

На правах рукописи

ФАТЬКИН Георгий Александрович

СТРУКТУРА И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ УСКОРИТЕЛЕМ
РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

01.04.20 – физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

БАТРАКОВ – кандидат технических наук,
Александр Матвеевич Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ДОЛГОВЕСОВ – кандидат технических наук,
Борис Степанович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, заведующий лабораторией.

КУКСАНОВ – доктор технических наук,
Николай Константинович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, заведующий лабораторией.

ВЕДУЩАЯ – Московский радиотехнический институт
ОРГАНИЗАЦИЯ Российской академии наук, г. Москва.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2012 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В связи с ратификацией договора о запрете на проведение ядерных испытаний, в последние годы активно развивается импульсная рентгенография (flash radiography), которая позволяет изучать поведение моделей ядерных боеприпасов при проведении неядерных гидродинамических испытаний. Одним из наиболее перспективных способов получения интенсивных точечных источников рентгеновского излучения, необходимых для этих работ, является применение линейных индукционных ускорителей (ЛИУ). С их помощью создаётся интенсивный (порядка нескольких килоампер) пучок электронов, который, попадая на мишень-конвертер, формирует рентгеновский пучок. В мире действует несколько рентгенографических комплексов на базе ЛИУ, применяемых для импульсной рентгенографии.

В ИЯФ СО РАН проектируется комплекс для импульсной рентгенографии на основе ЛИУ с энергией электронного пучка 20 МэВ. Прототипом высококачественного инжектора этого комплекса является ускоритель ЛИУ-2, который представляет собой мощную импульсную установку, генерирующую на конвертер пучок электронов с энергией 2 МэВ. Специфика проводимых экспериментов и сложность подготовки объекта исследования требует высокой надёжности работы, поэтому без соответствующей системы управления функционирование установки не представляется возможным.

Актуальность настоящей работы состоит ещё и в том, что проведённые исследования и полученный опыт позволят с полным пониманием проектировать систему управления гораздо более сложного ускорителя ЛИУ 20.

Цель диссертационной работы

Цели диссертационной работы заключались в следующем:

- определение функциональных требований для системы управления инжектором ЛИУ-2;
- разработка структуры системы управления;

- подбор и разработка необходимой аппаратуры;
- испытание и наладка системы управления в ходе пуско-наладочных работ инжектора ЛИУ-2;
- выработка подходов к построению системы управления ускорительным комплексом на 20 МЭВ.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в работы, составляющие основу диссертации, является определяющим. Диссертант отвечал за наладку и тестирование системы управления ЛИУ в ИЯФ, а впоследствии – за запуск и опытную эксплуатацию в РФЯЦ-ВНИИТФ. Им разработан регистратор ADC812-МЕ, также он принимал участие в наладке и доработке модулей ADC200-МЕ, DL200-МЕ, Ф-16. Автор активно участвовал в выработке структурных решений системы управления, в частности он доработал логику срабатывания блокировок и схему раздачи синхроимпульсов, сформировал состав аппаратуры в контроллере секции и центральном контроллере. Диссертант участвовал в разработке конструкции емкостного делителя, им предложены алгоритмы коррекции сигналов в системе осциллографического мониторинга и критерии определения надёжности работы установки.

Научная новизна работы

С учётом особенностей физической структуры предложена схема системы управления линейным индукционным ускорителем, основанная на распределении интеллектуальных узлов управления по длине установки и встраивании этих узлов непосредственно в мощные оконечные устройства.

Разработан состав контроллера модуляторной секции – функционально завершённого узла, реализующего необходимые операции по сбору данных и управлению структурной единицей ЛИУ – секцией модуляторов.

Экспериментально исследована возможность встраивания слаботочных интеллектуальных управляющих и измерительных устройств непосредственно в высоковольтные импульсные генераторы питания индукторов. Опробованы и найдены технические и конструктивные решения, обеспечивающие высокий уровень надёжности и живучести встроенной электроники.

Предложены критерии определения сбоев элементов ускорителя на основе анализа ансамбля сигналов, характеризующих их работу.

Разработан широкополосный, высоковольтный емкостной делитель повышенной точности, и предложен алгоритм, минимизирующий искажения, привносимые длинной несогласованной линией, передающей сигнал с делителя.

Научная и практическая ценность

В процессе опытной эксплуатации подтверждена правильность выбранной структуры системы управления и технических решений, обеспечивших высокую надёжность и живучесть разработанной аппаратуры. Опыт, полученный в ходе работы над системой управления ЛИУ-2, используется при проектировании системы управления ЛИУ-20М.

