPI и возможность сохранения и загрузки опорных напряжений. Обе версии программы предоставляют оператору возможность устанавливать опорные напряжения Vref для:

- накала катода (Filament Supply),
- первого фокусирующего электрода (Focusing Electrodes),

• экстрактора (Extractor Pulser).

Во время работы программы на экран в реальном времени выводятся:

- реальные напряжения накала катода (Vfs) и первого фокусирующего электрода (Vfoc),
- ток (Ifs) накала катода,
- давление (Pressure) и температура (Temperature) элегаза в танке пушки,
- напряжение на плате катодной электроники (Board Voltage),
- статус системы термостабилизации платы (Flow).

Раздел 2.5 посвящен системе синхронизации ускорителя. Описываются система синхронизации МЕА, новый вариант системы в принятом в ОИЯИ конструктиве на базе стандарта КАМАК, и причины замены.

Раздел 2.6 содержит информацию о системе термостабилизации ускоряющих секций ускорителя. Термостатирование охлаждающей воды обеспечивается с помощью двух ТЭНов по 3 кВт каждый и теблообменника с вентилятором. Построение системы базировалось на максимальном использовании аппаратуры и программного обеспечения индустриальных систем, основным управляющим элементом является универсальный измерительрегулятор ОВЕН ТРМ138.

В разделе 2.7 описывается система радиационного контроля. Аппаратура радиационного контроля ускорителя МЕА не была передана в ОИЯИ в связи с тем, что это оборудование не сертифицировано для применения в России. Ввиду этого была реализована собственная система радиационного контроля, основными элементами которой являются детекторы нейтронного и гамма-излучения (2 и 7 шт. соответственно) производства НПЦ «Аспект» и комьютер со специально разработанным для данной системы программным обеспечением RadCtrl. Все детекторы соединены с помощью последовательной линии связи RS-485 с использованием коммуникационного протокола Modbus RTU.

Программное обеспечение RadCtrl было создано для отображения в реальном времени показаний детекторов системы и сигнализации о превышении порогов мощности эффективной дозы (МЭД). Релизована также архивация показаний детекторов. Программа написана в среде Borland Delphi на языке Object Pascal и работает под управлением Windows XP. Проведена калибровка ПО в Отделе радиационной безопасности ОИЯИ — определены и внесены в программу коэффициенты перевода счета гамма-детекторов в МЭД.

Раздел 2.8 посвящен системе блокировок и сигнализаций (СБиС) ускорителя. В соответствии с нормами радиационной безопасности входы в зал ускорителя должны перекрываться защитными дверьми, связанными с системой блокировок и управляемыми специальной схемой электрооборудования. Система исключает возможности открывания двери в режиме работы ускорителя и включения ускорителя при открытой двери, а также обеспечивает отключение и блокировку режима работы ускорителя при отсутствии питающего напряжения и возможность повторного включения пучка только в случае закрытой двери и активации пусковой кнопки на управляющем пульте. Система сигнализации обеспечивает персонал световой, звуковой и визуальной информацией о состоянии ускорителя. СБиС основана на промышленном оборудовании производства компании ABB. Такой подход позволяет достигнуть максимальной отказоустойчивости.

Глава 3 посвящена стендам фотопушки и фотоинжектора. В разделе 3.1 речь идет о разработанных в ОИЯИ концпециях «полого» и «прозрачного» фотокатодов. «Полый» фотокатод представляет собой шайбу толщиной несколько миллиметров с цилиндрическим или коническим отверстием в центре. Катод может быть изготовлен как из массивного материала (ниобий, медь), так и методами тонкопленочной технологии (CsITe и алмазоподобный углерод в виде пленок на медной основе). Рабочей поверхностью фотокатода является образующая конуса или цилиндра. Такая геометрия катода позволяет увеличить квантовый выход за счет поверхностного фотоэффекта, обусловленного нормальной к поверхности материала компонентой электрического поля волны фотона (т.н. векториальный фотоэлектрический эффект).

В процессе экспериментальных исследований полый фотокатод был заменен на «прозрачный», представляющий собой либо сетку из металлической проволоки диаметром 30 мкм и размером ячейки 40 мкм × 40 мкм, либо кварцевую/сапфировую пластину. Сетка или пластина служит подложкой для создания пленочных катодов из различных фотоматериалов (сетка, помимо этого, может использоваться в качестве фотокатода и сама по себе, без пленки) — как металлов, так и полупроводников. Облучение с тыльной стороны также радикально упрощает наводку на эмитирующую поверхность и ее лазерную чистку как после первоначальной установки катода, так и в процессе эксплуатации.

В разделе 3.2 описывается стенд фотопушки. Стенд был создан для исследования катодов (как термо-, так и фотоэмиссионных) для ускорителя Линак-200. В дальнейшем ускоряющая структура с термокатодом была перенесена на Линак-200, а стенд стал использоваться для разработки и совершенствования «полых», а затем «прозрачных» фотокатодов с целью увеличения квантового выхода, времени жизни и снижения требований к вакуумным условиям. Показано развитие стенда с момента его создания до настоящего времени. Сейчас на стенде в качестве лазерного драйвера используется ультрафиолетовый лазер LOTIS TII LS-2134 с длительностью импульса 15 нс, максимальная энергия электронов в пучке составляет 30 кэВ.

Раздел 3.3 посвящен развитию стенда фотопушки — стенду фотоинжектора. На этом создающемся стенде энергия электронов будет достигать 400 кэВ. Основными элементами стенда являются УФ лазерный драйвер, оптическая линия транспортировки лазерного излучения на фотокатод, чиллер для охлаждения твердотельных оконечных усилителей лазера, источник высокого напряжения и ускоряющая структура прямого действия с прозрачным фотокатодом. В качестве УФ лазерного драйвера используется созданная совместно с ИПФ РАН система, позволяющая получать микроимпульсы длительностью порядка 10 пс, объединенные в макроимпульсы (до 8000 микроимпульсов в каждом). Используемая ускоряющая структура, за исключением катода, аналогична установленной на Линак-200.

В апреле 2017 г. на стенде был получен первый пучок фотоэлектронов. Зарегистрированы макроимпульсы с зарядом 15 нКл, что соответствует току микроимпульса порядка 200 мА, макроимпульса 20 мкА и среднему току 150 нА при частоте повторения 10 Гц. Напряжение на катоде составляло -80 кВ. Использовался прозрачный катод из медной сетки с размером ячейки 40 мкм × 40 мкм и диаметром проволочки 30 мкм.

В главе 4 дается обзор средств диагностики на ускорителе Линак-200 и стендах фотопушки и фотоинжектора. Разработанные диагностические системы принципиально не привязаны к какой-то конкретной установке и могут использоваться (и используются) на других. Поэтому диагностическим устройствам посвящена отдельная глава.

В разделе 4.1 приведено описание системы видеодиагностики и видеонаблюдения ускорителя Линак-200. Система разработана для визуализации профиля и положения пучка (используются IP-камеры Aviosys) и общего контроля происходящего в зале ускорителя (используется аналоговая камера, подключенная к телевизору). Предусмотрены широкие возможности для развития системы. Так, программное обеспечение Surf 16 Ch от Aviosys позволяет одновременно работать с 16 IP-камерами, а имеющийся IP-видеосервер IP Video 9100A Plus позволяет подключать до 4 аналоговых камер по локальной сети (и, соответственно, также работать с ними в Surf 16 Ch или через браузер).

Раздел 4.2 посвящен системе видеодиагностики стенда фотопушки (и, впоследствии, стенда фотоинжектора). Основным видеооборудованием является высокочувствительная цифровая видеокамера AVT Prosilica GC1380 с объективом Kowa LM50JCM. Важной особенностью этой камеры является возможность синхронизации с лазерным драйвером стенда.

В начале раздела приводится описание используемого программного обеспечения. В поставляемый производителем камеры программный пакет Vimba SDK входит программа Vimba Viewer, позволяющая просматривать изображение с камеры и дающая доступ к ее параметрам. Однако для работы в качестве диагностического ПО данная программа имеет достаточно слабый функционал. В связи с этим было принято решение об использовании разработанного в DESY Цойтен программного обеспечения AVINE.

AVINE — Advanced Video and Imaging Network Environment — разработанный в DESY набор программных инструментов для создания систем видеодиагностики (в первую очередь поперечного профиля пучка ускоренных частиц) на физических установках. Серверная часть системы написана на C++и работает под управлением MS Windows XP или 7, клиентская часть имеет C++ версию, которая также работает только под управлением Windows и кроссплатформенную Java-версию. Важной особенностью системы является то, что серверная и клиентская части могут быть установлены на одном компьютере. Именно в таком варианте AVINE используется на стенде фотопушки, установленная на ноутбуке ASUS U36S.

Затем описывается видеодиагностика электронного пучка. Первым использованным вариантом было размещение люминофорного экрана в специальной вакуумной камере под углом 45° к оси пучка (видеокамера размещалась на боковом фланце). Однако в связи с намагничиванием вакуумного бокса, от этого варианта пришлось отказаться, несмотря на то, что пока этот вариант единственный, в котором удалось выделить электронный пучок. В текущем варианте люминофорный экран закреплен на выходном фланце вакуумного бокса измерения эмиттанса. Основной проблемой для наблюдения пучка электронов является засветка люминофора лазером (усугубляющаяся малой яркостью люминофора из-за низкой энергии электронов). В частности, выделить электронный пучок в варианте с расположением люминофора под углом 90° пока не удается. Возможны следующие варианты минимизации влияния фактора засветки (в порядке убывания приоритета): установка диагностического узла с двумя новыми типами экранов; отклонение электронного пучка с помощью дипольного магнита (т.к. этот вариант позволяет полностью избавиться от засветки, в отличие от предыдущего, он, вероятнее всего, будет реализован независимо от того, насколько будет снижена засветка при использовании новых экранов); установка на пути пучка фольги, проницаемой для электронов и непроницаемой для лазера (вероятно, будет реализовано на стенде фотоинжектора); размагничивание имеющегося бокса.

Вышеупомянутый бокс измерения эмиттанса представляет собой вакуумную камеру с щелевой маской внутри и предназначен для измерения поперечного эмиттанса пучка щелевым методом. Бокс оснащен двухпозиционным пневмоприводом для ввода/вывода маски в/из тракта. На данный момент реализовано и протестировано на лазерном пучке оборудование и программное обеспечение для расчета поперечного эмиттанса пучка в вертикальной плоскости. В зависимости от результатов тестирования с электронным пучком планируется либо заменить пневматический привод на трехпозиционный (с двумя масками со взаимно перпендикулярными щелями), либо использовать метод Pepper-pot, при котором вместо щелевой маски используется маска с несколькими рядами отверстий. Для расчета эмиттанса щелевым методом было создано программное обеспечение EmCa. Программа написана в среде MS Visual Studio 2010 на языке C++ и работает с изображениями, сохраненными в видеоклиенте AVINE. Для вычисления эмиттанса используется формула, выведенная в [19]. Планируется работа с произвольным количеством бимлетов (сейчас их число фиксировано и равно трем), их автоматического выделения, отображения пучка в фазовом пространстве и вычисления общего поперечного эмиттанса (после аппаратной реализации).

Далее описывается диагностика лазерного пучка, которая осуществляется в двух местах: там же, где электронного, и на т.н. «виртуальном катоде». Последний представляет собой такое расположение диагностического оборудования, при котором профиль пучка на люминофорном экране соответствует профилю пучка на катоде. Достигается это расположением экрана таким образом, что расстояние между лазером и экраном равно расстоянию между лазером и катодом. Были проведены кратковременные (30 минут) измерения временной стабильности координаты пучка и его среднеквадратичного размера на виртуальном катоде. Обнаружено, что пучок имеет тенденцию к горизонтальному сдвигу. Для определения причин этого планируется провести более продолжительные исследования.

Завершается раздел описанием тестирования системы на Линак-200. Было получено изображение пучка на люминесцентном экране, среднеквадратичный размер пучка составил 3,2 мм × 2,9 мм.

В заключительном **разделе 4.3** описывается прочая диагностика на стендах: измерение энергии лазерного излучения и температуры термокатода.

В Заключении приводятся основные результаты и выводы работы, а также благодарности.

ГЛАВА 1

ОБЗОР ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ НА УСКОРИТЕЛЯХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Важность системы управления (СУ) любой крупной установки (не обязательно научной) трудно переоценить. От успешного функционирования средств управления непосредственно зависит работоспособность всего комплекса.

Можно выделить три основных типа систем управления научными установками:

- Реализованные с использванием разработанных большими коллаборациями (специально для этого созданными) инструментариев. Наиболее известны два таких инструментария: EPICS и TANGO.
- Основанные на собственных разработках конкретного института или коллаборации (здесь, в отличие от предыдущего пункта, речь о коллаборациях, представляющих собой научные эксперименты). Достаточно обширный набор — от систем управления крупных установок типа European XFEL и LHC до небольших приложений для конкретных задач.
- Реализованные на коммерческом ПО.

1.1 EPICS

ЕРІСЅ (Experimental Physics and Industrial Control System) — широко используемая клиент-серверная среда разработки систем управления для больших установок, ускорителей и телескопов, разработка которой началась в 1990-х гг. в LANL и ANL [20]. Серверы (IOC — Input-Output Controllers) предоставляют клиентам доступ к Process Variable (PV) — основным единицам данных в EPICS, представляющим собой поименованные области с данными, содержащими определенную информацию с реальных устройств. Помимо собственно данных, PV содержат вспомогательную информацию: единицы измерения, временную метку (Timestamp), информацию о проблемах (Alarm, Severity), диапазон значений величины (Operating range, Control limits). Обмен информацией осуществляется по протоколу Channel Access [21]. Например, в Ускорительном центре Айдахо (Idaho Accelerator Center, IAC) на 44-МэВном электронном линаке с помощью EPICS реализовано управление источниками питания магнитов (установка требуемого тока и контроль тока реального для нескольких типов источников) и CCDвидеокамерами. Также реализована функция сохранения настроек ускорителя (т.е. токов магнитов) и последующей их загрузки (используется пакет BURT — Back Up and Restore Tool). Для связи с сервером EPICS источники питания подключены к локальной сети через два терминальных сервера Moxa, к которым, в свою очередь, они подсоединяются с помощью преобразователей RS-485 в RS-232. Используется программное обеспечение из пакета SynApps (ASYN и StreamDevice для работы с источниками питания магнитов и areaDetector для работы с камерами) и MEDM для создания GUI [22].

На фотоинжекторе Пекинского университета в качестве клиентского ПО используется CSS — основанная на Eclipse среда разработки интерфейсов для систем управления. Установка состоит из нескольких частей: криомодуль, в котором размещены DC-фотопушка и SRF-резонатор (температурные датчики через мониторы Cryocon работают с соответствующим IOC непосредственно по локальной сети, а для связи с высоковольтным источником питания фотопушки используется ПЛК Siemens), система управления источниками питания магнитов (IOC на одноплатном VME компьютере с OC реального времени RTEMS используется для связи с источниками питания по RS-422/485 через соответствующие модули VME), сканер эмиттанса, экраны, цилиндры Фарадея и вакуумные насосы также подсоединены к сети через ПЛК Siemens [23].

EPICS обладает хорошей масштабируемостью. Наряду с двумя вышеприведенными примерами относительно небольших ускорителей на базе этой системы создана, например, система управления инжекторного линака японского электрон-позитронного коллайдера SuperKEKB (385 контроллеров различных типов, 153 IOC и более 44 тысяч PV) [24].

К недостаткам EPICS можно отнести не всегда стабильную работу (в частности, [24] и [25] описывают происходящие время от времени остановки/падения системы без каких бы то ни было сообщениях об ошибке).

Новая, 4-я, версия вводит архитектуру, упрощающую построение научных приложений: модули pvData (структурированные данные: скаляр, массив скаляров, структура и массив структур), pvAccess (новый сетевой протокол вместо ChannelAccess), ChannelFinder (организация древовидной структуры БД путем ввода свойств (properties) и тэгов (tags) для записей), Gather (служба аггрегирования данных) и т. д. [26].

1.2 TANGO

TANGO (TAco Next Generation Objects) — второе поколение (первое — присутствующая в названии TAco) систем управления, разработка которых началась в ESRF. Работа над TANGO началась в 1998 году, а в 1999 система была представлена на конференции ICALEPS [27].

Сейчас это современный клиент-серверный инструментарий с открытым исходным кодом для разработки распределенных систем управления синхротронами, лазерами и различным оборудованием для физических экспериментов. Полностью поддерживаются языки программирования C++, Java и Python, для написания клиентских приложений также могут использоваться LabView, Matlab и IgorPro [28].

TANGO — объектно-ориентированный комплекс инструментов, объектом (устройство, device) является любая единица оборудования или ПО. Управление объектами реализовано с помощью серверов устройств (device server). Поддерживаются три типа взаимодействия клиент-сервер: синхронный, асинхронный и на базе событий (event driven), имеется обширный набор ПО от аппаратных интерфейсов до клиентского GUI, включающий инструменты администрирования, тестирования, архивирования и сигнализации [29].

Одним из преимуществ TANGO является производительность сетевого протокола. Изначально использовался стандарт CORBA (реализации omniORB для C++ и JacORB для Java), в 2012 году он был заменен на open source стандарт ZMQ [28]. В частности, замена службы уведомлений CORBA на новую систему событий на базе ZMQ увеличило производительность в 40 раз для событий, передающих малые объемы данных и в 10 для больших (> 100 Кбайт) объемов [29].

На TANGO, в том числе, будет основана система управления создающегося в ОИЯИ комплекса NICA, в связи с чем система управления базового ускорителя NICA — Нуклотрона — модернизируется для совместимости с TANGO. Так, модернизированная система управления инжекцией в Нуклотрон включает в себя:

• Device server'ы TANGO низкого уровня для работы с:

- протоколами MODBUS/RTU и Profibus;
- ИП септума (через Profibus TANGO device) установка и контроль тока септума, обработка ошибок;
- контроллером (через MODBUS TANGO device) сигнализация, тайминг;
- устройствами сбора данных NI установка и контроль напряжения на кикере, считывание с 4 пропорциональных камер (32×32 проволочки каждая) информации о профиле пучка;
- цифровыми преобразователями NI считывание с 3 пикапэлектродов информации о продольном профиле пучка;
- цифровыми мультиметрами NI высокоточные измерения напряжения и тока.
- Device server'ы высокого уровня для реализации алгоритма инжекции и диагностики пучка контроль серверов низкого уровня, сбор с них данных и их преобразование в физические величины.
- Клиентское ПО, написаное на LabVIEW, работает с серверами высокого уровня через события (events).

