

На правах рукописи

ЕВТУШЕНКО Юрий Анатольевич

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ
ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ УСКОРИТЕЛЕЙ
И НАКОПИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

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 – 2007

Работа выполнена в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Медведко Анатолий Степанович – кандидат технических наук,
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера,
СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Вейс Михаил Эрикович – кандидат технических наук,
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера,
СО РАН, г. Новосибирск.

Харитонов Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор,
Новосибирский государственный
технический университет, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Объединенный институт ядерных
исследований, г. Дубна.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2007 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.01
Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ
им. Г.И.Будкера СО РАН.

Автореферат разослан: «_____» _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. Наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) в течение многих лет ведутся исследования в области физики высоких энергий со встречными электрон-позитронными пучками.

Опыт построения экспериментальных физических установок в ИЯФ им. Г.И. Будкера и в других ведущих научных центрах показывает, что только специально спроектированные системы позволяют достичь необходимого качества работы элементов физических установок. Промышленных устройств, обладающих необходимыми характеристиками, зачастую просто не существует. Системы питания экспериментальных физических установок интегрированы в сложные комплексы нестандартного электротехнического оборудования и электроники, поэтому их целесообразно составлять из устройств, специально построенных по единым правилам, обеспечивающим совместимость оборудования с системами управления, электромагнитную совместимость источников питания с измерительными и физическими устройствами. Таким образом, разработка специализированных источников питания для элементов ускорителей заряженных частиц является весьма актуальной задачей.

Цель диссертационной работы

- 1) Описание разработки источников питания;
- 2) Описание особенностей построения отдельных узлов и элементов источников питания;
- 3) Рекомендации разработчикам силовой электроники по построению источников питания.

Научная новизна диссертационной работы

1. Разработана серия источников питания для регистрирующей аппаратуры детектора «Кедр», особенностью которых является построение двухканального источника питания на базе одного мостового выпрямителя с отдельным управлением анодной и катодной группами вентилях. Это позволило обеспечить надежным питанием регистрирующую аппаратуру детектора, чувствительную к броскам напряжения питания. Описан алгоритм расчёта выходных пульсаций выпрямителя с асимметричным управлением.
2. Для вигглеров разработана серия источников питания килоамперного диапазона тока с трапецеидальной формой тока. Их отличительной

- особенностью является использование принципа рекуперации энергии, запасенной в магнитном поле вигглеров, в емкостную батарею и обратно для форсированного переключения полярности тока. Этот прием позволил применить относительно маломощные источники питания с инвертором на выходе. Описаны трудности разработки устройств коммутации больших токов при низких напряжениях, рассмотрены пути преодоления таких трудностей.
3. Разработана серия источников анодного питания ВЧ-генераторов с быстродействующей защитой от короткого замыкания на выходе и мощностью до 2.8 МВт. Схема и конструкция быстродействующей параллельной защиты ламп оказались весьма удачными по сравнению со схемой последовательной защиты, применявшейся ранее. Позднее схема параллельной защиты была также применена в источниках анодного питания на комплексе ВЭПП-2000. Такую же защиту планируется применить в источнике анодного питания ВЧ-системы Технологического Накопительного Комплекса (г. Зеленоград).
 4. Разработан высоковольтный источник питания электронного охладителя с выходным напряжением до 300 кВ. Отличительной особенностью его является высокая стабильность в различных режимах работы и при различной величине сопротивления нагрузки. В источнике применён секционированный выпрямитель с емкостной связью между секциями и входным генератором переменного напряжения.

Практическая ценность диссертационной работы и внедрение результатов

1. В 1992 г. успешно запущена в работу серия двухканальных (5.2 В, 1200 А и 2 В, 300 А) источников питания для регистрирующей аппаратуры детектора «Кедр». Это позволило обеспечить надежным питанием дорогую и чувствительную к броскам напряжения питания регистрирующую аппаратуру детектора. За время 15-летней эксплуатации детектора «Кедр» не было ни одного выхода из строя регистрирующей аппаратуры вследствие превышения напряжения питания.
2. В 1994г. разработан и изготовлен источник трапецеидального тока (до 1200 А) для питания вигглера. Источник находится в работе в Брукхэйвенской Национальной лаборатории (США).
3. В 1996г. разработан и изготовлен источник трапецеидального тока вигглера килоамперного диапазона. Источник находится в работе в Аргоннской Национальной Лаборатории (США).
4. В 1999г. разработан, поставлен и находится в эксплуатации в Аргоннской Национальной Лаборатории источник трапецеидального тока ондулятора килоамперного диапазона с входным транзисторным преобразователем, работающим на частоте 2.4 кГц. Разработанные с

