

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.

1. Актуальность темы исследования и ее связь с практикой и развитием науки и техники.

Научно-квалификационная работа Сенькова Дмитрия Валентиновича посвящена решению задачи, имеющей существенное значение при создании систем питания на основе силовых преобразователей для ускорителей и накопителей заряженных частиц и для специализированных высоковольтных источников напряжения и источников тока в промышленности. Автор работы решил актуальную задачу моделирования и проектирования сложной системы питания с цифровым управлением на основе высоко производительных специальных сигнальных процессоров и силовых элементов, предложил программные алгоритмы контроля и стабилизации выходных параметров источников, исследовал и решил задачу согласования импедансов преобразователя и трансформатора системы высоковольтного питания физической установки, реализовал схему защиты, которая обеспечивает безаварийный быстрый выход на рабочий режим. Результатом выполненных работ было создание прецизионных систем питания для действующих и разрабатываемых в ИЯФ СО РАН электрофизических установок для исследовательских центров и промышленности РФ, что представляется весьма актуальным.

2. Научные результаты в рамках требований к научной значимости и новизны.

Основные результаты работы являются **новыми** и состоят в следующем:

- создана структура управляющего цифрового контроллера и разработаны программные алгоритмы контура стабилизации, позволяющие создать прецизионные быстродействующие системы питания и минимизировать переходной процесс при глубокой модуляции выходной мощности;

- реализован новый метод согласования импедансов преобразователя и высоковольтного трансформатора, обеспечивающий ограничение тока преобразователя при замыкании на выходе и уменьшающий переходной процесс в выходном напряжении источника при изменении нагрузки и на его основе разработана структура источника высокого напряжения;

- 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 ИЯФ СО РАН установках электронно-лучевой сварки;

- выполнено моделирование и разработана прецизионная система питания для квадрупольных магнитов бустера источника синхротронного излучения NSLS-II;

- разработаны и реализованы системы питания 1,5МВ ускорительной колонны прототипа инжектора протонов и 2МВ ускорительной колонны установки электронного охлаждения протонного пучка.

3. Научные результаты в рамках требований к научной значимости и новизны.

В работе Сеньков Д.В. для решения поставленных задач, на основе анализа существующих методов и приборов выбрал и обосновал способ построения сильноточных и высоковольтных мощных источников с числовым управлением, разработал и реализовал новую методику определения оптимального построения систем питания, вычисляемых по допустимой погрешности и быстродействию. Впервые в мощном источнике все управляющие и защитные функции решены на уровне разработанных алгоритмов сигнального процессора. Практическое применение созданных систем питания для уникальных электрофизических установок подтвердило высокие метрологические и эксплуатационные характеристики источников с учетом нелинейной шкалы ПИД-регулирования и быстродействия. В результате проделанной работы создан задел для построения систем питания современных установок для изучения ядерных и термоядерных процессов и широкого применения эффективной технологии гомогенной сварки металлов в широком диапазоне глубины шва.

Достоверность результатов проведенной работы подтверждается внедрением в производство ведущих предприятий и успешной эксплуатацией семи созданных установок электронно-лучевой сварки, результатами испытаний систем питания 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.

4. Содержание работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 22 наименований. Материал работы изложен на 112 страницах, включает 71 рисунок и 3 таблицы.

Во введении дается обзор основных этапов развития прецизионных мощных источников питания и наиболее значимые области их применения. Показано, что большая часть существующих систем питания построены по схеме аналоговых структур. Особо отмечена необходимость исследования быстрых процессов в трансформаторных установках для регулирования в режиме реального времени.

В первой главе показаны варианты построения силовых преобразователей, сделан обзор вариантов устройств высоковольтных источников.

Во второй главе приведена структура разработанного высоковольтного источника для вакуумной сварочной установки. Показано, что удобно использовать модульное построение силового преобразователя. Обоснованы требования к согласованию преобразователя и высоковольтного трансформатора. Представлено проведенное компьютерное моделирование (временной анализ) силовой схемы источника с учетом выходного выпрямителя с исследованием реакции на изменение нагрузки и пробой на выходе источника. Показаны результаты испытаний преобразователя.

В третьей главе описывается устройство разработанного автором контроллера для управления высоковольтным источником и перечислены предъявленные к нему требования. Представлены вопросы построения цифрового регулятора, приводится структура контроллера и управляющего алгоритма. Анализируются частотные и временные характеристики контура стабилизации. Показано совпадение данных моделирования и реально полученных результатов.

В четвертой главе представлена система питания 1,5МВ высоковольтной колонны прототипа инжектора протонов. Приведена структура источника и применяемые в контроллере адаптированные управляющие алгоритмы, показаны полученные результаты испытаний.

