

*На правах рукописи*

НЕМЫТОВ Петр Иванович

СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
СЕРИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ  
С МОЩНОСТЬЮ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА  
СОТНИ КИЛОВАТТ

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

НОВОСИБИРСК - 2010

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

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:

КУКСАНОВ – доктор технических наук,  
Николай Константинович Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КУПЕР – доктор технических наук,  
Эдуард Адольфович Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

ОРИШИЧ – доктор физико-математических наук,  
Анатолий Митрофанович Учреждение Российской академии наук  
Институт теоретической и прикладной  
механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

РЕМНЕВ – доктор технических наук,  
Геннадий Ефимович НИИ высоких напряжений при Томском  
политехническом университете, г. Томск.

ВЕДУЩАЯ – Учреждение Российской академии наук  
ОРГАНИЗАЦИЯ: Институт сильноточной электроники  
Сибирского отделения РАН, г. Томск.

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,  
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения  
Российской академии наук Института ядерной физики имени Г.И. Будкера  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А. В. Бурдаков

## ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Современные технологии широко используют электронные пучки, выпущенные в атмосферу для процессов: радиационной сшивки полимеров (полиэтилен, полихлорвинил, поливинилхлорид и т. д.), радиационного отверждения полимерных материалов, стимулирования или инициирования химических реакций, очистки дыма, очистки сточных вод, дезинфекции зерна. Этот список постоянно пополняется. Общее количество ускорителей электронов, установленных в технологических линиях, исчисляется сотнями. Институт ядерной физики Сибирского отделения Академии наук в нашей стране является пионером в области внедрения ускорителей электронов в промышленность.

Можно выделить следующих основных зарубежных производителей высоковольтных промышленных ускорителей электронов прямого действия в диапазоне мощностей до нескольких сотен кВт и с энергией до нескольких МэВ. Это: IBA (Бельгия) & RDI (США), Nissin High Voltage Corp. (Япония), Denki Kogyo Co., Ltd (Япония), IHI Corporation (Япония), L-3 Communications Pulsed Sciences Division (США), Vivirad (Франция), Mevex (Канада). В последние годы появилось несколько производителей промышленных ускорителей электронов в Китае. В России НИИЭФА (Санкт Петербург) также производит ускорители данного класса. Указанные фирмы – наши основные конкуренты на рынке промышленных ускорителей.

К началу наших работ мощность промышленных ускорителей зарубежного производства не превышала 100 кВт. Мощность отечественных промышленных ускорителей была около 20 кВт. Уровень систем питания и управления также отставал от зарубежных образцов. Для преодоления указанного отставания был произведен цикл работ, направленных на повышение мощности, надежности, технического уровня систем питания и управления.

В результате, несмотря на жесткую конкуренцию на рынке промышленных ускорителей Институт ядерной физики за последние 15 – 20 лет произвел и реализовал заметную часть (более ста) от общего количества ускорителей прямого действия, как в нашей стране, так и за рубежом. Параметры и характеристики ускорителей, производимых в ИЯФ, описаны в работах [1,2,3,10,16,22]. Конкурентоспособность промышленного ускорителя напрямую зависит от его надежности, удобства в эксплуатации, уровня сервиса представляемому покупателю в интерфейсе между оператором или системой управления технологической линией. Стабильность параметров, таких как энергия и ток пучка, равномерность дозы облучения под выпускным окном, должны обеспечивать высокое качество обработки изделий.

В последние годы появилась потребность в ускорителях электронов для экологических применений с мощностью выпущенного электронного пучка около 500 киловатт [11,17]. Столь большие мощности предъявляют повышенные требования к системам питания и управления ускорителем.

### **Цель диссертации**

Разработка методов расчета надежных источников питания (преобразователей частоты) для мощных высоковольтных ускорителей электронов трансформаторного типа, исходя из геометрических размеров ускорителя и принятых величин максимальной энергии тока электронного пучка.

Разработка методов и способов стабилизации основных параметров выпущенного электронного пучка (энергия, ток).

Разработка надежных и эффективных методов выпуска мощного электронного пучка в атмосферу через титановую фольгу.

Разработка программного обеспечения, позволяющего легко встроить ускоритель в любую технологическую линию для радиационной обработки широкого класса изделий.

Разработка программных и аппаратных методов непрерывной диагностики исправности высоковольтного выпрямителя и организации системы блокировок, обеспечивающих надежность ускорителя и безопасность обслуживающего персонала.

**Областью исследования** настоящей работы являются процессы в мощных преобразователях частоты для питания промышленных ускорителей электронов или каких-либо других электрофизических установок (например, индукционных печей для закалки металлов). Разработка методов, позволяющих реализовать всю систему управления и питания ускорителя на современном уровне. Автоматизированная система управления включает стабилизаторы энергии и тока электронного пучка и систему выпуска пучка в атмосферу, систему защит и блокировок.

### **Научная новизна**

1. Исследованы и разработаны способы расчета преобразователей частоты для питания мощных каскадных генераторов с индуктивной связью для питания промышленных высоковольтных ускорителей электронов. Показано, как, зная размеры ускорителя и требуемые максимальные параметры (энергия и ток электронного пучка) определить основные конструктивные параметры преобразователя.
2. Приведен метод расчета величины пульсаций напряжения высоковольтного выпрямителя, что очень важно для создания различных систем облучения, обрабатываемой продукции и оптимального использования площади окна выпускного устройства.

3. Обоснованы методы и способы стабилизации основных параметров выпущенного в атмосферу электронного пучка. Предложена и реализована конструкция малогабаритного роторного вольтметра для измерения напряжения высоковольтного выпрямителя в диапазоне напряжений от 0.1 до 2.5 МэВ и более.
4. Предложен и реализован способ автоматической центровки растра и его визуализации в окне выпускного устройства. Данный способ не имеет аналогов в мире. На основе данного метода реализован выпуск пучка в атмосферу с поворотом пучка на  $90^\circ$ . Это позволило исключить влияние остаточного намагничивания в железе поворотного магнита и его гистерезиса на траекторию пучка в поворотном устройстве.
5. Исследованы способы организации выпуска пучка через два параллельно расположенных выпускных окон. Данные методы успешно использованы также в системе 4-стороннего облучения кабельных или трубчатых изделий.
6. Разработана конструкция и схемная реализация оригинальной микропроцессорной многоканальной специализированной управляющей станции. Для этой станции разработано программное обеспечение, которое совместно со станцией может быть использовано и для других применений.

**Теоретическая ценность работы** состоит в том, что были обоснованы методы расчета мощных транзисторных преобразователей частоты для питания промышленных ускорителей электронов. Показано, как рассчитать цепь компенсации реактивной мощности в первичной обмотке высоковольтного трансформатора.

Для систем выпуска электронного пучка в атмосферу через две параллельно расположенные титановые фольги обоснованы методы и способы переброса пучка с одной фольги на другую, учитывающие скин-эффект в стенках вакуумной камеры.

#### **Практическая ценность**

Данные разработки способствовали поставке более чем 100 промышленных ускорителей электронов в Японию, Польшу, Германию, Китай, Южную Корею, Индию, Малайзию, Сингапур, Турцию. Несколько ускорителей также были поставлены для российских компаний.

Разработки, исследования и предложения автора были использованы при повышении мощности ускорителей типа ЭЛВ до 100 – 500 киловатт.

#### **На защиту выносятся следующие результаты:**

1. На основе проведенных исследований и анализа разработан метод расчета мощных транзисторных преобразователей частоты для питания ускорителей электронов трансформаторного типа с выходной частотой

400 – 1000 герц и мощностью до 500 и более киловатт. Данная разработка позволила реализовать источник питания для ускорителя ЭЛВ-12 [13,21] с мощностью выпущенного электронного пучка 400 киловатт. В лабораторных испытаниях ускоритель успешно работал с мощностью выпущенного пучка до 500 киловатт.

