

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертацию
Сенькова Дмитрия Валентиновича
на тему
**«Разработка структуры и алгоритмов управления силовыми преобразователями для
электрофизических установок»,**
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Актуальность темы исследования

Прогресс в области разработки и создания современной электрофизической аппаратуры и, в частности, ускорителей заряженных частиц, во многом определяется не только принципом действия и конструкцией самих источников электронов или ионов, но и схем их электропитания и управления. Постоянно обновляемая элементная база как силовой, так и микропроцессорной электроники позволяет продвигаться в область параметров, которые 10-20 лет назад казались труднодостижимыми. Особенno впечатляющих успехов можно достичь, сочетая использованные современной твердотельной электроникой с разработкой новых схемных решений и программных алгоритмов управления электроникой. В этом плане диссертационная работа Сенькова Дмитрия Валентиновича, посвящённая разработке и созданию серии мощных силовых преобразователей специально предназначенных для современных ускорителей и накопителей заряженных частиц, является актуальной, решающей важную задачу повышения параметров этих электрофизических установок, а, соответственно, расширяющих их возможности как для проведения научных исследований, так и для применений в технологических целях.

Содержание работы

Кандидатская диссертация Д.В. Сенькова состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 112 страниц, в том числе 62 рисунка и 5 таблиц, а также список использованных литературных источников из 22 наименований.

Во введении кратко показана актуальность проблем, затрагиваемых в диссертации, задачи и практическая значимость диссертационной работы, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе показаны традиционные варианты построения силовых преобразователей, сделан краткий обзор современных высоковольтных источников для электропитания установок электронно-лучевой сварки и приведены их основные параметры.

Во второй главе сформулированы основные требования, предъявляемые к источникам ускоряющего напряжения электронных пушек для электронно-лучевой сварки материалов и изделий. Приведена структура разработанного автором высоковольтного источника с преобразователем частоты. Показано, что целесообразно использовать модульное построение силового преобразователя. Обоснованы требования к согласованию преобразователя и высоковольтного трансформатора. Представлено, проведенное автором, компьютерное моделирование (временной анализ) силовой схемы источника с учетом выходного выпрямителя с исследованием реакции на изменение нагрузки и электрический пробой на выходе источника электропитания. Далее показаны результаты испытаний преобразователя и приведены примеры реализации энергокомплексов для электронно-лучевых систем с ускоряющим напряжением 60 кВ и мощностью 15 кВт и 30 кВт.

В третьей главе сформулированы основные требования, которые применялись при выборе серийного микроконтроллера, обосновывается его выбор и описывается устройство разработанного и созданного автором оригинального полномасштабного контроллера для управления высоковольтными источниками электропитания электрофизических установок. Представлены вопросы построения регулятора, приводится структура контроллера и его управляющего алгоритма. Анализируются частотные и временные характеристики контура

стабилизации. Показано совпадение данных математического моделирования и экспериментально полученных результатов по испытанию высоковольтного источника, управляемого созданным автором контроллером.

В четвертой, пятой и шестой главах рассмотрены примеры систем питания для электрофизических установок, построенных на основе описанных в этой главе управляющего контроллера и силового преобразователя.

В четвертой главе представлена система электропитания 1,5МВ высоковольтной колонны прототипа инжектора протонов, разработанная автором диссертации. Приведена структура источника и применяемые в контроллере управляющие алгоритмы, показаны полученные результаты испытаний, свидетельствующие о достижении планируемых параметров. Важным, на мой взгляд, является использование принципа мягкой коммутации ключей синхронного выпрямителя, реализованного автором за счёт разработанного им специального алгоритма управления этими ключами. Это позволило в разы уменьшить динамические потери в полупроводниковых ключах, а также выбросы напряжения в моменты коммутации, что в свою очередь снизило требования по классу обратного напряжения для транзисторов синхронного выпрямителя.