- участием автора системы «источник-вигглер» позволили иметь поляризованное синхротронное излучение с переключаемым направлением поляризации. Эксперименты с применением вигглеров и их систем питания ведутся в вышеупомянутых научных центрах до сих пор.
5. В 2001г. закончена разработка и запуск в эксплуатацию источника анодного питания с выходной мощностью до 2.8 МВт для ВЧ-генераторов, являющихся составной частью Лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Это позволило вести на ЛСЭ эксперименты (биологические и химические) с наблюдением в субмиллиметровом диапазоне длин волн.
 6. В 2004г. закончена разработка и поставлен в Институт Современной Физики (г. Ланчжоу, Китай) высоковольтный источник питания 300 кВ, 5 мА для установки электронного охлаждения. В будущем планируется начать эксперименты по охлаждению протонных и ионных пучков для научных и прикладных целей.

Основные результаты работы, выносимые на защиту:

Разработана серия специализированных источников питания для элементов ускорителей и накопителей заряженных частиц. Разработанные с участием автора и описанные в настоящей диссертации источники питания работают в составе различных ускорительных комплексов, как в России, так и за рубежом. Проведённые автором разработки внесли решающий вклад в получение многочисленных научных результатов на этих комплексах. Описанные автором оригинальные системотехнические и схемотехнические решения востребованы сейчас и будут востребованы далее при проектировании новых устройств и систем электропитания.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на научном предзащитном семинаре в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН и на следующих конференциях: XIII Российской конференции по использованию синхротронного излучения, Новосибирск, 2000г.; 2-й Азиатской конференции по ускорителям заряженных частиц, сентябрь 2001, Пекин, Китай (APAC'2001); XVII Международном семинаре по ускорителям заряженных частиц, 17-23 сентября 2001г., Алушта, Крым.; XVIII Российской конференции по ускорителям заряженных частиц, 1-4 октября 2002г., Обнинск, Россия (RUPAC'2002); Европейской конференции по ускорителям заряженных частиц, 3-7 июня 2002г., Париж, Франция (EPAC'2002); Конференции по ускорителям заряженных частиц, Ванкувер, Канада, 12-16 мая 1997г. и многих других.

Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 14 печатных работах, перечисленных в списке литературы.

Структура диссертации и ее объем

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, и списка литературы (20 наименований). Материал диссертации изложен на 148 страницах, содержит 64 рисунка и 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, сформулирована цель работы, дано ее краткое описание, обоснована необходимость разработки отдельных типов источников питания непосредственно в ИЯФ.

В первой главе рассматриваются особенности двухканального (5.2 В, 1200 А и 2 В, 300 А) источника питания регистрирующей аппаратуры детектора «КЕДР». Рассмотрены различные варианты систем питания большого количества микроэлектронной аппаратуры, произведено их сравнение и выбор типа питающего преобразователя. Источник питания имеет следующие особенности:

1. Построение двух каналов питания на базе одного тиристорного выпрямителя с раздельным управлением анодной и катодной группами вентилей (Рис.1).
2. Применение параметрического параллельного стабилизатора в виде цепочки из последовательно включенных диодов. Ток стабилизации диодов – примерно 60 – 80 А.

