


На правах рукописи

ГАЙКАЗЬЯН ТИГРАН КАРЭНОВИЧ



**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МНОГОЗВЕННОГО
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РЕГУЛЯТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность 05.09.01. "Электромеханика и электрические аппараты"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА 2010

Работа выполнена в Государственном Образовательном Учреждении
Высшего Профессионального Образования Московском Энергетическом
Институте (Техническом Университете) на кафедре Электрических и
Электронных аппаратов

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Рябчицкий Максим Владимирович

Официальный оппонент доктор технических наук,
профессор Левин Александр
Владимирович;
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник Румянцев
Михаил Юрьевич.

Ведущее предприятие - Концерн ООО «Русэлпром»

Защита состоится 24 февраля 2010 г.

на заседании диссертационного совета Д 212.157.15 при ГОУВПО МЭИ (ТУ)
в аудитории Е-205 в 16 час. 00 мин.

по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО МЭИ (ТУ).

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим
направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, ученый
совет при ГОУВПО МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан « » _____ 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.157.15.

к.т.н., доц.



Рябчицкий М.В.

2010А

26356

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.-Петербург
09 2007 акт 1055

Актуальность работы. Современные электрические и электронные аппараты (ЭА) должны отвечать требованиям по возможности интеграции в сложные системы, снижению массы и габаритов ЭА и энергоэффективности. Эти требования приводят к появлению новых статических аппаратов на базе современных полупроводниковых ключей. Одной из областей, где такие аппараты находят все более широкое применение, являются системы электроснабжения пассажирского железнодорожного транспорта.

Применение в пассажирских вагонах электрических компонентов оборудования началось в конце XIX в. Основной задачей в тот период было обеспечение электрического освещения в вагонах. Реализованные решения, использовавшиеся многие десятилетия, основывались на применении электрического генератора с приводом от колесной пары и аккумуляторных батарей.

С развитием электрификации железных дорог появилась возможность применения в вагонах электрического отопления. Для этого в поезде предусматривалась сборная электрическая шина, напряжение в которую подавалось от локомотива.

С развитием комфортабельности железнодорожного транспорта появилось большое количество преобразовательного оборудования в железнодорожном вагоне, обеспечивающее работу кондиционеров, обогрев и других устройств. Мощность применявшихся многие десятилетия генераторов с приводом от колесной пары, в большинстве случаев была недостаточной для питания оборудования. В связи с этим дальнейшие разработки базировались исключительно на системе питания электрических устройств вагонов от поездной сборной шины, с применением трансформатора сетевой частоты.

Развитие силовой электроники в конце XX в. позволило создать мощные статические аппараты, пригодные для эксплуатации на подвижном составе.

Цель работы.

Создание высоковольтного регулятора постоянного напряжения, способного обеспечивать электроэнергией современный пассажирский вагон,

отвечающего всем требованиям по качеству электроэнергии, безопасности и экономичности.

Достижение цели исследования потребовало решения следующих научно-исследовательских и практических задач:

1. Проведения аналитического анализа современных научно-технических решений в области регулирования напряжения свыше 2,5кВ с целью выявления наиболее перспективных структур регуляторов и алгоритмов управления.

2. Синтез проведенного анализа, и на его основе разработка многозвенной структуры и принципов работы регулятора, позволяющих повысить энергоэффективность, улучшить массогабаритные показатели, а так же повысить надежность устройства;

3. Проведения анализа электромагнитных процессов в статических и динамических режимах работы с помощью математических моделей и современных программных комплексов. Разработка методики инженерного проектирования силовой части регулятора на основе проведенного анализа;

4. Разработки алгоритма управления и системы управления регулятором напряжения, позволяющих реализовать его функции и обеспечить точность, устойчивость и своевременную защиту при возникновении аварийных ситуаций;

Методы исследований, применяемые в диссертационной работе: методы теории электрических цепей, методы теории автоматического управления, математическое моделирование регулятора постоянного тока (РПТ) в программном комплексе Or CAD, физическое моделирование РПТ.

