

На правах рукописи

СЕНЬКОВ Дмитрий Валентинович

**РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМОВ
УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2016

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

МЕДВЕДКО – кандидат технических наук
Анатолий Степанович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения РАН

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

СЕРОВ – доктор технических наук
Анатолий Федорович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. Г.И.Кутателадзе Сибирского отделения РАН, г.Новосибирск

КОВАЛЬ – доктор технических наук
Николай Николаевич Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, г.Томск

ВЕДУЩАЯ – Международная межправительственная
ОРГАНИЗАЦИЯ: организация «Объединенный институт ядерных исследований», г. Дубна

Защита диссертации состоится «__» _____ 2016г. в «__» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск 90, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения РАН, г.Новосибирск.

Автореферат разослан «__» _____ 2016г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.В.Бурдаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Источники тока и напряжения с диапазоном максимальных мощностей от 5кВт и до 50кВт используются в электрофизических установках очень широко. Источники тока используются для получения пучков заряженных частиц и для питания магнитных элементов ускорителей и накопителей заряженных частиц. Высоковольтные источники напряжения применяются в электронных и ионных пушках ускорителей заряженных частиц для научных целей, в промышленных ускорителях, источниках рентгеновского излучения. Источники тока и напряжения мощностью десятки киловатт находят широкое применение не только в научной и медицинской аппаратуре, но и в промышленности. Высоковольтные источники используются в установках дефектоскопии и неразрушающего контроля, установках электронно-лучевой сварки. Источники тока с таким диапазоном мощностей используются в установках напыления материалов, сварочном оборудовании.

Первая часть работы посвящена разработке высоковольтных источников анодного напряжения электронных пушек электронно-оптических колонн для аппаратуры электронно-лучевой сварки с энергией луча 60кэВ и мощностью в луче до 30кВт, разрабатываемых в ИЯФ. Основной задачей автора в данной работе была разработка силовых преобразователей высоковольтных источников анодного напряжения электронных пушек.

На основе модулей силовых преобразователей были разработаны еще два отдельных типа источников. Первый тип это 10кВт источник питания высоковольтной колонны для прототипа инжектора ионов проекта NITS. Он представляет собой генератор синусоидального напряжения частотой 400Гц амплитудой до 120В. Вторая разработка – 40кВт источник питания высоковольтной колонны установки электронного охлаждения протонного синхротрона COSY (Юлих, Германия), представляющий собой преобразователь с синусоидальным выходным напряжением частотой 26кГц амплитудой до 1000В.

Вторая часть работы посвящена разработке источников тока для питания квадрупольных магнитов бустера-синхротрона для источника синхротронного излучения (СИ) нового поколения NSLS-II (Аптон, США). Бустер предназначен для ускорения электронного пучка от энергии инжекции 200МэВ до энергии 3ГэВ и для последующего его перепуска в основное кольцо NSLS-II, где пучок используется для получения СИ. Задачей автора была разработка источников тока для питания квадрупольных магнитов бустера. Особенностью питания магнитной системы бустера являлась необходимость управляемого быстрого подъема тока в магнитных элементах в цикле ускорения пучка и потом быстрого спада для подготовки к следующему

циклу ускорения. При этом требуется высокая точность установки и поддержания тока в течение всего цикла ускорения. Для питания всех квадрупольных магнитов бустера был разработан прецизионный трехканальный источник тока с током каждого канала до 180А и выходным напряжением до 170В, позволяющий осуществлять быструю перестройку тока.

Целью работы, положенной в основу диссертации, является разработка серии силовых преобразователей класса мощностей до 50 кВт для специализированных высоковольтных источников напряжения и источников тока, работающих в составе ускорителей и накопителей заряженных частиц.

Личный вклад автора в работы, положенные в основу диссертации, заключался в выборе и расчете схем согласования импедансов высоковольтных трансформаторов и силовых преобразователей, разработке структурной схемы источников, разработке структуры и алгоритмов работы их управляющих контроллеров.