Разработан ряд модулей в формате PMC CompactPCI:

- двухканальный регистратор формы импульсных сигналов ADC200- ME с разрядностью 12 бит и частотой преобразования 200 МГц;
- восьмиканальный регистратор формы импульсных сигналов ADC812-ME с разрядностью 12 бит и частотой преобразования 4 МГц;
- шестнадцатиканальная программируемая линия задержки DL200-ME с дискретностью 5 нс и аппаратной логикой блокировок;
- шестнадцатиканальный формирователь/размножитель синхросигналов Ф-16.

В ходе опытной эксплуатации проверены технические решения в разработанных модулях и проведены доработки, направленные на улучшение стабильности работы в условиях наводок от импульсных высоковольтных устройств.

Созданная аппаратура нашла применение в других работах, в частности в системе автоматизации стенов измерения импульсных магнитов бустерного синхротрона комплекса NSLS-II для Брукхэйвенской национальной лаборатории (США), в исследованиях по физике плазмы на установке ГОЛ-3 в ИЯФ СО РАН, при модернизации клистронных станций на инжекционном комплексе ВЭПП-5 в ИЯФ.

Основные положения, выносимые на защиту

Структура системы контроля и управления индукционным ускорителем, основанная на распределении узлов управления по длине установки и встраивании этих узлов в мощные оконечные устройства.

Состав контроллера модуляторной секции – функционально завершённого узла, реализующего необходимые операции по сбору данных и управлению структурной единицей ЛИУ – секцией модуляторов.

Способ цифровой коррекции искажений сигнала с широкополосного высоковольтного емкостного делителя.

Критерии определения стабильности работы элементов ускорителя на основе анализа ансамбля сигналов, характеризующих работу отдельных его элементов.

Проект системы управления ЛИУ-20, выполненный с учётом опыта разработки и эксплуатации ЛИУ-2.

Апробация работ

Достоверность и правильность результатов диссертации подтверждается успешной работой системы управления ускорительного комплекса ЛИУ-2 и успешным проведением первых гидродинамических экспериментов.

Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях IPAC 2011, ICALEPCS 2011, IASTED «Автоматизация, контроль и информационные технологии» 2010 г., конференции «Забабахинские чтения».

Структура работы

Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Она изложена на 116 страницах, содержит 64 рисунка и 5 таблиц. Список литературы включает в себя 45 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан краткий обзор существующих в мире рентгенографических комплексов на основе ЛИУ, обсуждается актуальность диссертационной работы, формулируются её цели и приводятся положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается ускоритель-инжектор ЛИУ-2 и его основные подсистемы: электронно-оптическая, высоковольтного питания и диагностики электронного пучка. Приводится конструкция разработанного широкополосного высоковольтного емкостного делителя повышенной точности. Формулируются функциональные требования к системе управления, и предлагается её разбиение на подсистемы.

Ускоритель ЛИУ-2 позволяет генерировать пучок электронов с энергией до 2 МэВ, током до 2 кА, и длительностью 300 нс. Предусмотрен двухимпульсный режим с интервалом между импульсами 4 – 20 мкс, для получения двух последовательных рентгенограмм в ходе опыта. Размер электронного пучка на мишени менее 1,5 мм.

В связи со сложностью подготовки и высокой стоимостью проводимых экспериментов, принципиальное значение придается надёжности работы ускорителя. Требуется обеспечить надёжную и строго согласованную работу всех подсистем ускорителя. Большое число различных, в том числе и высоковольтных устройств, делает немалой вероятность сбоев, поэтому импульс на старт гидродинамического эксперимента подаётся только в случае корректной работы всех элементов ускорителя.

Рабочий цикл установки можно разделить на три последовательных фазы: подготовительную, медленную и быструю. Первая фаза – подготовительная, во время неё необходимо нагреть катод, проверить вакуум, подготовить зарядные устройства. Эта фаза может длиться от 10 секунд (между выстрелами) до одного часа (в случае первого включения установки). Вторая фаза – медленная, во время неё заряжаются формирующие линии модуляторов, отключается накал катода, включается магнитное поле в корректорах. Она длится около 60 мс. И последняя, быстрая фаза, начинается с размагничивания индукторов и заканчивается генерацией пучка (или двух пучков, разнесённых по времени). Её длительность составляет около 10 – 20 мкс. Во время быстрой фазы может быть подан импульс на старт опыта (ГСО).