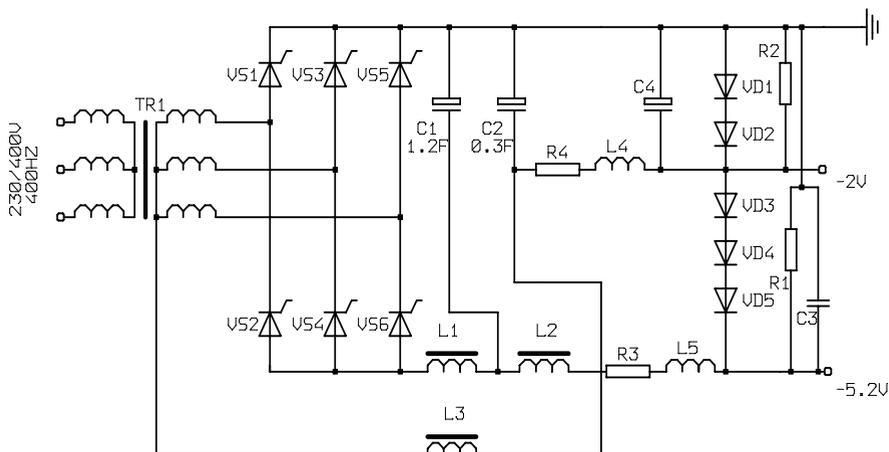


Рис. 1. Принципиальная схема источника питания регистрирующей аппаратуры.

Описан алгоритм расчёта сглаживающего фильтра в условиях раздельного управления анодной и катодной группами тиристоров. Рассмотрены особенности проектирования силового понижающего трансформатора, работающего на повышенной частоте 400Гц, и сглаживающего фильтра.

Во второй главе описан источник питания вигглера с трапецидальной формой выходного тока. Частота изменения полярности тока до 100 Гц; максимальный ток источника – 1200 А, максимальное напряжение – 10 В, фронт переключения тока не более 1.5 мсек. Рассмотрены различные варианты схемотехнических решений, позволяющих форсированно переключать полярность тока на активно-индуктивной нагрузке с большой (около 30мсек) постоянной времени. Выбран вариант, при котором на выходе источника постоянного тока типа В-1000 с LC-фильтром расположен тиристорный инвертор (VT7-VT10), а параллельно вигглеру подключена конденсаторная батарея C3, в которую рекуперируется энергия вигглера (около 80 Дж при максимальном токе) на этапе изменения полярности тока. Для выключения тиристоров инвертора применён последовательный узел искусственной коммутации, состоящий из генератора коммутирующих импульсов G1 и коммутирующего трансформатора с обмотками W1 и W2 (см. Рис.2).

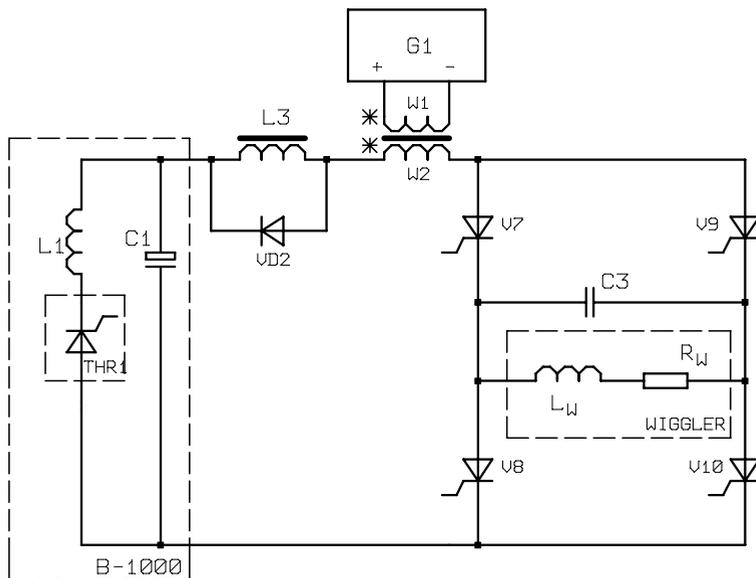


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема источника питания вигглера.

Кроме того, в данной главе рассмотрена коммутация тиристоров на больших токах и малых напряжениях, отражены особенности такой коммутации, описаны процессы, протекающие в тиристорах. Таким образом, в 1994г. впервые была создана система «вигглер – источник питания», работающая на переменном токе повышенной частоты с трапецеидальной формой тока вигглера.