Научная новизна.

1. На основе анализа показана целесообразность использования структуры многозвенного высоковольтного регулятора с последовательным соединением входных каскадов и параллельным соединением выходных каскадов для применения в железнодорожном вагоне;

2. Разработана методика расчета и выбора элементов силовой части многозвенного высоковольтного регулятора, учитывающей ограниченные возможности и номенклатуру современных полупроводниковых ключей, учитывающую высокое входное напряжение и необходимость гальванической развязки между входной и выходной цепями.

Практическая ценность. В результате выполненной работы разработано новое схемотехническое решение высоковольтного регулятора постоянного

напряжения, разработана инженерная методика проектирования высоковольтного регулятора, позволяющая наиболее эффективно выбрать элементы силовой части, повысить энергоэффективность регулятора, а так же улучшить массогабаритные показатели.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. инженерные методики расчёта силовых элементов регулятора;
2. схемотехнические решения и принципиальные схемы нового вида высоковольтного регулятора постоянного тока;
3. математические модели высоковольтного многозвенного регулятора.

Практическое применение результатов работы:

Полученные результаты работы использованы в работах проводимых кафедрой ЭиЭА МЭИ (ГУ) совместно с ЗАО «ЭЛСИЭЛ» по разработке устройств силовой электроники и систем управления для железнодорожного транспорта.

Публикации по теме работы. По теме диссертации опубликовано 3 печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы и имеет объем 141 страницы, 69 рисунков, 8 таблиц и 99 наименований списка литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования. Описаны проблемы, связанные с использованием высоковольтных регуляторов с применением однозвенной структуры. Современный этап развития электротехнического оборудования возлагает требования по энергоэффективности, безопасности и экономичности. В этой связи актуальна становится разработка современных решений в области регулирования высоковольтного напряжения.

В первой главе приведено описание существующих устройств и методов регулирования напряжения. Указаны достоинства и недостатки используемых методов и устройств. Выявлена актуальность проблемы повышения энергоэффективности работы высоковольтного регулятора.

В системе электроснабжения современного пассажирского железнодорожного вагона существует ряд особенностей. Основное из них – высокое входное напряжение контактной сети. В связи с этим, описано устройство с последовательным подключением входных каскадов для

решения проблемы высокого входного напряжения контактной сети.

Статический высоковольтный регулятор (СВР) (рис. 1) предназначен для питания нагрузок в современном вагоне постоянным напряжением 450В с питанием от высоковольтной магистрали. Предложена схема регулятора на основе нескольких звеньев, имеющих схему инвертора с высокочастотным разделяющим трансформатором. В данной работе рассматривается регулятор для железнодорожного транспорта, мощностью 40кВА и выходным напряжением 450В.

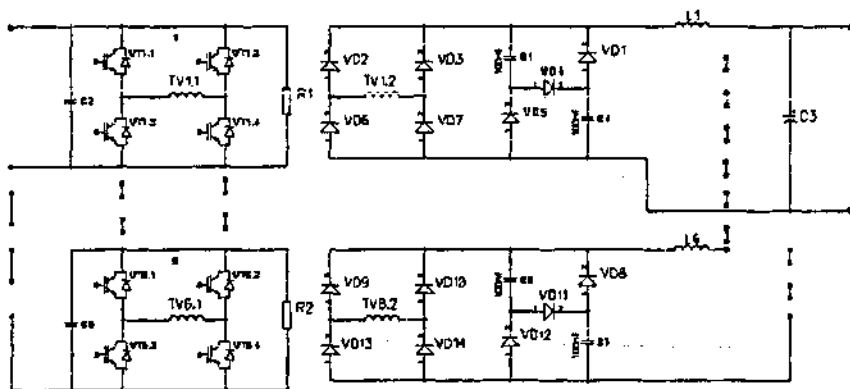


Рис.1. Статический высоковольтный регулятор.