Научная новизна

1. Для силового преобразователя по результатам измерений, расчетов и компьютерного моделирования была предложена схема согласования импедансов преобразователя и высоковольтного трансформатора с выпрямителем, которая обеспечивает ограничение тока преобразователя при замыкании выхода источника и минимизирует переходной процесс в выходном напряжении источника при изменении нагрузки.
2. Для управляющего контроллера высоковольтного источника разработаны схемные решения и программные алгоритмы, которые позволяют получить высокую стабильность выходного напряжения и качество переходного процесса при глубокой модуляции тока. Долговременная относительная нестабильность выходного напряжения составляет менее 0.1%. Амплитуда переходного процесса в выходном напряжении при модуляции тока источника от уровня холостого хода до номинального выходного тока составляет не более 5% при длительности переходного процесса менее 2мс.
3. Структура и алгоритмы контроллера и структура построения преобразователя в целом позволяют получить высокую гибкость и адаптируемость к разнообразным задачам, что было продемонстрировано построением на основе преобразователя источника синусоидального напряжения 400Гц для прототипа инжектора NITS.
4. Для питания высоковольтной колонны установки электронного охлаждения протонного синхротрона COSY рассчитана схема согласования, образующая с реактивными элементами колонны два связанных контура, и разработаны алгоритмы управления, позволяющие

получить гармоник рабочей частоты и минимизировать переходной процесс при глубоком изменении нагрузки колонны. На основе этого разработан 50кВт источник синусоидального напряжения с рабочей частотой 26кГц. Нестабильность амплитуды выходного напряжения преобразователя составляет менее 1% от номинального уровня во всех режимах работы. Содержание высших гармоник в выходном напряжении менее 1%.

5. Для питания квадрупольных магнитов бустера комплекса NSLS-II был разработан трехканальный прецизионный источник тока (180А 170В в каждом канале) с долговременной нестабильностью выходного тока 0.01% и возможностью управляемой перестройки тока за 0.3сек с ошибкой регулировки во время перестройки менее 0.1%.

Практическая значимость работы

1. В процессе опытной эксплуатации разработанной аппаратуры подтверждена правильность выбранной структуры преобразователей и контроллера управления и технических решений, обеспечивших высокую надежность и эксплуатационную гибкость разработанных источников напряжения и тока. Опыт, полученный в ходе работ, использовался для создания высоковольтных источников 110кВ 120мА для экспериментов по физике плазмы проекта ТАЕ4, для создания высоковольтного источника 300кВ 50мА для электронной пушки установки ЛСЭ Сибирского центра СИ, используется также при проектировании системы питания для магнитов установки CR проекта FAIR.
2. Для управления высоковольтными источниками напряжения и источниками тока разработан ряд контроллеров, обеспечивающих высокую стабильность выходного напряжения или тока.
3. Разработана линейка преобразователей с выходной мощностью 10, 15, 30, 50кВт для использования в ускорителях и накопителях заряженных частиц. В ходе опытной эксплуатации проверены технические решения в разработанных источниках и проведены доработки, направленные на улучшение надежности и стабильности выходных параметров источников.
4. С использованием вышеописанных научных (схемотехнических) разработок изготовлено десять высоковольтных (до 60 кВ, до 50кВт) источников, пять из которых функционируют в составе установок электронно-лучевой сварки на промышленных предприятиях России уже более 5 лет. В дополнение к этому создано четыре модификации высоковольтных источников (60кВ 100мА, 50кВ 300мА 50кВ, 120кВ 120мА, 300кВ 50мА), использующихся в ИЯФ на электрофизических установках, и 40кВт источник синусоидального напряжения для питания высоковольтной колонны, разработанной в ИЯФ установки электронного

охлаждения для протонного синхротрона COSY (Юлих, Германия). Установка с 2012 года эксплуатируется в составе комплекса COSY. Прецизионный трехканальный источник тока для квадрупольных магнитов бустера-синхротрона комплекса NSLS-II (США) эксплуатируется в составе комплекса с 2012года.

Автор выносит на защиту следующие положения:

Оригинальная схема согласования силового преобразователя и секционированного высоковольтного трансформатора.