В третьей главе описывается источник питания эллиптического Вигглера-2 (ЭВ2). Постоянная времени ЭВ2 существенно выше, чем ЭВ1 – около 90 мсек. Максимальный выходной ток источника – 1200 А, максимальное выходное напряжение до 18В, фронт переключения тока не более 5 мсек. Отличием данного источника от описанного в первой главе является активное демпфирование фильтра входного источника питания на этапе коммутации тока в вигглере. Достигается это подключением к выходу LC-фильтра двух вспомогательных транзисторов VT1 и VT2 с резисторами R1-R3, суммарное сопротивление которых, примерно, равно активному сопротивлению ондулятора (Рис.3).

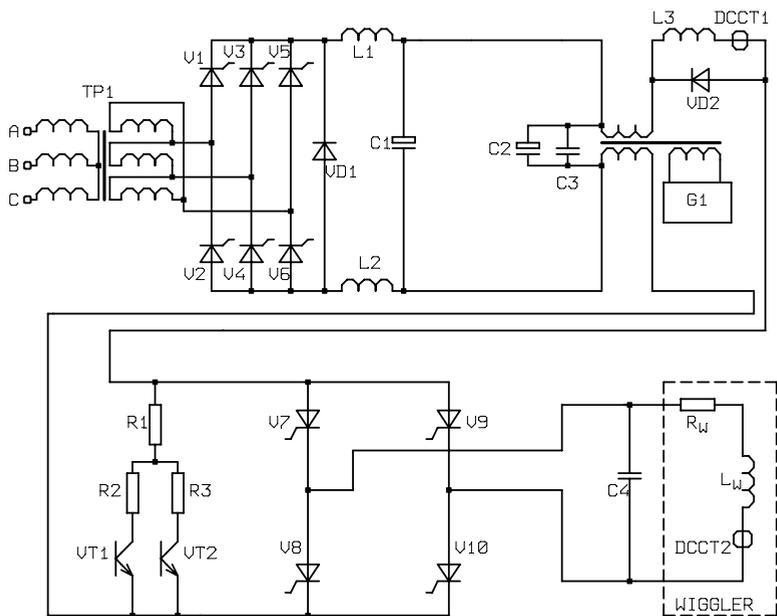


Рис. 3. Принципиальная схема силовой части эллиптического вигглера 2.

В четвертой главе описаны источники питания спирального ондулятора. Спиральный ондулятор представляет собой модернизированный вариант эллиптического вигглера. Отличие данного ондулятора состоит в том, что он имеет обмотки для создания знакопеременного магнитного поля в двух взаимно ортогональных плоскостях. Первый из рассмотренных

источников питания (для горизонтальной обмотки) имеет выходные параметры 24 В, 1600 А; второй (для вертикальной обмотки) – 10 В, 400 А. Максимальная частота переключения – 10 Гц, длительность фронтов переключения тока – не более 12 мсек. Структурная схема этих источников повторяет структуру источников питания предыдущей разработки (см. главы 2 и 3). Однако существуют и отличия. Оба рассмотренных в этой главе источника имеют следующие особенности:

1. Применение преобразователя, работающего на повышенной частоте, в качестве входного источника питания постоянного тока. Это решение позволило увеличить точность стабилизации, практически полностью исключило паразитную раскачку фильтра входного источника питания при коммутации выходного тока, уменьшило габариты,.

2. Применение на выходе источника транзисторного инвертора вместо тиристорного. В качестве силовых транзисторов были использованы параллельно соединённые IGBT-модули с малым падением напряжения (около 1.2 В при токе 400 А) в статическом режиме.

3. Рекуперация энергии ондулятора в ёмкость фильтра через обратные диоды транзисторов выходного инвертора. Это позволило вместо громоздких бумажных конденсаторов применить электролитические, с пониженными потерями на пульсирующем токе.

На Рис.4 представлена функциональная схема силовой части источника питания горизонтальной обмотки ондулятора.