VT1-VT6 – транзисторные модули.

VD2,VD3,VD6,VD7 – выпрямительные диоды

Блок VD1,VD4, VD5, C1, C4 – ЦФТП.

L1-L6 и C3 – выходной LC фильтр.

TV1-TV6 – трансформаторы.

C2-C6 – разделительные конденсаторы.

СВР представляет собой статический полупроводниковый регулятор входного напряжения переменного (постоянного) тока в выходное стабилизированное напряжение постоянного тока. СВР состоит из входного сглаживающего фильтра, шести звеньев регулирования, шести высокочастотных трансформаторов, шести диодных мостов и выходного сглаживающего фильтра.

Каждое звено регулятора состоит из мостового высокочастотного инвертора, трансформатора и мостового однофазного выпрямителя. Однофазный инвертор формирует последовательность импульсов напряжения прямоугольной формы частотой 7,5 кГц, которая подается на первичную обмотку трансформатора. Переменное напряжение с вторичной обмотки подается на вход выпрямителя. На выходе выпрямителя установлен сглаживающий фильтр, на конденсаторах которого получается стабилизированное постоянное напряжение. Импульсы управления ключами формируются системой управления и подаются на драйвер. Питание системы управления осуществляется от вторичных источников питания.

Во второй главе описана методика инженерного проектирования силовой части высоковольтного регулятора, позволяющая производить расчет силовых компонентов многозвенного высоковольтного регулятора с учетом наибольшей эффективности и улучшения массогабаритов устройства.

Для расчёта и выбора параметров силовых компонентов регулятора постоянного напряжения (РПН) необходимо определить начальные условия:

- напряжение сети, к которой подключается РПН;
- параметры полезной нагрузки;
- требуемая величина КПД регулятора;
- требуемое выходное напряжение;
- коэффициенты пульсаций входной и выходной цепи.

Эти данные позволяют определить следующие основные энергетические характеристики РПН:

- величина тока силовых ключей;
- величина энергии, расходуемая регулятором во время работы;

В результате расчета определяются следующие параметры силовых элементов регулятора:

1) параметры силовых полупроводниковых ключевых элементов:

- класс напряжения полупроводниковых ключей;
- частотные свойства силовых элементов;
- величина тепловых потерь в ключевых элементах и параметры системы отвода тепла от ключа;

2) параметры дросселей фильтров на стороне постоянного тока регулятора:

- индуктивность;

- величина падения напряжения на дросселе;
- потери мощности в дросселе.

Для улучшения качества потребляемой энергии регулятора на стороне переменного тока могут использоваться пассивные LC фильтры, настроенные на резонанс на частоте коммутации ключевых элементов регулятора. В таком случае необходимо рассчитать параметры этого фильтра обеспечивающего заданную величину ослабления высших гармоник тока регулятора.

Ключевые полупроводниковые элементы РПН работают в высокочастотном режиме, причём потери от переключений (потери коммутации) превышают потери проводимости. Поэтому предельное рабочее значение тока полупроводниковых элементов зависит от условий их эксплуатации: частоты коммутации, входного напряжения, типа использующегося радиатора охлаждения. Величина индуктивности дросселя фильтра, напряжение сети, максимальная величина тока регулятора, а также использующийся метод модуляции напряжения РПН определяют напряжение на стороне постоянного тока статического аппарата. Величина выходного напряжения, ток регулятора и частота коммутации определяет величину тепловых потерь ключевого элемента, параметры и тип использующейся системы охлаждения. Таким образом, максимальное значение величины тока полупроводниковых элементов, частота коммутации полупроводниковых ключей, выходное напряжение регулятора и другие параметры являются взаимозависимыми, что приводит к необходимости использовать итерационный метод расчёта и выбора этих параметров.