Серверы написаны на C++, особое внимание уделено кроссплатформенности (Windows/Linux). Все серверы работают на одном промышленном компьютере и удаленно управляются с помощью TANGO Starter device. Архивация значений тока и напряжения реализована с помощью TANGO Archiving Service [30].

1.3 European XFEL

Несмотря на распространение EPICS и TANGO, многие институты продолжают использовать свои системы управления. Так, на Европейском рентгеновском лазере на свободных электронах (European XFEL) используется несколько собственных систем. Для управления ускорителем используется сразу две разработанных в DESY системы: DOOCS и TINE. DOOCS (Distributed Object Oriented Control System) разработана для FLASH, ЛСЭпредшественника European XFEL. Она используется для действий, синхронизированных с пучком, и потому требующих высокой скорости. Система имеет ряд сходств с TANGO — к примеру, объектно-ориентированный подход и использование протокола ZeroMQ. TINE (Three-fold Integrated Networking Environment) — СУ источника сихнротронного излучения 3-го поколения PETRA III. Она отвечает за медленные приложения, такие как вакуум и питание магнитов. Основным инструментом клиентских приложений является среда jddd (Java DOOCS Data Display, может использоваться не только с DOOCS и TINE, но и с TANGO и EPICS [31]), также используются пользовательские приложения на Java, MATLAB и Python. Помимо этого используется отдельная интегрированная с DOOCS распределенная система для управления каждым из ондуляторов, специально созданный фреймворк Karabo для управления пользовательскими установками на пучках ЛСЭ, и основанная на EPICS система (с клиентским ПО на CSS) для управления криогенным оборудованием и вспомогательными системами (электропитание, вода). Все системы могут взаимодействовать между собой посредством специальной локальной сети. Аппаратная часть в значительной степени основывается на электронике в новом стандарте MTCA.4 [32].

1.4 LHC

LHC (а точнее, весь комплекс ускорителей CERN) также использует свою систему управления с классической трехуровневой компоновкой — Front End Layer (непосредственное взаимодействие с оборудованием), Business Layer (сервисы) и Presentation Layer (операторские интерфейсы). На первом уровне используется FESA (Front End Software Architecture) — фреймворк для разработки ПО реального времени для непосредственного управления оборудованием и интеграции его в систему управления в соответствии с принятой моделью данных (Device-property model). Промышленное оборудование управляется через SCADA PVSS (Perfect Solution for Slow Control). Для связи устройств с клиентским и сервисным ПО используется промежуточное ПО CMW (Controls MiddleWare). В качестве коммуникационного протокола изначально использовался CORBA, сейчас — ZeroMQ. В число сервисов входят система управления настройками LSA, средство для работы с последовательностями задач SEQ, система работы с аналоговыми сигналами OASIS, средство мониторинга инфраструктуры СУ DIAMON, програмнные средства безопасности SIS и PMA, архивный сервис Logging. Применимость этой системы управления не ограничивается ускорителями CERN — ее основые сервисы (FESA, CMW, LSA) также используются в GSI (Дармштадт) [33].

1.5 Коммерческие системы

Комплексные коммерческие системы используются для управления ускорителями достаточно редко — они не обладают необходимой гибкостью и дорого стоят. Однако и здесь имеются успешные примеры. Так, в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ используется коммерческая SCADA FlexControl, работающая под операционной системой QNX. Выбор операционной системы обусловлен простотой написания драйверов устройств, работой в режиме реального времени, открытостью и отказоустойчивостью, и умеренными требованиями к ресурсам [34]. К минусам QNX можно отнести тот факт, что система уже не развивается, а только поддерживается производителем (выпускаются обновления драйверов и исправления ошибок, следовательно, отсутствуют драйверы для современного оборудования) [35], а также высокую цену (порядка 10 тыс. евро за лицензию разработчика [36]).

1.6 Заключение

Системы EPICS и TANGO обладают обширным функционалом и предоставляют возможность сведения к минимуму программирования при создании системы управления новой установки. Однако они сложны и обладают достаточно высоким порогом вхождения. На тестовых стендах задачи часто появляются по мере развития стендов и для создания систем управления таких стендов (до определенной степени) разумен подход, при котором под конкретную задачу создается обособленная подсистема. Таким подсистемам в значительной степени и посвящена данная диссертация.

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ЛИНАК-200

Ускоритель Линак-200 базируется на части ускорительного комплекса [37], который в конце 90-х гг. был безвозмездно передан в ОИЯИ Национальным институтом субатомной физики NIKHEF (Амстердам, Нидерланды). Линейный ускоритель NIKHEF, т.н. «ускоритель на средние энергии» (Medium Energy Accelerator, MEA), был разработан Haimson Research Corporation (США) в 1969–1974 гг., построен в 1975–1978 гг. и запущен в работу с пучком в 1978 г.

Анализ ускорительного оборудования MEA показал, что требуется значительная модернизация только системы управления. Все остальное оборудование находится в хорошем состоянии и имеет значительный рабочий ресурс части аналогичного по конструкции линака в Стэнфордском центре линейного ускорителя (SLAC, США) до сих пор успешно используются (FACET, LCLS).

2.1 Структура и параметры ускорителя

Ускоритель состоит из инжекторной и семи ускоряющих секций (рис. 2.1). Инжектор, в свою очередь, состоит из электронной пушки, чоппера, пребанчера и банчера. Ускоряющую систему составляют четыре ускоряющих станции, включающих источники ВЧ-мощности (клистроны с модуляторами), СВЧ-фидеры и ускоряющие структуры. Каждая станция обеспечивает работу двух ускоряющих секций (в случае первой станции, одна из них — инжекторная). Основные параметры ускорителя на момент окончания работы над диссертацией приведены в таблице 2.1.



Рис. 2.1. Общая схема действующих секций ускорителя Линак-200. Цифрами обозначены: 1 — чоппер, 2 — пребанчер

Параметр, единицы измерения	Сейчас	Проект
Максимальная энергия электронов, МэВ	200	200
Ускоряющий градиент, МэВ/м	5	
Ток после секции А0ВВ (22 МэВ), мА	15	15
Ток после секции В2АА (50 МэВ), мА	5	12
Ток после секции B4A (110–120 МэВ), мА	3	10
Ток после секции А6А (200 МэВ)	$1,\!5$	8
Частота повторения импульсов, Гц	1 - 10	100
Длительность импульса тока, мкс	0,1-3	
Длина, м	55	55

Основные параметры ускорителя Линак-200

2.2 Требования к системе управления. Постановка задачи

Поскольку специфика линейного ускорителя позволяет его поэтапный ввод в эксплуатацию, то развитие установки было разбито на несколько этапов:

- 1. Получение первых электронов: запуск электронной пушки, генерация пучка электронов с энергией 400 кэВ.
- 2. Ввод в строй первой ВЧ ускорительной станции (A00): получение пучка электронов с энергией порядка 7 МэВ.
- 3. Получение пучка электронов с энергией 22 МэВ, получение инфракрасного излучения на ондуляторе.
- Получение пучка электронов с энергией 110−120 МэВ, необходимой для проведения испытаний кристаллических сцинтилляторов в полном диапазоне энергий (5−110 МэВ): ввод в строй второй и третьей ускорительных станций (А01 и А02).
- 5. Получение пучка электронов с проектной энергией 200 МэВ: ввод в строй четвертой ускорительной станции (A03).

Для реализации первого этапа была необходима в первую очередь система управления электронной пушкой, дающая возможность задавать напряжения накала катода пушки, первого фокусирующего электрода и экстрактора. Кроме того, в соответствии с нормами радиационной безопасности, требовалось создание систем радиационного контроля и защиты персонала от ионизирующего излучения: сигнализация в зале ускорителя и пультовой о работе ускорителя, а также блокировка его работы в случае потенциального присутствия людей в зале ускорителя (при открытой гермодвери). Остальные системы (удаленный мониторинг состояния вакуума, управление магнитными линзами и пр.) были перенесены с МЕА практически без изменений.

Реализация второго этапа в основном была связана с системами управления СВЧ-оборудованием и охлаждения клистрона, в данной диссертации не расматривающимся.

На третьем этапе, в связи с достижением энергии, достаточной для пользовательских экспериментов, возникла необходимость в повышении качества пучка — понадобилась термостабилизация соответствующих ускоряющих секций.

Кроме того, реализация третьего и последующих этапов потребовала системы, синхронизирующей работу нескольких ускорительных станций и электронной пушки.

2.3 Организация системы управления ускорителем

Электроника и программное обеспечение — наиболее быстро устаревающие части любой сложной установки. В NIKHEF система управления MEA (рис. 2.2) включала в себя следующее оборудование:

• Ряд КАМАК-станций (CO1, A00-A013, AFBU, EO4) с контроллерами CARPO на основе микропроцессоров Motorola 68000, работавших под управлением CENIX OS — разработки NIKHEF.



Рис. 2.2. Схема системы управления МЕА в NIKHEF [38]

- Компьютер MEAWAY, представлявший собой VME-контроллер Robcon на основе микропроцессора Motorola 68020. Эта машина являлась шлюзом к вышеперечисленным станциям КАМАК, администрировала центральную базу данных установки, и также работала под управлением операционной системы CENIX.
- Компьютер PARAPLU сервер SparcServer 1 под управлением SunOS 4.1.2 обеспечивал резервное копирование базы данных и работу различных резидентных служб.
- Компьютер C01WS рабочая станция SUN 4/20 (IPC) под управлением SunOS 4.1.2 — клиентская машина, обеспечивавшая интерфейс оператора.

На рисунке присутствуют также VME-станции RING1, RING2 и INJECT, относящиеся к кольцу AmPS, и поэтому не рассматривающиеся.

Все вышеперечисленное оборудование и программное обеспечение было разработано в 80-х и начале 90-х гг., т.е. на момент начала активной работы над ускорителем Линак-200 (середина 2000-х) существенно устарело и не поддерживалось производителем. Операционная система CENIX и программное обеспечение систем управления, кроме того, были разработаны NIKHEF для внутреннего использования, результатом чего стало практически полное отсутствие документации (а имеющийся минимум был на голландском языке). В связи с этим было принято решение о разработке собственной системы управления.

Другим фактором, повлиявшим на это решение, была ограниченность финансовых и человеческих ресурсов. Поэтому базовой задачей было обеспечение получения пучка электронов ценой минимальных вложений времени и финансов. Это обусловило децентрализационный подход, при котором обособленные подсистемы управления создаются по мере возникновения необходимости в них. В нижеследующих подразделах описаны созданные непосредственно автором, либо при его определяющем участии системы и дано обоснование выбранных решений.

В настоящий момент система управления [12; 14] включает в себя следующие подсистемы:

• система управления электронной пушкой,

- система синхронизации,
- система термостатирования ускоряющих секций,
- система радиационного контроля,
- система блокировок и сигнализаций,
- система диагностики и видеонаблюдения,
- система СВЧ,
- система управления модуляторами,
- система управления вакуумным оборудованием,
- система управления магнитными элементами.

К четырем последним автор отношения не имеет, в связи с чем в диссертации они не описываются. Информацию по этим системам можно найти, к примеру, в [39].

Управление параметрами и контроль систем (за исключением систем CBЧ и термостатирования ускоряющих секций) сосредоточны в пультовой ускорителя (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Оборудование пультовой ускорителя. Цифрами обозначены: 1 — система синронизации, 2 — компьютер системы управления электронной пушкой, 3 компьютер системы видеонаблюдения, 4 — компьютер системы радиационного контроля, 5 — детекторы системы радиационного контроля, 6 — монитор наблюдения за залом ускорителя, 7 — система блокировок и сигнализаций

2.4 Аппаратура электронной пушки

Основным элементом инжектора Линак-200 является электронная пушка триодного типа с постоянным высоким напряжением на катоде, «заземленным» анодом и управляющим электродом [40]. Пушка размещена в танке, наполненном элегазом (гексафторидом серы) SF₆ под давлением около 6 атмосфер для повышения электрической прочности. В электронной пушке используется импрегнированный катод (вольфрам с 20% окислов бария, кальция и алюминия). Катод имеет диаметр 8 мм, эмитирующая поверхность составляет 0,5 см². Накал катода косвенный, диапазон рабочих значений токов и напряжений находится в пределах от 6,5 В / 4 А до 8,8 В / 5 А. Ресурс работы катода составляет 15 – 20 тысяч часов.

Параметры электронного пучка Линак-200 недостаточны для возбуждения ЛСЭ. Поэтому в будущем, с началом использования ускорителя как драйвера ЛСЭ, планируется модернизировать инжектор, используя вариант электронной пушки с фотокатодом. Исследования в этом направлении ведутся на стендах, описанных в главе 3.



Рис. 2.4. Схема электронно-оптической системы пушки и электроники управления

Катод крепится на конце высоковольтной колонны — высоковольтного проходного вакуумного многосекционного изолятора, разделяющего вакуумный объем ускорительного тракта и газонаполненный объем танка, в котором размещена высоковольтная часть катодной электроники. Электроннооптическая система пушки (рис. 2.4) образована управляющим электродом и системой из 15 анодов с принудительным резистивным (R = 200 МОм) распределением потенциала (примерно 30 кВ на промежуток). На первый фокусирующий анод подается постоянное напряжение, регулируемое в пределах 8-20 кВ. Катодный модулятор собран по каскадной схеме генератора Маркса, где накопительные конденсаторы заряжаются параллельно, а разряжают-



Рис. 2.5. Схема системы управления электронной пушкой Линак-200

ся посредством управляемых ключей последовательно на нагрузку — управляющий электрод. Выходное напряжение модулятора составляет от -400 В (запирающее напряжение) до +5 кВ (отпирающий импульс), длительность импульса — от 200 нс до 50 мкс (шаг 100 нс), стабильность амплитуды — лучше 0,1%, максимальная частота повторения импульсов — до 500 Гц. Внутри танка на конце высоковольтной колонны смонтирована консоль с блоками катодной электроники [41]. Весь блок катодной электроники «подвешен» под высокое напряжение -400 кВ. Выходная энергия электронов составляет около 400 кэВ, пиковый ток пучка — 0,3–0,4 А.

Система управления электронной пушкой Линак-200 [3] состоит из следующих основных частей (рис. 2.5):

- Источник ICT (Insulating Core Transformer) обеспечивает высоковольтное катодное напряжение -400 кВ со стабильностью $10^{-4} - 10^{-5}$ [42]. Источник размещен в танке с элегазом SF₆ под давлением в 4 атмосферы. Стабильность высокого напряжения обеспечивается дополнительным блоком «ICT 400 kV Stabilizer» [43]. Напряжение подается на пушку по высоковольтному маслонаполненному коаксиальному кабелю диаметром 6 см. По этому же кабелю подается переменное напряжение частотой 50 Гц для питания катодной электроники, состоящее из двух фаз по 110 В, сдвинутых по фазе на 120°. В танке пушки расположен пикап-электрод для измерения пульсаций (с частотой f > 10 Гц) катодного напряжения [44].
- Катодная электроника.

- Компьютер с программным обеспечением GunCtrl.
- Линия связи. От пультовой до танка пушки линия состоит из преобразователя интерфейса RS-232 в RS-485 с гальванической развязкой, скрученной пары проводов длиной 20 м (расстояние от пульта управления до пушки), и преобразователя RS-485 в RS-232. Далее линия связи состоит из оптоволокна с преобразователями электрических сигналов в световые и обратно в электрические (для развязки электроники управления пушкой, находящейся под потенциалом -400 кВ). Оптоволоконные кабели выводятся через торцевой (выходной) фланец танка пушки. Для связи с платой контроллера используются два оптоволоконных кабеля. Два других используются соответственно для запуска модулятора и контроля параметров выходного импульса модулятора.

2.4.1 Катодная электроника включает в себя следующие элементы (рис. 2.4):

- Плата контроллера отвечает за связь с компьютером, задание опорных напряжений и контроль основных параметров пушки.
- Плата питания катодной электроники преобразует входное напряжение 187 В частотой 50 Гц в переменное напряжение 2х65 В частотой 50 кГц. Далее из этого напряжения формируются необходимые питающие напряжения для всех элементов катодной электроники.
- Плата питания накала катода задает ток накала катода.
- Блок управления экстрактором обеспечивает необходимый отпирающий импульс пушки.
- Плата управления фокусирующим электродом регулирует напряжение на первом фокусирующем электроде пушки.

Плата контроллера катодной электроники MEA включала в себя модуль распределенного управления (DCM, Distributed Control Module, выполненный на базе микроконтроллера Intel 8044) и плату расширения, имеющую в своем составе 8 цифровых входов, 8 цифровых выходов, 4 аналоговых выхода и 16 аналоговых входов [41]. Исходный код программного обеспечения микроконтроллера не был передан в ОИЯИ. Соответственно, т.к. в любом случае



Рис. 2.6. Структурная схема платы программируемого логического контроллера

требовалось написание нового ПО микроконтроллера, становилась разумной разработка собственной платы контроллера, основанной на более современном микроконтроллере, которым стал ATmega32 фирмы Atmel.

2.4.2 Плата контроллера состоит из микроконтроллера ATmega32, четырех каналов ЦАП, 16 каналов для измерения напряжения с последовательным опросом, входного регистра на 8 входов и выходного регистра также на 8 выходов (уровни TTL). Структурная схема платы представлена на рис. 2.6. Для управления катодной электроникой в данном варианте используется часть возможностей платы, а именно 3 канала ЦАП с выходным напряжением 0-5 В, 6 каналов контроля аналоговых сигналов со входными сигналами в диапазоне $\pm 0-5$ В и 2 канала входного регистра. Дополнительные возможности заложены для будущих применений.

Обмен информацией между управляющим компьютером с программой GunCtrl (см. раздел 2.4.4) и платой контроллера осуществляется с использованием интерфейса RS-232, который преобразуется в RS-485 с применением гальванической развязки. Далее интерфейс RS-485 преобразуется обратно в RS-232 и по оптоволоконным кабелям связывается с платой контроллера. Скорость передачи информации составляет 115,2 кбит/с, обмен информацией осуществляется по принципу Master-Slave, т.е. компьютер выдает управляющее сообщение из четырех байт и ждет от контроллера ответного сообщения. Первый байт управляющего сообщения содержит адрес узла в пяти младших битах и служебную информацию в трех старших. В нашем случае пушка имеет нулевой адрес, биты служебной информации также равны нулю, т.е. первый байт всегда равен нулю. Второй байт содержит информацию о функции, которую должен выполнить контроллер. Третий (DATAL) и



Рис. 2.7. Временная диаграмма обмена информацией между контроллером и компьютером для случая штатной работы

четвертый (DATAH) байты отводятся под данные. Выполнение части функций не требует передачи данных контроллеру, в этом случае контроллер игнорирует содержимое двух последних байтов управляющего сообщения, но для определенности GunCtrl записывает в них нулевую информацию. Задержка между байтами составляет порядка 50 мкс. Контроллер принимает эти четыре байта, обрабатывает информацию, в них содержащуюся, и, в зависимости от результата обработки, через задержку порядка 50 мкс посылает ответное сообщение.