2. Показан метод параллельной работы транзисторных инверторных модулей и организации 2-фазного питания для ускорителей с двумя включенными параллельно высоковольтными выпрямителями [21]. Данный способ позволяет снизить пульсации высокого напряжения в 8 раз по сравнению с питанием от однофазного источника. Это означает, что разброс энергии электронов снизится соответственно.
3. Разработанные методы расчета величины пульсаций напряжения высоковольтного выпрямителя, используют компьютерное моделирование схемы высоковольтного выпрямителя. Уровень пульсаций был проверен экспериментальными методами и результаты расчетов хорошо совпали с измеренными экспериментально данными. Предложена и реализована система двухфазного питания мощных ускорителей электронов.
4. Показан метод оценки коэффициента полезного действия ускорителя.
5. Разработанные системы управления ускорителем, включающие стабилизаторы энергии и тока электронного пучка. Автоматизация системы управления осуществлена на основе оригинальной микропроцессорной станции. Данная станция производится также в Республике Корея для совместно производимых ускорителей.
6. Разработанная система выпуска мощного электронного пучка через титановую фольгу со сканированием пучка по фольге в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Разработка системы выпуска пучка через два параллельно расположенных выпускных окна. Разработана система переброса пучка с одной фольги на другую с учетом толщины скин-слоя стенок вакуумной камеры. Разработка и создание системы центровки раstra в окне выпускного окна, не имеющая аналогов в мире.
7. Создание комплекса программного обеспечения для управления ускорителем и его сопряжения с технологическим оборудованием (транспортные линии, системы 2-стороннего и 4-стороннего облучения).

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на 5, 6, 7, 8, 9, 10 11-ой Всесоюзных (международных) совещаниях по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве (Ленинград (Санкт-Петербург), 1985, 1988, 1992, 1995, 1998, 2001, 2005 годы); X Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1986); IV Международной конференции по применению изотопов и радиационных процессов в

промышленности (Лейпциг, 1988); 1-ом Советско-Индийском семинаре по промышленному применению ускорителей электронов (Бомбей, 1988); 13-ой Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий (Новосибирск, 1987); Европейской конференции (EPAC, Рим, 1988); Конференциях RUPAC (2004, 2006, 2008 годы); VII Международной конференции EBТ-2000; IV Международной научной конференции “Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах” (2004); Симпозиуме по мощным пучкам и обработке материалов (Мумбай, Индия, 2006); XVIII Международном семинаре по ускорителям заряженных частиц (2003, Алушта, Крым); Международном симпозиуме по бор-нейтрон захватной терапии (2004, Новосибирск); Международной конференции по радиационным процессам (IMRP2006, Малайзия); APAC-2007 (Индия); Семинарах ускорительных лабораторий ИЯФ СО РАН.

### **Публикации**

Список основных научных работ, представляющих важнейшие результаты диссертации, составляет 24 наименования, из них 11 в рецензируемых изданиях.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 61 наименование. Объем диссертации составляет 231 страницы, в том числе 80 рисунков и 7 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** содержится изложение проблем создания систем управления и питания промышленных ускорителей электронов, сформулированы цели диссертации, обосновывается их актуальность, схематично изложено распределение материала по главам. Приведен краткий обзор параметров мировых производителей промышленных ускорителей на этапе начала настоящих работ (начало 70-х годов) и показано место ускорителей типа ЭЛВ Института ядерной физики. Из обзора видно, что в то время наши ускорители заметно уступали лучшим мировым образцам по энергии электронов и мощности пучка. В настоящее время, благодаря разработкам ИЯФ наши ускорители не уступают мировым в своем диапазоне энергий.

**В главе 1** описывается конструкция ускорителя ЭЛВ и формулируются требования к параметрам систем питания и управления, выбираются способы их стабилизации и регулирования.

В разделе 1.1 сформулированы основные требования, предъявляемые к системам управления и питания промышленных ускорителей электронов.

В разделе 1.2 приведен состав серии высоковольтных ускорителей электронов типа ЭЛВ, указаны их параметры и предложена функциональная схема систем питания и управления (рис. 1).

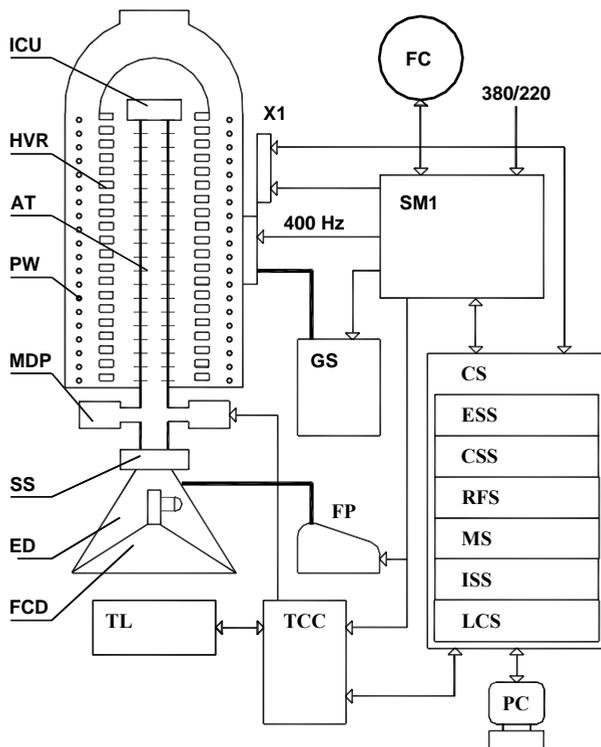


Рисунок 1. Функциональная схема ускорителя ЭЛВ и его связи с системами питания и управления. В баке, заполненном изолирующим газом, расположены первичная обмотка – PW, колонна высоковольтного выпрямителя – HVR, ускорительная трубка – AT, источник питания накала – ICU, вакуумная система – ED. Откачка вакуумной системы производится двумя магнеторазрядными насосами – MDP. Снаружи вакуумной системы расположены электромагниты системы формирования раstra – SS. Фольга выпускного окна охлаждается вентилятором обдува – FCD. Напряжение повышенной частоты для питания первичной обмотки вырабатывается преобразователем частоты – FC. Силовой шкаф – SM1 распределяет входное напряжение по системам и обеспечивает их включение или выключение. Система управления, диагностики и стабилизации – CS включает: модули системы стабилизации энергии ускоренных электронов – ESS; модули системы стабилизации тока пучка – CSS; модули системы формирования раstra на фольге выпускного окна – RFS; модули измерительной системы – MS; модули системы блокировок – ISS; специализированная управляющая станция – LCS; управляющий компьютер – PC. GS – газовая система, FP – форвакуумный насос, TCC – модули управления транспортной линией, TL – транспортная линия.

Все указанные на схеме элементы связаны в единое целое комплексной системой управления и питания, обеспечивающей полную автоматизацию ускорительного комплекса для радиационной обработки тех или других изделий. Для всех элементов схемы были разработаны, управляемые источники напряжения (тока), обеспечивающие требуемые параметры и требуемую точность.

В разделе 1.3 рассмотрены варианты компоновки ускорителя (один высоковольтный выпрямитель, либо два, соединенных параллельно).

В разделе 1.4 рассмотрены схемы выпрямления, применяемые в ускорителях типа ЭЛВ.

В разделе 1.5 предлагается линейная схема замещения высоковольтного трансформатора, учитывающая схему компенсации реактивной мощности и большую индуктивность рассеяния.

**В главе 2** проведен анализ системы силового питания ускорителя и сформулированы требования к этой системе.

В разделе 2.1 кратко рассматриваются преобразователи частоты на основе электромашинного преобразователя, формулируются основные недостатки преобразователей такого типа. Предлагается система бесконтактного управления силовыми цепями, включающая схему плавного разгона мощных (сотни киловатт) 3-фазных асинхронных электродвигателей, которая позволяет в несколько раз понизить пусковой ток двигателя и уменьшить механические нагрузки на его элементы. Программная реализация алгоритма разгона позволяет, не меняя аппаратуру, разгонять и включать любой 3-фазный асинхронный электродвигатель с минимальными перегрузками питающей сети. Так, для преобразователя частоты типа ВПЛ-200, двигатель которого при прямом пуске потребляет из сети ток до 4 кА, разработанная система разгона позволяет понизить пусковой ток до 700 – 800 А.

Обосновывается выбор схемы преобразователя частоты на базе мощных транзисторных полумостов.

В разделе 2.2 предлагается схема преобразователя частоты на базе мощных IGBT транзисторных полумостов, выполненная по классической мостовой схеме инвертора напряжения [6,9]. Регулирование выходного напряжения осуществляется методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Описан разработанный ШИМ-контроллер с 100% диапазоном регулирования фазы. Произведена оценка максимальной мощности инверторного модуля, зависящая от максимального тока используемых транзисторов.

В разделах 2.3, 2.4 показан метод расчета индуктивностей рассеяния и намагничивания высоковольтного трансформатора.

В разделе 2.5 показаны расчетные линейная и нелинейная схемы замещения высоковольтного выпрямителя. Показано, что для выпрямителя с активно-емкостной нагрузкой, напряжение на вторичной обмотке трансформатора с большой индуктивностью рассеяния имеет форму,

близкую к прямоугольной, несмотря на то, что первичная обмотка питается синусоидальным напряжением.

