

*На правах рукописи*

**БЕЛИКОВ Олег Витальевич**

**ИСТОЧНИКИ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ТОКА  
ДЛЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ МАГНИТОВ В УСКОРИТЕЛЯХ  
И НАКОПИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

**НОВОСИБИРСК – 2010**

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

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

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

АУЛЬЧЕНКО  
Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор,  
Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
СО РАН, г. Новосибирск.

ВАГИН  
Алексей Ильич – кандидат технических наук,  
Учреждение Российской академии наук  
Московский радиотехнический институт,  
г. Москва.

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

Защита диссертации состоится « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г.  
в « \_\_\_\_\_ » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01  
Учреждения Российской академии наук 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 Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А. В. Бурдаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН со времени его основания проводятся эксперименты со встречными электрон-позитронными пучками. Для этих целей создаются сложные ускорительно-накопительные комплексы, периметры синхротронов которых составляют десятки и сотни метров.

Жёсткие требования к структуре магнитного поля современных ускорителей и накопителей заряженных частиц приводят к необходимости использовать множество дополнительных электромагнитов (корректоров) для коррекции возмущений магнитного поля на орбите. Для отдельного управления и питания этих элементов необходима современная автоматизированная система, содержащая большое количество стабилизированных источников тока, управляемых и контролируемых от компьютера. Набор специфических требований, предъявляемых к питанию корректоров, не позволяет использовать промышленно выпускаемые источники. Актуальность настоящей работы была обусловлена необходимостью создания нового поколения источников стабилизированного тока для питания корректоров возмущений магнитного поля орбиты для вновь разрабатываемых и модернизируемых ускорителей и накопителей заряженных частиц.

**Целью настоящей работы** является обобщение опыта, накопленного автором в процессе разработки, изготовления и эксплуатации автоматизированных систем питания корректоров равновесной орбиты, корректоров частот бетатронных колебаний и регулировки мультипольных возмущений магнитного поля ускорителей и накопителей заряженных частиц.

**Методы исследования.** При решении задач связанных с разработкой электрофизического оборудования и электроники автором использовались программы моделирования нелинейных электрических схем типа NL и LES разработки ИЯФ, пакеты программ Micro-Cap, Mathcad и Excel, а также аналитические методы анализа электрических цепей.

**Научная новизна** результатов работы заключается в следующем:

1. Основываясь на изучении поведения пучка в ускорителях и накопителях заряженных частиц, обоснованы допуски на долговременные нестабильности и на величины пульсаций тока в обмотках различных корректоров с учётом их частотных характеристик.
2. Изучены особенности работы импульсных преобразователей для их применения в качестве силовых регуляторов в источниках стабилизированного тока. Предложена методика выбора несущей частоты преобразователя с учётом спектра частот собственных колебаний пучка в ускорителях и накопителях заряженных частиц, а также на основании анализа устойчивости работы цепи обратной связи источников питания, найдено

решение системы регулирования, которая остаётся устойчивой при изменении постоянной времени нагрузки в широких пределах.

3. Предложен способ построения многоканальных систем питания корректоров, позволяющий увеличить эксплуатационную надёжность физической установки.
4. Предложено схемное решение исполнения источников подшунтирования электромагнитов как элементов коррекции равновесной орбиты, с возможностью рекуперации отобранной энергии в основной источник питания электромагнитов. Проанализированы условия получения оптимальных параметров подшунтирования предложенным способом.
5. Предложен и реализован способ построения электропривода для шестифазного шагового двигателя с применением программируемой логики, позволяющий улучшить эксплуатационные характеристики системы привод – двигатель. Осуществлён режим работы двигателя с дроблением шага, позволяющий уменьшить дискретность шага, а также увеличить плавность хода на малых скоростях вращения.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что рассмотренные и решённые в ней вопросы способствовали разработке систем питания электромагнитов, предназначенных для коррекции параметров магнитной системы и частот бетатронных колебаний в ускорителях и накопителях заряженных частиц.