Так как выбрана многозвенная схема регулятора, то методика расчета и выбора сводится к трём задачам:

- Определить число звеньев согласно наибольшей эффективности регулятора, а так же улучшения его массогабаритов;
- Определить параметры силовых полупроводниковых элементов каскада, которые рассчитываются по напряжению входной и выходной частей и их частотными свойствами;
- Рассчитать параметры пассивных LC фильтров по мощности звена и коэффициенту пульсаций.

Необходимость в исследовании и разработке методики инженерного проектирования регулятора, заключается в том, что современная элементная база не позволяет с максимальной эффективностью обеспечить работу

высоковольтного регулятора. В данном случае входное напряжение имеет верхнюю границу в 4кВ, потребляемый ток (при мощности в 40кВА) составляет примерно 10А, а существующие полупроводниковые ключи классом напряжения до 8-10 кВ рассчитаны на ток порядка нескольких сотен ампер. Следовательно, их использование в заданном решении не целесообразно.

Применение многозвенной схемы позволяет:

- уменьшить класс по напряжению силовых ключей;
- снизить падение напряжения;
- добиться эффективного применения современных полупроводниковых ключевых элементов.

Используя программу MathCAD, рассчитано наиболее эффективное число регулирующих звеньев регулятора. Благодаря универсальности программы расчетов, её можно использовать для различных исходных данных регулятора. Опирируя количеством выходных каскадов, добиваться наилучших показателей по энергоэффективности, массогабаритам регулятора в целом.

На рис.2 представлена зависимость мощности потерь от количества звеньев. Как видно из диаграммы, при начальном увеличении числа каскадов (от одного до четырех) – изменения потерь мощности существенное (из-за того, что выбираются силовые элементы схемы, не обеспечивающие требуемую энергоэффективность), в отличие от последующего увеличения. Расчет производился при постоянной частоте переключения полупроводниковых элементов. Если уменьшать частоту, потери мощности снизятся, но значительно увеличатся габариты (размеры трансформатора) и масса регулятора. Для данного регулятора было выбрано количество выходных каскадов, равное шести.

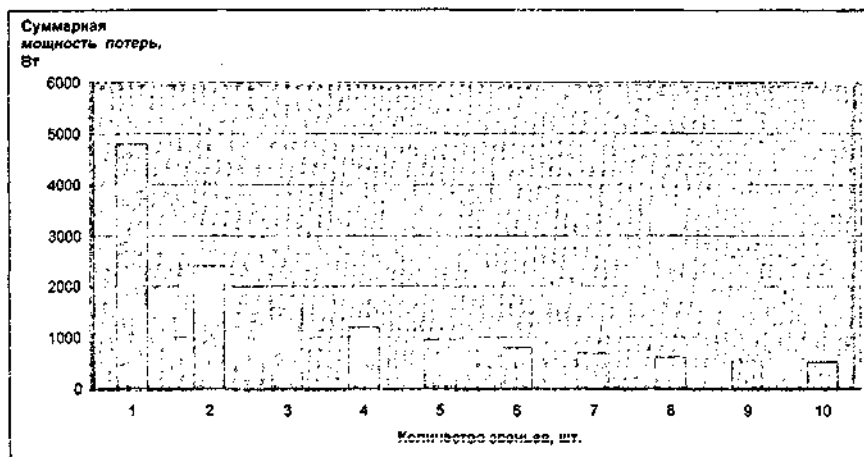


Рис.2. Диаграмма мощности потерь в регуляторе от количества звеньев.

В третьей главе проведен анализ системы регулирования классическими методами в целях обеспечения требуемой точности и устойчивости системы.

Показана эквивалентность предложенной схеме классической схеме регулятора постоянного тока при допущении идеальности трансформатора, равномерного распределения входного напряжения между звеньями и тока нагрузки на выходе регулятора.

Для стабилизации выходных характеристик используется обратная связь по выходному напряжению или току, а для обеспечения или повышения запаса устойчивости используются корректирующие звенья в цепях обратной связи или контура обратной связи по различным переменным состояниям.