- Из трех байтов в случае штатной работы. Первый байт имеет такую же структуру, как и в управляющем сообщении и в нашем случае равен нулю. Второй и третий байты содержат данные. Аналогично управляющему сообщению, если функция не предусматривает передачи данных в ответном сообщении, в эти байты для определенности записывается нулевая информация. Временная диаграмма для этого случая представлена на рис. 2.7.
- Из двух байтов в случае ошибки (подробности см. далее).

Контроллер поддерживает 9 функций:

Function_1 — запись канала в коммутатор, DATAL = 0 - 15, DATAH = 0.

Function_2 — старт АЦП и чтение кода преобразования, DATAL = 0 - 255, DATAH = 0 - 63.

- Function_3 запись канала в коммутатор, DATAL = 0 15, DATAH = 0 и чтение кода преобразования, DATAL = 0 255, DATAH = 0 63.
- Function_4 запись данных в ЦАП DAC1, DATAL = 0 255, DATAH = 0 255.
- Function_5 запись данных в ЦАП DAC2, DATAL = 0 255, DATAH = 0 255.
- Function_6 запись данных в ЦАП DAC3, DATAL = 0 255, DATAH = 0 255.
- Function_7 запись данных в ЦАП DAC4, DATAL = 0 255, DATAH = 0 255.
- Function_8 запись данных в выходной peructp Reg_OUT, DATAL = 0 255, DATAH = 0.
- Function_9 чтение данных из входного регистра Reg_IN, DATAL = 0 255, DATAH = 0.

Как видно из временной диаграммы выше, цикл обмена информацией занимает заведомо меньше 1 мс. Если за это время от контроллера не приходит ответ — выдается сообщение об ошибке передачи (Global Error 1) и выполнение команды игнорируется. С целью уменьшения вероятности искажения информации цикл обмена осуществляется синхронно с работой ускорителя (во временном отрезке с минимальными электромагнитными помехами). Для этих целей служит специальная схема привязки к работе ускорителя.

На уровне контроллера производится контроль на наличие следующих типов ошибок:

- ошибки при приеме каждого из байтов сообщения (формат, паритет и переполнение),
- нарушение временных соотношений,
- нарушение количества принятых байтов,
- неправильный адрес узла (пушки),
- служебная информация в принятом сообщении не соответствует истинному значению,
- принята несуществующая функция.

В случае обнаружения ошибки при приеме управляющего сообщения контроллер посылает ответное сообщение из двух байтов (в отличие от стандартного ответного сообщения, состоящего из трех), содержащее информацию об фактическом адресе контроллера, номер ошибки и сопутствующую данному типу ошибки информацию.

Контроллер посылает ответное сообщение о 8 типах ошибок:

- Error_Message1 ошибка при приеме первого байта. Биты Frame Error (FR), Data OverRun (DOR) и Parity Error (PE) в регистре UCSRA не равны нулю. В ответном сообщении первый байт имеет вид ObO0100000, а второй байт содержит регистр UCSRA.
- Error_Message2 ошибка при приеме второго байта. Биты Frame Error (FR), Data OverRun (DOR) и Parity Error (PE) в регистре UCSRA не равны нулю. В ответном сообщении первый байт имеет вид ObO1000000, а второй байт содержит регистр UCSRA.
- Error_Message3 ошибка при приеме третьего байта. Биты Frame Error (FR), Data OverRun (DOR) и Parity Error (PE) в регистре UCSRA не равны нулю. В ответном сообщении первый байт имеет вид 0b01100000, а второй байт содержит регистр UCSRA.
- Error_Message4 ошибка при приеме четвертого байта. Биты Frame Error (FR), Data OverRun (DOR) и Parity Error (PE) в регистре UCSRA не равны нулю. В ответном сообщении первый байт имеет вид 0b1000000, а второй байт содержит регистр UCSRA.
- Error_Message5 ошибка таймера, т.е. четыре байта не пришло в определенный отрезок времени. Контролируется бит 0CF0 в регистре TIFR of Timer/Counter0. В ответном сообщении первый байт имеет вид 0b10100000, а второй байт содержит регистр TIFR.
- Error_Message6 ошибка количество принятых байтов в определенный вариант времени (не четыре байта). В ответном сообщении первый байт имеет вид 0b11000000, а второй байт содержит регистр количества принятых байтов.
- Error_Message7a ошибка информации в первом байте управляющего сообщения (в нашем случае — первый байт не равен нулю). В ответном

сообщении первый байт имеет вид 0b11100000, а второй байт равен первому байту принятого управляющего сообщения.

- Error_Message7b ошибка при приеме функции. Второй байт управляющего сообщения равен нулю, либо больше 9. В ответном сообщении первый байт имеет вид 0b11100000, а второй байт равен второму байту принятого управляющего сообщения.
- Global Error2 не удалось определить тип ошибки (первый байт ответного сообщения не соответствует ни одному из приведенных выше вариантов).

Остановимся более подробно на реализации некоторых функций.

Контроль работоспособности вентиляторов катодной электроники организован через чтение информации со входного регистра. Используется два канала — по числу вентиляторов. Работоспособность каждого анализируется электронной схемой, после чего в разряды DIO и DI1 входного регистра выдаются сигналы в уровнях TTL. Уровень сигнала, соответствующий «1», говорит о работоспособности данного вентилятора, «0» — о неисправности. Управляющее сообщение контроллеру, посылаемое программой GunCtrl, имеет вид (0, 9, 0, 0). Содержимое третьего и четвертого байтов значения не имеет, но для определенности в них записываются нули. Ответное сообщение в случае отсутствия ошибки состоит из трех байтов, первый и третий из которых равны нулю, а второй кодирует информацию о состоянии вентиляторов и может принимать значение от 0 до 3. Если какой-то из принятых байтов примет отличное от описанного значение, программа GunCtrl выдаст сообщение об ошибке Global Error 3. В противном случае анализируется содержимое двух последних битов второго байта ответного сообщения, каждый из которых кодирует состояние соответствующего вентилятора («1» — работает, «0» — не работает), и на экран выводится соответствующая информация.

Установка опорных напряжений для накала катода, управляющего и фокусирующего электродов осуществляется с помощью трех управляющих аналоговых каналов. Каждому каналу соответствует свой ЦАП: DAC1, DAC2 и DAC4. Выходное напряжение ЦАП находится в диапазоне 0–5000 мВ. При этом 0 мВ соответствует 0, а 5000 мВ — 65536. Следовательно, изменение значения данных на единицу соответствует изменению напряжения
0,0763 мВ. Таким образом, чтобы установить напряжение равное, например, $V_{\rm ref} = 1000$ мВ, необходимо записать в регистр ЦАПа значение кода $D = {\rm round}(V_{\rm ref}/0,0763) = {\rm round}(1000/0,0763) = 13106$. Таким образом, управляющее сообщение программы GunCtrl для канала Filament Supply будет следующим: первый байт равен нулю, второй байт кодирует операцию записи в DAC4 (Function_7), третий и четвертый байты содержат D = 13106. Опорное напряжение для управляющего и фокусирующего электродов устанавливается аналогичным образом. Фокусирующему электроду соответствует DAC1 и операция Function_4, экстрактору — DAC2 и Function_5.

Контроль параметров пушки производится с помощью шести аналоговых измерительных каналов с соответствующими АЦП. Соответствие номера канала и измеряемой величины следующее:

- $Ain\theta$ напряжение накала катода (0-12 В),
- Ain1 ток накала катода (0-6 A),
- Ain2 напряжение на плате катодной электроники,
- Ain3 давление SF₆ в танке пушки (0-6 бар),
- Ain4 температура SF₆ в танке пушки (0-100°С),
- Ain5 напряжение на фокусирующем электроде (0-25 кВ),

Для измерения выбранного параметра необходимо записать соответствующий канал в коммутатор, сделать старт АЦП и считать код преобразования. Управляющее сообщение программы GunCtrl выглядит следующим образом. Первый байт, как обычно, равен нулю. Второй байт кодирует функцию чтения из АЦП (Function_3). Третий байт кодирует номер АЦП и может принимать значение от 0 до 5. Четвертый байт равен нулю. При отсутствии ошибок ответное сообщение состоит из трех байтов, первый из которых равен нулю, а два оставшихся (DATAL и DATAH) кодируют полученную информацию. Представление информации зависит от способа включения АЦП: монополярный (таблица 2.2) или биполярный режим (таблица 2.3). В нашем случае используется биполярный режим. Как видно из таблицы 2.3, в этом режиме представление значения реализовано в виде дополнительного кода [45, с. 52]. Старший разряд при таком представлении — знаковый, разрядность АЦП

Таблица 2.2

Монополярный режим АЦП

Напряжение на входе АЦП	Двоичное представление
0,00000	0000000
9,99939	11111111

Биполярный режим АЦП

Таблица 2.3

Напряжение на входе АЦП	Двоичное представление
-5,00000	1000000
-0,00061	11111111
+0,00000	0000000
+2,50000	01000000
+4,99939	01111111

+4,99939

равна 14, поэтому используется 13 разрядов, что соответствует максимальному целому 8191. Таким образом, 1 бит считываемого кода соответсвует 0,6103515625 мВ (5000/8191). Также вследствие 14-разрядности АЦП в старшем байте DATAH информация содержится в первых 6 битах, и перед обработкой необходимо сдвинуть DATAH вправо на два бита. Пример фрагмента программы обработки на языке TurboPascal:

```
begin
        ADC_H := ADC_H shr 2;
        d2 := ADC_H;
        if d2 >= 32 then Sign := -1 else Sign := 1;
        if sign = -1 then
        begin
                 ADC_H := ADC_H and 31;
                d2 := 31 - ADC_H;
                d1 := 255 - ADC_L;
        end
        else d1 := ADC_L;
        d := d1 + 256 * d2;
        V := int(d*(1000/16192));
end;
```

2.4.3Программа тестирования контроллера была разработана для тестирования и настройки платы контроллера. Программа получает от пользователя четыре числа размером в 1 байт (0...255) в десятичном формате, для удобства переводит эти числа в двоичный и шестнадцатеричный форматы и передает их через интерфейс RS-232 (COM-порт) контроллеру. После чего получает от контроллера ответные три байта, переводит их в двоичный и шестнадцатеричный форматы и выводит на экран. Передача и прием данных идут непрерывно, при этом пользователь в любой момент по нажатию клавиш F1...F4 может изменить соответствующий посылаемый байт. Программа написана на языке Borland Pascal 7.0 под операционную систему MS-DOS. Основное окно программы представлено на рис. 2.8.



Рис. 2.8. Интерфейс программы тестирования контроллера

Рис. 2.9. Интерфейс DOS-версии программы GunCtrl

2.4.4 Программное обеспечение GunCtrl создано для обеспечения взаимодействия пользователя и контроллера электронной пушки. Первая версия программы была написана на языке Borland Pascal 7.0 под операционную систему MS-DOS. Программа работала с последовательным портом напрямую, через предопределенный массив Port. Основное окно программы представлено на рис. 2.9.

Оператору предоставлялась возможность устанавливать опорные напряжения Vref для:

- накала катода (Filament Supply),
- первого фокусирующего электрода (Focusing Electrodes),
- экстрактора (Extractor Pulser).

Во время работы программы на экран в реальном времени выводились:

• реальные напряжения накала катода (Vfs) и первого фокусирующего электрода (Vfoc),

- ток (Ifs) накала катода,
- давление (Pressure) и температура (Temperature) SF₆ в танке пушки,
- напряжение на плате катодной электроники (Board Voltage),
- статус системы охлаждения платы (Flow).

Установка напряжения накала катода скачком запрещена в связи с тем, что это может привести к перегоранию нити накала. Поэтому при вводе нового значения в поле Filament Supply в случае, если оно превышает предыдущее, программно реализовано плавное изменение напряжения до нового значения (в течение 30 с, если напряжение поднимается впервые за сеанс и 6 с в противном случае). В период плавного повышения напряжения никакие действия с программой производить нельзя.

При выходе из программы происходило сохранение данных в два файла: data.dat во внутреннем формате DataFile, представляющем собой запись (record), в которой каждому параметру соответствует поле, для удобства чтения программой; и в текстовый файл с именем, включающим текущие дату и время (в формате «день_месяц_час.минута», например «17_3_15.12» — 17 марта в 15:12). При загрузке программы опорные напряжения устанавливались в значения, записанные в файле data.dat (т.е. в значения, сохраненные при последнем выходе из программы).

Для контроля работоспособности программы (что она не «зависла») использовался мигающий индикатор «**Program working...**».

Вторая версия (используемая в настоящее время) была написана в среде Borland Delphi на языке Object Pascal и работает под управлением Windows XP.

Основными отличиями от предыдущей версии стали новый интерфейс с использованием стандартных элементов Windows и работа с портом средствами WinAPI.

Возможность сохранения параметров в файл и загрузки из него опорных напряжений стала доступна в любой момент. Формат файла был изменен на *.ini, что позволило избавиться от двух разных типов файлов — этот формат легко читается как человеком, так и программой. Более того, при желании оператор может менять значения опорных напряжений непосредственно в файле с помощью любого текстового редактора и загружать его в программу с уже измененными напряжениями. По умолчанию имя файла имеет формат,



Рис. 2.10. Основное окно Windows-версии программы GunCtrl

состоящий из текущих времени и даты, например «31.10.2015 17-58.gc». При запуске программы оператору предлагается выбор следующих вариантов:

- нулевые начальные опорные напряжения,
- загрузка опорных напряжений, сохраненных при последнем закрытии программы,
- загрузка опорных напряжений из файла.

Кроме того, оператор может вывести на экран схему электроннооптической системы пушки и/или окно с увеличенным шрифтом.

Основное окно программы представлено на рис. 2.10. Блок-схема Windows-версии программы (в упрощенном виде, без обработки ошибок и открытия окон с дополнительной информацией) приведена на рис. 2.11 и 2.12.



Рис. 2.11. Блок-схема программы управления электронной пушкой, ч. 1



Рис. 2.12. Блок-схема программы управления электронной пушкой, ч. 2

2.5 Синхронизатор

Система синхронизации МЕА (рис. 2.13) была организованна на базе задающего генератора (синтезатор частот Rohde & Shwarz 826.4517.52, 100-1000 МГц), вырабатывающего опорный сигнал частотой 476 МГц. В дальнейшем этот сигнал поступал в две подсистемы, в первой из которых, умноженный в 6 раз до рабочей частоты ускорителя в 2856 МГц и усиленный по мощности до 300 Вт, использовался для возбуждения клистронов, а во второй — поступал на блок Master Clock. В последнем формировался набор синхронизационных сигналов с частотами 2 МГц (внутренние часы), 2500 Гц (сигнал синхронизации частоты повторений) и 10 Гц (сигнал периодической синхронизации). Далее этот набор сигналов передавался в локальные подсистемы синхронизации с помощью амплитудно-модулированной ВЧ распределительной системы [46; 47].



Рис. 2.13. Схема системы синхронизации МЕА

Вышеописанная система, несмотря на наличие ряда преимуществ (все сигналы связаны и синхронны с частотой ускорителя, благодаря системе с несущей волной не существует искажений и временных ошибок), была избыточно сложной для имеющихся задач. Так, с новым блоком управления модулятором для запуска минимальной конфигурации ускорителя (с одной ускоряющей станцией) требовалось всего 4 сигнала:

- зарядка формирователей импульсов (PFN-модулей),
- стартовый импульс электронной пушки,
- запуск предусилителя ВЧ-сигнала 2856 МГц,

• разрядка формирователей импульсов,

Для каждой последующей ускоряющей станции добавляются еще два сигнала: зарядка и разрядка соответствующих блоков PFN-модулей.

Однако требовалась регулировка не только задержки импульсов относительно стартового, но и длительности импульсов, в связи с тем, что длительность импульса экстрактора (а следовательно, и длительность импульса ускорителя) непосредственно определяется длительностью соответствующего синхроимпульса.

В результате был сделан выбор в пользу централизованной системы в принятом в ОИЯИ конструктиве в стандарте КАМАК. Это позволило существенно упростить систему синхронизации, избавившись от локальных подсистем синхронизации и ВЧ-компонентов, многие из которых на момент начала восстановления ускорителя уже не производились (впрочем, часть оборудования МЕА, такого, например, как генератор на 476 МГц и соответствующий шестикратный умножитель частоты, продолжает использоваться). Однако используемый в указанной системе блок задержек БЗ-53 позволял регулировать только задержку импульсов. В связи с этим, блок БЗ-53 в новой системе синхронизации был заменен на новый блок T12-2, изготовленный в ЛВЭ ОИЯИ в соответствии с вышеприведенными требованиями [48]. В результате, система синхронизации Линак-200 (рис. 2.14) состоит из следующих элементов:

 блока управления БС-4ИР, осуществляющего привязку к нулю сети 50 Гц и выдающего главный импульс «Старт» для системы с частотой 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100 или 150 Гц;



Рис. 2.14. Схема системы синхронизации

- блока формирователей длительностей импульсов T12-2 (12 каналов, диапазон 0 – 900 мкс, шаг 100 нс; входные сигналы имеют уровни NIM, выходные сигналы имеют уровни TTL с повышенной нагрузочной способностью и работают на нагрузку 50 Ом); джиттер выходных сигналов относительно сигнала запуска составляет не более ±12.5 нс [49];
- модуля-переходника с разъемов LEMO на BNC на 8 каналов;
- блока привязки к питающей сети;
- крейт-контроллера КАМАК;
- компьютера с программным обеспечением для управления системой.

Программное обеспечение (рис. 2.15) выполняет следующие функции:

- конфигурирование системы,
- составление/редактирование таблицы параметров,
- запуск на исполнение.