В разделах 2.6, 2.7 производится анализ амплитудно-частотных и фазовых характеристик линейной схемы замещения (Рис. 2).

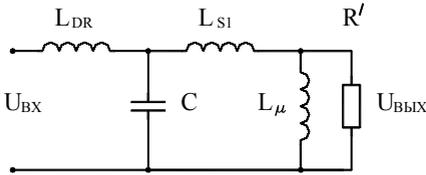


Рисунок 2. Упрощенная линейная схема замещения высоковольтного трансформатора:  $U_{ВХ}$  – входное синусоидальное напряжение (напряжение первой гармоники входного прямоугольного напряжения от преобразователя частоты);  $L_{DR}$  – индуктивность в схеме компенсации реактивной мощности;  $C$  – емкость в схеме компенсации реактивной мощности;  $L_{S1}$  – индуктивность рассеяния высоковольтного трансформатора;  $L_{\mu}$  – индуктивность намагничения высоковольтного трансформатора;  $R'$  – сопротивление нагрузки, проведенное к индуктивности намагничения.

Аналитические выражения, описывающие данную схему, достаточно громоздки, и мы не будем их здесь приводить. Целью анализа являлось нахождение величин  $L_{DR}$  и  $C$ , которые при заданной частоте обеспечивают коэффициент мощности на входе схемы равный единице. При этом для максимальной мощности ток, отбираемый от преобразователя частоты, будет минимально возможным. Полученные уравнения могут быть решены численными методами.

На рис. 3 схематически показаны формы амплитудно-частотных и фазовых характеристик данной схемы.

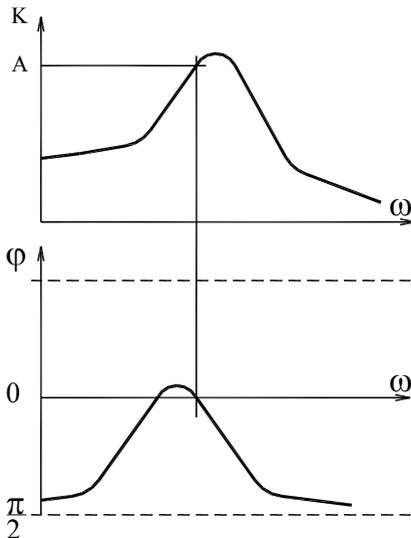


Рисунок 3. Амплитудно-частотные и фазовые характеристики линейной схемы замещения. Верхний график показывает значение модуля коэффициента передачи схемы ( $K$ ) в зависимости от частоты, на нижнем графике показана фаза входного тока.

Значение коэффициента передачи, равное  $A$ , соответствует максимальному напряжению на первичной обмотке в/в трансформатора, которое выше входного напряжения схемы. Для данного коэффициента передачи необходимо обеспечить нулевое значение фазы входного тока. В работе показан метод, как пользуясь программами моделирования линейных схем подобрать искомые

значения индуктивностей и емкостей, удовлетворяющих поставленным условиям.

В разделе 2.8 показано как, решить данную задачу графически методом векторных диаграмм.

В разделе 2.9 обсуждается конструкция инверторного модуля, обосновывается плоскопараллельная ошиновка силовых цепей, произведена оценка минимального значения емкости на стороне постоянного напряжения.

В разделе 2.10 оценивается к.п.д. ускорителя. При питании ускорителя от транзисторного преобразователя частоты к.п.д. составляет около 87%. При работе с электромеханическим преобразователем к.п.д. близок к 65%. Можно сказать, что транзисторный преобразователь более экономичен.

Раздел 2.11 посвящен сложению мощности инверторных модулей и организации 2-фазного питания ускорителя [13]. Данная разработка позволила реализовать транзисторный преобразователь частоты мощностью 500 – 600 кВт для питания ускорителя ЭЛВ-12.

Раздел 2.12 посвящен теоретическому и экспериментальному исследованию пульсаций напряжения в/в выпрямителя. Проанализированы источники пульсаций. Исследован источник пульсаций, связанный с неоднородностью распределения напряжения по длине колонны в/в выпрямителя в последовательно-параллельной схеме выпрямления. В этой схеме фильтрующие конденсаторы секций в 2-х соседних полупериода заряжаются от разных соседних катушек. Так как напряжения на катушках отличаются (см. рис. 4), возникают пульсации с частотой питающего напряжения.

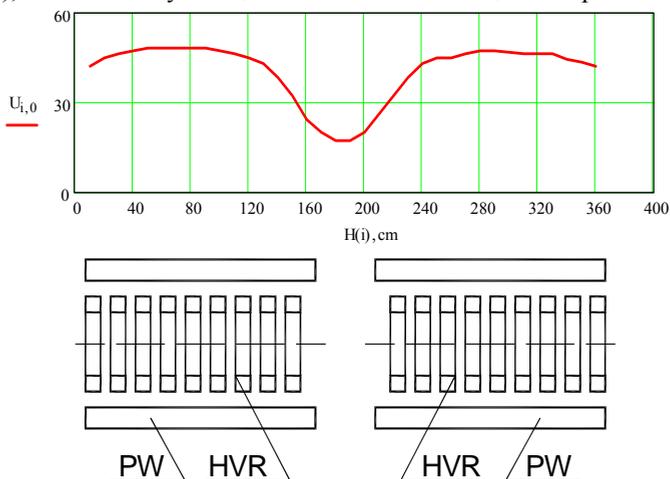


Рисунок 4. Распределение напряжения по секциям высоковольтного выпрямителя ускорителя ЭЛВ-12, снятое экспериментально. Горизонтальная ось – высота выпрямителя в см, вертикальная ось – напряжение измерительной катушки. На первичные обмотки (PW) подано переменное напряжение. Колонны в/в выпрямителя (HVR) удалены из первичных обмоток.

Под нагрузкой распределение напряжения по колонне меняется, так как в этом случае поток, пронизывающий секции выпрямителя, складывается из потока первичной обмотки и противоположно направленного потока вторичных обмоток. Численными методами кривая распределения напряжения по секциям была скорректирована для работы под нагрузкой. Это дало возможность определить величину пульсаций связанных с неравномерностью распределения напряжения.

Таблица 1

	$\Delta U/U$ выпрям.	$\Delta U/U$ 300 Гц	$\Delta U/U$ неравномерность	$\Delta U/U$ сумма
ЭЛВ-8, 2.5 МэВ, 100 кВт	$\pm 1.7\%$	$\pm 0.8\%$	–	$\pm 2.5\%$
ЭЛВ-8, 1.0 МэВ, 50 кВт	$\pm 4.3\%$	$\pm 0.7\%$	–	$\pm 5.0\%$
ЭЛВ-12, 0.9 МэВ, 400 кВт (однофазный режим)	$\pm 7.2\%$	$\pm 0.8\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 8.5\%$
ЭЛВ-12, 0.9 МэВ, 400 кВт (двухфазный режим)	$\pm 0.9\%$	$\pm 0.8\%$	$\pm 0.7\%$	$\pm 2.4\%$

Таблица 1 показывает величины пульсаций высокого напряжения, связанные с различными источниками для ускорителя ЭЛВ-8 и ускорителя ЭЛВ-12.  $\Delta U/U$  выпрямителя – пульсации, определяемые схемой выпрямления и величиной нагрузки;  $\Delta U/U$  300 Гц – пульсации, определяемые сетевым 3-фазным выпрямителем;  $\Delta U/U$  неравномерность – пульсации, связанные с неоднородностью распределения по колонне в последовательно параллельной схеме. В последнем столбце показаны суммарные величины пульсаций. Видно, что применение 2-фазного питания позволило существенно снизить пульсации высокого напряжения, что позволило в ускорителе ЭЛВ-12 успешно выпускать в атмосферу пучки электронов с суммарной мощностью 400 – 500 кВт. Результаты расчетов были проверены с помощью емкостного датчика и по углу отклонения пучка в поле отклоняющих магнитов. Экспериментальные и расчетные данные показали хорошее совпадение.

**В главе 3** рассмотрены системы стабилизации энергии и тока электронного пучка [14,18,19].

В разделе 3.1 сформулированы требования к точности и диапазону регулирования стабилизатора выходного напряжения в/в выпрямителя. Показано, что с учетом подсадки напряжения под нагрузкой невозможно реализовать стабилизатор, не охваченный обратной связью. Это означает, что необходимо иметь независимый измеритель величины высокого напряжения.

В разделе 3.2 рассматриваются резистивные делители высокого напряжения, отмечаются их достоинства и недостатки.