Структура и алгоритмы управления контроллера высоковольтного источника на основе быстродействующего сигнального процессора и матрицы программируемой логики.

Источник синусоидального напряжения частотой 400Гц с выходным напряжением до 120В мощностью 10кВт, построенный на базе полномостовой схемы 20кГц ШИМ-модулятора и синхронного выпрямителя–демодулятора.

Источник питания для высоковольтной колонны 2МВ, представляющий собой стабильный источник синусоидального напряжения частотой 26кГц с амплитудой 700В и выходной мощностью до 40кВт.

Система питания квадрупольных магнитов бустера NSLS-II, представляющая собой прецизионный трехканальный источник с током канала до 180А, выходным напряжением до 170В и скоростью управляемой перестройки выходного тока до 600А/с.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы докладывались на семинаре в Институте ядерной физики и на международных конференциях RUPAC2006, RUPAC2008, EPAC2008, RUPAC2010, IPAC 2010, PAC2011, COOL'11, RUPAC2013, IPAC2013, COOL2013, научно-практическом семинаре «Технология и оборудование для термической обработки материалов высококонцентрированными источниками энергии (лазер, электронный луч)» 2006 г, а также опубликованы в виде 19 статей, из них 3 в реферируемых журналах.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из (22) наименований, изложена на (112) страницах машинописного текста, содержит (62) рисунок и (5) таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность, а также показана практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе показаны варианты построения силовых преобразователей, приведены преимущества использования для преобразователей мощностью до 100кВт схемы с преобразованием частоты с рабочей частотой преобразователя 10-30кГц. Затем приведен обзор вариантов устройства высоковольтных источников. Далее в главе показано устройство установок электронно-лучевой сварки и приведены требования, предъявляемые к высоковольтным источникам, применяемым в этих установках. Также проведен обзор характеристик современных западных высоковольтных источников для установок электронно-лучевой сварки.

Во второй главе приведены параметры, требуемые от высоковольтного источника для использования его в составе аппаратуры электронно-лучевой сварки (Таблица 1) и сформулированы требования к преобразователю частоты высоковольтного источника:

- современная элементная база,
- частота выходного напряжения – 15-30кГц,
- амплитуда выходного напряжения преобразователя – 500В,
- выходная мощность от 10 до 60кВт.

Далее приведена структура разработанного высоковольтного источника (Рисунок 1). Показано, что удобно использовать модульное построение силового преобразователя, оформив его в виде трех блоков:

- модуля входного выпрямителя,
- модуля частоты преобразователя,
- модуля согласования и фильтрации.

Показаны требования к согласованию преобразователя и высоковольтного трансформатора. Первое требование – решение проблемы раскачки колебаний на частоте собственного резонанса вторичных обмоток высоковольтного трансформатора, которая связана с наличием в выходном

напряжении мостового преобразователя частоты высокочастотных компонент (Рисунок 2). Показано подавление основных механизмов накачки энергии в данный паразитный резонансный контур, связанных с наличием в подаваемом на высоковольтный трансформатор напряжении высших гармоник рабочей частоты и коммутационных выбросов.

Таблица 1 Требования к высоковольтному источнику

Номинальная мощность	15кВт/30кВт
Ускоряющее напряжение ($U_{\text{уск}}$)	60кВ
Нестабильность $U_{\text{уск}}$ за 8 часов при постоянной нагрузке (при $U_{\text{уск}}=60\text{кВ}$)	Не более $\pm 0.1\%$
Пульсации $U_{\text{уск}}$ (среднеквадр)	Не более 0.2%
Длительность переходного процесса при изменении выходного тока от 10% до 100% от номинального	Не более 5мс
Амплитуда переходного процесса при изменении выходного тока от 10% до 100% от номинального	Не более 5%
Диапазон рабочих температур	$0 \div 40^\circ\text{C}$
Энергия, выделяемая при пробое в нагрузку	Не более 20Дж
Время восстановления выходного напряжения после пробоя	Регулируемое от 5мс до 5с
КПД	Лучше 90%
Охлаждение преобразователя	Водяное
Охлаждение высоковольтного выпрямителя	Трансформаторным маслом
Напряжение питания	380В 50Гц 3фазное