Наиболее значимыми, по мнению автора, являются работы по созданию систем питания корректоров комплекса ВЭПП-2000 (около 180 каналов питания) и инженерно-производственного комплекса с синхротроном «Зеленоград» – специализированного источника синхротронного излучения (около 30 каналов питания и подшунтирования).

Успешные физические результаты, полученные на комплексе ВЭПП-2000 и малом накопителе синхротрона «Зеленоград», свидетельствует о том, что перечисленные системы питания вполне соответствуют или лучше требуемых параметров. Как следствие, рассмотренные в диссертации методы могут быть применены при разработке новых подобных систем.

**Автор выносит на защиту** следующие результаты проделанной работы:

1. Предложена методика разработки систем питания электромагнитов, предназначенных для коррекции возмущений магнитного поля на орбите ускорителей и накопителей заряженных частиц, заключающаяся в следующем:
  - 1.1. Сформулированы основные требования, предъявляемые к системам питания корректоров на основе анализа поведения пучка в ускорителях и накопителях заряженных частиц.

- 1.2. На основе четырёхквadrантных широтно-импульсных преобразователей разработаны варианты структурных схем стабилизаторов тока с использованием полевых транзисторов в качестве ключевых элементов. Проанализированы переходные процессы в ключевых элементах и даны рекомендации, позволяющие улучшить коммутационные процессы.
- 1.3. Предложен вариант структурной схемы источника подшунтирования электромагнитов на основе обратного преобразователя, позволяющий работать с рекуперацией отобранной энергии в основном источнике питания электромагнита.
- 1.4. На основе методов теории систем авторегулирования, предложена методика анализа структурных схем, позволяющая обеспечить требуемое качество регулирования для индуктивных нагрузок с характерными частотами от 0,1 Гц до 500 Гц.
2. Разработаны следующие типы управляемых от компьютера четырехквadrантных источников стабилизированного тока, предназначенных для питания корректоров:
  - 2.1. УМ-6, РА-6, MPS-6 – источники с максимальным выходным током  $\pm 6$  А, максимальным выходным напряжением  $\pm 100$  В. Дисперсия выходного тока у этих источников за 10 часов работы не превышает значения 100 ppm.
  - 2.2. УМ-20, УМ-25, РА-25, MPS-20, MPS-25 – источники с максимальным выходным током  $\pm(20\div 25)$  А, максимальным выходным напряжением  $\pm 160$  В. Дисперсия выходного тока у этих источников, не превышает значения 100 ppm, за 10 часов работы.
3. Для коррекции радиального положения пучка разработан источник подшунтирования SHUNT-20, позволяющий отбирать ток от обмотки электромагнита до 20 А при падении напряжения на обмотке в диапазоне от 5 до 30 В. При этом дисперсия тока подшунтирования за 10 часов работы не превышает значения 100 ppm. Разработанное устройство позволяет работать как с рекуперацией отобранной энергии в основном источнике питания электромагнита, так и со сбросом энергии в балластную нагрузку.
4. При определяющем участии автора были созданы следующие системы, содержащие перечисленные источники питания и подшунтирования:
  - 4.1. Системы питания корректоров равновесной орбиты и мультипольный возмущений магнитного поля накопителя БЭП и коллайдера ВЭПП-2000, содержащие около 180 каналов питания, включая каналы транспортировки пучков заряженных частиц. Системы успешно работают в составе комплекса ВЭПП-2000 (ИЯФ).

- 4.2. Системы питания и подшунтирования электромагнитов, предназначенных для коррекции возмущений магнитного поля на орбите малого и большого накопителей синхротрона «Зеленоград». Общее количество раздельно управляемых каналов питания и подшунтирования составляет около 30шт. Оборудование поставлено по контракту с НИИФП им. Ф.В. Лукина (г. Зеленоград), где в настоящее время продолжается сборка большого накопителя.
- 4.3. Система питания поворотного магнита выпускного устройства импульсного линейного ускорителя ИЛУ-8. Система разработана в рамках контракта по поставке ускорителя ИЛУ-8 в “e-Energy Corporation” (Япония) в 2006 году, где продолжает успешно работать по настоящее время.
- 4.4. Систему питания двух дублетов квадрупольных линз линейного ускорителя электронов ЛУЭ-200. Система успешно работает в составе установки ИРЕН (ОИЯИ, г. Дубна).
5. Автором разработан электропривод ЭШД-5, предназначенный для управления шестифазным шаговым двигателем типа ШД-5, с дискретностью шага 22,5 МОА (угловых минут). С использованием этого устройства была произведена модернизация механизма подавителя фона релятивистского пучка заряженных частиц на комплексе ВЭПП-4, а также модернизированы сверлильные станки типа КД-46, фрезерные станки типа НЗЗ и электроэрозионные станки станочного парка в экспериментальном производстве ИЯФ, где в настоящее время успешно работают около 50 электроприводов ЭШД-5.