В разделах 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 рассматривается разработанный, малогабаритный роторный вольтметр [12,15]. Произведена оценка его точности в зависимости от температуры и скорости вращения крыльчатки (рис. 5).

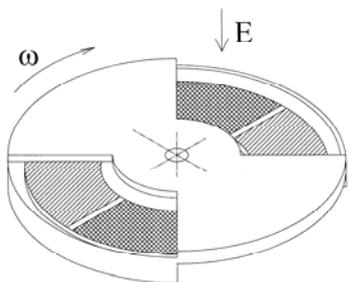


Рисунок 5. Роторный вольтметр. Заземленная металлическая крыльчатка вращается с угловой частотой  $\omega$ , открывая и закрывая (экранируя) от электрического поля ( $E$ ) две неподвижных измерительных пластины. Величина напряженности электрического поля в высоковольтном зазоре в/в выпрямителя пропорциональна величине высокого напряжения. Ток измерительных пластин пропорционален величине  $E$ . Таким образом, измеряя ток пластин, мы можем определить значение высокого напряжения.

Роторный вольтметр реализован на основе прямо приводного двигателя, применяемого в винчестерских дисках или видеомагнитофонах.

Применение такого двигателя позволило разработать вольтметр с весьма малыми размерами. При наружном диаметре около 100 мм, его высота составляет всего 40 мм. Малые габариты облегчают установку роторного вольтметра в ускоритель или в какую-либо другую высоковольтную установку.

Несмотря на конструктивную простоту, описанный роторный вольтметр позволяет надежно измерять выходное напряжение высоковольтного выпрямителя ускорителей ЭЛВ с точностью не хуже 1%.

В разделе 3.7 рассматривается система стабилизации и регулирования выходного напряжения в/в выпрямителя. Сложность построения данного стабилизатора обусловлена тем, что, во-первых, сопротивление нагрузки меняется в широких пределах и, во-вторых, времена нарастания и спада напряжения при регулировании различны и зависят от нагрузки. Так, для ускорителя ЭЛВ-8 приведенное к индуктивности намагничивания сопротивление нагрузки меняется от 0.09 до 5.8 Ом в рабочем диапазоне энергии и мощности электронного пучка. Изменение времен нарастания и спада напряжения в зависимости от энергии и мощности пучка показано в таблице 2.

Таблице 2

Энергия, МэВ	Мощность, кВт	Время нарастания, мсек	Время спада, мсек
2.5	5.0	100.0	1000.0
2.5	105.0	30.0	40.0
1.0	53.0	10.0	20.0
1.0	3.0	80.0	400.0

Значения времен нарастания и спада напряжения получены методами компьютерного моделирования. На схему замещения высоковольтного выпрямителя подавался прямоугольный импульс напряжения. Из таблицы

видно, что время нарастания напряжения изменяется в 10 раз, а время спада – в 50 раз в зависимости от энергии и тока пучка.

Несмотря на указанные трудности, были получены аналитические выражения для расчета устойчивости и качества переходных процессов в этой системе, предложены программные и аппаратные средства, позволяющие обеспечить необходимую стабильность энергии для всех ускорителей серии ЭЛВ. Практически, можно утверждать, что точность стабилизации энергии не хуже 1%, и в основном определяется точностью измерения. Если возникнет необходимость, точность стабилизации может быть повышена с помощью использования прецизионных резистивных измерительных делителей высокого напряжения.

В разделе 3.8 формулируются требования к системе стабилизации тока пучка. В настоящее время ток пучка во всех ускорителях серии ЭЛВ управляется изменением напряжения накала. Данный метод позволяет увеличить срок жизни катода, так как он работает с минимально необходимым напряжением накала и электронно-оптические характеристики ускоряющей трубки меньше зависят от приложенного напряжения по сравнению с регулированием тока эмиссии с помощью изменения напряжения на первом аноде (режим 3/2-х).

При построении стабилизатора тока пучка возникают следующие проблемы:

1. Необходимо спроектировать управляемый источник питания накала, гальванически развязанный от «земли» на полное напряжение в/в выпрямителя и работоспособный в широком диапазоне энергий;

2. Необходимо передавать управляющие и измерительные сигналы под высокое напряжение, т. е. иметь по этим цепям гальваническую развязку на полное напряжение высоковольтного выпрямителя;

3. Необходимо обеспечить устойчивость, существенно нелинейной, системы регулирования и приемлемое качество переходных процессов.

В разделе 3.9 показаны методы построения управляемых источников питания накала, в которых входное напряжение изменяется в 3 – 4 раза, и описаны способы передачи управляющих сигналов под полное напряжение в/в выпрямителя. Приведены результаты экспериментального исследования динамических свойств катода, на этой основе разработан аппаратно-программный способ реализации стабилизатора, устойчивого как для малых, так и больших возмущений. Обеспечена точность стабилизации тока пучка лучше, чем 1% во всем рабочем диапазоне энергий и токов пучка.

Отметим, что во многом высокое качество систем регулирования и стабилизации энергии и тока электронного пучка позволяет нам сохранить свое присутствие, на китайском рынке, не смотря на то, что китайская промышленность начала производить собственные промышленные ускорители.

**В главе 4** рассматривается система формирования раstra электронного пучка на фольге выпускного устройства [20]. Эта система в решающей степени определяет максимальный ток пучка, срок непрерывной безаварийной работы ускорителя. Как правило, оператор ускорителя (технологической установки) не обладает достаточными знаниями и навыками (иногда это просто невозможно) для ручной установки токов разверток, линз, коррекций. Следовательно, эти параметры должны устанавливаться автоматически.

Автором разработаны программные и аппаратные модули для управления этой системой.

Предложен и реализован способ автоматической центровки раstra в окне выпускного устройства, не имеющий аналогов в мире.

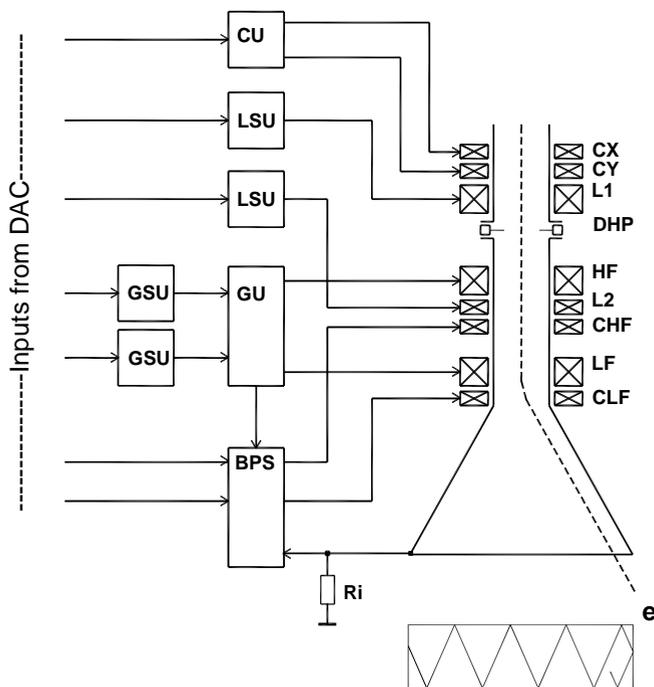


Рисунок 6. Схема выпуска пучка в атмосферу через окно, закрытое титановой фольгой. На схеме: CX, CY, CHF, CLF – корректирующие электромагниты; L1, L2 – линзы; HF, LF – отклоняющие электромагниты, сканирующие пучок вдоль и поперек фольги; CU, LSU, GU, GSU, BPS – источники питания электромагнитов. Все источники управляются сигналами от ЦАП-ов (DAC). Особенностью описываемого устройства является то, что корпус вакуумной камеры изолирован от земли изолятором, в котором установлена диафрагма. Соединение с землей осуществляется через измерительный резистор  $R_i$ , позволяющий измерять токооседание на стенку выпускного устройства.

В разделе 4.1 формулируются требования к системе формирования раstra (рис. 6).

Система должна обеспечивать:

1. Одинаковую дозу, получаемую облучаемым материалом, по всей длине выпускного окна;
2. Равномерную тепловую загрузку фольги;
3. Автоматическую перестройку токов сканирующих электромагнитов и линз в зависимости от энергии электронного пучка;
4. Автоматическую центровку раstra по окну выпускного устройства;
5. Безаварийное отключение ускорителя при возникновении любых неполадок в системе выпуска пучка.

В разделе 4.2 описывается блок генераторов, снабжающий отклоняющие электромагниты (LF, HF) токами треугольной формы.