1	C:\Program Files\JINR PPL\SynchrBL\WORK.MDB							- 🗆 ×				
Файл Задержка Опрограмме												
	Комментарий: Линак-800. Проверка сохранения информации! и наличия блоков в крейте!											
	Система синхронизации Конфигурация КАМАК											
	Nмедл	Канал	Тип	Имяк	анала	A/II	Z(нс)	ШагZ(нс)	W(нс)	-		
	16	1	медл	Start		A	1 025 000	100	1 000		Пуск	
	16	2	медл	Charg	e	A	100	100	10 000		Разовый	
	16	3	медл	Disch	arg	A	1 010 000	100	10 000		<u></u>	
	16	4	медл	Starte	ìun	A	1 025 000	100	2 000		Останов	
	16	5	медл	mod		п	100	100	100		Частота БСУ	
Ш	16	6	медл	mod		п	100	100	100			1
Н	16	7	медл	mod		п	100	100	100		Задержка БСУ	
Ш	16	8	медл	mod		п	100	100	100			
Ш	16	9	медл	mod		п	100	100	100		🗆 Проверять	
Ш	16	10	медл	mod		п	100	100	100		наличие блоков	
Н	16	11	медл	mod		п	100	100	100		Инициализация	
Н	16	12	медл	mod		п	100	100	100			
Н	18	1	медл	mod		п	1 000	100	100			
Н	18	2	медл	mod			1 000	100	100	Шаг	задержки в канал	е(нс) –
Н	18	3	медл	mod			1 000	100	100		<u></u>	
μ	18	4	медл	mod		п	1 000	100	100	▼I	длительн. в канал	е(нс)
┛												
	Частота=1 Гц Работа						Задержка БСУ=					

Рис. 2.15. Программное обеспечение системы синхронизации

Изменение параметров системы (частота запуска, величина задержек и длительность импульсов) осуществляется без остановки непрерывного режима.

Конфигурация системы и таблица параметров сохраняется в отдельном файле. Каждое изменение в установке параметров и расстановке блоков по

станциям приводит к организации нового файла. Имя файла устанавливается автоматически и содержит дату и название подсистемы (например, «Synchronizer_18-02-06-11:36.57»). При запуске программы по умолчанию считывается последний по времени файл. Возможна также загрузка любого файла из архива.

2.6 Система термостатирования ускоряющих секций

Изменение температуры ускоряющей секции ускорителя вызывает изменение резонансной частоты секции на 50 кГц/°С, что приводит к снижению средней энергии и увеличению энергетического разброса пучка электронов [50]. Для получения требуемых проектных параметров пучка требуется термостабилизация ускоряющих секций. На МЕА использовалась модульная система термостатирования — каждая ускорительная станция имела обособленную систему, обеспечивающаю термостатирование входящих в нее ускоряющих секций (точность $\pm 0,1$ °С) и волноводов (точность $\pm 0,5$ °С), а также охлаждение клистрона [51]. Схема системы для одной станции представлена на рис. 2.16.



Рис. 2.16. Схема системы термостатирования ускорительной станции МЕА [51]

На начальном этапе развития Линак-200 качество пучка не играло определяющей роли, в связи с чем термостатирование ускоряющих секций не требовалось. Поэтому восстановление сложной системы МЕА стало нецелесообразным. Для охлаждения клистрона же была создана простейшая водооборотная система с теплообменником. Дальнейшее развитие ускорителя потребовало улучшения качества пучка, соответственно, вновь возникла необходимость в термостатировании ускоряющих секций двух первых ускорительных станций. Однако требования к точности были не такими строгими, как на МЕА достаточно было поддерживать температуру секции с точностью $\pm 0.5^{\circ}$ С при частоте ускорителя 1-10 Гц (снимаемая мощность 0,1-1 кВт соответственно). Также для уменьшения времени нагрева воды до рабочей температуры была снижена требуемая температура с 45 до 35°С. В связи с уже имеющейся системой охлаждения клистрона, избыточной сложностью системы термостатирования МЕА для задач Линак-200, а также уже упоминавшимися факторами (устаревшее оборудование, нехватка документации) целесообразным стало создание новой системы термостатирования, построенной на современной аппаратуре и программном обеспечении индустриальных систем (в основном производства фирмы ОВЕН).

В состав системы (рис. 2.17) входят:

- бак с дистиллированной водой объемом 240 л, оснащенный поплавковым датчиком уровня воды ПДУ-2.1.1000,
- Hacoc Calpeda NM 32/12 AE,
- фильтр,
- электрический нагреватель (два ТЭНа мощностью 3 кВт каждый),
- теплообменник с вентилятором,
- 5 датчиков температуры (термометры сопротивления ДТС035-50М.В3.60):
 - воды на выходе системы термостабилизации,
 - воздуха в модуляторном зале,
 - воздуха в ускорительном зале,
 - воды на входе системы термостабилизации (перед теплообменником),



Рис. 2.17. Схема системы термостатирования ускоряющих секций

– воды на выходе теплообменника,

- восьмиканальный универсальный измеритель-регулятор ТРМ138-Р.Щ7,
- датчик давления воды ПД100-ДИ1,0М 1,0.И.11 на выходе системы термостабилизации.

Для реализации логики работы системы использутся два реле измерителя-регулятора TPM138. Реле OUT1 отвечает за управление TЭHами и включается, когда температура на датчике Rt1 опускается ниже уставки минимальной температуры. Реле OUT2 управляет вентилятором теплообменника и включается, когда температура на датчике Rt1 превышает уставку максимальной температуры. Реле OUT8 служит для экстренного отключе-



Рис. 2.18. График изменения температуры на выходе системы термостабилизации (Rt1) и на входе в нее (Rt3) при включении ускорителя на частоте 1 Гц (левая верикальная линия) и повышении до 10 Гц (правая вертикальная линия)

ния насоса в случае падения уровня воды в баке ниже допустимого. Для задания уставок минимальной и максимальной температуры воды возможно использовать как элементы управления, расположенные непосредственно на лицевой панели TPM138, так и компьютер с установленным на нем программным обеспечением: Конфигуратор TPM служит для изменения уставок, а простая SCADA-система OWEN Process Manager — для регистрации состояния системы (показаний датчиков) и документирования истории работы системы.

Нагрев воды с 20 до 35 °C при отсутствии ВЧ-мощности в секции происходит за время порядка полутора часов. Колебания температуры на выходе системы при работе под нагрузкой на частоте ускорителя до 10 Гц составляют $\pm 0,1$ °C (рис. 2.18, Rt1) при проектных $\pm 0,5$ °C. Период колебаний температуры — порядка 20 минут для работы в режимах холостого хода и 1 Гц, и порядка 15 минут для работы с частотой 10 Гц. Поведение системы при переходе с 1 Гц на 10 Гц (рис. 2.18) дает основания полагать, что снимаемая системой мощность будет достаточна для работы ускорителя на проектной частоте 100 Гц.

Показания датчиков и значения уставок (там, где они есть) для каждого канала поочередно отображаются на лицевой панели TPM138 (рис. 2.19). Общий вид системы представлен на рис. 2.20.

50



Рис. 2.19. Второй канал ТРМ138. В большом окне показано текущее показание датчика Rt1 (25,1°C), в маленьком — уставка для реле OUT2 (25,2°C). Уставка для реле OUT1 в данном случае составляет 25,0°C



Рис. 2.20. Общий вид системы термостатирования

2.7 Система радиационного контроля

Аппаратура радиационного контроля ускорителя MEA не была передана в ОИЯИ в связи с тем, что это оборудование не сертифицировано для применения в России.

Основным источником радиационной опасности при работе ускорителя являются фоновые и аварийные потери электронного пучка, которые генерируют тормозное излучение широкого энергетического спектра (вплоть до энергии тормозящегося электрона). В дополнение к тормозному излучению при энергии фотонов выше порога реакции (~ 12 – 14 МэВ) возникают вторичные нейтроны (фотонейтроны). За биологическими защитами зала ускорителя радиационная обстановка определяется сильнопроникающим излучением – фотонами высоких энергий и нейтронами из фотоядерных реакций.

После остановки ускорителя, во время ремонтных и профилактических работ на ускорителе радиационная обстановка для персонала определется наведенной гамма- и бета-активностью оборудования, подвергшегося облучению фотонами высоких энергий и нейтронами. Возможно также образование снимаемой радиоактивности на оборудовании и радиоактивных аэрозолей в воздухе. Эти факторы радиационной опасности (их уровни) изучаются в процессе достижения ускорителем своих проектных параметров.

Другим (не радиационным) фактором опасности может стать образование высоких уровней озона в воздухе зала ускорителя при его работе. Эта опасность устраняется (при необходимости) введением «времени запрета» на вход в зал, достаточного для проветривания помещения до допустимых концентраций озона в воздухе зала.

В таблице 2.4 приведены параметры электронного пучка, использовавшиеся для разработки мер по радиационной безопасности. Отличие некоторых параметров от приведенных в таблице 2.1 обусловлено тем, что расчеты проводились исходя из максимальной энергии электронов в 800 МэВ, являвшейся проектной на момент разработки системы радиационного контроля.

К системе радиационного контроля ускорителя Линак-200 предъявляются следующие требования [46]:

 автоматическое измерение мощности экспозиционной дозы гаммаизлучения, мощности эквивалентной дозы нейтронов в зале ускорителя, экспериментальных залах и прилегающих технологических помещениях;

Таблица 2.4

Параметры ускорителя,	использовавшиеся	для	расчета	мер	no	радиационной
	безопасност	nu				

Параметр, единицы измерения	Значение
Максимальная энергия электронов, МэВ	800
Ток, мА	40
Частота повторения импульсов, Гц	3 - 10
Длительность импульса тока, мкс	1 - 10
Средние токи потерь в рабочем режиме, мкА	0,4
Аварийные потери заряда за время 1–10 мкс, нК	менее 50
Длина, м	200

- сбор информации с детекторов и оперативное отображение информации на экране монитора оператора системы;
- обработка и создание архива данных о радиационном фоне на ускорительном комплексе;
- тестирование детекторов и каналов регистрации;
- приведение в действие сигнализирующих и блокирующих устройств;
- оперативное управление параметрами элементов системы и защита от несанкционированных действий оператора;
- локализация потерь пучка электронов как во времени, так и в пространстве.

С учетом приведенных требований была реализована система радиационного контроля [4; 10], включающая в себя:

- блоки детектирования сцинтилляционные БДС-1М-63×63 [52] (7 шт., диапазон регистрируемых энергий фотонного излучения 0,16 5 МэВ) производства НПЦ «Аспект»;
- устройства детектирования нейтронного излучения УДБН-01-01 [53] (2 шт., диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы 0,1 – 10⁴ мкЗв/ч, диапазон регистрируемых энергий 0,025 эВ – 14 МэВ) того же производителя;

- блок питания и коммутации БПК-02 [54];
- компьютер с источником бесперебойного питания;
- программное обеспечение RadCtrl;
- последовательную линию связи RS-485;
- портативный дозиметр рентгеновского и гамма-излучений ДКС-АТ1123 [55] (диапазон энергий 0,015 – 10 МэВ; диапазон измерения мощности амбиентной эквивалентной дозы 50 нЗв/ч – 10 Зв/ч непрерывного излучения и 0,1 мкЗв/ч – 10 Зв/ч импульсного излучения с длительностью импульса от 10 нс) производства АТОМТЕХ.

Все детекторы соединены с помощью последовательной линии связи RS-485 с использованием коммуникационного протокола Modbus RTU [56]. Схема расположения радиационных детекторов в помещениях ускорителя представлена на рис. 2.21.



Рис. 2.21. Схема системы радиационного контроля Линак-200. Обозначения: γ — БДС-1М-63×63, п — УДБН-01-01

Количество точек измерения и тип детекторов, расположенных в них, определяется спецификой ускорительного комплекса и исследовательскими задачами, решаемыми на этом оборудовании. При этом необходимо отметить, что ускоритель строится и запускается в эксплуатацию поэтапно. Соответственно, также развивается и система радиационного контроля. Кроме этого, инжектор ускорителя территориально находится в непосредственной близости от установки ИБР-2 [46]. Таким образом, необходимо контролировать уровень нейтронного и гамма-излучения уже на стадии монтажа элементов ускорителя.

Здесь следует пояснить, что из-за импульсности излучения (скважность $1 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ при длительности импульса 1 – 10 мкс) потребуется ввести поправки в показания гамма датчиков, воспользовавшись измерениями прибором ДКС-АТ1123, который может адекватно измерять мощность дозы импульсного излучения с минимальной длительностью импульса 10 нс.

2.7.1 Программное обеспечение RadCtrl было создано для отображения в реальном времени показаний детекторов системы и сигнализации о превышении порогов мощности эффективной дозы (МЭД). Программа написана в среде Borland Delphi на языке Object Pascal и работает под управлением Windows XP. Основное окно программы (с демонстрацией фонового излучения) представлено на рис. 2.22. Для защиты от несанкционированного доступа требуется ввести пароль перед входом в программу.



Рис. 2.22. Основное окно программы RadCtrl

Основную часть главного окна занимают два поля с отображением в графическом виде изменения показаний детекторов в графическом виде. В верхем поле отображаются показания (уровень МЭД) гамма-детекторов БДС-1М-63×63 (показания каждого детектора отображаются своим цветом), в нижнем — показания нейтронных детекторов УДБН-01-01. Справа от графического представления индицируются числовые показания каждого из детекторов в данный момент, состояние детекторов, а также соответствие цветов на графике конкретным детекторам. Помимо перечисленного, на главом экране программы отображаются текущие значения даты и времени (которое также используется для контроля того, что программа не «зависла») и поле быстрой установки масштабных коэффициентов графиков.

Панели состояния детекторов расположены справа от их числовых показаний и индицируют следующие состояния:

Зеленый цвет — система функционирует нормально.

Желтый цвет — превышен первый предел по МЭД.

Красный цвет — превышен второй предел по МЭД.

Серый цвет — детектор отключен оператором.

Мигание серым/красным — нет связи с детектором.

Пункт меню Scheme показывает схему расположения детекторов в помещениях ускорителя (рис. 2.23, а). На схеме отображаются числовые показания детекторов, а также панели состояния, имеющие такие же функции, как и аналогичные панели в главном окне программы. Пункт меню Archive вызывает на экран список детекторов. После выбора детектора из списка появляется окно архива измерений соответствующего детектора (рис. 2.23, б). В архиве приведены следующие данные: порядковый номер измерения, значение МЭД в мкЗв/ч, дата и время измерения. В архиве сохраняются последние 500 измерений. При нажатии на иконку сохранения в панели инструментов можно сохранить архивные данные в формате Microsoft Excel. При клике на панель на экран выводится окно настроек канала (рис. 2.23, в), позволяющее установить пределы детектора и, в случае необходимости, отключить его. В окне настроек, вызываем пунктом меню Options (рис. 2.23, д) оператор может изменить масштаб графика (линейный или логарифмический), а также установить масштабные коэффициенты.

Алгоритм работы программы следующий. При запуске цикла измерения первому детектору посылается запрос на отправку текущего значения МЭД. В случае, если детектор в течение 200 мс не присылает значение, он помечается как отсутствующий (панель состояния начинает мигать красным/серым



Рис. 2.23. Вспомогательные окна программы RadCtrl: (a) схема расположения детекторов, (б) окно архива измерений, (в) окно настроек канала и (г) окно настроек программы

цветом) и посылается запрос следующему детектору. Если же ответ от детектора получен, то запрос следующему детектору посылается через 10 мс. После завершения опроса цикла делается пауза в 100 мс и посылается запрос первому детектору. Таким образом, в случае отсутствия проблем, полный цикл опроса выполняется пять раз в секунду. Работа идет в режиме RTU: 1 стартовый бит, 8 бит данных, 2 стоповых бита, со скоростью передачи 57 600 бод. Блок-схема программы (в упрощенном виде, без обработки ошибок и открытия окон с дополнительной информацией) представлена на рис. 2.24 и 2.25.



Рис. 2.24. Блок-схема программы RadCtrl, ч. 1



59

2.7.2 Калибровка системы производилась в Отделе радиационной безопасности ОИЯИ следующим образом:

- Каждый детектор облучался в эталонных точках с известной мощностью дозы, записывался счет (количество частиц, зарегистрированных детектором). Экспозиция детектора была установлена в 1 секунду. Пример таблицы с результатами измерений (для гамма-детектора №1) дан в таб. 2.5.
- На основании результатов измерений производилась кусочно-линейная аппроксимация функции отношения мощности МЭД к счету.
- Полученные коэффициенты для каждого из линейных участков функции вносились в программу RadCtrl. Пример набора уравнений (для гамма-детектора №1) приведен в таб. 2.6. Пример графика зависимости МЭД от счета приведен на рис. 2.26.
- Проверялось соответствие выводимой программой мощности дозы излучения и эталонными значениями. Разница измеренного и эталонного значения находилась в пределах требуемой погрешности.

Дата: 8 июля 2010 г.						Гамма-детектор №1			
Иат Васат		№ изм.	1	2	3	4	5	Средн.	
FICT.	r accr.	МЭД/фон	13	17	18	7	15	14,0	
6A2	144,1	9,43	3 2 3 0	3239	3179	3 3 1 2	3 2 3 9	$3239,\!8$	
6A2	59,0	56,58	16 484	16378	16592	16419	16 498	16474,2	
1H5	472,3	94,3	25000	25012	25116	24808	24774	24 942,0	
1H5	335,5	188,6	39 468	39691	39366	39 282	39 169	$39395,\!2$	
1H5	265,9	301,8	50 219	49917	50211	50238	50 089	50134,8	
1H5	194,6	566,0	62708	62783	62737	62648	62 909	62757,0	
1H5	151,0	943,0	66 1 46	66 309	65620	65 792	66 0 36	$65980,\!6$	
1H5	106,9	1886,0	67 272	67 331	67111	67223	67 476	67 282,6	

Таблица 2.5 Соответствие счета эталонной мощности дозы для гамма-детектора №1

Начальный счет	Конечный счет	Уравнение отрезка
0	14	y = 0,0143x
3 2 4 0	16474	y = 0,0029x + 0,1599
16474	24942	y = 0,0036x - 2,1124
24 942	39395	y = 0,0065x - 68,434
39 395	50135	y = 0,0105x - 226,64
50 135	62757	y = 0,0209x - 747,59
62 757	65980	y = 0,1169x - 6773,4
65 980	_	y = 0,7243x - 46845

Таблица 2.6 Уравнения кусочно-линейной аппроксимации для гамма-детектора №1



Рис. 2.26. График зависимости МЭД от счета для гамма-детектора №1

2.8 Система блокировок и сигнализаций

Система блокировок и сигнализаций Линак-200 предназначена для непрерывной работы при эксплуатации комплекса ускорителя и обеспечивает:

- предотвращение доступа персонала в зоны с повышенным уровнем ионизирующего излучения,
- предупреждение персонала звуковыми и световыми сигнализаторами о возможной радиационной опасности.

Схема системы представлена на рис. 2.27.