Электронно-оптическая система инжектора ЛИУ-2 состоит из двух частей. Первая представляет собой диодную пушку со сферическим катодом, к которому приложено напряжение 1 МВ. Ко второй части, ускорительной трубке, также приложено напряжение 1 МВ. Ускоряющее напряжение на электродах секционированных

изоляторов формируется с помощью 96 индукторов. Конструктивно индукторы сгруппированы по 4 штуки в одном индукторном модуле.

Индуктор представляет собой сердечник с объемным витком, который можно считать образующим первичную обмотку импульсного трансформатора, вторичную обмотку которого образует электронный пучок. При движении в индукционном ускорителе заряженные частицы пучка приобретают энергию, соответствующую сумме напряжений на индукторах, таким образом, достаточно точно измерив эти напряжения, можно вычислить энергию пучка. Для полного использования материала сердечника, перед подачей импульса на первичную обмотку, ферромагнитный сердечник переводится импульсом размагничивания в область отрицательного насыщения.

После прохождения ускоряющей структуры, пучок электронов попадает на мишень – диск с танталовыми пластинами толщиной 0,5 мм. На мишени происходит конверсия электронного пучка в рентгеновский.

Напряжение на индукторах создаётся системой высоковольтного питания, включающей 48 модуляторов, питание которых осуществляется от двух независимых зарядных устройств. Задачей каждого модулятора является формирование двух последовательных импульсов ускоряющего напряжения амплитудой до 21 кВ и импульса тока размагничивания. Модуляторы установлены в восемь однотипных стоек, расположенных вдоль электронно-оптической системы ускорителя. Модулятор состоит из формирующей линии, тиратрона, блока размагничивания и управляющего устройства (УБС). Параметры тиратрона деградируют со временем, поэтому необходимо отслеживать его поведение, для чего с помощью трансформаторов тока измеряется импульсный выходной ток модулятора в каждом выстреле. Один модулятор используется для питания двух индукторов.

Качество электронного пучка является основным фактором, влияющим на качество рентгенографического изображения. Для предоставления максимальной информации о качестве электронного пучка и работе установки создана комплексная система диагностики, состоящая из емкостных делителей напряжения на индукторах, делителя напряжения на вакуумном диоде, трансформаторов тока пучка, полоскового датчика тока пучка и цилиндра Фарадея.

Емкостные делители напряжения должны обеспечить измерение напряжения, а соответственно и распределение энергии по длине пучка с точностью 2%. При разработке делителя было необходимо обеспечить конструктивную совместимость с высоковольтным вводом индуктора.

Сформулируем задачи, стоящие перед системой управления ускорительным комплексом ЛИУ-2:

- подготовка элементов установки к работе;
- своевременное генерирование импульсов запуска, инициирующих работу импульсных устройств как в быстрой, так и в медленной фазах работы;
- регистрация сигналов, характеризующих работу ускорителя и отдельных его элементов;
- запрет опыта в случае нештатной работы.

Исходя из описанного выше, представляется разумным разделить систему управления на три подсистемы:

- подсистему синхронизации и блокировок, которая будет раздавать синхроимпульсы модуляторам и другим устройствам, а также запрещать генерацию импульса ГСО в случае нештатной работы установки;
- подсистему регистрации осциллограмм тока и напряжения на индукторах, зарядного напряжения и тока размагничивания в модуляторах, сигналов с цилиндра Фарадея, датчика положения пучка, зарядных устройств, устройств питания линз и корректоров;
- подсистему управления подготовительными операциями устройствами. В её задачи будет входить установка режимов, а также контроль работы установки в подготовительной фазе.

Во второй главе приводится обзор немногочисленной литературы по теме, которую удалось найти. Далее рассматривается структура системы управления ЛИУ-2 включающая подсистему синхронизации и блокировок, подсистему регистрации осциллограмм и подсистему управления модуляторами и технологическими устройствами.