В разделе 4.3 описаны источники питания блока генераторов (GSU), представлено выражение, позволяющее задать выходное напряжение этих источников для любой энергии.

В разделах 4.4, 4.5 описывается способ формирования поперечного размера пучка на фольге с помощью линз L1, L2 и источники питания линз.

В разделе 4.6 предложен метод определения положения раstra на фольге с помощью анализа токооседания на стенки вакуумной камеры выпускного устройства. Данный способ позволяет определять положение раstra, не используя какие-либо датчики.

В разделе 4.7 (рис. 7) показано, как практически реализовать метод, предложенный в разделе 4.6. Визуализация положения раstra на фольге чрезвычайно удобна, как при наладке ускорителя, так и при его эксплуатации. Отметим, что при работе с большими токами пучка совершенно недопустимо выкидывать пучок на стенки выпускного устройства. Пучок может прожечь стенку выпускного устройства, вакуум будет нарушен и это потребует достаточно серьезных работ для восстановления работоспособности ускорителя.

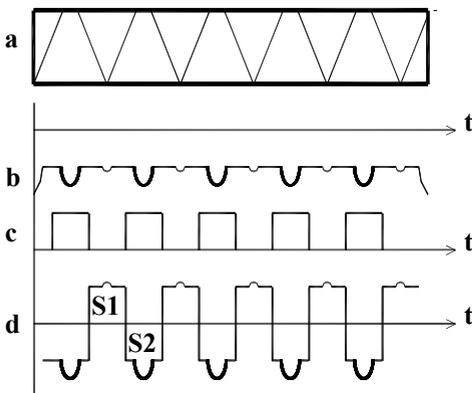
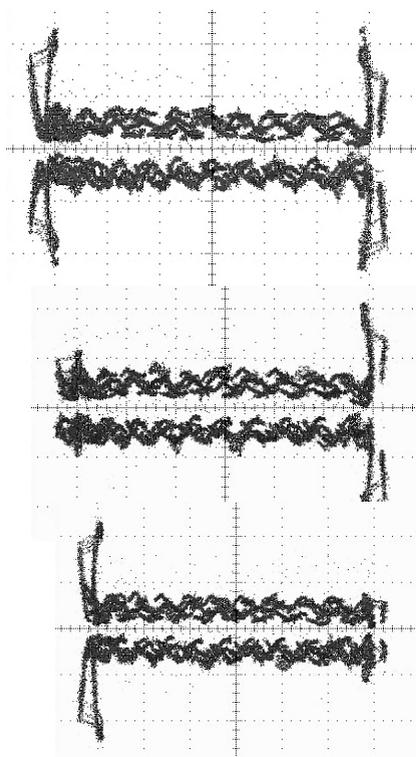


Рисунок 7. Диаграммы, поясняющие работу стабилизатора положения пучка. Канал – HF. Эюра 7а – траектория пучка на фольге выводного окна, повторяющая форму тока отклоняющего электромагнита HF (в направлении поперек фольги). Эюра 7б – ток, регистрируемый измерительным резистором Ri (ток оседания), соответствующий этой траектории (см. рис. 6). Постоянную составляющую в этом токе создают отраженные электроны. В моменты времени, когда ток в отклоняющих электромагнитах максимален, пучок

начинает касаться стенок выводного устройства своим ореолом. Эпюра 7в – сигнал, переключающий знак коэффициента передачи входного усилителя, измеряющего ток измерительного резистора. Эпюра 7г показывает измеренный сигнал токооседания после схемы переключения полярности входного сигнала. Схема в автоматическом режиме работает следующим образом. Если растр в поперечном направлении окна отцентрирован правильно, то площади фигур "S1" и "S2" будут равны. Смещение растра вверх (рис. 4.7а) увеличивает положительные импульсы и уменьшает отрицательные. Смещение растра вниз приводит к противоположному результату. Если проинтегрировать полученный сигнал, усилить его и подать в нужной полярности (так чтобы обратная связь была отрицательной) на обмотку корректирующей катушки (CHF), система стабилизации будет стремиться удерживать интеграл равным нулю, тем самым, стабилизируя положение растра по этой координате.

Схема центровки растра в направлении вдоль длины выпускного окна несколько сложнее, однако, ее принцип действия такой же.

Ниже показаны осциллограммы, которые наглядно показывают положение растра на фольге выпускного окна и позволяют оперативно управлять токами корректирующих магнитов, как в ручном режиме, так и автоматически.

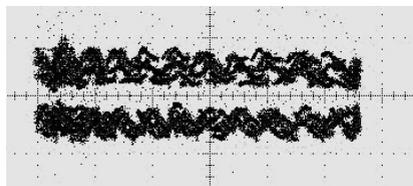
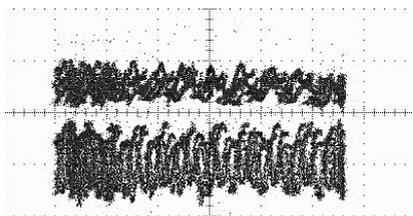
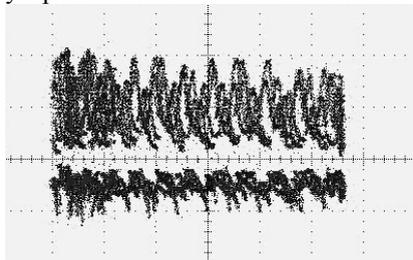


Ток развертки НЧ велик. Растр отцентрирован, но касается обеих коротких стенок выпускного устройства. Оператор должен изменить (уменьшить) масштабные коэффициенты, задающие в программе выходное напряжение блока питания низкочастотной развертки и запомнить их значения в файле конфигурации.

Пучок касается одной из коротких стенок выпускного устройства. В режиме стабилизации положения растра блок СПП (стабилизатор положения растра) обязан изменить ток в обмотке коррекции так, чтобы картинка на экране осциллографа стала симметричной. Если этого не происходит, то это сигнализирует о неисправности в электронике СПП или неисправности корректирующих катушек. В режиме управления положением растра оператор должен вручную изменить ток корректирующего электромагнита.

Ситуация аналогична предыдущей,

но пучок касается короткой противоположной стенки выпускного устройства.



Пучок касается одной из длинных стенок выпускного устройства. Необходимо либо автоматически, либо вручную в зависимости от режима работы СПП изменить ток корректирующего электромагнита, смещающего растр в направлении поперек фольги.

Ситуация аналогична предыдущей, но пучок касается длинной противоположной стенки выпускного устройства.

Растр отцентрован относительно фольги выпускного устройства.

Описанная возможность визуализации положения раstra особенно удобна при настройке ускорителя, так как позволяет быстро и легко настроить систему формирования раstra. Например, при настройке тока развертки НЧ достаточно при малом токе пучка коснуться пучком коротких стенок пучка, так чтобы были видны выбросы справа и слева осциллограммы, отцентровать растр и, уменьшая ток в обмотках корректирующего в направлении длины выпускного устройства электромагнита добиться пропадания выбросов. Аналогичная операция производится и для центровки раstra относительно ширины фольги.

Данное устройство позволяет увидеть неточности юстировки отклоняющих электромагнитов, так как осциллограмма будет несимметричной относительно нулевой линии. В этом случае можно, поворачивая электромагниты и наблюдая осциллограмму добиться симметричной картинки. Хорошо наблюдаются возможные искажения формы раstra типа «сабля» или «бочка». Методы борьбы с искажениями таких типов выходят за рамки данной работы.

В разделе 4.8 описывается выпускное устройство с поворотом пучка на  $90^\circ$ , в котором метод автоматической центровки раstra позволил исключить влияние гистерезиса в железе поворотного магнита на траекторию пучка.

В разделе 4.9 рассмотрена система выпуска пучка через два параллельно расположенных выпускных окна [5].

Применение радиационных технологий в крупномасштабных промышленных производствах (очистка отходящих газов ТЭЦ или металлургических производств; обработка сточных вод и др.) требует увеличения единичной мощности промышленных ускорителей электронов до уровня сотен киловатт.