**Апробация работы.** Работы, составляющие материал диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах ИЯФ. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

1. XX Russian Conference on Charged Particle Accelerators (RuPAC 2006), Novosibirsk, September 10-14, 2006, Russia (1 доклад).
2. XXI Russian Particle Accelerators Conference (RuPAC 2008), Zvenigorod, 28.09 – 03.10 2008, Russia (3 доклада).
3. XII International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALPCS 2009), Kobe, 12.10 – 16.10 2009, Japan (2 доклада).

**Публикации.** Все материалы диссертации опубликованы в 14 статьях в журналах и трудах конференций.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка использованной литературы (55 наименований). Содержит 130 стр. основного текста, 57 иллюстраций и 14 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и её научная новизна, дано краткое описание работы.

**В первой главе** описываются магнитные системы ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000 и синхротрона «Зеленоград». Отдельно рассматриваются дипольные, квадрупольные, Skew-квадрупольные, секступольные и октупольные корректора магнитного поля. Проводятся сравнения различных способов коррекции радиального положения пучка при помощи: отдельно расположенных дипольных корректоров, дополнительных обмоток, намотанных в поворотных магнитах, или при помощи подшунтирования основных обмоток магнитов специальными источниками, осуществляющими частичный отбор тока. На основании изучения поведения пучка в накопителе заряженных частиц формулируются требования к источникам питания корректоров.

**Во второй главе** рассматриваются варианты возможных группирований корректоров по потребляемой мощности, позволяющие систематизировать систему их питания. Из приведённых рассуждений определяются две группы источников питания корректоров: с максимальными выходными токами 5 А и 20 А.

Основываясь на изучении частотной зависимости связи магнитного поля и тока в обмотке корректора, формулируются требования на допустимую погрешность коэффициентов передачи системы питания, а также на допустимый уровень пульсаций выходного тока в спектре частот синхротронных и бетатронных колебаний.

Исходя из требуемых параметров регулирования тока в обмотках корректоров на участках перестройки энергии ускорителей и накопителей заряженных частиц показана необходимость использования источников питания корректоров с четырёхквadrантной вольт-амперной характеристикой выходного тока (четырёхквadrантных источников тока).

**В третьей главе** показана и обоснована целесообразность применения широтно-импульсных преобразователей (импульсных преобразователей). С учётом требований к стабильности выходного тока источников питания корректоров, рекомендована область рабочих частот широтно-импульсного преобразования. Показана целесообразность использования полевых транзисторов в качестве ключевых элементов импульсных преобразователей в области рабочих частот.

На основании изучения переходных процессов в полупроводниковых ключах приводятся различные варианты коммутации этих элементов, реализованные автором при разработке источников питания корректоров. Рассматриваются достоинства и недостатки приведённых схем коммутации полупроводниковых ключей, а также приводятся рекомендации по минимизации потерь при их переключении.

**В четвёртой главе** приводятся схемные решения и способы реализации четырёхквadrантных источников стабилизированного тока на основе импульсного мостового преобразователя, обосновывается выбор способов подавления ВЧ-пульсаций выходного тока.

Рассмотрены возможные возмущающие факторы в системе стабилизации тока, а также, исходя из допустимых нестабильностей регулируемого тока, изучены регулировочные характеристики, обосновано наличие звеньев регулирования с дифференцирующей и интегрирующей характеристикой в цепи обратной связи по току, а также приводятся оценки качества регулирования выходного тока для различных параметров нагрузок.