В пятой главе приведено описание системы питания 2МВ высоковольтной колонны установки электронного охлаждения, разработанной в ИЯФ СО РАН для протонного синхротрона COSY (Юлих, Германия). Показаны требования, предъявляемые к источнику питания высоковольтной колонны, которые позволяют обеспечить ее стабильную и надежную работу. Представлены 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 как в ИЯФ СО РАН, так и на установке COSY в Германии. Нестабильность амплитуды напряжения созданного источника питания составила менее 1%, что превосходит известные аналоги.

Шестая глава посвящена разработке и созданию системы питания квадрупольных магнитов бустера источника синхротронного излучения NSLS-II (Брукхевенская лаборатория, Аптон, США). Дано общее описание бустера, и его магнитной системы. Приводится алгоритм работы бустера, заключающиеся в быстром (за 0,3секунды) подъеме энергии инжектированного в него пучка электронов для перепуска в основное кольцо-накопитель комплекса. Обоснована выбранная структура трехканального источника тока для питания квадрупольных магнитов и приведены оценки энергетических затрат с учётом рекуперации энергии в накопительную ёмкость. Затем приводится описание устройства управляющих контроллеров системы электропитания и представлены полученные на испытаниях в ИЯФ СО РАН и запуске на комплексе NSLS-II результаты и внешний вид трёхканальной системы питания квадрупольных магнитов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы с указанием достигнутых параметров разработанных устройств электропитания различных электрофизических установок.

Основные результаты, их новизна и практическая значимость

К числу наиболее значимых результатов работы определяющих её научную новизну и практическую ценность сформулированных положений и выводов следует отнести следующее:

- предложена структура управляющего контроллера и разработаны программные алгоритмы контура стабилизации, позволяющие создать прецизионные системы электропитания и минимизировать переходной процесс при глубокой модуляции их выходной мощности;
- предложена схема согласования импедансов преобразователя и высоковольтного трансформатора, обеспечивающая ограничение тока преобразователя при замыкании на выходе и уменьшающая переходной процесс в выходном напряжении источника при изменении нагрузки и на ее основе разработана структура источника высокого напряжения для современных электрофизических установок;

- предложена структура и на ее основе разработана и изготовлена серия из десяти источников высокого напряжения, обладающих малыми искажениями выходного напряжения при глубокой модуляции выходного тока и высокой долговременной стабильностью, семь из этих источников использованы в произведенных в ИЯФ СО РАН и поставленных в различные организации установках электронно-лучевой сварки;
- предложена структура и на ее основе разработана, создана и исследована прецизионная система электропитания для квадрупольных магнитов бустера источника синхротронного излучения NSLS-II (США) нового поколения;
- разработаны, созданы и исследованы системы электропитания 1,5МВ ускорительной колонны прототипа инжектора протонов и 2МВ ускорительной колонны установки электронного охлаждения протонного пучка, позволившие добиться устойчивой и бесперебойной работы этих электрофизических установок на предельных параметрах.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Результаты диссертационной работы представляются обоснованными, что подтверждается соответствием экспериментальных данных, полученных при исследовании различных узлов разработанной аппаратуры, теоретическим представлениям, а также численным оценкам процессов в электрических цепях этих устройств.

Полученные в работе результаты могут быть рекомендованы для использования в научных и технологических лабораториях, занимающихся разработкой и применением ускорителей и накопителей заряженных частиц, а также высоковольтных технологических источников электронов и ионов для научных исследований и технологических целей.