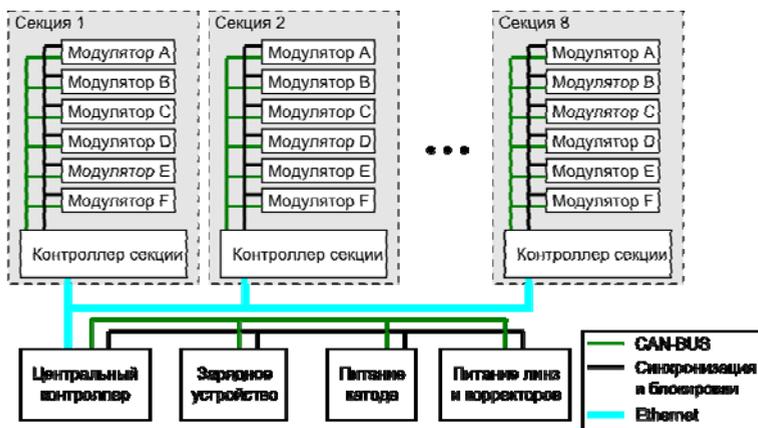


Рис. 1. Структура системы управления.

Система управления обеспечивает 288 каналов синхронизации, более 100 «быстрых» осциллографических каналов и столько же «медленных». Разумным решением в таком случае видится разделение системы на функционально законченные узлы, которые распределяются вдоль установки в непосредственной близости от оконечных устройств. Структура системы управления представлена на рис. 1. Восемь периферийных узлов (контроллеры секций) встраиваются непосредственно в модуляторные стойки и соединяются между собой посредством сети Ethernet. Центральный узел (центральный контроллер) расположен в отдельной стойке и обеспечивает работу всех контроллеров секций, а также ряда дополнительных устройств и связь с ЭВМ оператора.

На рис. 2 представлена схема подсистемы синхронизации и блокировок, которая обеспечивает своевременное срабатывание всех устройств в медленной и быстрой фазах работы ускорителя, а также запрет импульса на старт опыта (ГСО) в случае отказов в системе. Так как все каналы синхронизации можно разделить на «медленные» (требующие подстройки с шагом не хуже 100 нс) и «быстрые» (требующие подстройки с шагом 5 нс), то подсистема синхронизации и блокировок была сделана двухуровневой. Сигналы синхронизации представляют собой импульсы тока с амплитудой 200 мА, длительностью 1 мкс и фронтом 10 нс, которые передаются по 50-Ом коаксиальному кабелю. Общий старт установки привязан к фазе электросети.

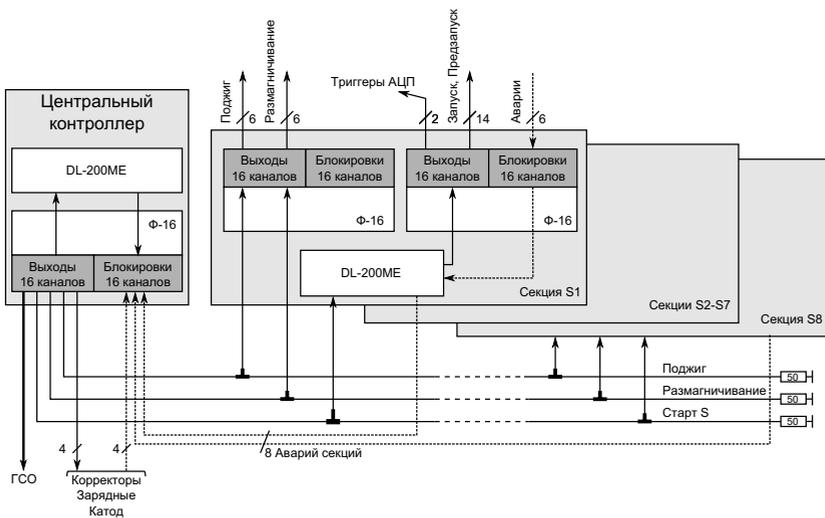


Рис. 2. Подсистема синхронизации и блокировок.

Сигналы «Авария» собираются со всех устройств в DL200-МЕ секции по схеме ИЛИ. Затем по схеме «открытого коллектора» передаются на DL200-МЕ центрального контроллера. На центральный контроллер поступают и сигналы «Авария» с других устройств (зарядных, подогревателя катода, и т.д.). При наличии сигнала «Авария» хотя бы с одной секции, выдача импульса ГСО запрещается.

Подсистема регистрации осциллограмм подразделяет все сигналы на два класса, каждый из которых измеряется со своим периодом дискретизации: быстрые (5 нс) и медленные (250 нс). К быстрым относятся токи модуляторов и напряжения на индукторах, сигналы с систем диагностики пучка. К медленным относятся токи размагничивания, напряжения на формирующих линиях, напряжения на зарядных устройствах и токи питания линз. Для регистрации быстрых сигналов используется 12-разрядный 200 MSPS преобразователь ADC200-МЕ, для медленных – 12 разрядный 4 MSPS преобразователь ADC812-МЕ.