В пятой главе описана система питания 2МВ высоковольтной колонны установки электронного охлаждения, разработанной в ИЯФ 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 пробой на ускоряющей трубке. 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 для промежуточного ускорителя (бустера) источника синхротронного излучения NSLS-II (Брукхевенская лаборатория, Аптон, США). Дано общее описание бустера и его магнитной системы. Приводятся особенности работы бустера, заключающиеся в быстром (за 0,3 секунды) подъеме энергии инжектированного в него пучка электронов для перепуска в основное кольцо-накопитель комплекса. Обоснована выбранная структура трехканального источника тока для питания квадрупольных магнитов. Приводится описание устройства управляющих контроллеров системы питания и представлены полученные на испытаниях в ИЯФ и запуске на комплексе NSLS-II результаты.

5. В заключении перечислены основные результаты работы, которые выносятся на защиту:

- Разработана структура и алгоритмы управления для контроллера высоковольтного источника на основе быстродействующего сигнального процессора и матрицы программируемой логики.
- Выработана концепция согласования силового преобразователя и секционированного высоковольтного трансформатора.
- Конструкция и реализация источника синусоидального напряжения частотой 400 Гц с выходным напряжением до 120 В мощностью 10 кВт, построенный на базе полно-мостовой схемы 20 кГц ШИМ-модулятора и синхронного выпрямителя-демодулятора.
- Конструкция и реализация источника питания для высоковольтной колонны 2 МВ, представляющий собой стабилизированный источник синусоидального напряжения частотой 26 кГц с амплитудой 700 В и выходной мощностью до 40 кВт.
- Система питания квадрупольных магнитов бустера NSLS-II, представляющая собой прецизионный трехканальный источник с током канала до 180 А, выходным напряжением до 170 В и скоростью управляемой перестройки выходного тока до 600 А/с.

6. Степень обоснованности и достоверности каждого результата, выводы и заключения соискателя, сформулированные в диссертации.

Выводы, сделанные в диссертационной работе Сенькова Д.В. достаточно обоснованы и убедительны. Моделирование и экспериментальные исследования проведены с применением современных методов и средств с

привлечением оригинальных методик. Достоверность и надежность результатов не вызывает сомнений, они воспроизводимы и в ряде случаев подтверждены созданными электрофизическими установками, эксплуатируемые независимыми исследованиями и производителями. Используя в работе опыт применения сигнальных процессоров и компьютерное моделирование для выбора структуры систем питания, современные методы и аппаратные средства определения погрешностей источника, выполняя участие в проектировании и техническом эксперименте, пользуясь принципами прикладной метрологии, Сеньков Д.В. создал ряд новых систем питания электрофизических установок. Источник питания, построенный на принципе «электротехнические компоненты - цифровой процессор), легко адаптируется к новым требованиям. Особое значение в работе Сенькова Д.В. занимает реализация разработанных устройств и широкое внедрение в исследовательскую и производственную практику в РФ и за рубежом.

Основные результаты работы апробированы на международных и национальных конференциях, также опубликованы в российских и зарубежных журналах, список приведен в перечне опубликованных автором работ.

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них 6 статьи опубликованы в изданиях, определенных перечнем российских рецензируемых научных журналов и изданий.

7. Недостатки по содержанию и оформлению.

Диссертационная работа не лишена недостатков, причем это касается как оформления, так и существа работы. Можно указать следующие основные замечания:

- в работе указывается на высокую стабильность рабочих параметров созданных источников, но нет раздела, который бы показал метрологическую оснащенность работ, применённые методы и приборы, позволившие выполнить измерения;
- значительная часть работы (стр.1-20) посвящены неинтересному материалу из учебников, но нет глубокого анализа материала о тенденциях внедрения цифровых систем управления силовыми объектами со ссылками на российский и мировой опыт;
- в тексте незначительное количество опечаток, определений на профессиональном жаргоне, иногда приводятся параметры противоречащие друг другу (нестабильность $U_{\text{уск}}$ - не более $\pm 0.1\%$, а пульсации $U_{\text{уск}}$ - не более 0.2%);
- в диссертации приведен богатый графический материал, но очень часто отсутствует расшифровка обозначений;

Однако, указанные замечания не снижают значимости созданных уникальных систем питания и проведенных исследований. Таким образом, диссертация Сенькова Д.В. является законченным и выполненным на современном научном уровне научным исследованием.

8. Общая оценка диссертации

В целом диссертация Сенькова Д.В. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Диссертация получила практическое внедрение и прошла апробацию 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 диссертации.

Автореферат правильно и достаточно полно отражает основное содержание диссертации. Тема исследования соответствует заявленной научной специальности.

9. Заключение

В целом, диссертационная работа Сенькова Дмитрия Валентиновича «Разработка структуры и алгоритмов управления силовыми преобразователями для электрофизических установок» является квалифицированным научным трудом, в полной мере отвечающим требованиям п. 7 Положения ВАК Минобрнауки РФ о порядке присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий, а её автор – Сеньков Дмитрий Валентинович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности – «01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор, гл.н.с. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Серов Анатолий Фёдорович

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.

Тел. (383) 330-64-66, E-mail: serov@itp.nsc.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук,

<http://www.itp.nsc.ru>

Подпись Серова А.Ф. заверяю

Ученый секретарь ИТ СО РАН



П.А. Куйбин