Динамические характеристики (перерегулирование по току и напряжению при включении и отключении СВР, скачкообразном изменении входного напряжения и нагрузки), высокочастотные пульсации тока дросселя и выходного напряжения могут быть найдены из решения системы дифференциальных уравнений, описывающих переменные состояния: токи в индуктивностях и напряжения на емкостях на различных этапах работы СВР, когда транзистор находится в открытом и закрытом состоянии. Исследование статических характеристик СВР (коэффициент стабилизации выходного

напряжения и тока, запас устойчивости, по фазе и амплитуде, полоса подавления низкочастотных пульсаций) осуществляется с помощью критерия Найквиста по частотным характеристикам передаточной функции разомкнутой петли ОС регулятора. Частотные характеристики могут быть получены путем сведения дискретно-нелинейных моделей импульсного преобразователя напряжения к непрерывной линейной модели с использованием метода усреднения и линеаризации дифференциальных уравнений.

Исследование статических характеристик СВР (коэффициент стабилизации выходного напряжения и тока, запас устойчивости, по фазе и амплитуде, полоса подавления низкочастотных пульсаций) осуществляется с помощью критерия Найквиста по частотным характеристикам передаточной функции разомкнутой петли ОС СВР. Частотные характеристики могут быть получены путем сведения дискретно-нелинейных моделей импульсного преобразователя напряжения к непрерывной линейной модели с использованием метода усреднения и линеаризации дифференциальных уравнений.

При помощи математического моделирования, произведен анализ работы регулятора в различных режимах в программном комплексе OrCad. На рис.3 представлена модель входного каскада регулятора напряжения.

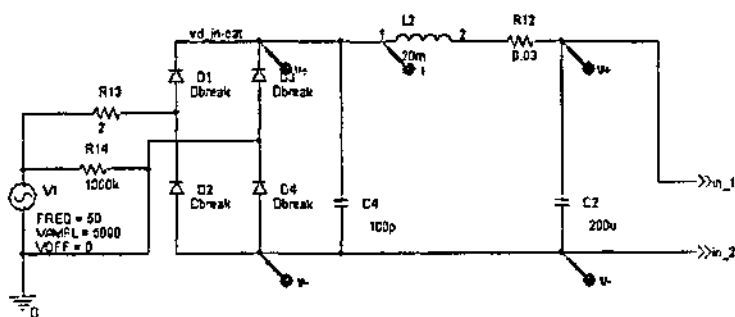


Рис. 3. Входной каскад регулятора напряжения.