Затем приводится алгоритм восстановления сигналов с емкостных делителей напряжения на индукторе, который основывается на численном решении дифференциального уравнения, описывающего систему. Приведённый алгоритм позволяет уменьшить искажения на полочке сигнала с 6% до 2%.

В третьей главе рассматриваются аппаратные средства системы управления. Приведены обоснования выбора стандарта магистрально-модульной системы и состав контроллера секции. В этой главе формулируются требования к аппаратным средствам, приводятся характеристики и схемные решения разработанных модулей: DL200-ME, Ф-16, ADC812-ME и ADC200-ME.

Наиболее подходящим выбором представляется базировать аппаратуру на широко распространённом магистрально-модульном стандарте. Оценка количества информации, которую необходимо обработать за выстрел даёт около 700 Кбайт. С учётом времени между выстрелами около 10 с, скорость обработки не оказывает никакого влияния на выбор стандарта. Из современных стандартов автоматизации предпочтение отдано CompactPCI в основном из-за того, что он основан на архитектуре x86. Изготовление аппаратуры в стандарте PMC позволит, при необходимости использовать её и в носителях VME и PXI стандартов. Самостоятельная разработка части аппаратуры привела более чем к десятикратной экономии.

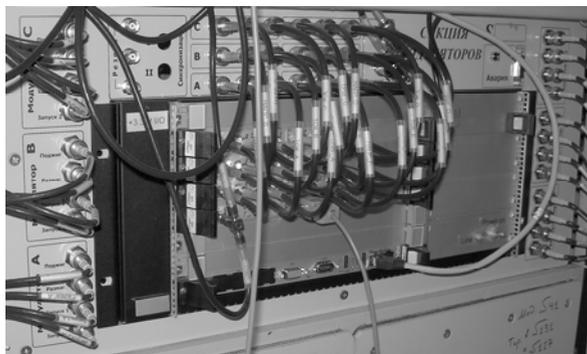


Рис. 3. Фотография контроллера секции.

В состав контроллера секции (изображённого на рис. 3) и центрального контроллера входят процессорный модуль Kontron CP600, CAN-модуль TEWS TPMC810-10, носители CP-690 и разработанные в ИЯФ PMC носители, а также PMC-платы DL200-ME, ADC812-ME и ADC200-ME.

Далее приводится описание цифровой линии задержки DL200-ME и формирователя/размножителя Ф-16. Характеристики DL200-ME приведены в таблице 1. Обсуждаются схемные решения и реализация логики работы устройства.

Таблица 1. Параметры DL200-ME.

Параметр	DL200-ME_F	DL200-ME_S
Каналов	16	16
Дискретность	5 нс	80 нс
Диапазон регулировки	163.8 мкс (15 бит)	671 мс (23 бита)
Джиттер	< 0.5 нс	< 2 нс
Входов блокировок	16	16
Выходов «Аварий»	2	2

Затем описываются модули ADC812-ME и ADC200-ME, которые представляют собой цифровые регистраторы формы импульсных сигналов, их параметры приведены в таблице 2. Приводятся схемотехнические решения и описание логики управления. Также приводится описание разработанного RIO-модуля для ADC812-ME.

Таблица 2. Параметры ADC200-ME и ADC812-ME.

Параметр	ADC200-ME	ADC812-ME
Синхронных каналов	2	8
Разрядность	12	12
Частота дискретизации	200 МГц	4 МГц
Память (слов)	1 М×2	125 К×8
Ошибка нуля	< 1 мл.р.	< 1 мл.р.
Ошибка масштаба	< 2 мл.р.	< 2 мл.р.

В четвёртой главе приводятся основные результаты опытной эксплуатации установки ЛИУ-2 и системы управления. В этой главе описаны способы цифровой обработки полученных осциллограмм, облегчающие работу оператора, а также способы автоматического определения сбоев в работе элементов по ансамблю осциллограмм. На основе полученного опыта формулируются подходы к построению системы управления установкой ЛИУ-20 и приводится её предварительный проект.

В начале главы рассмотрены технические усовершенствования, позволившие достичь стабильной работы аппаратуры в условиях наводок от импульсных высоковольтных элементов. Удачность выбора двухступенчатой системы синхронизации демонстрируется простотой внесения усовершенствований, связанных с временной

нестабильностью запуска ГСО. В настоящий момент ЛИУ-2 успешно применяется для получения рентгенографических снимков в экспериментах, не требующих большой просвечивающей способности.