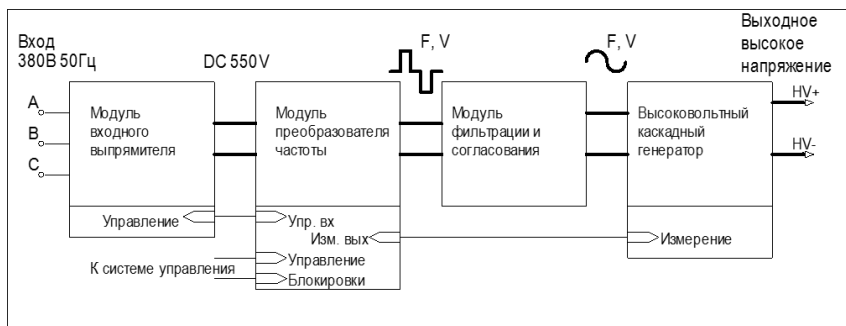


Рисунок 1. Блок – схема модульного высоковольтного источника.

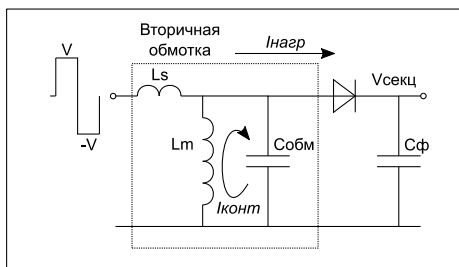


Рисунок 2. Резонансный контур вторичной обмотки высоковольтного трансформатора.

Второе требование к блоку согласования – он должен обеспечивать компенсацию конструктивной емкости и индуктивности рассеяния высоковольтного трансформатора и конструктивную защиту при высоковольтном пробое. Приведен анализ и результаты компьютерного моделирования в программе NL5 силовой схемы (Рисунок 3), выбраны добавочные реактивные элементы с тем, чтобы:

- входной ток схемы при коротком замыкании на выходе (эквивалентное $R_n=0.2\text{Ом}$) не превышал максимального пикового тока ключей, а по возможности был бы в диапазоне рабочих токов,
- реактивные токи, циркулирующие через ключи (т.е. входной реактивный ток при моделировании данной схемы), были как минимум меньше номинального рабочего тока.

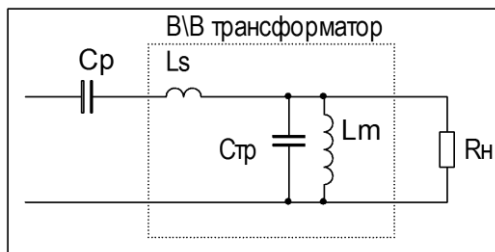


Рисунок 3. Эквивалентная схема для блока согласования и высоковольтного трансформатора.

На рисунке 4 показаны итоговые частотные характеристики схемы согласования при разных нагрузках. Из графиков видно, что на рабочей частоте схема в диапазоне от холостого хода до номинальной нагрузки имеет низкое эквивалентное сопротивление. При этом в ситуации пробоя на выходе эквивалентное сопротивление схемы увеличивается.

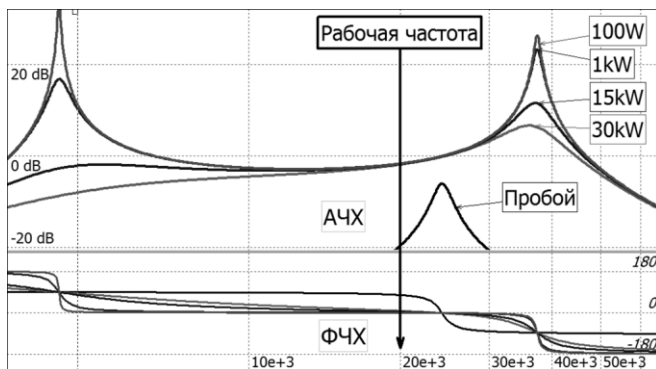


Рисунок 4. Частотные характеристики системы, состоящей из схемы согласования и высоковольтного трансформатора.