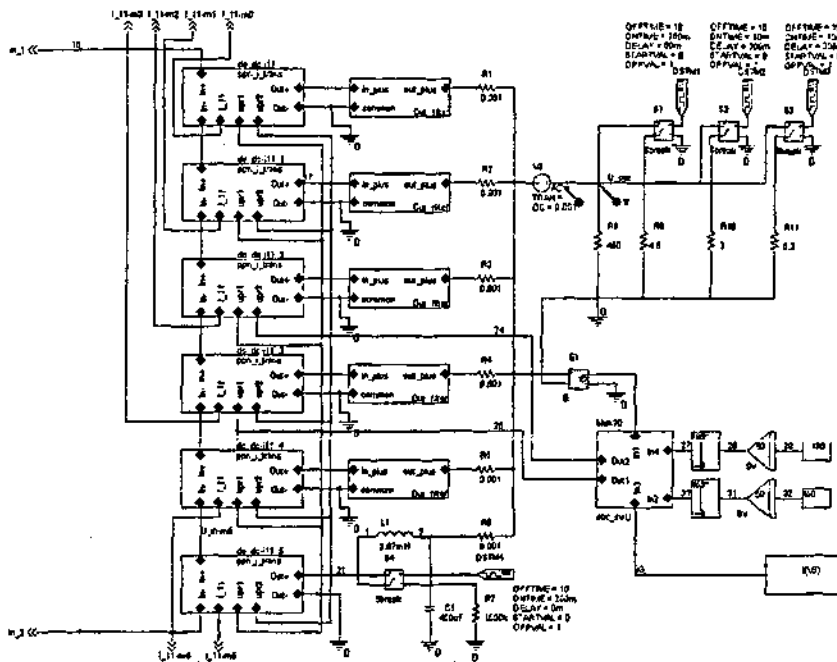


Рис.4. Выходные каскады высоковольтного регулятора.
На рисунке 4 представлены 6 выходных звеньев регулятора.



Рис.5

Кривые основных электрических параметров в пусковом и установившемся режимах.

На осциллограмме (рис.5) приведены следующие напряжения и токи:

- $I(L2)*10$ – ток дросселя входного фильтра умноженный на 10;
- $V(VD_IN-CAT,IN_2)$ – напряжение на выходе диодного моста;
- $V(IN_1,IN_2)$ – напряжение на конденсаторе фильтра;
- $V(U_OUT)*10$ – напряжение на выходе ПСН умноженное на 10;
- $I(V3)*10$ – ток на выходе ПСН умноженный на 10.

Так же глава посвящена моделированию процессов в блоке коммутационно-защитной аппаратуры (КЗА), который входит в состав высоковольтного регулятора для пассажирских вагонов. Блок КЗА должен обеспечивать выпрямление и сглаживание напряжения входной сети, а также защиту потребителей от возможных импульсных перенапряжений. Приводится, так как возможно питание регулятора от сети переменного тока. Упрощенная электрическая схема блока КЗА приведена на рис.6.

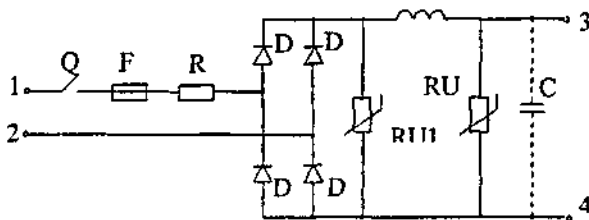


Рис. 6. Упрощенная электрическая схема блока КЗА

Как видно, блок содержит входные клеммы 1-2, к которым подключается сеть постоянного или переменного напряжения (3 кВ), и выходные клеммы 3-4, к которым подключается регулятор постоянного напряжения (РПН). В состав блока входят также контактор Q, предохранитель F, ограничивающий резистор R, однофазный мостовой выпрямитель D1...D4, два варистора RU1, RU2 (пороговое напряжение 5 кВ, дифференциальное сопротивление 1 Ом) и дроссель L (индуктивность 700 мГн). Конденсатор (ёмкость 1000 мкФ) входит в состав РПН.

Задачей моделирования является исследование переходных процессов и установившихся режимов блока КЗА при различных сочетаниях параметров входной сети, приведенных в табл. 1, и нагрузки (номинальная мощность 45 кВт).

Табл. 1. Параметры напряжения входной сети

Вид напряжения сети	Входное напряжение, В		
	минимальное	номинальное	максимальное
Постоянное	2200	3000	4000
Переменное	2200	3000	3600

Моделирование проводилось с использованием пакета программ OrCad 9.2. Модели блока КЗА при различных видах напряжения сети приведены на рис.7. Как видно, модель включает в себя однофазный выпрямитель, LC-фильтр и два варистора. В приведенных схемах V1 обозначает источники постоянного или переменного напряжения, подключаемые к блоку ЗКА посредством ключа S1, а V2 и V3, включённые с ним последовательно, имитируют импульсные перенапряжения 16 кВ (4 мс) и 12 кВ (10 мс).