Затем демонстрируется необходимость сбора статистики по стабильности работы элементов для определения способов повышения надёжности установки. Вывод суммы осциллограмм напряжений по секциям оказался очень удобен для операторов установки. Формулируются критерии автоматического определения отказа модулятора по осциллограммам тока и напряжения на нём.

Рассматривается проект установки ЛИУ-20, в котором количество объектов управления на порядок больше, чем на ЛИУ-2. Это приводит к необходимости формулировать новые подходы к системе управления. В частности, обосновывается использование стандарта VME, с частичной реализацией расширения VXIBus. Для связи контроллеров секций предлагается использовать WLAN. Самостоятельная разработка части аппаратуры также видится разумной, предлагается максимально расширить функционал самотестирования, для облегчения поиска неисправностей.

Далее рассматриваются подсистемы синхронизации и регистрации осциллограмм для ЛИУ-20. Подсистему синхронизации предлагается реализовать на основе современного событийного (Event-based) подхода, а также использовать локальные шины для синхронизации устройств в крейте. Приведены способы аппаратной реализации такого подхода и схема модуля таймера.

Для уменьшения количества каналов в системе регистрации осциллограмм предлагается модуль сумматора-мультиплексора. В окончании главы представлен состав контроллера секции новой системы управления.

В заключении формулируются основные результаты диссертационной работы, состоящие в следующем:

Создана и введена в эксплуатацию система управления линейного индукционного ускорителя, с её помощью в 2011 г. проведены первые рентгенографические эксперименты.

Экспериментально проверена возможность встраивания управляющей электроники непосредственно в стойки высоковольтных импульсных источников питания, что позволило заметно

сократить длины кабельных трасс и повысить надёжность работы подсистем синхронизации и регистрации осциллограмм.

Предложенный способ цифровой коррекции искажений, привносимых длинной несогласованной линией в сигнал с емкостного делителя, позволил повысить точность измерений на полке импульса до 2%.

Накопленный в ходе работ опыт позволил приступить к проектированию системы управления установкой ЛИУ-20.

Сформулированы критерии автоматического определения сбоев на установке, которые позволяют накапливать статистику надёжности работы элементов и обеспечить заранее заданную вероятность срабатывания установки при проведении опыта.

Разработанная аппаратура нашла применение в других работах в Институте, и будет использоваться при модернизации систем управления существующих ускорительных комплексов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. A. Batrakov, G. Fatkin, I. Ilyin, et.al. The Structure and Hardware of Control System for Power Linear Accelerator. // Proc. of the IASTED International Conferences on Automation, Control and Information Technology (ACIT 2010), June 15-18, 2010 Novosibirsk, Russia, p. 164-167.
2. D. Bolkhovityanov, A.A. Eliseev, F.A. Emanov, G.A. Fatkin, et. al. Performance of 2 MeV, 2 kA, 200 ns Linear Induction Accelerator with Ultra Low Beam Emittance for X-Ray Flash Radiography. // Proc. of IPAC 2011, Sep 4-9, 2011 Kursaal, San Sebastian, Spain, p. 1906-1908.
3. G. Fatkin, P.A. Bak, A.M. Batrakov, P.V. Logachev, A. Panov, A.V. Pavlenko, V.Ya. Sazansky. Control System for Linear Induction Accelerator LIA-2: the Structure and Hardware. // Proc. of ICALEPCS 2011, Grenoble, France, p. 502-505.
4. А. Батраков, П. Логачёв, А. Павленко, Г. Фатькин и др. Система автоматизации линейного индукционного ускорителя рентгенографического комплекса. // Вестник НГУ. Серия: Физика, 2010. Том 5. вып. 3, с. 98-105.

5. Бак П.А., Батраков А.М., Кадыров Р.А., Фаткин Г.А. и др. Система управления линейным индукционным ускорителем рентгенографического комплекса: структура, аппаратные средства, результаты опытной эксплуатации. // Автометрия, 2011, т. 47, № 3, с. 120-132.

ФАТЬКИН Георгий Александрович

**Структура и аппаратные средства
системы управления
линейным индукционным ускорителем
рентгенографического комплекса**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сдано в набор 28.09.2012 г.

Подписано в печать 2.10.2012 г.

Формат 60x90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 25

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11