2.8.1 Система блокировок. В соответствии с нормами радиационной безопасности входы в зал ускорителя должны перекрываться защитными дверьми, связанными с системой блокировок и управляемыми специальной схемой электрооборудования. Эта схема позволяет производить открытие и закрытие двери снаружи и аварийное открытие изнутри. Система блокировки входа в зал ускорителя отвечает следующим требованиям:

- исключение возможности открывания двери в режиме работы ускорителя,
- исключение возможности включения ускорителя при открытой двери,
- отключение и блокировку режима работы ускорителя при отсутствии питающего напряжения,
- возможность повторного включения пучка только в случае закрытой двери и активации пусковой кнопки на управляющем пульте,
- надежное гарантирование от сбоев и отказов в работе.

Закрытие дверей возможно только в течение короткого (180 секунд) промежутка времени после нажатия кнопки разрешения закрытия, установленной внутри зала ускорителя. Кнопка расположена таким образом, что в момент нажатия можно убедиться в отсутствии людей в помещении. Необходимое время задается с помощью реле времени. Закрытие (и открытие) дверей происходит с помощью соответствующих кнопок снаружи зала только при вставленном в гнездо блокировочном ключе. Этот же ключ должен быть вставлен в соответствующее гнездо на пульте для запуска ускорителя.



Рис. 2.27. Схема системы блокировок и сигнализаций Линак-200

2.8.2 Система сигнализации должна обеспечивать персонал световой, звуковой и визуальной информацией о состоянии ускорителя. Над входами в зал ускорителя расположены информационные табло, отображающие один из следующих сигналов:

- *зеленый свет* ускоряющее напряжение выключено, излучение отсутствует,
- знак радиации и табло «ЗОНА ЗАПРЕТА» наличие излучения в зале ускорителя.

Во время работы ускорителя в зале включается красный мигающий фонарь, расположенный таким образом, что виден из любого места зала ускорителя. Перед включением ускоряющего напряжения в зале ускорителя и в пультовой на 10 секунд включается предупреждающий звуковой сигнал. Красный фонарь в пультовой мигает 30 секунд, а потом горит непрерывно. Также система видеонаблюдения позволяет убедиться в отсутствии людей в ускорительном зале при включенном пучке (подробнее об этом см. в главе, посвященной диагностике).

2.8.3 Состав системы. Система основана на промышленном оборудовании производства компании ABB. Такой подход позволяет достигнуть максимальной отказоустойчивости. В состав системы входят:

- распределительный щит (рис. 2.28) с расположенными на нем блоками управления и блокировок и сигнализации, а также сигнализатором,
- сигнализатор в зале ускорителя,
- информационные табло над входами в зал ускорителя.

2.8.4 Алгоритм работы системы. Перед включением ускоряющего напряжения на ускорителе оператор осматривает зал ускорителя, убеждается в отсутствии в нем персонала и нажимает кнопку разрешения закрытия дверей. После этого у него есть 180 секунд, чтобы выйти из зала и закрыть блокировочную дверь. В случае, если дверь не будет закрыта в течение этого времени, потребуется снова нажимать кнопку разрешения закрытия дверей. Затем оператор приходит на пульт, вставляет ключ в гнездо, поворачивает ег,



Рис. 2.28. Распределительный щит системы блокировок и сигнализаций

убеждается по мнемосхеме блока блокировок и сигнализации, что все готово к включению ускорителя (ключ в гнезде, двери закрыты, ПК системы радиационного контроля включен, камера наблюдения показывает отсутствие людей в зале) и нажимает кнопку включения ускорителя. После этого включается звуковая (на 10 секунд) и световая (на 30 секунд) сигнализация и через 30 секунд автоматически включаются синхронизатор и высокочастотная система ускорителя.

2.9 Заключение

Акцент при создании системы управления ускорителя на минимальные временные и финансовые затраты, а также на децентрализацию системы, оправдал себя. Созданные непосредственно автором, либо при его определяющем участии, системы позволили осуществить физический пуск инжекторной секции ускорителя (энергия электронов 7 МэВ) в 2006 году [57], «нулевой» секции (энергия 22 МэВ) — в 2014 [39], первой и второй — в конце 2015 г., и остальных четырех — летом 2017 г. Энергия после второй секции составляет порядка 50 МэВ, после 4-й — 110–120 МэВ, после 6-й — 200 МэВ. Импульсный ток пучка на выходе ускорителя составил 1,5 мА; ток на пользовательском выводе пучка (энергия 22 МэВ) составил 15 мА в импульсе.

Бесперебойная работа вышеупомянутых систем дала возможность осуществить:

- получение с ондулятора инфракрасного излучения с длиной волны 13,7 мкм и мощностью излучения 30 мВт,
- исследования кристаллических сцинтилляторов на пучке предельно низкой интенсивности с энергией 22 МэВ,
- исследования радиационной стойкости полупроводниковых материалов на пучке с максимальным током до 15 мА в импульсе с энергией 22 МэВ.

Под руководством автора на ускорителе создается специальный учебный участок с энергией 22 МэВ для студентов инженерно-технических специальностей ВУЗов России и других государств-членов ОИЯИ (программа Учебнонаучного центра).

ГЛАВА 3 СТЕНДЫ ФОТОПУШКИ И ФОТОИНЖЕКТОРА

Существующие и планируемые установки для исследований в области физики частиц для генерации излучения высокой мощности и высокой яркости в ЛСЭ, а также для других применений, требуют источников интенсивных электронных пучков со сгустками, обладающими малым эмиттансом и большим зарядом. Такими источниками признаны фотоинжекционные системы. Благодаря фотоинжектору можно получать электронные пучки, профилированные по времени в виде цугов одинаковых коротких сгустков, синхронизированных с ускоряющим ВЧ-полем. Современные фотоинжекторы включают в себя два основных типа систем [58]: ВЧ-фотоинжектор и фотоинжектор прямого действия. В последнем генерацию качественных электронных пучков и сгустков с малым извлекаемым зарядом обеспечивает электронная пушка Пирса с фотокатодом. Обеспечение малого эмиттанса в этих пушках при увеличении извлекаемого заряда до нужных значений требует применения высоковольтного напряжения (100-500 кВ) для компенсации сил пространственного заряда. Сложности обеспечения высоковольтного ввода не умаляют привлекательности фотоинжекторов прямого действия в силу того, что такого типа источники характеризуются минимальным «темновым» током, возникающим вследствие полевой эмиссии. Многие исследовательские группы достигли значительных успехов в создании такого типа фотоинжекторов и продолжают исследования и разработки с целью оптимизации параметров и поиска новых решений. В ОИЯИ с этой целью ведется разработка новых концепций фотокатодов и их исследование на двух стендах, речь о которых пойдет в этой главе.

3.1 Концепции «полого» и «прозрачного» фотокатодов

«Полый» фотокатод [9; 11] представляет собой шайбу толщиной несколько миллиметров с цилиндрическим или коническим отверстием в центре (рис. 3.1). Катод может быть изготовлен как из массивного материала (ниобий, медь), так и методами тонкопленочной технологии (CsITe и алмазоподобный углерод в виде пленок на медной основе). Рабочей поверхностью фотокатода является образующая конуса или цилиндра. Такая геометрия катода позволяет увеличить квантовый выход за счет поверхностного фотоэф-

68





Рис. 3.1. Принципиальная схема электронной пушки прямого действия с полым фотокатодом

Рис. 3.2. Внешний вид (с тыльной стороны) электронной пушки с полым фотокатодом

фекта, обусловленного нормальной к поверхности материала компонентой электрического поля волны фотона (т.н. векториальный фотоэлектрический эффект, [59, § 10.4]). В процессе эмиссии играет роль только компонента поля, перпендикулярная поверхности катода, и ток эмиссии обнаруживает резкую поляризационную зависимость. Длительность импульса тока оказывается меньшей, чем длительность лазерного импульса, что служит указанием на многофотонный характер эмиссии.

Облучение с тыльной стороны радикально упрощает наводку на эмитирующую поверхность и ее лазерную чистку как после первоначальной установки катода, так и в процессе эксплуатации. Внешний вид (со стороны лазера) электронной пушки с полым фотокатодом представлен на рис. 3.2.

В процессе экспериментальных исследований полый фотокатод был заменен на «прозрачный», представляющий собой либо сетку из металлической проволоки диаметром 30 мкм и размером ячейки 40 × 40 мкм, либо кварцевую/сапфировую пластину. Сетка или пластина служит подложкой для создания пленочных катодов из различных фотоматериалов (сетка, помимо этого, может использоваться в качестве фотокатода и сама по себе, без пленки) — как металлов, так и полупроводников.

На рис. 3.3 представлена зависимость извлекаемого из фотокатода заряда от энергии лазерного импульса для пленочных фотокатодов на основе алмазоподобного углерода (Diamond-like carbon, DLC) с сеткой из нержавеющей стали в качестве подложки, изготовленных различными методами. PD и PH — катоды, полученные с использованием технологии плазмохимического



Рис. 3.3. Зависимость извлекаемого из фотокатода заряда от энергии лазера для разных DLC катодов



Рис. 3.4. Катодный узел пушки с «прозрачным» фотокатодом из перфорированного (200×200 мкм) GaAs

осаждения в вакууме (Plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) из газовых смесей $CH_4 + D_2 + Ar$ и $CH_4 + H_2 + Ar$, соответственно. MD и MH — катоды, изготовленные с помощью реактивного магнетронного напыления (Reactive magnetron sputtering, RMS) с использованием в качестве реактивного газа дейтерия и водорода, соответственно. SS — сетка из нержавеющей стали без какой-либо пленки.

Проводились исследования пленочных катодов на основе алмазоподобных пленок и карбида кремния с кварцевым стеклом в качестве подложки [6; 60].

Катоды на основе GaAs позволяют получать пучки электронов со степенью поляризации более 80%, в силу чего такой катод, к примеру, планируется использовать в источнике поляризованных электронов ILC. Сеточный катод (рис. 3.4) из GaAs-пластинки толщиной 0,4 мм был изготовлен методом травления в плазме CCl_2F_2 [61]. Исследование квантового выхода такого катода позволило обсудить возможности и ограничивающие стороны технологии.

69

3.2 Стенд фотопушки

3.2.1 Создание стенда

Замена катода описанного в главе 2 ускорителя Линак-200 — достаточно сложная и трудоемкая операция (скачивание и утилизация элегаза, вскрытие танка, демонтаж электроники, развакуумирование высоковольтного проходного вакуумного изолятора, демонтаж катода с последующим монтажом нового катода, сборка изолятора и его вакуумирование, монтаж электроники, закрытие танка и заполнение его объема элегазом). В связи с чем для исследования эмиссионных свойств катодов (как фото-, так и термоэмиссионных), снятия вольт-амперных характеристик (паспортизации), выбора рабочих режимов, отработки методики выхода катодов на рабочие режимы после нахождения катода при атмосферном давлении и т.п. был создан стенд фотопушки [2]. Помимо этого, в задачи созданного стенда входили отработка электроники управления, снятие калибровочных характеристик управляющих и измерительных каналов, и наладка программного обеспечения.

На момент создания стенд (рис. 3.5) включал в себя электронную пушку прямого действия (максимальное напряжение на аноде — 4 кВ), лазер LOTIS TII LS-2134 и аппаратуру диагностики пучка.



Рис. 3.5. Схема стенда фотопушки в 2008 году

Рабочий вакуум составлял не менее 2×10^{-7} торр. В качестве основного откачного средства на стенде используется геттерно-ионный насос VARIAN производительностью 500 л/с). Форвакуумная линия отсутствует, а для предварительной откачки используется передвижной вакуумный стенд, состоящий из турбомолекулярного насоса в паре с мембранным форвакуумным насосом и системы контроля и управления. Вакуумная система не имеет элементов, подлежащих принудительному охлаждению водой.

3.2.2 Масс-спектрометрия

Одним из существенных узлов вакуумной системы стенда являлся массспектрометр Balzers QMG 111 [62] с подсистемой напуска газов, позволявший выполнять следующие задачи:

- качественный и количественный анализ остаточных газов в рабочем объеме;
- исследования влияния остаточных газов на эмиссионные характеристики катодов;
- обнаружение течей в вакуумных системах;
- изучение процессов адсорбции, десорбции, поверхностных реакций диффузии, что особенно важно для контроля процессов напыления тонких пленок;
- исследование селективности откачки и т.п.

Квадрупольные масс-спектрометры широко используются в вакуумной технике благодаря высокой чувствительности, быстродействию, широкому диапазону масс анализируемых газов, а также прочности конструкции датчика и надежности его работы. Принцип действия прибора основан на разделении ионов по массам в ВЧ-квадрупольном электрическом поле, создаваемом между четырьмя параллельными стержнями круглого сечения (рис. 3.6). Стержни электрически попарно соединены и на них подается определенная комбинация постоянного и высокочастотного напряжения $U + V \cos \omega t$ [62—64].

Атомы или молекулы исследуемого газа ионизируются электронным ударом в ионном источнике, направляются в квадрупольный анализатор и, проходя вдоль него, совершают колебания под действием ВЧ-поля. Амплиту-



Рис. 3.6. Схематическое изображение принципа действия квадрупольного масс-спектрометра

да колебаний ионов зависит от удельной массы иона m/e и величины напряжения на стержнях. При определенных параметрах квадруполя (3.1) через анализатор могут пройти ионы только одной массы, амплитуда колебаний которых меньше радиуса поля. Амплитуда колебаний ионов всех других масс при этом неограниченно возрастает и они нейтрализуются, ударяясь о стержни. Развертка спектра масс осуществляется изменением напряжений на стержнях анализатора, при этом отношение постоянной составляющей напряжения U ($U_{max} = \pm 51$ В) к амплитуде ВЧ-составляющей V($V_{max} = 300$ В на 2,5 МГц) остается неизменным (3.2). Шкала масс квадрупольного масс-спектрометра — линейная. Приемником ионов служит цилиндр Фарадея. Если уровень сигнала мал, то используют вторичный электронный умножитель, обеспечивающий высокую чувствительность и быстродействие прибора [63, § 23].

$$\frac{m}{e} = K \frac{V}{\omega^2}, \qquad K = \text{const}$$
(3.1)

где *К* — постоянная прибора.

$$\frac{U}{V} = \lambda = \text{const} \tag{3.2}$$

Несмотря на то, что данная модель прибора выпущена более 30 лет назад, ее основные технические характеристики отвечают современным требованиям. Основной проблемой при эксплуатации данного прибора являлось
то, что вывод информации был возможен только на аналоговый стрелочный прибор либо на аналоговый графопостроитель. Решение этой проблемы было достигнуто подключением масс-спектрометра к компьютеру с соответствующим программным обеспечением и аппаратурой. Была проделана следующая работа:

- разработаны алгоритм работы и структурная схема системы;
- настроены блоки крейт-контроллера КК009 с платой связи ПК009, АЦП (АЦП также откалиброван), двухканального ЦАПа (необходим для настройки системы и имитирует выходные сигналы масс-спектрометра);
- разработан, смонтирован и настроен блок двухканального аналогового коммутатора;
- создано программное обеспечение;
- вся система компактно располагается в стойке КАМАК;
- создано техническое описание системы с соответствующей документацией.

В результате проведенной работы по подключению масс-спектрометра к компьтеру стало возможно проводить следующие мероприятия:

- измерение парциальных давлений остаточного газа с выводом информации на дисплей и сохранение этой информации;
- считывание сохраненной информации с наложением калибровочного теста;
- подготовку полученной информации для обработки другими стандартными программами;

Система контроля вакуума состояла из масс-спектрометра, компьютера с программным обеспечением на языке Turbo Pascal, крейта KAMAK, крейтконтроллера KK009 с платой связи ПК009, аналогового коммутатора, АЦП и двухканального ЦАПа. Алгоритм работы системы заключался в следующем. При запуске блока QMG 111 на анализ на его выходах появляются соответствующие сигналы. На одном из выходов появляется пилообразное



Рис. 3.7. Подсистема напуска газов

напряжение. Это напряжение используется для развертки по оси X (по массам ионов остаточного газа, находящегося в исследуемом вакуумном объеме). На другом выходе синхронно появляются сигналы (по оси Y), соответствующие составу остаточного газа. Измеряя эти сигналы, можно определить спектральный состав остаточного газа (предварительно проведя калибровку).

Калибровка масс-спектрометра проводилась с использованием эталонного набора газов. Для этого использовалась подсистема напуска газов (рис. 3.7). Кроме функции калибровки с помощью этой подсистемы можно исследовать спектральный состав неизвестных газов (из рабочего диапазона массспектрометра). Подсистема напуска газа состоит из прецизионного натекателя, промежуточного вакуумного объема, форвакуумного насоса, объема с эталонным (исследуемым) газом и вакуумных вентилей.

3.2.3 Лазерные драйверы

С момента создания стенда и до настоящего времени основным лазерным драйвером является LOTIS TII LS-2134 [65], представляющий собой моноимпульсный лазер на кристалле АИГ:Nd³⁺ с преобразованием длины волны излучения основной частоты генерации в излучение второй гармоники, работающий в частотном режиме. Для генерации излучения ультрафиолетового диапазона на стенде применяется генератор 3-й/4-й гармоник YHG-34 [66].

Лазер состоит из следующих составных частей: блок излучателя, блок питания, система охлаждения и пульт управления. Программное обеспечение, поставляемое с лазером, позволяет при подключении к компьютеру:

• управлять режимами работы лазера;

- снимать (сканировать) и визуализировать зависимости энергий лампы накачки и пироприемников от времени и от задержки запуска затвора в реальном масштабе времени;
- сохранять графики энергий в файлах на диске;
- загружать из файла и просматривать ранее сохраненные графики;
- проводить сканирование энергий лампы накачки и пироприемников в двух стандартных режимах;
- создавать произвольные алгоритмы сканирования.

В декабре 2010 г. на стенде был установлен пикосекундный лазер — LOTIS TII LS-2151 [67], позволивший увеличить ток пучка до 16 А (по сравнению с 6 А с лазером LS-2134). К сожалению, он оказался не таким отказоустойчивым, как LS-2134, и вышел из строя через несколько лет использования. В данное время идет подготвительная работа с новым лазером той же фирмы — LS-2132 UTF [68]. Параметры всех трех вышеупомянутых лазеров представлены в таблице 3.1. На новом стенде фотоинжектора будет использоваться существенно отличающаяся от белорусских лазеров система производства ИПФ РАН, подробнее о которой — в разделе 3.3.1.

Таблица 3.1

Параметр, единицы измерения	LS-2134	LS-2151	LS-2132
Используемая длина волны, нм		266	
Длительность микроимпульса, пс	15000	75	5000
Энергия в микроимпульсе, мкДж	15000	5 000	30 000

Параметры лазеров

3.2.4 Текущее состояние

В дальнейшем ускоряющая структура с термокатодом была перенесена на Линак-200, а стенд стал использоваться для разработки и совершенствования «полых», а затем «прозрачных» фотокатодов с целью увеличения квантового выхода, времени жизни и снижения требований к вакуумным условиям. Вакуум был улучшен до 2×10^{-9} торр, а напряжение на аноде увеличено до 6 кВ [9]. Позднее анодное напряжение было увеличено до 10-12 кВ, в конце 2011 года был смонтирован фокусирующий магнит с корректирующими обмотками.