Дополнительно было проведено компьютерное моделирование (временной анализ) силовой схемы источника с учетом выходного выпрямителя (Рисунок 5). Исследована реакция на изменение нагрузки и пробой на выходе источника.

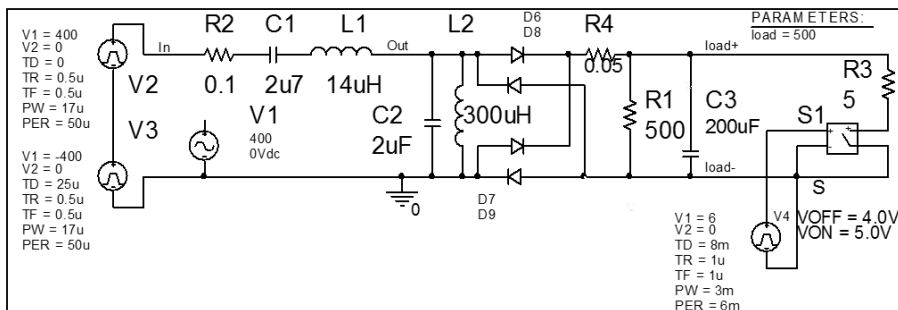


Рисунок 5. Схема модели для исследования переходного процесса при изменении нагрузки и при пробое на выходе.

Далее приведены результаты испытаний преобразователя.

В третьей главе описывается устройство разработанного автором контроллера для управления высоковольтным источником, созданного на основе сигнального процессора и программируемой логической матрицы. Перечислены требования, предъявляемые к контроллеру. Описана структура контроллера (Рисунок 6) и его управляющего алгоритма (Рисунок 7). Далее описываются вопросы построения регулятора: анализируется силовая схема источника, предлагается эквивалентная модель силовой части, которая позволяет рассматривать поведение источника в статических режимах, и

сохраняет актуальность при рассмотрении поведения модели во времени при увеличении тока нагрузки, описывается структура регулятора, состоящего из основного контура в виде пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора и двух дополнительных (Рисунок 7). С помощью моделирования в программе NL5 анализируются частотные характеристики основного контура, выбираются параметры регулятора, которые позволяют уменьшить нестабильность выходного напряжения до уровня менее 0.1% во всем диапазоне рабочих нагрузок. Рассмотрен дополнительный контур регулирования выходного напряжения по уровню выходного тока, который позволяет минимизировать переходной процесс в выходном напряжении при модуляции выходного тока источника. Проводится временное моделирование поведения источника с данным контуром, показывается возможность уменьшения амплитуды переходного процесса до уровня менее 1% от выходного напряжения и сокращенная времени переходного процесса до 1мс, показаны результаты испытаний высоковольтного источника управляемого данным контроллером.

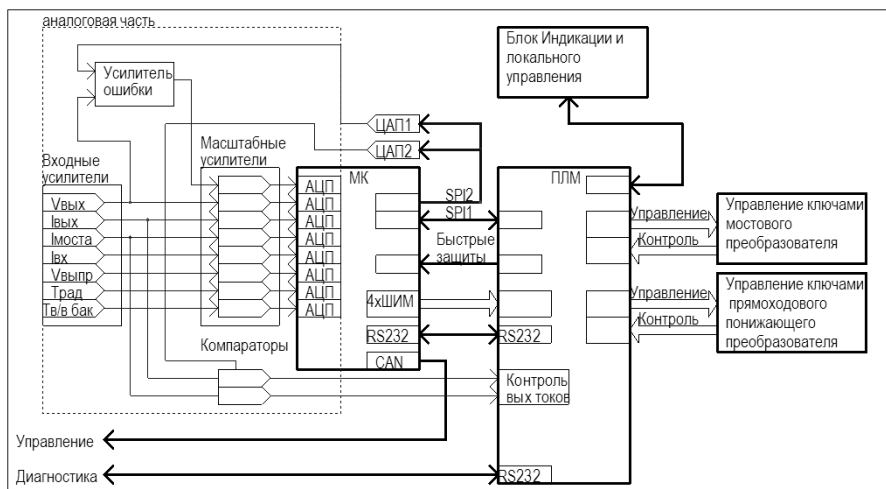


Рисунок 6. Блок – схема контроллера.