Предложены конкретные практические реализации схем источников питания с максимальными выходными токами  $\pm 6$  А и  $\pm(20\div 25)$  А. Абсолютное значение выходного напряжения этих источников выбирается от 0 В до 100 В, в зависимости от индуктивного и активного сопротивления питаемых обмоток корректоров и подводящих трасс, а долговременная нестабильность выходного тока не превышает 0,01% от максимального значения за 10 часов работы.

Показана целесообразность исполнения многоканальной модульной системы питания, позволяющей улучшить эксплуатационные характеристики. Продемонстрированы различные варианты исполнения многоканальных модулей питания в конструктиве «ВИШНЯ» и «Евромеханика». В последнем варианте межблочные соединения выполнены на кросс-плате, что позволило упростить процесс тиражирования этих устройств. Показана целесообразность применения аппаратных защит в источниках питания, а также приведена схема узла рекуперации энергии, запасённой в индуктивности обмотки корректора.

Приводятся результаты лабораторных испытаний разработанных источников тока, контроль и управление которыми осуществляется при помощи многоканальных цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей, позволяющих контролировать выходной ток и напряжение источников тока и вспомогательных устройств.

**В пятой главе** рассмотрены существующие варианты исполнений источников подшунтирования электромагнитов, а также предложена новая схема, позволяющая осуществлять рекуперацию отобранной энергии в источник питания основного магнита, что избавляет от необходимости применять нагрузочные резисторы. В качестве основного схемного решения обоснован выбор схемы обратного преобразователя, обеспечивающего требуемый режим работы с гальванической развязкой входной и выходной частей источника подшунтирования.

Предлагается схемное решение источника с максимальным током подшунтирования 20 А, для магнита с максимальным падением напряжения на обмотке до 30 В. Абсолютная погрешность регулирования тока подшунтирования составляет 0,1% от максимального значения, а ширина полосы пропус-

кания токовой петли обратной связи составляет примерно 500 Гц. Двухканальный источник подшунтирования выполнен в конструктиве «Евромеханика» с воздушным охлаждением силовой части обратногоходового преобразователя.

Предложен способ увеличения тока подшунтирования на энергии инжекции, при низком напряжении на обмотке подшунтируемого магнита. Приводятся расчёты максимального тока подшунтирования при напряжении на обмотке менее 3 В.

**В шестой главе** даётся описание систем питания корректоров возмущений магнитного поля коллайдера ВЭПП-2000, синхротрона «Зеленоград», и других физических установок. Описанные системы разработаны автором на основе стабилизированных источников тока. Демонстрируется целесообразность разбиения систем питания на отдельные группы. Приводятся измеренные на физических установках гистограммы выходного тока, осциллограммы переходных процессов источников питания, а также результаты измерений равновесной орбиты в коллайдере ВЭПП-2000. Демонстрируется соответствие расчётных и измеренных параметров источников питания.

Приводится описание спроектированной автором системы коррекции радиального положения пучка в Малом накопителе синхротрона «Зеленоград», реализованной подшунтированием обмоток поворотных магнитов основного поля. Система подшунтирования реализована с рекуперацией энергии, отобранной от обмоток магнитов, в источники питания поворотных магнитов. Приводятся осциллограммы переходных процессов в цепи рекуперации.

**В седьмой главе** демонстрируется ещё одно применение импульсных преобразователей – для управления шаговыми электродвигателями. Предлагается практическая реализация схемы шестифазного электропривода, предназначенного для управления шаговыми двигателями типа ШД-5. Исполнительный алгоритм работы электропривода, а также регулирование тока в обмотках двигателя реализовано в цифровом виде на программируемой логической интегральной схеме, что позволило реализовать дробление шага двигателя на четыре, автоматическое уменьшение токов в обмотках двигателя в режиме удержания и другое.

Приводятся результаты испытаний, демонстрирующие улучшение характеристик двигателя за счёт добавления новых режимов работы электропривода, позволяющих уменьшить влияние неустойчивостей пошагового режима вблизи резонансных частот, а также уменьшить нагрев двигателя в процессе работы. Рассматриваются примеры модернизации сверлильных, фрезерных и электроэрозионных станков станочного парка ИЯФ.