В 2014—15 гг. в диагностическую систему были добавлены блок видеонаблюдения (люминесцентный экран, высокочувствительная видеокамера Prosilica GC1380 — подробнее см. главу 4), две станции профилометра и оборудование системы измерения эмиттанса электронного пучка щелевым методом. Катодное напряжение пушки было увеличено до 30 кВ [7]. Изменение внешнего вида стенда с течением времени представлено на рис. 3.8. Схема стенда приведена на рис. 3.9, внешний вид на момент окончания работы над диссертацией — на рис. 3.10.



Рис. 3.8. Развитие стенда в период с 2007 по 2013 годы



Рис. 3.9. Схема стенда фотопушки. Цифрами обозначены: 1 — «прозрачный» фотокатод, 2 — фокусирующий магнит с корректирующими обмотками, 3 — поглотитель пучка. Фиолетовым цветом показано излучение лазера, красным пучок электронов



Рис. 3.10. Схема стенда фотопушки. Цифрами обозначены: 1 — лазер LS-2134, 2 — фотопушка, 3 — фокусирующий магнит с корректирующими обмотками, 4 — вакуумный бокс системы измерения эмиттанса щелевым методом, 5 — видеокамера Prosilica GC1380

3.3 Стенд фотоинжектора

Развитием стенда фотопушки является полномасштабный стенд фотоинжектора прямого действия на энергию электронов до 400 кэВ.

3.3.1 Оборудование стенда

В качестве драйверного лазера на стенде использовуется созданная совместно с ИПФ РАН система [5; 15] с параметрами, указанными в таблице 3.2. Лазер не является моноимпульсным, как используемые на стенде фотопушки, а выдает серии (макроимпульсы) идентичных коротких импульсов (микроимпульсов), до 8000 в серии.

Таблица 3.2

Параметр, единицы измерения	Значение
Длина волны, нм	260 - 266
Длительность микроимпульса, пс	8-12
Энергия в микроимпульсе, мкДж	1,85
Длительность макроимпульса, мкс	800
Число микроимпульсов в макроимпульсе	8000
Частота повторения макроимпульсов, Гц	10

Основные параметры лазерного драйвера

Измерение частоты повторения лазерных микроимпульсов в задающем генераторе показало, что они флуктуируют в очень узком интервале — около 10 Гц (проектное значение 50–100 Гц) и перестраиваются в широком диапазоне частот: $\pm 1,3$ кГц. Средняя частота повторения микроимпульсов после получасового прогрева изменяется незначительно и только в случае изменения температуры окружающей среды.

Уникальность драйвера заключается в том, что он обладает нетипичным для лазерного приборостроения наличием параметров, каждый из которых не является рекордным. Однако оптимальное их сочетание позволяет заявить о высокой конкурентоспособности всей системы в целом на рынке лазерных драйверов для ускорительной техники.

Доставка лазерного излучения на фотокатод осуществляется с помощью оптической линии транспортировки, которая переносит на фотокатод изображение круглой диафрагмы диаметром 5 мм с уменьшением 1:5. Также линия транспортировки позволяет осуществлять поворот линейной поляриза-



Рис. 3.11. Элементы стенда фотоинжектора: а) лазерный драйвер, б) чиллер Lauda UC-0040-SP, в) высоковольтный источник Glassman

ции излучения на произвольный угол при помощи полуволновой пластинки и диагностику поперечного распределения пучка, формы макроимпульса и мощности УФ излучения перед фотокатодом.

Лазер (рис. 3.11, а) находится в помещении, в котором обеспечивается кондиционированние и фильтрация воздуха. Однако специальных требований по классу чистоты лазер не имеет, в связи с чем используются обычные бытовые сплит-система и установка приточной вентиляции Aeropac SN, обеспечивающая избыточное давление в помещении относительно окружающей среды. Для достижения рабочих параметров требуется охлаждение твердотельных оконченых усилителей (тепловая мощность, снимаемая при температуре воздуха 23°С, должна составлять не менее 3 кВт), которое обеспечивается с помощью системы на основе циркуляционного охладителя (чиллера) Lauda UC-0040-SP (рис. 3.11, б) с водяным охлаждением. Стабильность поддержания заданной температуры составляет $\pm 0,7$ К.

Высоковольтный источник Glassman PS/OS400N3.5GE9 (рис. 3.11, в) позволяет получать напряжение на катоде до -400 кВ. Используется ускоряющая структура, аналогичная установленной на Линак-200. На рис. 3.12 представлено схематическое изображение ускоряющей структуры. Показано также распределение потенциалов между электродами для различных ускоряющих напряжений.



Рис. 3.12. Ускоряющая структура стенда фотоинжектора в разрезе

3.3.2 Физический пуск

В апреле 2017 г. на стенде был получен первый пучок фотоэлектронов. Зарегистрированы макроимпульсы с зарядом 15 нКл, что соответствует току микроимпульса порядка 200 мА, макроимпульса 20 мкА и среднему току 150 нА при частоте повторения 10 Гц. Напряжение на катоде составляло -80 кВ. Использовался прозрачный катод из медной сетки с размером ячейки 40×40 мкм и диаметром проволочки 30 мкм. Заряд электронного сгустка измерялся с помощью цилиндра Фарадея, соединенного с землей через измерительный конденсатор емкостью 1 нФ (рис. 3.13). Собственная емкость цилиндра Фарадея — 24 пФ — была пренебрежимо мала по сравнению с емкостью измерительного конденсатора и в расчетах не учитывалась. Напряжение на конденсаторе регистрировалось осциллографом Tektronix TDS 2024B (рис. 3.14), после чего вычислялся заряд $Q = C \cdot U$, где C — емкость измерительного конденсатора, U — напряжение на нем.





Рис. 3.13. Схема эксперимента при физическом пуске

Рис. 3.14. Ток макроимпульса на осциллографе (2-й канал)

Следует отметить, что в используемом методе не учитывается фотоэмиссия из цилиндра Фарадея (которая имеет место в силу конструкции фотокатода), вторичная эмиссия и пр. — полученные значения заряда и токов являются оценочными. Общий вид стенда при физическом пуске приведен на рис. 3.15.



Рис. 3.15. Общий вид стенда фотоинжектора при физическом пуске. Цифрами обозначены: 1 — внешняя стенка лазерной комнаты, 2 — оптическая линия транспортировки, 3 — ускоряющая структура с фотокатодом, 4 — высоковольтный источник

3.4 Заключение

При непосредственном участии автора создан стенд фотопушки — установка с пучком электронов с максимальной энергией 30 кэВ для проведения исследований термо- и фотокатодов. На стенде выполнены и продолжают выполняться исследования «прозрачных» фотокатодов различных типов. Осуществлен физический пуск нового стенда — фотоинжектора. Получен пучок электронов с энергией 80 кэВ (при максимальной проектной 400 кэВ) и зарядом 15 нКл.

ГЛАВА 4

ДИАГНОСТИКА НА УСКОРИТЕЛЕ ЛИНАК-200 И СТЕНДАХ ФОТОПУШКИ И ФОТОИНЖЕКТОРА

Диагностика параметров пучка электронов является важнейшей задачей. Разработанные для ускорителя Линак-200 и стендов фотопушки и фотоинжектора диагностические системы принципиально не привязаны к какому-то конкретной установке и могут использоваться (и используются) на других. Поэтому диагностическим устройствам посвящена отдельная глава.

4.1 Система видеодиагностики и видеонаблюдения ускорителя Линак-200

Система видеонаблюдения (рис. 4.1) разработана для визуализации профиля и положения пучка, а также общего контроля происходящего в зале ускорителя [3; 12; 14] и включает в себя следующие элементы:

- цифровую видеокамеру Aviosys IP Катега 9000 для наблюдения профиля пучка на выходе электронной пушки на люминесцентном экране;
- электронику дистанционного управления приводом люминесцентного экрана;
- аналоговую видеокамеру Sunkwang SK-2005 PHC/SO/BLACK, 3.7 mm для наблюдения за происходящем в ускорительном зале;
- компьютер с OC Windows Server 2003 для работы с IP-камерами и TBтюнером Behold TV 409 FM для работы с аналоговой камерой;
- телевизор Supra STV-LC16741WL для визуализации изображения с аналоговой камеры;
- линий связи, включающих в себя коммутационные кабели и свитч SURECOM EP-808SX для подключения IP-камер, и коаксиальный кабель для подключения аналоговой камеры.

Камера Aviosys IP Катега 9000 имеет следующие функции [69]:

• встроенный web-сервер;



Рис. 4.1. Схема системы видеонаблюдения Линак-200. Пунктиром показаны возможности расширения

- разрешение 640×480, 352×288, 320×240, 176×144;
- настройка чувствительности (низкая/высокая);
- настройки цвета: яркость, контрастность, оттенок и насыщенность;
- датчик движения с тремя уровнями чувствительности;
- отправка зафиксированных случаев движения по электронной почте или загрузка на FTP-сервер;
- поддержка DHCP, PPPoE и DDNS;
- возможность работы с камерой через браузер: просмотр изображения, сохранение изображения (серии изображений) в формате JPEG или видео в формате AVI.

На рис. 4.2 представлена камера IP Катега 9000, размещенная на фланце бокса видеонаблюдения, а на рис. 4.3 — изображение пучка электронов на люминофоре, передаваемое этой камерой.

Видеокамера Sunkwang SK-2005 PHC/SO/BLACK, 3.7 mm оснащена сенсором 1/3" B/W Super HAD CCD и имеет разрешение 510×492 в формате EIA и 500×582 в формате CCIR. Отношение сигнал/шум составляет 45 дБ,



Рис. 4.2. Камера IP Катега 9000 на фланце

Рис. 4.3. Пучок на IP Kamera 9000

минимальная освещенность 0,5 лк, потребляемый ток 110 мA (питается от 12 В постоянного тока) [70].

Компьютер системы видеонаблюдения оснащен ТВ-тюнером Behold TV 409 FM, что позволяет принимать на нем сигнал с аналоговой камеры. Но т.к. наблюдение за залом ускорителя - важный элемент системы блокировок и сигнализаций (см. раздел 2.8), то было принято решение развязать контроль параметров пучка и наблюдение за залом ускорителя, реализовав последнее с помощью непосредственного подключения аналоговой видеокамеры к видеовходу RCA телевизора. Однако, вариант с подключением камеры видеонаблюдения через ТВ-тюнер также представляет собой интерес в связи, например, с возможностью использовать программно реализованный детектор движения (плагин Guard [71] к программе BeholdTV).



Рис. 4.4. Окно браузера с изображением с двух аналоговых камер, передаваемым через IP-видеосервер IP Video 9100A Plus

Предусмотрены широкие возможности для развития системы. Так, программное обеспечение Surf 16 Ch от Aviosys позволяет одновременно работать с 16 IP-камерами [72], а имеющийся IP-видеосервер IP Video 9100A Plus позволяет подключать до 4 аналоговых камер по локальной сети (и, соответственно, также работать с ними в Surf 16 Ch или через браузер) [73]. На рис. 4.4 представлено изображение (показываемое в браузере) зала ускорителя с двух аналоговых камер, подключенных через видеосервер.

4.2 Система видедиагностики стенда фотопушки

Основным видеооборудованием системы видеодиагностики стенда фотопушки (и, впоследствии, стенда фотоинжектора) является высокочувствительная цифровая видеокамера Allied Vision Technologies Prosilica GC1380 [74] с объективом Kowa LM50JCM. Параметры камеры приведены в таблице 4.1. Камера, установленная на диагностическом боксе, представлена на рис. 4.5.

Таблица 4.1

Сенсор	2.3" Sony ICX285AL CCD
Разрешение	1360×1024
Размер пикселя	$6,45$ мкм $\times 6,45$ мкм
Частота кадров	20,2 кадра в секунду
Потребляемая мощность	Не больше 3,3 Вт
Аппаратный интерфейс	IEEE 802.3 1000BASE-T, 100BASE-TX
Программный интерфейс	GigE Vision Standard 1.0

Параметры камеры Prosilica



Рис. 4.5. Видеокамера Prosilica GC1380 с объективом Коwa LM50JCM, установленная на диагностическом боксе

Попытка использовать аналоговую видеокамеру Qcam QM-68PAT не увенчалась успехом — достигнуть визуализации пучка на люминофоре в каждом импульсе лазера не удалось. Можно предположить, что это связано с малой длительностью импульса лазера и отсутствием возможности синхронизации камеры и лазера.

Камера Prosilica GC1380 поддерживает запуск от внешнего источника по двум каналам: изолированному (задержка срабатывания триггера 5 мкс, дрожание (jitter) $\pm 0,5$ мкс) и неизолированному (3,7 мкс и ± 20 нс соответственно). Т.к. на стенде отсутствуют мощные источники помех, используется неизолированный выход. В связи с тем, что параметры сигнала на синхронизационном выходе лазеров LOTIS отличаются от требуемых камерой (см. таблицу 4.2), в систему был введен генератор GW Instek GFG-3015 в качестве преобразователя импульсов. Схема подключения камеры к сети питания и синхронизационному выходу лазера представлена на рис. 4.6.

Таблица 4.2

Сравнение параметров синхронизационного выхода лазера LS-2134 и требований к импульсу внешней синхронизации камеры Prosilica GC1380

Параметр	LS-2134 [65, c. 9]	Prosilica GC1380
Длительность, мкс	10-20	>11,1 [74, c. 27, 2]
Амплитуда, В	10	3,3-5,5 [74, c. 24, 6]



Рис. 4.6. Схема подключения камеры Prosilica GC1380 к сети питания и синхронизационному выходу лазера

4.2.1 Программное обеспечение на основе Vimba SDK

В доступный на сайте AVT пакет программного обеспечения Vimba SDK [75] входит предназначенная для работы с камерой программа Vimba Viewer, позволяющая просматривать изображение с камеры и дающая доступ к ее параметрам. Однако для для работы в качестве диагностического ПО данная программа имеет достаточно слабый функционал. В связи с этим была начата разработка собственного программного обеспечения, благо упомянутый SDK предоставляет для этого достаточно широкие возможности.

Vimba SDK - камеронезависимый набор средств для разработки ПО для 32- и 64-битных операционных систем Windows XP, Windows 7, Windows 8 и различных дистрибутивов Linux, позволяющий работать с камерами, поддерживающими AVT 1394 (только Windows) и AVT GigE Vision [76]. SDK предоставляет API для языков C, C++ и .NET, причем с последним можно пользоваться любым из языков для .NET: C#, C++/cli или Visual Basic .NET. API для любого из языков реализует следующие функции:

- предоставление списка подключенных камер,
- контроль параметров камеры,
- получение изображений с камеры,
- уведомления о подсоединении или отсоединении камер.

Vimba API использует объектную модель, схема которой представлена на рис. 4.7. Объект System олицетворяет собой непосредственно API, соответственно, возможно создать только один его экземпляр. Приложение должно инициализировать этот объект, прежде чем пользоваться какими бы то ни было функциями API. Объект System содержит список интерфейсов и камер и служит основной точкой доступа к этим объектам. Объект Camera используется для взаимодействия с видеокамерой. Он предоставляет набор функций, не зависящий от используемого камерой интерфейса. Объект Interface служит для работы с физическим портом комьютера и используется для управления настройками соответствующего интерфейсу оборудования. Каждый из перечисленных объектов — System, Camera и Interface — содержит ряд объектов Feature, содержащих в себе настройки соответствующих объектов верхнего уровня. Для объекта System это глобальные настройки API — например, информация о том, какие модули транспортных уровней (transport



Рис. 4.7. Схема объектной модели Vimba API

layer) загружены. Для объекта Camera — настройки конкретной камеры, такие как время экспозиции или формат изображения. Для объекта Interface — настройки интерфейсного оборудования, например, IP-адрес сетевой карты. Наконец, объекты Frame используются для получения изображений с камеры.



Рис. 4.8. Изображение пучка в ПО, созданном на основе Vimba SDK. Справа и снизу от изображения — сечения распределения интенсивности в соответствующих плоскостях

Создано программное обеспечение (рис. 4.8) в среде MS Visual Studio 2010 с использованием языка C++, имеющее следующий функционал:

• авторизация камеры по уникальному номеру,

88

- асинхронный вывод видеопотока с камеры на экран компьютера,
- вывод в реальном времени распределения интенсивности пучка в указанных оператором сечениях.

На этом этапе разработки ПО было получено предложение от коллег из DESY Цойтен о возможности использования разработанного там программного обеспечения AVINE, которое описывается в следующем подразделе. В связи с этим работы над собственным программным обеспечением временно прекращены.

4.2.2 Программное обеспечение AVINE

AVINE — Advanced Video and Imaging Network Environment — разработанный в DESY набор программных инструментов для создания систем видеонаблюдения (в первую очередь поперечного профиля пучка ускоренных частиц) на физических установках. Гибкость системы обеспечивается за счет компонентного подхода. Набор существующих компонентов и их взаимодействие между собой представлены на рис. 4.9.



Рис. 4.9. Схема компонентов AVINE и их взаимодействия между собой

Серверная часть системы написана на C++ и работает под управлением MS Windows XP или 7, клиентская часть имеет C++ версию, которая также работает только под управлением Windows и Java-версию, работающая на любой платформе, поддерживающей Java Runtime Enviroment версии не ниже 1.6 [77]. Важной особенностью системы является то, что серверная и клиентская части могут быть установлены на одном компьютере [78]. Именно в таком варианте AVINE используется на стенде фотопушки, установленная на ноутбуке ASUS U36S.



Рис. 4.10. Изображение поперечного профиля пучка лазера LS-2134 в Video Client 3 — основное окно программы и окно увеличения части изображения

Основным компонентом системы, с которым взаимодействует пользователь, является видеоклиент, который, как было сказано выше, доступен в Windows- и кроссплатформенном JAVA-варианте. В нашем случае используется первый, в связи с тем, что кроссплатформенность не требуется, а Windows-версия разрабатывается давно и имеет больше возможностей. Программа Video Client 3 (рис. 4.10) обладает следующими функциями [79]:

- Визуализация пучка в ЧБ и в двух режимах ложного цвета (classic и MATLAB JET-like)
- Сохранение фона (как одного изображения, так и нескольких с последующим объединением двумя методами: envelope и average) и его вычитание из общей картинки. Запись фона на диск. Возможность взаимодействия с лазерным затвором (shutter).
- Запись изображения на диск в своем формате и в bmp. Быстрое сохранение по горячей клавише (включая обработку — вырезание фона,

ложный цвет — в отличие от Save). Возможность одновременного сохранения фона и изображения (с помощью управления затвором лазера).