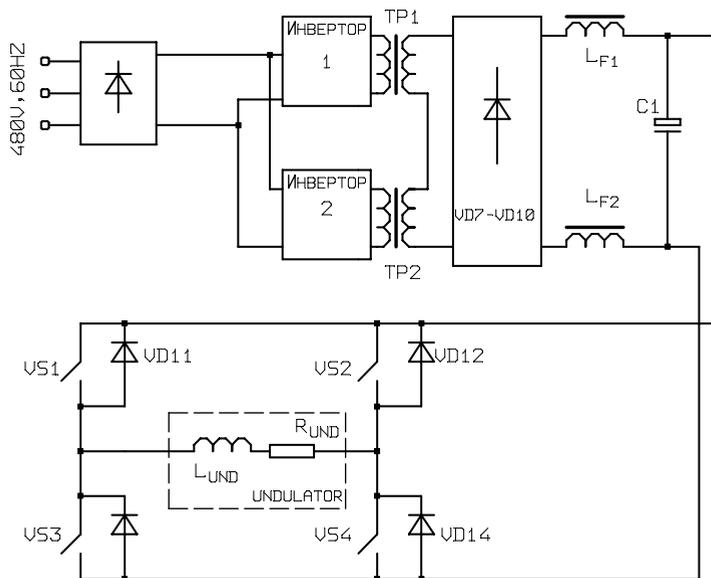


Рис. 4. Упрощенная функциональная схема источника питания горизонтальной обмотки ондулятора.

Описанный комплекс источников с июня 1999г. находится в работе на комплексе APS в Аргоннской Национальной Лаборатории (США). Источник питания горизонтальной обмотки, описанный в главе 4, имеет самую большую мощность и самые малые габариты по сравнению с предыдущими. Таким образом, все схемотехнические решения оказались правильными и целесообразными.

В пятой главе описаны два источника анодного питания ВЧ-генераторов лазера на свободных электронах. Оба источника имеют сходную структуру. Отличительной особенностью обоих источников является наличие быстрой защиты, позволяющей отключать источник от нагрузки в случае пробоя на выходе в течение нескольких микросекунд. Наиболее подробно рассмотрен источник анодного питания микротрона-рекуператора, как наиболее мощный. Источник имеет выходную мощность до 2.9 МВт. Напряжение промышленной сети (6.3 кВ, 50 Гц) подаётся на высоковольтный тиристорный выпрямитель, после чего выпрямленное напряжение поступает на два канала сглаживающих LC-фильтров и два канала быстрой защиты (для источника анодного питания микротрона-рекуператора).

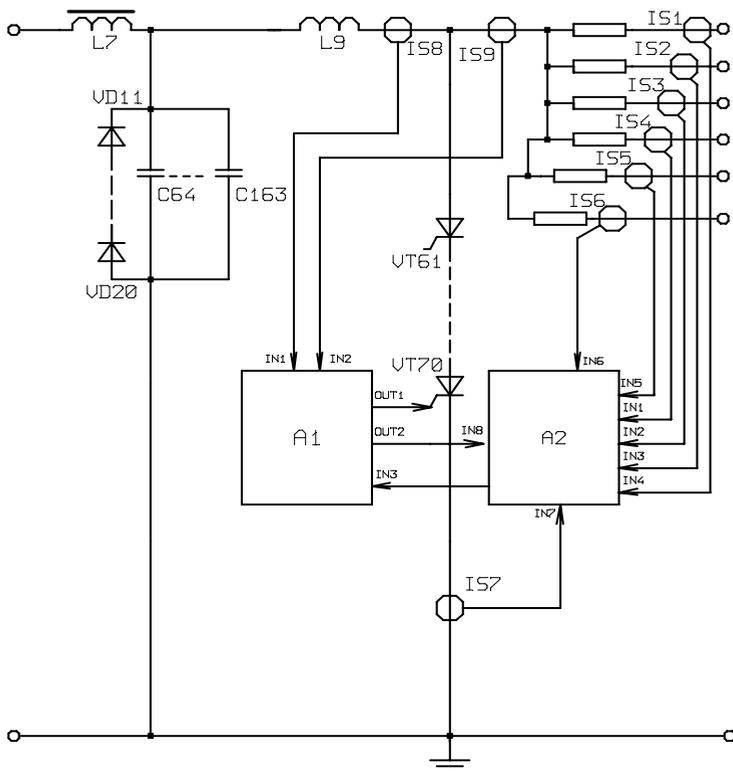


Рис. 5. Упрощенная схема системы быстрой защиты.