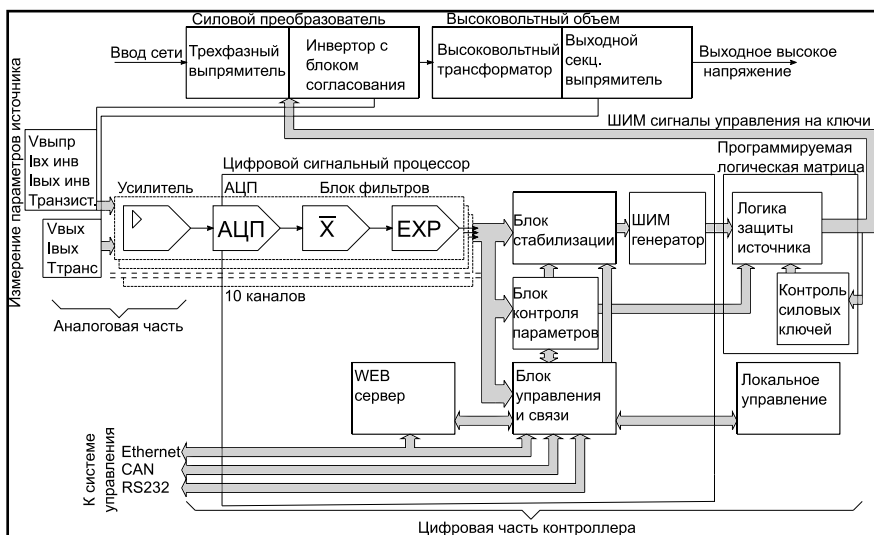


Рисунок 7. Блок – схема управляющего алгоритма контроллера.

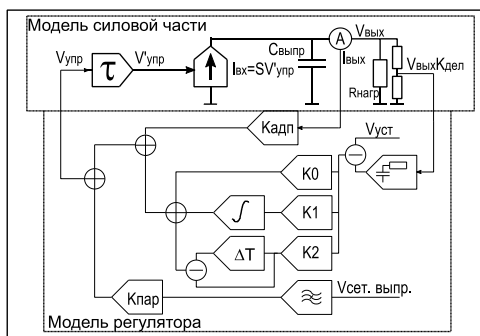


Рисунок 8. Модель системы управления.

В четвертой главе описывается источник питания высоковольтной колонны прототипа инжектора НТС, который представляет собой источник синусоидального напряжения 100В 400Гц. Дано описание структуры источника, состоящего из преобразователя частоты с рабочей частотой 25кГц, понижающего трансформатора и синхронного выпрямителя с выходным фильтром. Для получения мощности на требуемой выходной частоте применена модуляция ШИМ синусоидальным напряжением частоты 400 Гц и последующее синхронное детектирование. Силовой преобразователь с максимальной мощностью 10кВт выполнен на базе модулей сетевого

выпрямителя и инвертора частоты, описанных в главе 2. Синхронный выпрямитель разработан специально для этого источника. Для управления используется контроллер, описанный в главе 3. Описываются модификации управляющего алгоритма контроллера, выполненные для адаптации его к управлению описываемым источником. Далее отдельно рассмотрен алгоритм управления ключами синхронного выпрямителя, обеспечивающий мягкую коммутацию тока, и показаны меры по уменьшению коммутационных выбросов от ключей мостового инвертора. В конце главы приведены результаты испытаний источника в составе 1.5МВ высоковольтной колонны прототипа инжектора HTS.