- Загрузка изображения (с возможной загрузкой фона и его вычитанием из изображения в этом случае фон надо загрузить до изображения).
- Установка масштаба пиксель-мм по горизонтальной и вертикальной осям
- Подсчет в реальном времени средних координат (центра) и среднеквадратичного размера пучка в соответствии с этим масштабом на основе двух методов вычисления (Fourier analysis и Straightforward statistics).
- Печать (в т.ч. в файл) изображения либо всего окна программы.
- Увеличение части изображения в отдельном окне.
- Проекция видеосигнала по горизонтальной и вертикальной осям.
- Запись серий изображений и последующее усреднение.
- Выбор области интереса (Area of Interest), круглой или квадратной. В этом случае все вычисления делаются для этой области, а не для всего экрана.

4.2.3 Оценка времени послесвечения люминофора

Основной проблемой наблюдения профиля пучка на люминесцентном экране при использовании «прозрачного» фотокатода является засветка люминофора лазером. Одним из рассматриваемых способов борьбы с ней было сдвигание времени срабатывания триггера (предполагалось, что время свечения люминофора под воздействием лазера будет заметно меньше времени свечения люминофора под воздействием электронного пучка). Однако практика показала, что время послесвечения существенно больше, чем ожидалось. Для оценки времени послесвечения люминофора средствами Video Client 3 было сохранено 5 изображений освещенного лазером люминесцентного экрана с различной задержкой срабатывания триггера (параметр TriggerDelayAbs), в также фон. В таблице 4.3 приведены суммы величин всех пикселей изображения без вычитания фона и с его вычитанием. Из таблицы видно, что время послесвечения люминофора составляет порядка 10 мс, что практически

	~		
Задержка, мс	Сумма значений пикселей		
	Без вычитания фона	С вычитанием фона	
0	$13 \ 936 \ 521$	5 830 717	
5	$13 \ 936 \ 521$	5 830 717	
10	4 229 269	43	
20	3 816 440	0	
100	3 764 774	0	

Сумма значений пикселей изображения лазерного луча на люминофоре для разных значений задержки срабатывания триггера

на 6 порядков больше, нежели собственно длительность лазерного импульса (15 нс). Для уверенности, что такой результат не является следствием брака камеры, была проведен эксперимент, описанный в следующем подразделе.

4.2.4 Проверка задержки срабатывания триггера и экспозиции

К синхронизационному выходу лазера был подключен вход генератора Г5-54, а к выходу генератора - светодиод АЛ307, на который направлена камера. Временная диаграмма представлена на рис. 4.11. Схема соединений представлена на рис. 4.12. Были получены следующие результаты.



Рис. 4.11. Временная диаграмма эксперимента по определению задержки начала экспозиции и продолжительности экспозиции камеры Prosilica GC1380

Задержка срабатывания триггера функционирует корректно. Сохранялось изображение диода при задержке (параметр TriggerDelayAbs) 0, 5, 10,



Рис. 4.12. Схема соединений в эксперименте по определению задержки начала экспозиции и продолжительности экспозиции камеры Prosilica GC1380

15, 20 и 25 мкс. С увеличением задержки яркость диода на изображении падает, при задержке 20 мкс диод практически не виден, и при 25 мкс пропадает окончательно. Что соответствует временной диаграмме. Экспозиция (параметр ExposureTimeAbs) при измерениях была установлена в 100 мкс. Программное усиление яркости камеры (параметр GainRaw) в этом и следующем измерениях было установлено в 20 единиц.

Настройка экспозиции камеры также функционирует корректно. Сохранялось изображение диода при экспозиции (параметр ExposureTimeAbs) 8, 13, 18, 23, 50 и 100 мкс. При минимально возможной экспозиции 8 мкс яркость диода на изображении снижена, т.к. камера не захватывает все время излучения (которое составляет порядка 25 мкс относительно начала экспозиции). При увеличении экспозиции яркость увеличивается и на 23 секундах достигает насыщения. Яркость диода при экспозиции 50 и 100 мкс увеличивается незначительно (тот факт, что она вообще увеличивается, вероятно связан с захватом камерой фотонов от внешнего освещения помещения). Задержка срабатывания триггера (параметр TriggerDelayAbs) во время измерения была установлена в 0.

В связи с вышеизложенным от идеи с исключением засветки люминофора лазером путем сдвигания времени срабатывания триггера пришлось отказаться.

4.2.5 Диагностика электронного пучка

Для наблюдения электронного пучка использовалось два варианта: с экраном, расположенным под углом 45° и 90° по отношению к оси пучка [18].

Экран под углом 45°

Этот вариант использовался до установки станции измерения эмиттанса щелевым методом. Видеокамера была установлена на боковом фланце отдельного вакуумного бокса с люминесцентым экраном, расположенным под углом 45° к оси пучка. Стенд с этим вариантом диагностики и изображение на видеокамере представлены на рис. 4.13.

Цифрами обозначены: 1 — лазер LS-2134, 2 — фокусирующий магнит, 3 — профилометр, 4 — вакуумный бокс с люминесцентным экраном, 5 видеокамера, 6 — изображение лазерного пучка, 7 — изображение электронного пучка. Однако в связи с намагничиванием вакуумного бокса, от этого варианта пришлось отказаться, несмотря на то, что пока этот вариант единственный, в котором удалось выделить электронный пучок.

Экран под углом 90°

В этом варианте на выходном фланце вакуумного бокса с щелевой маской закреплен люминофорный экран (использовались два варианта: фосфор и калиевое стекло), а за ним размещена видеокамера. Фотография этого варианта расположения оборудования приведена ранее, при описании стенда фотопушки (рис. 3.10).



Рис. 4.13. Вариант диагностики поперечного профиля электронного пучка с экраном, расположенным под углом 45° к оси пучка.

Засветка люминофора лазером

Как уже упоминалось, основной проблемой для наблюдения пучка электронов является засветка люминофора лазером (усугубляющаяся малой яркостью люминофора из-за низкой энергии электронов). В частности, выделить электронный пучок в варианте с расположением люминофора под углом 90°пока не удается. Ниже перечислены планируемые варианты минимизации влияния фактора засветки лазером в порядке убывания приоритета.

- Установка диагностического узла RadiaBeam Technologies с еще двумя типами экранов: АИГ и фосфор P-22 (предполагается, что эти люминофоры будут слабее засвечиваться лазером).
- Отклонение электронного пучка с помощью дипольного магнита. Т.к. этот вариант позволяет полностью избавиться от засветки, в отличие от предыдущего, он, вероятнее всего, будет реализован независимо от того, насколько будет снижена засветка при использовании новых экранов.
- Установка на пути пучка фольги, проницаемой для электронов и непроницаемой для лазерного луча. Для этого варианта требуется бо́льшая, чем имеющиеся на стенде фотопушки 30 кэВ, энергия электронов. По-

этому он, вероятнее всего, будет реализован на создающемся стенде фотоинжектора, где энергия электронов будет составлять 100–400 кэВ.

• Размагничивание имеющегося бокса. Наименее перспективный вариант, в связи с тем, что размагничивание придется проводить регулярно.

4.2.6 Поперечный эмиттанс электронного пучка

Эмиттанс — одна из важнейших характеристик пучка частиц, и его измерение является одной из ключевых задач при исследовании фотокатодов. На стенде фотопушки создается система измерения эмиттанса щелевым методом. При измерении эмиттанса этим методом на пути пучка электронов устанавливается маска с тонкими щелями, разделяющая пучок на небольшие «подпучки» — бимлеты. Зная размеры бимлетов и их координаты, ширину щелей маски и расстояние между ними, и расстояние между маской и экраном, можно вычислить поперечный эмиттанс пучка [19].

Аппаратура измерения эмиттанса

В состав системы входит следующее оборудование:

- щелевая маска, представляющая собой вольфрамовую пластину толщиной 1 мм с 9 щелями шириной 50 мкм, расположенными на расстоянии 3 мм друг от друга;
- вакуумный бокс, в котором размещается маска, оснащенный двухпозиционным пневматическим приводом для ввода/вывода маски в/из тракта (бокс и маска изготовлены на заказ в RadiaBeam Technologies);
- различные типы люминофорных экранов (подробнее см. раздел 4.2.5);
- высокочувствительная видеокамера Prosilica GC1380 для визуализации профиля пучка на экране после прохождения щелевой маски;
- компрессор на максимальное давление 7 атм для подачи сжатого воздуха на пневматический привод.

Программное обеспечение для расчета эмиттанса

На данный момент реализовано и протестировано на лазерном пучке оборудование и программное обеспечение для расчета поперечного эмиттанса пучка в вертикальной плоскости. В зависимости от результатов тестирования с электронным пучком планируется либо заменить пневматический привод на трехпозиционный (с двумя масками со взаимно перпендикулярными щелями), либо использовать метод Pepper-pot, при котором вместо щелевой маски используется маска с несколькими рядами отверстий.

Для расчета эмиттанса щелевым методом было создано программное обеспечение EmCa (рис. 4.14). Программа написана в среде MS Visual Studio 2010 на языке C++ и работает с изображениями, сохраненными в видеоклиенте AVINE. Для вычисления эмиттанса используется формула, выведенная в [19].



Рис. 4.14. Программное обеспечение ЕтСа

Алгоритм работы программы следующий:

- 1. Открытие файла с изображением (кнопка Load image...), вывод изображения и его параметров (размеры, физическое и эффективное число бит на пиксель, масштабный коэффициент) на экран. На данный момент поддерживается только формат *.imm (без сжатия) с разрешением 8 бит на пиксель.
- 2. Фильтрация изображения если эта опция включена, все пиксели, имеющие значение от 0 до 15, становятся черными (получают значение 0).
- 3. Выбор бимлетов. Бимлеты выбираются вручную путем нажатия кнопки Mouse select, соответствующей каждому из бимлетов, и выбора рамкой. Тестирование программы проводилось на изображении лазерного пучка, разделенного на три бимлета, в связи с чем число бимлетов пока фиксировано (и, соответственно, равно трем).

4. Собственно, вычисление эмиттанса, осуществляемое при нажатии на кнопку Calc.

Планируется следующее развитие программы:

- работа с произвольным количеством бимлетов,
- отображение изображения пучка в фазовом пространстве,
- работа с разрешением до 16 бит на пиксель и с форматом *.imc (используется сжатие с помощью библиотеки zlib),
- автоматическое выделение бимлетов,
- реализация вычисления общего поперечного эмиттанса (в двух плоскостях) — после аппаратной реализации

4.2.7 Диагностика лазерного пучка

Качество пучка лазерного драйвера фотоинжектора непосредственно связано с качеством пучка фотоэлектронов, поэтому диагностика лазерного пучка также имеет большое значение. Здесь речь идет только о видеодиагностике, прочая диагностика лазерного пучка описана в разделе 4.3. Профиль лазерного пучка может наблюдаться в двух местах: за станцией измерения эмиттанса и в позиции катода (т.н. виртуальный катод [80]).

За станцией измерения эмиттанса

Описание расположения оборудования в этом варианте дано в разделе 4.2.5. Изображение пучка на рис. 4.10 сделано именно при таком варианте размещения оборудования (использовался фосфорный люминофор). Этот вариант использовался при тестировании ПО EmCa.

Виртуальный катод

Виртуальный катод представляет собой такое расположение диагностического оборудования, при котором профиль пучка на люминофорном экране соответствует профилю пучка на катоде. Достигается это расположением экрана таким образом, что расстояние между лазером и экраном равно расстоянию между лазером и катодом (рис. 4.15). Расположение реального оборудования и изображение профиля пучка представлены на рис. 4.16.



Рис. 4.15. Схема виртуального катода



Рис. 4.16. Оборудование виртуального катода. Цифрами обозначены: 1 — лазер LS-2134, 2 — зеркало, 3 — фосфорный люминофор, 4 — видеокамера, 5 — изображение пучка лазера на виртуальном катоде

Были проведены измерения стабильности координаты пучка и его среднеквадратичного размера. Значения измерялись ежеминутно в течение 30 минут. Результаты измерений представлены на рис. 4.17 и 4.18. Как видно, пучок имеет тенденцию к горизонтальному сдвигу. Для определения причин этого планируется провести более продолжительные исследования.



Рис. 4.17. Изменение координаты пучка лазера на виртуальном катоде во времени



Рис. 4.18. Изменение RMS размера пучка лазера на виртуальном катоде во времени

4.2.8 Тестирование системы на Линак-200

Как упоминалось в начале главы, описываемые диагностические системы принципиально не привязаны к конкретной установке и могут использоваться на других. Так, разработанная для стенда фотопушки система видеодиагностики на основе камеры Prosilica GC1380 и ПО AVINE была успешно протестирована на Линак-200.

После ускоряющей секции A0BB (энергия электронов в пучке 22 МэВ) был размещен диагностический бокс с люминесцентным экраном и видеокамерой (рис. 4.19). Сервер и клиент AVINE были установлены на промышленный компьютер iROBO, расположенный в пультовой. Получено изображение пучка на экране (рис. 4.20 и 4.21). Разрешение по горизонтали составило 25, а по вертикали — 35 пикселей на миллиметр, что существенно превышает разрешение средств видеодиагностики MEA (1 мм, [81]). Среднеквадратичный размер пучка составил 3,2 мм × 2,9 мм (расчет видеоклиентом AVINE).



Рис. 4.19. Бокс с люминесцентным экраном на Линак-200



Рис. 4.20. Пучок Линак-200 в оттенках серого



Рис. 4.21. Пучок Линак-200 в ложном цвете

4.3 Прочая диагностика на стендах

4.3.1 Измерение энергии лазерного излучения

Измерение энергии импульсов лазерного излучения на стенде фотопушки сначала осуществлялось с помощью калориметрического твердотельного измерителя ИКТ-1М [82], обладающего следующими техническими характеристиками:

- пределы измерения 0,05-150 Дж (с аттенюатором до 1000 Дж);
- диапазон длин волн 0,4-4 мкм;
- минимальная длительность импульса 10 нс;
- основная погрешность прибора 10%;
- Время между двумя последовательными измерениями 8 мин.

Принцип работы прибора заключается в поглощении приемным элементом энергии лазерного излучения и измерения возникающего при этом разбаланса мостовой схемы.

В данный момент энергия лазерных импульсов измеряется с помощью измерителя мощности/энергии Ophir Nova II с пироэлектрическим датчиком PE25.

4.3.2 Измерение температуры термокатода

На стенде фотопушки проводились исследования зависимости температуры термокатода Линак-200 (измеряемой с точностью $\pm 20\%$ с помощью оптического пирометра ОППИР-017 [83]) от напряжения и тока на нем (таблица 4.4), и зависимости тока пучка от напряжения на экстракторе (таблица 4.5).

Также исследовалась зависимость тока пучка с термокатода от напряжения и тока на катоде при облучении его лазерными импульсами с длиной волны 532 нм (т.е., по сути, эмиттирующая способность такого катода в качестве фотокатода). Результаты приведены в таблице 4.6 (длительность и энергия лазерного импульса 10 нс и 120 мкДж, соответственно; вакуум 2×10^{-7} торр, напряжение на аноде 2 кВ, частота повторения импульсов 1 Гц).

Напряжение	Ток	Мощность,	Температура,
накала, В	накала, А	Вт	$^{\circ}\mathrm{C}$
4,5	2,99	13,5	850
5,0	3,19	16,0	910
5,5	3,35	18,4	950
6,0	3,50	21,0	1000
6,5	3,70	24,0	1030
7,0	3,90	27,3	1070
7,5	4,05	30,4	1109
8,0	4,23	33,8	1150
8,4	4,34	36,5	1170
8,8	4,50	39,6	1210

Таблица 4.4 Зависимость температуры катода от напряжения и тока на нем

Таблица 4.5

Зависимость тока пучка от напряжения на экстракторе

Напряжение на экстракторе, кВ	1,0	2,0	3,0	4,0
Ток пучка, мА	50	125	225	350

Таблица 4.6

Зависимость тока катода от его нагрева при облучении лазером

Катод (накал)		Пучок		
Напряжение, В	Ток, А	Имп. ток, А	Ср. ток, мкА	
0,0	0,00	0,05	20	
1,0	1,80	0,10	20	
2,0	2,15	0,12	20	
3,0	2,52	0,20	20	
4,0	2,83	0,50	21	
5,0	3,23	2,00	22	

4.4 Заключение

Создана система видеонаблюдения для ускорителя Линак-200, позволяющая наблюдать поперечный профиль электронного пучка и осуществлять общее видеонаблюдение за залом ускорителя.

Создана другая система видеодиагностики электронного пучка для стенда фотопушки, позволяющая наблюдать поперечный профиль электронного пучка и осуществлять диагностику его параметров. Установлено оборудование измерения эмиттанса пучка с помощью щелевого метода. Разработано и протестировано с лазерным пучком оригинальное программное обеспечение для расчета эмиттанса. Проведены тесты системы на ускорителе Линак-200, получено изображение пучка.

Создана система видеодиагностики лазерного пучка для стенда фотопушки, включающая диагностику поперечного профиля пучка после бокса измерения эмиттанса и на виртуальном катоде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы

- 1. Проведен анализ требований к системе управления линейного ускорителя электронов Линак-200, на основе которого разработана, создана и введена в эксплуатацию система управления ускорителя. Разработаны и созданы следующие основные компоненты системы управления ускорителем Линак-200:
 - (a) система управления электронной пушки, обеспечивающая регулировку тока пучка ускорителя в пределах от 15 мА до величин порядка 100 нА, требуемых при исследовании кристаллических сцинтилляторов, и контроль параметров пушки;
 - (б) концепция системы синхронизации, позволившая запускать две и более ускоряющих станции синхронно с импульсом пушки;
 - (в) система радиационного контроля, предоставляющая информацию о радиационной обстановке в зале ускорителя, модуляторном зале, пультовой и прилегающих помещениях;
 - (г) система блокировок и сигнализаций, обеспечивающая предотвращение доступа персонала в зоны с повышенным уровнем ионизационного излучения и предупреждение персонала о возможной радиационной опасности с помощью звуковых и световых сигнализаторов;
 - (д) система термостабилизации ускоряющих секций ускорителя, обеспечившая необходимые параметры секций (тем самым обеспечивая необходимые параметры пучка), а также позволившая увеличить время непрерывной работы ускорителя с нескольких часов до нескольких суток.
- 2. При определяющем участии автора разработан и создан стенд фотопушки на энергию электронов до 30 кэВ для проведения исследований термо- и фотокатодов. Фотокатодная сборка интегрирована в ускоряющую структуру фотоинжектора на 400 кэВ, что позволило осуществить физический пуск нового стенда — фотоинжектора. Получен пучок электронов с энергией 80 кэВ и зарядом 15 нКл.