В частности, результаты могут быть рекомендованы для использования в Институте сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), Институте электрофизики Уро РАН (г. Екатеринбург) НИИ ЭФА им. Ефремова (г. Санкт-Петербург), Курчатовском институте (г. Москва) и других вузах и НИИ, а также на предприятиях, производящих современные источники заряженных частиц, например, ОАО «ТЭТА» (г. Томск)

Достоверность результатов проведенной работы подтверждается систематическим и комплексным характером исследований, удовлетворительным соответствием экспериментальных данных результатам расчётов и оценок, а также успешной эксплуатацией серии созданных установок электронно-лучевой сварки, результатами испытаний прототипа 1,5МэВ инжектора протонов, успешной эксплуатацией установки электронного охлаждения для COSY (Германия) и успешной эксплуатацией ускорительного комплекса NSLS-II (США). Правильность найденных решений подтверждается результатами, полученными на упомянутых установках при их стабильной и безаварийной работе.

Замечания

Следует отметить некоторые недостатки диссертационной работы:

1. Автор использует масляную изоляцию для разработанных и созданных им источников высоковольтного электропитания, хотя не приводит убедительных аргументов в её пользу. В некоторых современных источниках известных мировых производителей, например Spellman, используется твёрдая изоляция, показывающая высокую надёжность. На мой взгляд следовало бы обосновать выбор масляной изоляции.

2. Хотя автор для характеристизации своей разработки и употребляет термины «выдающийся» (стр. 50) и «превосходные» (стр. 68) характеристики источника, однако не проводит детального сравнения полученных им параметров и характеристик автоматизированных источников электропитания с известными литературными данными или мировыми аналогами.

3. Для оппонирования, также как и для ряда обязательных отправок экземпляров диссертации, был представлен экземпляр в чёрно-белом варианте, однако при описании осцилограмм на стр. 103-105 делаются ссылки на цветные их изображения (фиолетовые, сиреневые, тёмно- и светло – зелёные), что затрудняет анализ результатов.

4. На мой взгляд, было бы целесообразно объединить главы 4 (11 стр.), 5 (11 стр.) и 6 (15 стр.) т.е. всего 37 стр. в одну главу, разделив её на три параграфа.

5. Рисунок 5.6 на стр. 87 трудноразличим.

6. В списке цитированной литературы более половины публикаций являются работами автора диссертации. Считаю, что ссылок на работы других исследователей по аналогичной тематике должно быть больше.

Сделанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы.

Особо следует отметить комплексный характер работы: от чётко сформулированной цели и задач исследований до реального воплощения сформулированных идей в современных образцах систем электропитания уникальных электрофизических установок стабильно и надёжно работающих как в России, так и за рубежом, что с лихвой компенсирует некоторые ограхи и недочёты работы.

Общая оценка диссертации

В целом диссертация Сенькова Д.В. представляет собой завершенную научно-квалификационную работу. Диссертация получила практическое внедрение и прошла аprobацию на всероссийских и международных конференциях. Результаты исследований отражены в трех публикациях в **профильных рецензируемых журналах** (*Problems of Atomic State and Technologies*, Автометрия, Вестник НГУ: Физика), два из которых входят в Перечень журналов, утвержденных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертационных работ. Автореферат правильно и достаточно полно отражает основное содержание диссертации. Тема исследования соответствует заявленной научной специальности.

Заключение

Диссертационная работа Сенькова Дмитрия Валентиновича «Разработка структуры и алгоритмов управления силовыми преобразователями для электрофизических установок» отвечает требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук, установленным в п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Сеньков Дмитрий Валентинович, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Заместитель директора по научной работе,
заведующий лабораторией плазменной
эмиссионной электроники Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Института сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии
наук (ИСЭ СО РАН), д.т.н., профессор

Н.Н. Ковалев

Подпись Н.Н. Коваля удостоверяю.
Ученый секретарь ИСЭ СО РАН,
д.ф.-м.н.



И.В. Пегель

Данные официального оппонента:

ФИО, степень, звание: Коваль Николай Николаевич, д.т.н., профессор

Организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

Должность: заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией плазменной эмиссионной электроники

Почтовый адрес: 634055, Россия, Томск, пр-т Академический 2/3

Телефон: 8(3822)49-17-06

Адрес электронной почты: koval@oppe.hcei.tsc.ru