В пятой главе описана система питания 2МВ высоковольтной колонны установки электронного охлаждения, созданной в ИЯФ для протонного синхротрона COSY (Юлих, Германия). Описывается общая структура установки электронного охлаждения и структура ее высоковольтной части, состоящей из источника питания высоковольтной колонны, высоковольтной секционированной ускорительной колонны и высоковольтного терминала. Показаны требования, предъявляемые к источнику питания высоковольтной колонны, которые позволяют обеспечить ее стабильную и надежную работу. Источник должен представлять собой 40кВт источник стабилизированного напряжения частотой 26.5кГц. Максимальное выходное напряжение источника 700В (эффективное значение). Он должен иметь синусоидальную форму выходного напряжения с малыми искажениями формы и амплитуды при изменении нагрузки. Далее приводится структура источника. Он построен на базе модулей силового преобразователя, описанного в главе 2 и контроллера, описанного в главе 3. Силовая схема источника состоит из модуля сетевого выпрямителя, сдвоенного понижающего преобразователя, используемого в качестве силового регулятора выходного напряжения, модуля преобразователя частоты, генерирующего напряжение стабильной частоты 26.5кГц и модуля согласования и фильтрации, обеспечивающего уровень высших гармоник в выходном напряжении менее 1% и согласование импедансов источника и высоковольтной колонны. Приводятся результаты анализа и компьютерного моделирования схемы модуля согласования и результаты компьютерного моделирования реакции источника на изменение нагрузки и замыкание на выходе. В конце главы показаны результаты испытаний источника в составе высоковольтной колонны в ИЯФ и на установке COSY в Германии.

В шестой главе описывается система питания квадрупольных магнитов бустера источника синхротронного излучения NSLS-II (Брукхевенская лаборатория, Аптон, США). Бустер был разработан и изготовлен в ИЯФ и поставлен в брукхевенскую лабораторию «под ключ». Дано общее описание бустера, описана магнитная система. Приводятся особенности работы бустера,

закрывающиеся в быстром (за 0.3 секунды) подъеме энергии инжектированного в него из линака пучка электронов с энергии 200МэВ до энергии 3ГэВ для перепуска в основное кольцо-накопитель комплекса. Такой режим требует быстрой управляемой перестройки тока в магнитах бустера. Приведены параметры магнитной системы бустера (Таблица 2) и отдельно параметры для питания квадрупольных магнитов.

Таблица 2. Магнитные элементы бустера NSLS-II

Тип магнита	Дипольные линзы		Квадрупольные линзы			Секступольные линзы		Дипольные корректоры	
	BF	BD	QF	QD	QG	SXV	SXH	CX	CY
Количество	28	32	8	8	8	8	8	20	16
Поле в магните при энергии 200МэВ, мТ	30	75	34	24	21	3	3	8	5
Поле в магните при энергии 3ГэВ, мТ	460	1127	531	375	334	46	46	130	80
Ток (200МэВ), А	56	49	11	8	7	0,36	0,36	0,32	0,32
Ток (3ГэВ), А	862	742	167	118	105	5,6	5,6	5	5
R, мОм	3,7	18,9	37	37	37	1000	1000	1700	1700
L, мГн	1,18	9,69	13	13	13	86	86	250	180