Источник анодного питания инжектора имеет лишь один канал сглаживающего фильтра и один канал быстрой защиты. Система быстрой защиты состоит из воздушного дросселя L9, включённого последовательно с выходом, и параллельного высоковольтного тиристорного ключа VT61-VT70 с его системой запуска (Рис.5).

В случае пробоя на выходе источника тиристоры высоковольтного ключа отпираются, и напряжение на нагрузке становится равным нулю. Одновременно снимаются импульсы управления тиристорами входного выпрямителя. В главе подробно рассмотрены процессы, протекающие во всех элементах источника при срабатывании быстрой защиты.

Схема быстрой защиты оказалась удачной. Именно такая схема применена в источнике анодного питания на ускорительном комплексе ВЭПП-2000. Её же планируется применить на комплексе ТНК в г. Зеленограде.

В шестой главе рассмотрен высоковольтный источник питания с выходным напряжением до 300 кВ и выходным током до 3 мА. Нестабильность источника не превышает $(2\div 5)\times 10^{-5}$. Высоковольтный источник питания состоит из трех основных систем:

1. Высоковольтного выпрямителя, размещенного в баке под давлением изолирующего газа (избыточное давление 0.7 атм);

2. Системы контроля и стабилизации высокого напряжения, основными элементами которой являются: прецизионный высоковольтный делитель, емкостной датчик пульсаций, схема стабилизации высокого напряжения, схема защиты от пробоев и от превышения выходного напряжения выпрямителя;

3. Источника питания переменного тока – высокочастотного преобразователя, работающего на частоте 322 кГц.

По принципу действия высоковольтный выпрямитель представляет собой секционированную выпрямительную колонну с емкостной связью и параллельным по входу питанием выпрямительных секций, включенных по отношению к нагрузке последовательно. Высокое напряжение измеряется с помощью двух прецизионных резистивных делителей (постоянная составляющая) и с помощью емкостного делителя напряжения (переменная составляющая). Соответственно имеется две петли обратной связи по высокому напряжению. Третья петля обратной связи – вспомогательная, служит для подавления сетевых пульсаций (см. рис.6).

Перестройка и стабилизация величины выходного напряжения высоковольтного выпрямителя в диапазоне от 50 до 300 кВ осуществляются путем регулирования уровня входного напряжения инвертора 322 кГц, питающего резонансные контура в цепях возбуждающих пластин-электродов. Источником питания этого инвертора является преобразователь постоянного тока, работающий на частоте 20 кГц.



Рис.6. Структурная схема высоковольтного источника питания.

В главе рассчитаны амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики, как элементов источника питания, так и всего источника. Это позволило успешно решить проблему устойчивой работы трехконтурной системы обратных связей. Представлены результаты работы.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы. Подчёркнуто, что разработанная аппаратура является частью ускорителей и накопителей заряженных частиц. Эта аппаратура позволила получить новое качество, новые свойства в работе установок. В частности, она позволила обеспечить надёжную работу детектора «Кедр». На источниках синхротронного излучения применение источников питания ондуляторов с переменным выходным током позволяет обнаруживать очень слабые эффекты, обусловленные право- и лево-сторонностью некоторых физических систем. В установке ЛСЭ применение источника анодного питания с быстрой защитой позволило получить высокий уровень ВЧ-мощности (до 1.5 МВт) в непрерывном режиме работы. Применение высоковольтного источника питания с выходным напряжением до 300 кВ и стабильностью до 3×10^{-5} позволило проводить эксперименты по электронному охлаждению пучков протонов или тяжёлых ионов.