При моделировании блока КЗА исследованы последовательно во времени 4 режима:

- 1) подключение сети на холостом ходу (в момент времени, равный нулю);
- 2) подключение номинальной нагрузки (в момент времени 600 мс);
- 3) отключение нагрузки (в момент времени 1200 мс);
- 4) отключение сети (в момент времени 1800 мс).

Импульсные перенапряжения появляются в моменты времени 303 мс (16 кВ) и 900 мс (12 кВ).

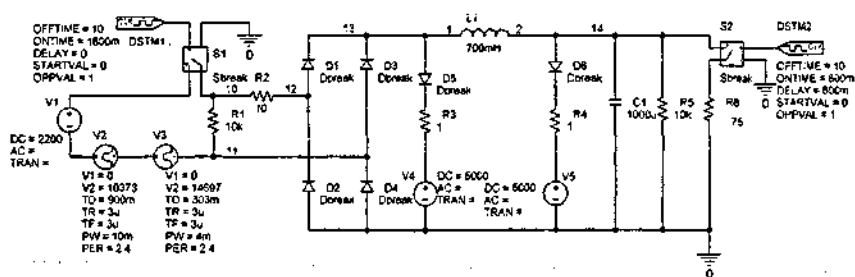


Рис.7. Схема модели блока КЗА.

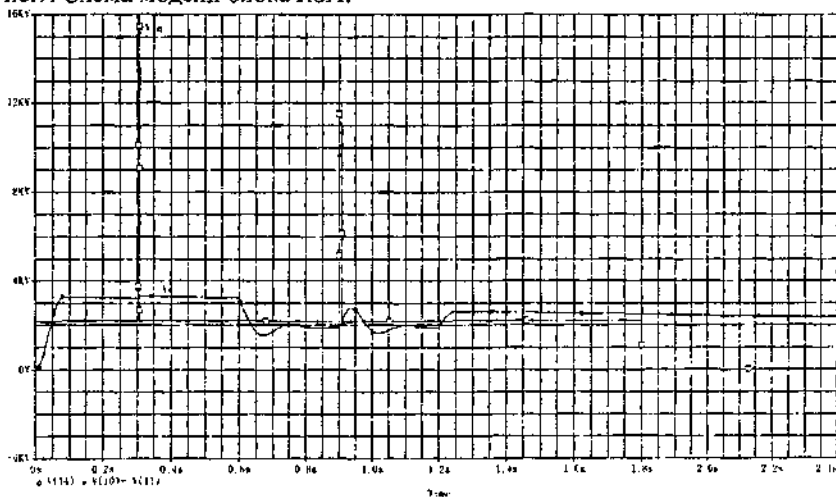


Рис.8. Диаграммы входного напряжения и напряжения на конденсаторе

Анализ результатов компьютерного моделирования блока КЗА позволяет сделать следующие выводы.

1. В установившихся режимах при питании блока от сети постоянного тока (2,2...4,0 кВ) напряжение на выходе блока изменяется в пределах от 1,89 до 5,0 кВ, а при питании от сети переменного тока (2,2...3,6 кВ) – в пределах от 1,7 до 4,95 кВ.
2. Переходные процессы имеют, как правило, затухающий колебательный характер с периодом колебаний порядка 120...150 мс и числом полупериодов 2...3. Напряжение на выходе блока в переходных процессах изменяется в пределах от 1,6 до 5,1 кВ при питании от сети постоянного тока и от 1,4 до 5,0 кВ при питании от сети переменного тока.
3. При питании блока от сети переменного тока в режиме номинальной нагрузки входной коэффициент мощности составляет 0,893 и 0,887 при входном напряжении 2,2 и 3,6 кВ соответственно.
4. Подтверждена необходимость использования в блоке варисторов RU1 и RU2 с параметрами 5 кВ и 1 Ом: первый из варисторов ограничивает воздействие импульсных перенапряжений в питающей сети, а второй исключает перенапряжения на выходе блока при подключении его к сети и, возможно, при аварийном отключении нагрузки.