Оптимальная энергия электронного пучка для большинства этих применений лежит в диапазоне 0.7 – 1.5 МэВ. Поэтому для достижения необходимой мощности требуется выводить в атмосферу электронные пучки с токами в сотни миллиампер. Максимальный средний ток пучка, обеспечивающий длительную безаварийную работу выпускного устройства при выводе пучка через окно из 50 мкм титановой фольги, составляет примерно 100 мкА/см<sup>2</sup>. Максимальная величина выпускаемого тока ограничена нагревом фольги, вызванным потерями энергии в фольге, и условиями ее охлаждения. Ширина окна выпускного устройства ограничена механической прочностью фольги. Давление атмосферного воздуха создает нагрузку на фольгу. Величина нагрузки не должна превышать предела прочности фольги при заданной температуре и при заданном радиусе изгиба фольги. В ускорителях ЭЛВ ширина выпускного окна принята равной 70 мм, что близко к оптимальной. Примерно такую же ширину используют все основные производители промышленных ускорителей электронов, как у нас в стране, так и за рубежом. Таким образом, на каждые 100 мА выпущенного тока (это соответствует 100 кВт в пучке, при энергии 1 МэВ) требуется окно длиной 150 см. Именно такая длина выпускного окна и такой максимальный ток пучка приняты в серийных ускорителях ЭЛВ мощностью до 100 кВт.

Для увеличения в несколько раз мощности ускорителя требуется пропорциональное увеличение тока пучка, и, следовательно, площади фольги. Простое увеличение длины фольги приводит к увеличению габаритных размеров выпускного устройства, а, следовательно, и всего ускорителя. Кроме того, увеличение длины выпускного окна существенно усложняет конструкцию и увеличивает вес выпускного устройства.

Для преодоления указанных проблем было разработано двухоконное выпускное устройство, в котором две фольги расположены параллельно. Применение двух фольг позволило увеличить площадь выпускного окна вдвое без существенного изменения габаритов всего выпускного устройства.

Несмотря на то, что на рисунке 8 изображено геометрическое расположение двух фольг, мы можем перейти во временные координаты, если учесть, что от одного края фольги до другого пучок пробегает за время определяемое частотой низкочастотной развертки (около 10 мсек).

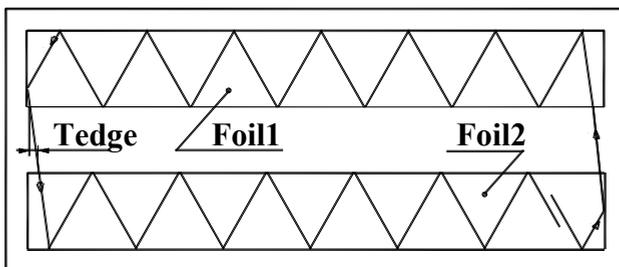


Рисунок 8. Траектория движения пучка по фольгам в двухоконном выпускном устройстве. Foil1, Foil2 – фольги. Tedge – время переброса пучка.

Рис. 8 показывает траекторию движения пучка. Как видно из рисунка, пучок пробегает по одной фольге и у торца выпускного устройства перекидывается на вторую, то есть, момент переброса пучка должен быть синхронизирован с фазой пилообразного тока продольной развертки. Сканирование по каждой фольге осуществляется стандартными для ускорителей ЭЛВ отклоняющими системами. Для обеспечения поочередного движения пучка по каждой из фольг необходимо к полю, создаваемому отклоняющими электромагнитами для поперечного сканирования пучка, добавить знакопеременное поле, постоянное в течение полупериода сканирования вдоль окна. Это поле создается дополнительным переключающим электромагнитом.

Пробежав по фольге 1 (Foil1), пучок перекидывается на фольгу 2 (Foil2). Потери пучка при перекидывании с одной фольги на другую пропорциональны времени перекидывания (Tedge). Необходимо также отметить, что потери пучка приводят к нагреву выпускного устройства. Таким образом, схема перекидывания пучка должна обеспечивать минимально необходимое время переброса пучка с одной фольги на другую.

При проектировании блока переброса было применено следующее схемное решение:

- организован резонансный LC контур, который и определяет время фронта смены направления тока в обмотке магнита. Контур работает в резонансном режиме только в моменты переключения транзисторного моста (смены направления тока в нагрузке). В этом контуре L – это индуктивность обмотки магнита, а C – емкость, установленная параллельно питанию транзисторного моста. На рис. 9 это конденсатор C1.

Обмотка переключающего электромагнита с индуктивностью L и активным сопротивлением R1 включена в диагональ транзисторного моста VT1...VT4, выполненного на IGBT транзисторах с встроенными обратными диодами. Мост питается от регулируемого источника постоянного напряжения (0 – 15 В) +U. С помощью шунта R3 измеряется сигнал

пропорциональный среднему току переключающего магнита и подается на вход схемы стабилизации тока. Транзисторы мостовой схемы переключаются синхронно с током электромагнита, сканирующим пучок вдоль фольги. Импульсы синхронизации поступают из блока генераторов (ГУ).

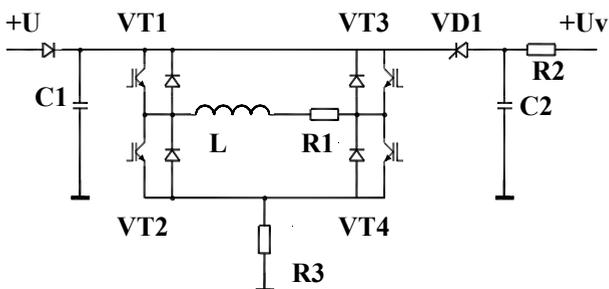


Рисунок 9. Упрощенная принципиальная схема коммутатора, питающего обмотку переключивающего магнита.

На рис. 10. показаны формы сигналов в схеме коммутатора. Поясним принцип работы данной схемы. Допустим, что к моменту переключения направления тока были включены транзисторы VT1 и VT4. Ток от источ-

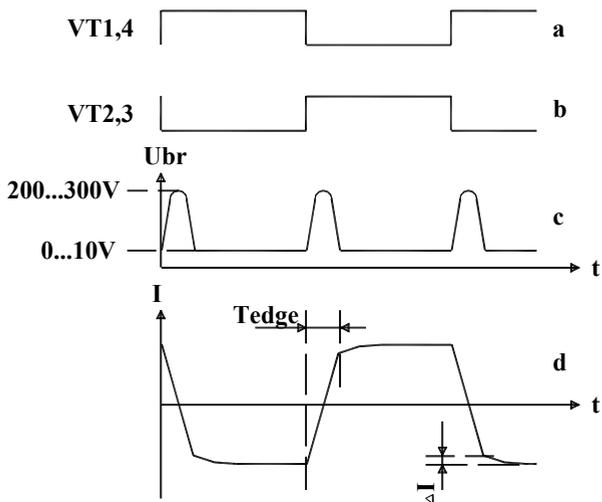


Рисунок 10. Графики (a, b) показывают управляющее напряжение на затворах транзисторов. Положительный импульс означает, что транзисторы включены. График (c) показывает форму выброса напряжения на конденсаторе C1. График (d) показывает форму тока в обмотке переключающего магнита.

ника  $+U$  протекает через указанные транзисторы и обмотку перекидывающего магнита. В обмотке перекидывающего магнита запасена энергия  $L \cdot I^2/2$ . Открываются обратные диоды, включенные параллельно транзисторам VT2, VT3 и ток начинает течь к источнику питания. Диод на выходе источника  $+U$  закрывается, и ток перекидывающего магнита начинает заряжать конденсатор C1. К моменту времени, когда ток в обмотке упадет до нуля, напряжение на конденсаторе будет максимальным. Далее, энергия, запасенная в конденсаторе C1, будет форсировано увеличивать ток обмотки в обратном направлении через транзисторы VT2, VT3. Если задаться максимальным значением напряжения выброса, можно определить значение емкости конденсатора C1 и время фронта переполюсовки тока в обмотке перекидывающего магнита. Действительно,  $L \cdot I^2/2 = C \cdot U^2/2$ . Задавшись максимальным напряжением выброса можно определить значение емкости конденсатора C1. Потерями энергии в активном сопротивлении обмотки магнита и подводящих проводах можно пренебречь. Далее, резонансная частота контура, образованного индуктивностью обмотки перекидывающего

магнита и емкостью конденсатора C1 будет равна  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC1} - \frac{R1}{4L^2}}$ .

Отсюда время фронта смены полярности тока будет равно  $T_{edge} = \frac{\pi}{\omega}$ .