Основные результаты работы, опубликованные по теме диссертации:

1. Б.А. Баклаков, А.М. Батраков, В.Ф. Веремеенко, Ю.А. Евтушенко и др. Статус лазера на свободных электронах для Сибирского центра фотохимических исследований. // XIII Российская конференция по использованию синхротронного излучения. (Новосибирск, 17-21 июля 2000г. Сборник трудов, с.24-29).
2. B.A. Baklakov, A.M. Batrakov, Yu.A. Evtushenko et al. Status of the free electron laser for the Siberian center for Photochemical research. // NIM, v.A470, N1/2, 2001, p.60-65.
3. S.V. Miginsky, V.V. Anashin, Yu.A. Evtushenko et al. Status of a 2MeV CW RF injector for the Novosibirsk high power FEL. // Proc. of 2nd Asian Conference on Particle Accelerators (APAC'2001), 17-21 September 2001, Beijing, China.
4. В.Н. Бочаров, А.В. Бублей, Ю.А. Евтушенко и др. Испытания электронного охладителя на энергию 35 кэВ для Института Современной Физики (Ланчжоу, КНР). // Труды XVIII российской конференции (RUPAC'2002). Октябрь 1-4, 2002, Обнинск, Россия.
5. A.S. Medvedko, V.V. Kolmogorov, Yu.A. Evtushenko. Precision power supply of trapezoidal current for the undulator. // Proc. of the 8th EPAC, 3-7 June 2002, Paris, p.2487.
6. V.S. Arbuzov, Yu. A. Evtushenko et al. RF System of the race-track microtron-recuperator for high power free electron laser. // Proc. of the 8th EPAC, 3-7 June 2002, Paris, p.2169.
7. В.С. Арбузов, Б.А. Баклаков, Ю.А. Евтушенко и др. Мегаваттные ВЧ системы для ускорителей, разработанных в ИЯФ СО РАН г.

Новосибирска. // XVIII Конференция по ускорителям заряженных частиц (RUPAC-2002). 1-4 октября, Обнинск, Россия.

8. V. Bocharov, A. Bublely, Yu. Evtushenko et al. HIRFL-CSR electron cooler commissioning. // NIM, v. A532, N1, 2004. p.144-149.
9. E. Bekhtenev, V. Bocharov, A. Bublely, Yu. Evtushenko et al. Commissioning of the electron cooler EC-300 for HIFRL-CSR. // XIX Russian Accelerator Conference (RuPAC-2004), Dubna, October 4-9, 2004, Russia.
10. V.S. Arbutov, A.A. Bushuev, E.I. Gorniker, Yu.A. Evtushenko et al. RF system for the industrial linear electron accelerator of KAERI (Korea, Daejeon) // XIX Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2004), October 4-9, 2004, Dubna, Russia.
11. Yu.M. Boymelshtein, V.N. Bocharov, A.V. Bublely, Yu.A. Evtushenko HIRFL-CSR electron cooler commissioning. // Proc. of the International Workshop on Beam Cooling and Related Topics (Cool'03), Lake Yamanaka, Yamanashi, Japan, May 19-23, 2003.
12. E. Gluskin, D. Frachon, P. M. Ivanov, E. A. Medvedko, E. Trakhtenberg, I. Vasserman, Yu. A. Evtushenko, N. G. Gavrilov, G. N. Kulipanov, A. S. Medvedko, S. P. Petrov, V. M. Popik, N. A. Vinokurov, A. Friedman, S. Krinsky, O. Singh. // The Elliptical Multipole Wiggler Project. Proc. 1995 Particle Accelerator Conference and International Conference on High-Energy Accelerators, IEEE, (1996), 1426 - 1428.
13. E. Gluskin, N. Vinokurov, V. Tcheskidov, A. Medvedko, Yu. Evtushenko, V. Kolmogorov, P. Ivanov, E. M. Trakhtenberg, P. K. Den Hartog, B. Deriy, O. Makarov, E. R. Moog, "An Electromagnetic Helical Undulator for Polarized X-rays," AIP Conf. Proc.: Synchrotron Radiation Instrumentation, P. Pianetta, J. Arthur, and S. Brennan, eds., 521, AIP, (2000), 344-347.
14. Ю.А. Евтушенко, С.П. Петров. Источник питания регистрирующей аппаратуры. Межвузовский сборник научных трудов, Новосибирск, 1991г.

Евтушенко Юрий Анатольевич

**Специализированные источники питания
для элементов ускорителей
и накопителей заряженных частиц**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Сдано в набор 23.10.2007 г.
Подписано к печати 24.10.2007 г.
Формат 100x90 1/16 Объём 0,7 печ.л., 0,6 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 29

Обработано на IBM PC и распечатано
на ротапинтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11.