Результаты моделирования показали, что предложенная схема с учетом рассчитанных по предложенной методике параметров силовой части и системы управления, обеспечивают требуемые показатели в части передаваемой мощности, точности регулирования, величине коэффициента пульсации выходного напряжения и входного тока, а так же времени переходных процессов и требованиям к пусковому режиму.

Четвертая глава посвящена физическому макетированию. Разработан макет (рис.9) высоковольтного регулятора, на котором проверялась правильность расчета и выбора силовых элементов регулятора. Производились испытания подтверждающие эффективность предложенной инженерной методики расчета.

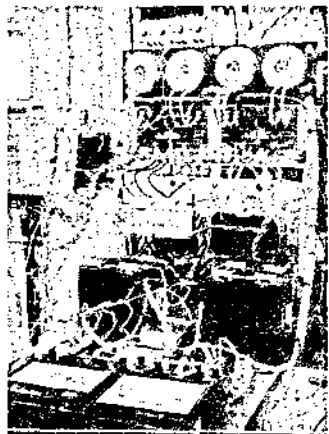


Рис.9. Макет высоковольтного регулятора.

После успешно проведенных экспериментов на макете, был создан опытный образец высоковольтного регулятора (рис.10), прошедший необходимые приемочные и государственные испытания. В настоящее время, данная разработка внедрена в серийное производство и используется на железнодорожных вагонах на территории Российской Федерации.

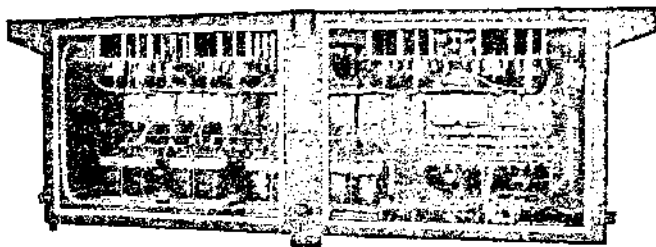


Рис. 10. Высоковольтный регулятор постоянного напряжения.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе:

- 1) Предложено использование в схеме регулятора постоянного напряжения многокаскадной структуры с высокочастотным трансформатором, позволяющая существенно уменьшить массогабариты высоковольтного регулятора, а так же улучшить электрические параметры схемы регулятора, снизить потери и установленную мощность силовых ключей.
- 2) Разработана методика инженерного проектирования силовой части регулятора напряжения, позволяющая определить наиболее эффективное количество звеньев с учетом повышения КПД и технических требований, предъявляемых к системе электроснабжения железнодорожного вагона.
- 3) Показана применимость классических методов регулирования и методов разработки алгоритма к многозвенной структуре.
- 4) Разработаны математические модели регулятора напряжения в программном комплексе MathCAD и OrCad, позволяющие оценить эффективность работы в статических и динамических режимах, а так же обеспечить корректировку параметров силовой части регулятора и физические модели, подтверждающие верность теоретических исследований.
- 5) Разработаны физические модели регулятора, на которых проверялась и подтверждалась предложенная методика инженерного проектирования регулятора

Основные положения диссертационной работы изложены в печатных трудах:

1. Гайказьян Т.К. Высоковольтный регулятор напряжения для пассажирского вагона // Известия вузов. Сев. – Кавк. Регион. Технические науки - 2010 г.- вып.6.- С.25-30.
2. Рябчицкий М.В, Гайказьян Т.К. Высоковольтный регулятор напряжения для пассажирского вагона // ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2010г.
3. Рябчицкий М.В, Гайказьян Т.К. Высоковольтный регулятор нового типа для железнодорожного вагона // XIII-я международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» МКЭЭЭ – 2010: Тез. докл. – Алушта, 2010.- С. 182-183.

Подписано в печать 27.11.10г. Зак. 291 Тир. 100 П.л. 1,25⁵
Полиграфический центр МЭИ(ТУ)
Красноказарменная ул., д.13

10-26356

2010A

26356