**В заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту. Подчёркнуто, что разработанная аппаратура является частью ускорителей и накопителей заряженных частиц.

**Основные результаты по теме диссертации** содержатся в следующих работах:

1. О.В. Беликов, Э.Л. Неханевич, Ш.П. Сингатулин. Электропривод для шагового двигателя ШДС. // Препринт 2002-66, ИЯФ СО РАН, Новосибирск.
2. O.V. Belikov, D.E. Berkaev, V.R. Kozak, A.S. Medvedko. Power supply system for correcting magnets of VEPP-2000 complex. // XX Russian Conference on Charged Particle Accelerators (RuPAC 2006), Novosibirsk, September 10-14, 2006, Russia.
3. О.В. Беликов, А.С. Медведко, Ш.П. Сингатулин. Привод для 6-тифазного шагового двигателя. Журнал “Силовая интеллектуальная электроника” №1(7), 2007г., стр. 27, Новосибирск.
4. О.В. Беликов, Д.Е. Беркаев, В.Р. Козак, А.С. Медведко. Усилители мощности УМ-6 и УМ-20 для питания корректоров комплекса ВЭПП-2000. // Препринт 2007-014, ИЯФ СО РАН, Новосибирск.
5. О.В. Беликов, В.А. Журавлёв, Э.Л. Неханевич. Модернизация системы ЧПУ сверлильного станка КД-46. // Препринт 2007-023, ИЯФ СО РАН, Новосибирск.
6. О.В. Беликов, М.О. Жуков. Источник питания корректирующих элементов ускорительной техники на базе цифрового сигнального процессора. // Вестник НГУ. Серия: Физика. Том 2, выпуск 3. 2007, Новосибирск.
7. O. Belikov, V. Kozak, A. Medvedko. Four-quadrant power supplies for steering electromagnets for electron-positron colliders. // XXI Russian Particle Accelerators Conference (RuPAC 2008), Zvenigorod, 28.09 – 03.10 2008, Russia.
8. O. Belikov, A. Chernyakin, V. Kozak, A. Medvedko. Bypass system for shunting of electromagnets for accelerators and storage rings. // XXI Russian Particle Accelerators Conference (RuPAC 2008), Zvenigorod, 28.09 – 03.10 2008, Russia.
9. D. Berkaev, O. Belikov, V. Kozak, P. Shatunov, A. Medvedko. System of Power Supply Ripples Measurement for VEPP-2000 Collider. // XXI Russian Particle Accelerators Conference (RuPAC 2008), Zvenigorod, 28.09 – 03.10 2008, Russia.
10. O. Anchugov et all. Status of "Zelenograd" storage ring. // Nuclear instruments and methods in physics research. Sec. A. - 2009. - Vol. A603, No 1/2. - P. 4 -6.
11. О.В. Беликов, А.С. Медведко, В.Р. Козак. Источник подшунтирования электромагнитов для коррекции параметров пучка в ускорителях и накопителях заряженных частиц. // Вестник НГУ. Серия: Физика. Том 4, выпуск 3. 2009, Новосибирск.
12. A.S. Medvedko, D.E. Berkaev, O.V. Belikov, P.Yu. Shatunov, V.R. Kozak. System of Power Supply Ripples Measurement for VEPP-2000 Collider. // XII International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS 2009), Kobe, 12.10 – 16.10 2009, Japan.
13. A.S. Kasaev, A.S. Stankevich, D.E. Berkaev, F.V. Podgorny, O.V. Belikov, P.B. Cheblakov, V.R. Kozak. Control System for Injection Channels of VEPP-2000 Collider, // XII International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS 2009), Kobe, 12.10 – 16.10 2009, Japan.

*БЕЛИКОВ Олег Витальевич*

**Источники стабилизированного тока  
для корректирующих магнитов в ускорителях  
и накопителях заряженных частиц**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

---

Сдано в набор 31.03. 2010 г.

Подписано в печать 31.03. 2010 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.6 печ.л., 0.5 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 9

---

Обработано на РС и отпечатано

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