3. Разработаны и созданы системы диагностики электронного пучка, позволяющие регистрировать профиль, размеры и распределение интенсивности пучка электронов на ускорителе Линак-200 и стенде фотопушки. На последнем также реализована возможность наблюдения профиля лазерного луча. Установлено оборудование измерения эмиттанса пучка с помощью щелевого метода. Разработано оригинальное программное обеспечение для расчета эмиттанса.

Благодарности

Автор диссертации выражает свою искреннюю благодарность научным руководителям — В.Ф. Минашкину и Г.Д. Ширкову за постоянное участие, внимание и помощь в написании работы на всех ее этапах; руководителям этапов «Фотоинжектор» и «Линак-200» темы «Перспективные разработки систем ускорителей и коллайдеров нового поколения для фундаментальных и прикладных целей» Н.И. Балалыкину, В.В. Кобецу и Э.И. Уразакову за консультации; Г.В. Трубникову, А.А. Фещенко, В.Ю. Щеголеву и Й. Гурану, в плодотворном соавторстве с которыми было выполнено большинство работ, вошедших в диссертацию, а также всем остальным соавторам этих работ. Автор благодарен Научно-инженерной группе УНЦ, В.Д. Коровякову, А.П. Сумбаеву, В.Г. Шабратову и А.В. Шевелкину за разнообразную поддержку проведенной работы, а также О.Ю. Дереновской и Н.С. Рогачевой за консультации по оформлению диссертации. В заключение автор выражает благодарность друзьям и родителям за поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ширков Г. Д. [и др.] Проект «Проектирование, изготовление и испытания прототипов элементов ускорителей и коллайдеров нового поколения для фундаментальных и прикладных целей» / ОИЯИ. Дубна, Россия, 2015.
- Balalykin N. I. [et al.] Researching the Characteristics of Photo- and Thermoemission Cathodes // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2008. — Vol. 5, no. 7. — Pp. 605–608.
- Balalykin N. I. [et al.] Control System of Injector for Linear Electron Accelerator LINAC-800 // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2010. — Vol. 7, no. 7. — Pp. 525–528.
- Balalykin N. I. [et al.] On Radiation Protection at the LINAC-800 Linear Electron Accelerator // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2012. — Vol. 9, no. 4–5. — Pp. 452–455.
- Gacheva E. I. [et al.] Laser Driver for a Photoinjector of an Electron Linear Accelerator // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 2014. — July. — Vol. 50, no. 7. — Pp. 522–529.
- Balalykin N. I. [et al.] Transmission photocathodes based on stainless steel mesh and quartz glass coated with N doped DLC thin films prepared by reactive magnetron sputtering // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 700, no. 1. — P. 012050. — URL: http: //stacks.iop.org/1742-6596/700/i=1/a=012050.
- Balalykin N. I. [et al.] JINR LHEP Photoinjector Prototype // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2016. — Vol. 13, no. 7. — Pp. 897–900.
- Балалыкин Н. И. [и др.] Электронная пушка с прозрачным фотокатодом для фотоинжектора Объединённого института ядерных исследований // Успехи физических наук. — 2017. — Т. 187, № 10. — С. 1134—1141.
- Nozdrin M. A. [et al.] Hollow Photocathode Concept for e-Gun // Proceedings of the XXII Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC2010, Protvino, Russia, Sept. 27–Oct. 1, 2010) / ed. by M. Kuzin, V. R. Schaa. — 2010. — Pp. 59–61.

- Ноздрин М. А. [и др.] Система радиационного контроля линейного ускорителя электронов ЛИНАК-800 // Труды XV-ой научной конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ (ОМУС2011, Дубна, Россия, 14—19 февр. 2011) / под ред. А. В. Филиппов. — 2011. — С. 131—134.
- Nozdrin M. A. [et al.] Hollow Photocathode Prototype for e-Gun // Proceedings of the 10th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators (DIPAC2011, Hamburg, Germany, May 16–18, 2011) / ed. by M. Marx [et al.]. 2011. Pp. 242–244.
- Nozdrin M. A. [et al.] Development of the new control systems for JINR e-Linac Accelerator Test Bench // Proceedings of the XXIII Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, Sept. 24– 28, 2012) / ed. by M. Kuzin, V. R. Schaa. — 2012. — Pp. 626–628.
- Huran J. [et al.] Photocathode based on deuterated diamond like carbon films prepared by reactive magnetron sputtering and PECVD technology // Proceedings of the Ninth International Conference on Advanced Semiconductor Devices & Microsystems (ASDAM2012, Smolenice, Slovakia, Nov. 11–15, 2012). — 2012. — Pp. 263–266.
- Nozdrin M. A. [et al.] Progress of the JINR e-Linac Accelerator Testbench Control Systems // Proceedings of the 9th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls (PCaPAC2012, Kolkata, India, Dec. 4–7, 2012) / ed. by V. R. Schaa [et al.]. — 2012. — Pp. 203–205.
- Balalykin N. [et al.] JINR Powerful Laser Driver Applied for FEL Photoinjector // Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC2014, Dresden, Germany, June 15–20, 2014) / ed. by C. Petit-Jean-Genaz [et al.]. — 2014. — Pp. 2906–2908.
- Balalykin N. I. [et al.] Detailed investigation of the DLC films in the transmissive photocathode DC gun application // Emission Electronics (ICEE), 2014 2nd International Conference on (ICEE2014, Saint-Petersburg, Russia, June 30–July 4, 2014). 2014. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ Emission.2014.6893973.
- Nozdrin M. A. [et al.] Diagnostics at JINR LHEP Photogun Bench // Proceedings of the 11th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls (PCaPAC2016, Campinas, Brazil, Oct. 25–28, 2016) / ed. by P. Renan, V. R. Schaa, L. M. Volpe. 2016. Pp. 117–119.
- Ноздрин М. А. [и др.] Диагностика на стенде фотопушки ЛФВЭ ОИЯИ // Сообщения ОИЯИ: Р9-2016-6. — 2016.
- Zhang M. Emittance Formula for Slits and Pepper-pot Measurement. Oct. 1996. — FERMILAB-TM-1988.
- Johnson A. N. [et al.] Not Dead Yet: Recent Ehnancements and Future Plans for EPICS Version 3 // Proceedings of the 14th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2013, San Francisco, CA, USA, Oct. 6–11, 2013). — 2013. — Pp. 457–459.
- 21. Johnson A. Introduction to EPICS: Video Lecture. Advanced Photon Source, USA, Sept. 18, 2014. — URL: https://www.youtube.com/ watch?v=7E-QUwXBRYc.
- 22. Andrews A. [et al.] Development of EPICS Accelerator Control System for the IAC 44 MeV Linac // Proceedings of the 14th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2013, San Francisco, CA, USA, Oct. 6–11, 2013). — 2013. — Pp. 385–388.
- Feng L. [et al.] Control System for DC-SRF Photo-Injector at Peking University // Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC2015, Richmond, VA, USA, May 3–8, 2015). 2015. Pp. 962–964.
- Satoh M. [et al.] Control System Upgrade for SuperKEKB Injector Linac // Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC2015, Richmond, VA, USA, May 3–8, 2015). — 2015. — Pp. 930–932.
- 25. Chevtsov P. [et al.] Current Status and Perspectives of the SwissFEL Injector Test Facility Control System // Proceedings of the 14th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control

Systems (ICALEPCS2013, San Francisco, CA, USA, Oct. 6–11, 2013). — 2013. — Pp. 378–380.

- Korhonen T. [et al.] EPICS Version 4 Progress Report // Proceedings of the 14th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2013, San Francisco, CA, USA, Oct. 6–11, 2013). — 2013. — Pp. 956–959.
- 27. *Götz A.* [et al.] The TANGO Control System // ICFA Beam Dynamics Newsletter. — 2008. — Dec. — No. 47. — Pp. 66–80.
- Götz A. [et al.] TANGO Can ZMQ replace CORBA? // Proceedings of the 14th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2013, San Francisco, CA, USA, Oct. 6–11, 2013). — 2013. — Pp. 964–968.
- Götz A. [et al.] TANGO V8 Another Turbo Charged Major Release // Proceedings of the 14th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2013, San Francisco, CA, USA, Oct. 6–11, 2013). — 2013. — Pp. 978–981.
- 30. Gorbachev E. V. [et al.] Upgrade of the Nuclotron Injection Control and Diagnostics System // Proceedings of the 14th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2013, San Francisco, CA, USA, Oct. 6–11, 2013). — 2013. — Pp. 1176–1179.
- 31. A Java DOOCS Data Display / DESY. URL: http://jddd.desy.de/.
- 32. Aghababyan A. [et al.] The Large Scale European XFEL Control System: Overview and Status of the Commissioning // Proceedings of the 15th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems (Pre-Press Release) (ICALEPCS2015, Melbourne, Australia, Oct. 17-23, 2015). — 2015. — URL: https://pubdb.xfel.eu/ record/288420.
- Gorbonosov R. The Control Systems of the Large Hadron Collider: Talk at Academic Training Lecture Regular Programme. — CERN, Oct. 1, 2013. — URL: https://indico.cern.ch/event/273998/.

- Aleynikov V., Nikiforov A. QNX Based Software for Particle Accelerator Control System of FLNR // Proceedings of the XX International Symposium Nuclear Electronics & Computing (NEC2005, Varna, Bulgaria, Sept. 12–18, 2005). — 2005. — Pp. 34–39.
- 35. *Большаков О.* Операционная система реального времени QNX: Знакомство. — 21 июля 2011. — URL: http://habrahabr.ru/post/124656/.
- 36. Manufacturer: QNX SOFTWARE: Pricelist / SWD GmbH. URL: http://swd.de/oxid/out/media/Preisliste_QNX_en.pdf.
- 37. Clendenin J. [et al.] Compendium of Scientific Linacs : CERN/PS 96-32 (DI). European Organization for Nuclear Research, 1996.
- Hart R. G. The MEA Control System: Version 1.4 / Computer Systems Group. — May 1992.
- Kobets V. V. [et al.] Physical starting of the first and second section of accelerator LINAK-800 // Proceedings of the 27th International Linear Accelerator Conference (LINAC14, Geneva, Switzerland, Aug. 31–Sept. 5, 2014) / ed. by C. Carli [et al.]. — 2014. — Pp. 288–290.
- 40. Kroes F. B. [et al.] Improvement of the 400 kV Linac electron source of AmPS // Proceedings of the Third European Particle Accelerator Conference (EPAC92, Berlin, Germany, Mar. 24–28, 1992). 1992. Pp. 1032–1034.
- Hollander H. J. [e.a.] Hotdeck: De aansturing van MEA. Injektor besturingselektronika: tech. rap. / NIKHEF. — Amsterdam, Netherlands, 1992.
- 42. Insulating core Transformer (ICT Power Supply): CRH, cs 3/25/75 / High Voltage Engineering Corporation. Massachusetts, USA, 1975.
- 43. Dobbe N., Sluijk T., Es J. T. van The ICT 400kV stabilizer : Internal Technical Note: tech. rap. / NIKHEF. Amsterdam, Netherlands, 1992.
- 44. *Dobbe N., Sluijk T.* High voltage pickup plate: tech. rap. / NIKHEF. Amsterdam, Netherlands, 1989. Nr. 20069186.
- 45. *Самофалов К. Г.* [и др.] Прикладная теория цифровых автоматов. К. : Вища школа, 1987. 375 с.
- 46. Технический проект ОИЯИ «ДЭЛСИ Фаза 1: Линак-800 и лазеры на свободных электронах». 2005.

- 47. Heine E. The MEA Modulator. Nov. 12, 1998.
- Балалыкин Н. И. [и др.] Система управления электронной пушкой ускорителя ЛИНАК-800 // Тезисы XX международного семинара по ускорителям заряженных частиц (Алушта, Крым, 9—15 сент. 2007). — 2007. — С. 80—81.
- Т12-2. Блок программируемой задержки и длительности (таймер): Техническое описание и инструкция по эксплуатации / ОИЯИ ЛВЭ НЭОН. — 2007.
- 50. *Бельковец В. А.* [и др.] Система термостабилизации ЛУЭ с программируемым контроллером // Сообщения ОИЯИ: Р9-97-143. — 1997.
- Noomen J. G., Geuzebroek N., Schiebaan C. A Modular Cooling System for the MEA High Duty Factor Electron Linac // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1981. — June. — Vol. NS-28, no. 3. — Pp. 3082– 3084.
- 52. Блок детектирования сцинтилляционный БДС-Г-1М-63х63: ДЦ-КИ.418223.056 : Паспорт / Научно-Производственный Центр «Аспект».
- 53. Устройство детектирования нейтронного излучения УДБН-01-01: ДЦ-КИ.418252.005ПС : Паспорт / Научно-Производственный Центр «Аспект».
- 54. Блок питания и коммутации БПК-02: ДЦКИ.436111.002ПС : Паспорт / Научно-Производственный Центр «Аспект».
- 55. Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1121А, ДКС-АТ1123, ДКС-АТ1123А: Руководство по эксплуатации / Научно-производственное унитарное предприятие «ATOMTEX».
- 56. Modbus Application Protocol Specification v1.1b3 / Modbus Organization. URL: http://modbus.org/specs.php.
- 57. Kobets V. V. [et al.] Physical starting of the first section of accelerator LINAK-800 // Proceedings of the XX Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC2006, Novosibirsk, Russia, Sept. 10–14, 2006). — 2006. — Pp. 156–158.

- 58. Sannibale F., Filippetto D., Papadopoulos C. F. Schemes and challenges for electron injectors operating in high repetition rate X-ray FELs // Journal of Modern Optics. 2011. Vol. 58, no. 16. Pp. 1419–1437. DOI: 10.1080/09500340.2011.601328. eprint: http://dx.doi.org/10.1080/09500340.2011.601328. URL: http://dx.doi.org/10.1080/09500340.2011.601328.
- 59. Ворончев Т. А., Соболев В. Д. Физические основы электровакуумной техники. М. : Высшая школа, 1967. 352 с.
- 60. Huran J. [et al.] Transmission photocathodes based on quarz glass coated with N or P-doped SiC thin films prepared by HWCVD technology // Advances in Electrical and Electronic Engineering. — 2016. — URL: http://advances.utc.sk/index.php/AEEE. — To be published.
- 61. Huran J. [et al.] GaAs Mesh Type Transmission Photocathode Prepared by Inductively Coupled Plasma CCl₂F₂ Etching of GaAs Substrate // Proceedings of the 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. — 2013. — Pp. 233–236.
- Quadrupole Mass Spectrometer QMG 111: Operating Instruction No. BG 800 001 BE / BALZERS AG. — Dec. 1974.
- Закиров Ф. Г., Николаев Е. А. Откачник-вакуумщик. М. : Высшая школа, 1977. — 253 с.
- 64. *Тальрозе В. Л.* Масс-спектрометр // Физическая энциклопедия / под ред. А. М. Прохоров. М. : Советская энциклопедия, 1988.
- 65. Лазер LS-2134: Руководство по эксплуатации : ЛОТ 3.970.005 РЭ / LOTIS TII.
- 66. Harmonic Assembly YHG-34: User's Manual / LOTIS TII.
- 67. Лазер LS-2151: Формуляр : ЛОТ 3.970.038 ФО / LOTIS TII.
- 68. Лазер LS-2132 UTF: Формуляр : ЛОТ 41.700 ФО / LOTIS TII. Минск, Беларусь.
- 69. IP Камера 9000A Plus: Руководство пользователя / Aviosys International Inc. URL: http://www.aviosys.ru/doc_9000a/manual9000Ar.html.
- 70. Miniature Camera (SK-2005, SK-2005X SERIES): Installation / Instruction Manual / Sunkwang. — URL: http://www.cameras-cctv.com/ 2005-man.pdf.

- 71. Описание плагина Guard / Beholder International Ltd. URL: http: //beholder.ru/support/Guard/.
- 72. Surf 16 Ch: User Manual / Aviosys International Inc. URL: http://www.aviosys.ru/download/manual/surf16ch_man.pdf.
- 73. IP Video 9100(A): User Guide : V2.38 / Aviosys International Inc. Nov. 2006. — URL: http://www.aviosys.ru/doc_9000a/ manual9000Ar.html.
- 74. GC1380 / GC1380C: Technical Manual : 700018A / Allied Vision Technologies Canada Inc. Sunnyvale, California, Aug. 26, 2010.
- 75. Vimba 1.4 The SDK for Allied Vision cameras / Allied Vision Technologies GmbH. — URL: https://www.alliedvision.com/en/products/ software.html.
- AVT Vimba: User Guide for Windows : V1.2 / Allied Vision Technologies GmbH. — Stadtroda, Germany, Aug. 28, 2013.
- 77. Weisse S., Melkumyan D., Duval P. Advanced Video and Imaging Network Environment (AVINE): Overview / DESY. Jan. 17, 2013. URL: http://adweb.desy.de/mcs/tine/VideoSystem/vsOverview.shtml.
- Weisse S., Melkumyan D., Duval P. Status, Recent Developments and Perspective of TINE-powered Video System, Release 3 // Proceedings of the 13th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2011, Grenoble, France, Oct. 10–14, 2011) / ed. by M. Robichon [et al.]. — 2011. — Pp. 405–408.
- 79. Weisse S., Melkumyan D., Duval P. AVINE Video Client 3: Quick Reference : Service Release 1 (SR1) / DESY. Oct. 2013. URL: http://adweb.desy.de/mcs/tine/VideoSystem/vsOverview.shtml.
- Bähr J. [et al.] Upgrade of the Laser Beam-Line at PITZ // Proceedings of the 27th International Free Electron Laser Conference (FEL2005, Palo Alto, California, USA, Aug. 21–26, 2005) / ed. by H.-D. Nuhn, R. Reitmeyer. — 2005. — Pp. 110–113.
- Luijckx G. [et al.] The Amsterdam Pulse Stretcher Project (AmPS) // Proceedings of the 1989 IEEE Particle Accelerator Conference (1989 PAC, Chicago, USA, Mar. 20–23, 1989). — 1989. — Pp. 46–48.

- 82. Измеритель калориметрический твердотельный ИКТ-1М: Паспорт : К 951.00.00 ПС / Волгоградский опытный завод «Эталон». 1978.
- Оптический пирометр ОППИР-017: Описание и правила пользования. Хмельницкое областное управление по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 1975.