Если бы потери энергии отсутствовали, то после смены полярности в обмотке магнита установился бы ток, абсолютная величина которого равна току до момента переключения. Потери приводят к тому, что ток установится на меньшем уровне. После этого, ток будет возрастать по экспоненциальному закону с постоянной времени  $L/R1$ . Для компенсации потерь в схему введен дополнительный источник  $+Uv$ , который заряжает конденсатор C2 через зарядный резистор R2. Величина запасенной в конденсаторе энергии должна быть равна потерям энергии. Одновременно с началом смены полярности специальная ключевая схема, условно показанная как тиристор VD1, передает заряд из конденсатора C2 в конденсатор C1. Назовем данную схему схемой вольтдобавки. Таким образом, можно возместить потери и сделать полку импульса тока практически прямой. Отметим, что если активные потери пропорциональны току магнита и напряжение дополнительного источника может задаваться линейно с неким коэффициентом ЦАП-ом, определяющим ток магнита, то потери на перемагничивание сердечника магнита и потери связанные с вихревыми токами в стенках выпускного устройства зависят от производной (скорости изменения тока). Ток магнита полностью определяется энергией электронов, а так как для данных применений диапазон перестройки энергии мал, то нелинейностью от влияния потерь связанных со скоростью изменения поля (тока магнита) можно пренебречь и считать, что напряжение вольтдобавки линейно зависит от тока магнита.

Время нарастания поля после смены полярности тока внутри вакуумной камеры оценивалось численными методами. Расчет проводился в предположении, что снаружи вакуумной камеры поле мгновенно меняет направление на противоположное. Результат расчета показывает, что по уровню 0.9 и при толщине стенок 1 мм (именно такая толщина стенок вакуумной камеры в месте установки перекидывающего магнита) длительность фронта переполюсовки поля внутри вакуумного объема составляет примерно 0.15 – 0.2 миллисекунды.

Учитывая, что время прохождения пучка по фольге, определяемое частотой сканирования пучка в направлении вдоль фольги, составляет 10 мсек, потери составят  $P \cdot 0.25/10$  ( $P$  – мощность в пучке) или, другими словами, 2.5% от мощности пучка.

Описанный способ выпуска пучка был применен нами впервые на ускорителе ЭЛВ-6 и при создании ускорителя ЭЛВ-12 с мощностью до 400 Вт и током пучка до 500 мА. Ускоритель был установлен в Республике Корея для очистки сточных вод красильного производства и успешно эксплуатируется. Подобные способы выпуска пучка начали использовать и другие компании, выпускающие промышленные ускорители.

В заключение данной главы отметим, что выбранная схема выпуска пучка в атмосферу через титановую фольгу обеспечила высокий коэффициент использования фольги. Во-первых, сканирование пучка по фольге организовано в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, во-вторых – возможность надежно центровать пучок в выпускном окне.

**В главе 5** описываются информационно-измерительные системы управления, которые в разное время использовались для автоматизации ускорителей типа ЭЛВ.

В разделе 5.1 формулируются требования к информационно-измерительной системе, определяется необходимое количество аналоговых и двоичных каналов ввода/вывода и достаточная точность для аналоговых каналов.

В разделе 5.2 обсуждаются применяемые длительное время для автоматизации ускорителя системы на основе секции КАМАК. Опыт эксплуатации позволил определить достоинства и недостатки применения для автоматизации промышленных установок системы КАМАК, предназначенной в основном для автоматизации научных исследований.

В разделе 5.3 обсуждаются системы автоматизации, основанные на промышленных программируемых станциях (ПЛС).

В разделе 5.4 описывается разработанная специализированная управляющая станция.

В результате этой работы была разработана модульная информационно-измерительная система, которая, по мнению авторов адекватно отвечает задачам управления ускорителем, имеет достаточное количество каналов двоичного ввода/вывода, включает в себя многоканальные аналого-цифровой

и цифро-аналоговые преобразователи с достаточными для данной задачи показателями точности. Схемные и конструктивные решения преследовали цель получить высокую надежность и помехозащищенность системы, малые габариты и вес, технологичность в изготовлении, высокую ремонтно-пригодность. В едином комплексе с конструированием станции разрабатывались программные средства для самотестирования и наладки.

Приведем основные технические данные модулей управляющей станции.

1. Интерфейс с управляющей ЭВМ - RS232. Скорость обмена – до 57600 бод.
2. Число каналов двоичного ввода – 64.
3. Число каналов двоичного вывода – 64.
4. Число каналов цифро-аналоговых преобразователей – до 32-х. Разрядность – 12 бит. Выходное напряжение – от 0 до +10.24 В.
5. Модуль аналого-цифрового преобразователя включает 16-разрядный АЦП с 64-канальным коммутатором аналоговых сигналов на входе. Диапазон измеряемых напряжений  $\pm 10.0$  В.

При недостаточном количестве каналов станция допускает каскадирование с помощью CAN магистралаи.

Подробно описана разработанная магистраль станции, система команд микроконтроллера, схемная реализация модулей.

Данная разработка может быть полезна и для других применений: станция успешно используется в системе автоматизации установки для бор-нейтрон захватной терапии. Корейская фирма EB-Tech отказалась от использования промышленных ПЛС и изготавливает такие станции для автоматизации совместно производимых ускорителей.

В разделе 5.5 рассматривается пакет программного обеспечения для работы с управляющей станцией.

**В главе 6** описано программное обеспечение системы управления ускорителем, обеспечивающее дружественный интерфейс с пользователем посредством системы динамических меню, текстовой и графической визуализации режима работы ускорителя. Алгоритмы, заложенные в программу управления ускорителем, берут на себя задачи подготовки ускорителя к работе (включение преобразователя частоты, включение двигателя обдува фольги, включение разверток), следят за состоянием блокировок, после включения ускорителя выводят на заданный режим энергию и ток электронного пучка, непрерывно диагностируют исправность колонны высоковольтного выпрямителя. Протокол работы ускорителя сохраняется на жестком диске.

**В главе 7** кратко описаны программные и аппаратные средства сопряжения, позволяющие простыми методами встроить ускоритель в технологические линии для облучения широкого класса изделий [23,24].

В последние годы получила широкое распространение 4-сторонняя система облучения для данного типа ускорителя [7,8]. Принцип действия

данной системы основан на том, что организуются два, скрещенных под углом  $90^\circ$ , пучка электронов. Отклонение пучков производится внутри выпускного устройства. Учитывая, что при перемотке провода или трубки при многократном прохождении изделия под пучком сторона, обращенная к выпускному устройству, меняется на противоположную, мы получаем возможность облучать изделие с четырех сторон. Данный метод позволяет существенно поднять однородность дозы по азимуту изоляции провода или термоусаживаемой трубки. Одновременно мы можем снизить энергию ускоренных электронов, что важно для длительной безаварийной работы ускорителя. Система питания и управления 4-сторонней системой облучения основана на блоках питания отклоняющих и перекидывающих магнитов, описанных в главе 4.

### **В заключении перечислены основные результаты работы.**

Работы по совершенствованию ускорителя и его систем управления и питания продолжают непрерывно. Целью данных работ являются повышение эксплуатационных параметров ускорителя, его надежности, времени безаварийной работы, возможности внедрения в новые технологические процессы. Изменение конструкции и параметров ускорителя, запросы потребителей заставляет непрерывно вносить коррективы в его аппаратное и программное окружение. Ниже перечислены основные результаты работы и указаны направления, в которых продолжается совершенствование систем.

1. В результате произведенных исследований разработана методика расчета и конструирования мощных преобразователей частоты для питания промышленных ускорителей электронов трансформаторного типа. Уверенно можно утверждать, что данная разработка может быть применена для создания преобразователей с мощностью в мегаватт и более. Продолжаются работы по внедрению современных микропроцессорных систем для управления двухфазными преобразователями частоты. Разработанный преобразователь частоты может быть применен и в других областях, например, для питания установок высокочастотной закалки металлов.

2. Разработаны системы стабилизации и регулирования энергии и тока электронного пучка, которые по точности и стабильности удовлетворяют всем востребованным, на сегодня, требованиям технологий. Продолжаются исследования направленные на повышение точности этих систем. Повышение качества стабилизации востребовано в применении высоковольтного выпрямителя связанных с медицинской тематикой [19] и для других электрофизических установок [4].

3. Цикл исследований по выводу мощных электронных пучков в атмосферу через титановые фольги позволил реализовать суммарную мощность выведенного пучка до 500 кВт при токе пучка до 500 мА. На очереди работы по автоматизации системы концентрированного выпуска пучка в атмосферу. Это связано с проведением работ на ускорителях типа ЭЛВ по получению нанопорошков, закалке и наплавке металлов с помощью пучка электронов.

4. Разработана многоканальная специализированная управляющая станция. С помощью данной станции автоматизируются все производимые сегодня ускорители ЭЛВ. Станция производится в Корее для совместно производимых ускорителей. Начаты работы по производству модулей станции в Китае для многолетней поддержки работы ускорителей. Конструктивная простота, большое количество каналов ввода/вывода позволяет успешно использовать эту разработку и для автоматизации других установок. Так на основе данной станции произведена значительная часть автоматизация установки по бор нейтрон захватной терапии.