Описана выбранная структура трехканального источника тока для питания квадрупольных магнитов, состоящего из накопительной емкости 0.3Ф, заряжаемой от сети до напряжения 180В источником с максимальной мощностью 20кВт и трех запитанных от нее источников тока (180А 170В каждый канал). Показано, что применение накопительной емкости позволяет решить проблемы рекуперации энергии из магнитов на участке спада тока и уменьшить пиковое потребление энергии от сети при подъеме тока. Затем приводится описание устройства управляющих контроллеров зарядного источника и источников тока. Далее описаны полученные на испытаниях в ИЯФ и запуске на комплексе NSLS-II результаты.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. D.V.Senkov, I.A.Gusev, A.S.Medvedko et.al. High-voltage source with output voltage up to 60 kV with power up to 15 kW // Proc of the RUPAC2006, Novosibirsk, p.301-303
2. P.V.Logachev, A.S.Medvedko, D.V.Senkov et. al. 60 keV 30 kW Electron Beam Facility for Electron Beam Technology. // Proc. of the EPAC 2008, June 23-27, 2008, Genoa, Italy, p. 1887-1889
3. D.V.Senkov, I.A.Gusev, A.S.Medvedko et.al. High-voltage source with output voltage up to 60kV and output current up to 500mA // Proc. of the RuPAC 2008, Sep 28-Oct 3, 2008, Zvenigorod, Russia, p. 168-170
4. I.A.Gusev, A.S.Medvedko, D.V.Senkov et. al. High-Voltage Source with Output Voltage up to 110 kV with Output Current up to 100 mA // Proc. of the RUPAC2012, Sep 24-28, 2012, Saint-Petersburg, Russia, p. 506-508
5. Сеньков Д.В. Управляющий контроллер высоковольтного источника энергоблока установки электронно-лучевой сварки. / Д.В. Сеньков, А.С. Медведко // Автометрия — 2015. — №6. — С. 117–124.
6. Senkov D.V. Master controller of a high-voltage power unit source of an electron beam welding device. / D.V. Senkov, A.S. Медведко // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing — 2015. — №6. — p. 632–637.
7. R.A.Salimov et. al. Ion Injector Based on Tandem Accelerator // Proc. of the IPAC 2010, May 23-28, 2010, Kyoto, Japan, p. 717-719
8. P.I. Nemytov, Yu.I. Golubenko, D.V. Senkov et. al. Power Source for High Voltage Column of Injector to Proton Synchrotron with Output Power up to 5kW// Proc of RUPAC 2010, Protvino, p. 360-362
9. Сеньков Д.В. Источник постоянного тока с обратимым синхронным выпрямителем на выходе на базе цифрового сигнального процессора / Д.В. Сеньков, Д.Н. Пурескин, А.С. Медведко // Вестник НГУ. Серия: Физика — 2015. — № 2. — С. 10–17.
10. V.G.Cherepov, P.I.Nemytov, D.V.Senkov et. al. Status of HITS injector // Proc of RUPAC 2010, Protvino, p. 376-378
11. V.V.Parkhomchuk et. al. The first commission results of the high voltage Magnetized cooler for COSY // Proc. of the COOL'11, Sep 12-16, 2011, Alushta, Ukraine, p. 37-42
12. V.V.Parkhomchuk, D.N.Skorobogatov, D.V.Senkov et. al. The power supply system for the accelerating column of the 2 MeV electron cooler for COSY // Proc. of the RUPAC2012, Sep 24-28, 2012, Saint-Petersburg, Russia, p. 512-514
13. V.B.Reva, V.V.Parkhomchuk, A.S.Medvedko et. al. Commissioning COSY Cooler with Electron Beam at Novosibirsk // Proc. of the COOL2013, June 10-14, 2013, Murren, Switzerland, p. 79-83

14. V.Kamerdzhev, J.Dietrich, V.V.Parkhomchuk et. al. COSY 2 MeV Cooler: Design, Diagnostic and Commissioning // Proc. of the IPAC2014, June 15-20, 2014, Dresden, Germany, p. 777-779
15. T.Shaftan, F.Willeke, S.Gurov et. al. Status of NSLS-II Booster // Proc. of the PAC2011, March 28-April 1, 2011, New-York, USA, p. 1864-1866
16. I.A.Gusev, A.S.Medvedko, D.V.Senkov et. al. 3-Channel Current Source with Channel Output Current up to 180 A and Output Voltage up to 180 V // Proc. of the RUPAC2012, Sep 24-28, 2012, Saint-Petersburg, Russia, p. 509-511
17. Gurov S.M. Status of NSLS-II Booster // S.M. Gurov et. al. / Problems of atomic state and technologies — 2012. — №4. — P. 3–6.
18. D.V.Senkov, A.I.Erokhin, A.S.Medvedko et. al. Power System for Quadrupole Magnets of NSLS-II 3 GeV Booster // Proc. of the IPAC2013, May 12-17, 2013, Shanghai, China, p. 723-725
19. V Kiselev et. al. The NSLS-II booster development and commissioning // Proc. of the IPAC2014, June 15-20, 2014, Dresden, Germany, p. 293-295