5. Комплект программного обеспечения позволяет решать широкий круг задач по адаптации ускорителя к любым технологическим процессам. Простота управления и дружественный интерфейс с пользователем дает возможность управления ускорителем и технологической линией после минимального цикла обучения оператора. Проведенные работы по совершенствованию программного обеспечения ускорительно технологических комплексов позволили адаптировать его под любые современные вычислительные платформы.

Широкий набор внешних систем формирования дозного поля и подпучкового оборудования, соединенных в единый аппаратно-программный технологический комплекс с ускорителем значительно повышает его привлекательность для покупателей.

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. M.E. Veis, Kuksanov N.K., Nemytov P.I., Korabelnikov B.M., Kosilov M.R., Salimov R.A., Prudnikov V.V. «Development of the next generation of powerful electron accelerators», Radiation Physics and Chemistry, Vol.46, 1995.

2. Veis M.E., Nemytov P.I., Salimov R.A. and others. «D.C. high power electron accelerators of ELV-series: status, development, applications», Radiation Physics and Chemistry, Volume 57, Number 3, March 2000, pp. 661-665.

3. Veis M.E., Kuksanov N.K., Korabelnikov B.M., Nemytov P.I., Salimov R.A. «High voltage electron accelerators at a power of up to 90 kW», Radiation Physics and Chemistry, 1990, Vol. 35. № 4-6, pp. 658.

4. N.K. Kuksanov, P.I. Nemytov, V.M. Panasyuk, V.V. Parkhomchuk, V.B. Reva, R.A. Salimov and others. «Conceptual project of an electron cooling system at an energy of electrons of 350 KEV», Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2000, Vol. 441, № 1, pp. 87-91.

5. Голубенко Ю.И., Куксанов Н.К., Салимов Р.А., Немытов П.И. «Вывод мощного пучка электронов в атмосферу через два параллельно расположенных листа титановой фольги», ПМТФ, Т.51, № 2, стр. 3-6, Новосибирск, 2009.

6. Golubenko Yu.I., Kuksanov N.K., Kuznetsov S.A., Nemytov P.I., Salimov R.A., Fadeev S.N., Veis M.E. «High power transistor frequency converter for supply of industrial transformer type electron accelerators», Vacuum 62 (2001) 75-76, pp 251-256.

7. Axamirsky P.V., Kuksanov N.K., Malinin A.B., Salimov R.A., Nemytov P.I. «4-sided irradiation systems for electron treatment of cable and pipe-like products», Vacuum 62 (2001) 75-76, pp. 257-262.

8. Куксанов Н.К., Малинин А.Б., Немытов П.И., Салимов Р.А. «Система четырехстороннего облучения электронами кабельных и трубчатых изделий», Электротехника. 1997, № 7, стр. 46-51.

9. Вейс М.Э., Голубенко Ю.И., Куксанов Н.К., Кузнецов С.А., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., Немытов П.И. «Создание серии IGBT преобразователей частоты для питания промышленных ускорителей электронов трансформаторного типа», Электротехника, 12 (2001), стр. 21-24, Москва, 2001.

10. М.Э. Вейс, Н.К. Куксанов, В.Е. Долгополов, А.В. Лаврухин, Р.А. Салимов, П.И. Немытов и др. «Усовершенствованный промышленный ускоритель электронов для облучения кабельной изоляции», Кабели и провода, № 4 (287), М., 2004, с.16-19.

11. Fadeev S.N., Golubenko Yu.I., Kuksanov N.K., Nemytov P.I. и др. «Accelerator ELV-12 and its applications in environment protection technologies», Problems of atomic science and technology, Ser. Nucl. Phys. Inv., 2004, 1, pp. 178-180.

12. Н.К. Куксанов, П.И. Немытов, Ю.И. Голубенко. «Малогобаритный роторный вольтметр, используемый в системах измерения и стабилизации ускоряющего напряжения промышленных ускорителей электронов», Вестник НГУ, Серия «Физика», No 3, 2010, стр. 84-91.

13. P.I. Nemytov, Yu.I. Golubenko, N.K. Kuksanov, R.A. Salimov, S.N. Fadeev, M.E. Veis. «High power transistors frequency converter for supply up to 500 kW DC electron accelerators», RUPAC, 2004.

14. P.I. Nemytov, Yu.I. Golubenko, N.K. Kuksanov, M.E. Veis, «Control and power supply systems of electron accelerators with power up to 500 kW», RUPAC 2006.

15. Golubenko J.I., Kuksanov N.K., Nemytov P.I., Chakin I.K. «Direct methods of measuring and stabilization of accelerating voltage in charged particle accelerators on the base of cascade generators», RUPAC 2008.

16. Yu.I. Golubenko, M.E. Veis, N.K. Kuksanov, S.A. Kuznetsov, A.B. Malinin, P.A. Nemytov, V.V. Prudnikov, R.A. Salimov, S.N. Fadeev. «D.C. high power electron ELV accelerators for industrial and research applications», Varna-2000. Electron beam technologies (EBT). Sixth International Conference on Electron Beam Technologies, 4-7 June 2000, Varna, Bulgaria. - Abstract book, pp. 69-70. (Варна-2000).

17. М.Э. Вейс, Ю.И. Голубенко, Н.К. Куксанов, П.И. Немытов, В.В. Прудников, Р.А. Салимов, С.Н. Фадеев. «Ускоритель ЭЛВ-12 и его применение в природоохранных технологиях», Вестник "Радтех-Евразия" No 1(11), Москва-Новосибирск-2002. См. также: Вейс М.Э., Голубенко Ю.И., Куксанов Н.К., Салимов Р.А., Прудников В.В., Фадеев С.Н., «Ускоритель ЭЛВ-12 и его применение в природоохранных технологиях», Сборник докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1-4 октября, 2001. С. 133.

18. Немытов П.И. «Стабилизация и контроль основных параметров мощного электронного пучка промышленных ускорителей прямого действия». Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новосибирск, 1997.

19. M.E. Veis, S.N. Fadeev, N.K. Kuksanov, P.I. Nemytov, V.V. Prudnikov, R.A. Salimov, S.Yu. Taskaev. «Stabilization of accelerating voltage in HV accelerator-tandem for neutron capture therapy», Препринт ИЯФ СО РАН 2002-17, Новосибирск, 2002.

20. Nemytov P.I. and others. «The system to extract the linear, ring and concentrated electron beam into atmosphere», Indo - USSR seminar on industrial application of electron accelerators. Preprint of lectures. Bombay, BARC, 1988, volume 1; см. также European particle accelerator conference, EPAC, ROME, 1988. Singapore e. a. World Sci., 1989, Vol. 2.

21. Вейс М.Э., Голубенко Ю.И., Куксанов Н.К., Прудников В.В., Немытов П.И., «Двухфазный транзисторный преобразователь частоты мощностью 500 кВт для питания промышленных ускорителей электронов трансформаторного типа», Сборник докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1-4 октября, 2001. С.56. См. также Вестник "Радтех - Евразия", Новосибирск, 2002. С. 24-28.

22. Вейс М.Э., Голубенко Ю.И., Куксанов Н.К., Салимов Р.А., Прудников В.В., Фадеев С.Н., Черепков В.Г., Немытов П.И. «Ускорители серии ЭЛВ и их применение в радиационно-технологических процессах», Сборник докладов X Международного совещания по применению

ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1-4 октября, 2001. С. 133; Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1-4 октября, 2001. С. 75.

23. С.Н. Фадеев, Салимов Р.А., Немытов П.И. и др. «Подпучковое оборудование для расширения технологических возможностей ускорителей ЭЛВ», Сборник докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1-4 октября, 2001. С. 68. См. также Вестник "Радтех - Евразия", Новосибирск, 2002. С. 8-13.

24. Голубенко Ю.И., Прудников В.В., Немытов П.И. «Системы управления ускорителями ЭЛВ, работающими в составе технологических линий», Сборник докладов десятого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1-4 октября, 2001. С. 361. См. также Вестник "Радтех - Евразия", Новосибирск, 2002. С. 20-23.

НЕМЫТОВ Петр Иванович

Системы питания и управления  
серии высоковольтных  
промышленных ускорителей электронов  
с мощностью выведенного пучка  
сотни киловатт

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

---

Сдано в набор .5.07. 2010 г.

Подписано в печать 6.07. 2010 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.9 печ.л.,1.5уч.-издл.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 20

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,  
*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*