

На правах рукописи

МУРАДОВ Эльхан Шахбаба оглы

**АВТОМАТИЧЕСКИЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ
ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА
ДЛЯ ГОРОДСКОГО НАЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА
(РАЗРАБОТКИ, ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ)**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена на кафедре «Техника высоких напряжений» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель -

доктор технических наук, доцент

Черных Илья Викторович

Научный консультант -

кандидат технических наук, доцент

Грицук Александр Антонович

Официальные оппоненты:

Дегтярь Владлен Гаврилович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
профессор кафедры электрических и
электронных аппаратов;

Чернигов Владислав Михайлович,
кандидат технических наук, Научно-
техническое предприятие «ООО
ЧЕРГОС», г. Санкт-Петербург,
директор

Ведущая организация -

ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный энергетический
университет» имени В.И. Ленина»

Защита диссертации состоится «21» декабря 2016 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=262600>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Анатолий Михайлович Зюзев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Наземный городской электротранспорт (ГЭТ) является важнейшим звеном городской инфраструктуры и в основном состоит из троллейбусов и трамвайных вагонов, которые во время работы никаких вредных примесей в атмосферу не выделяют. Они являются экологически чистым видом транспорта, и в этом видится их неоспоримая перспектива. Защита подвижных объектов ГЭТ от токов КЗ и от тепловых воздействий тех токов, которые возникают в режиме перегрузки во время эксплуатации, является актуальной задачей. Изношенность подвижных объектов ГЭТ создает серьезную проблему – это низкая электрическая прочность самих объектов. В этом случае необходимо обеспечить быстродействующую защиту (БЗ) от токов утечки и прикосновений. Нерешенность этих проблем приводит к тяжелым последствиям, включая человеческие жертвы.

Существующие конструкции автоматических выключателей (АВ) не могут обеспечить быстродействия по ГОСТу 2585, где регламентируется основной параметр автоматических быстродействующих выключателей (АБВ) постоянного тока – собственное время отключения – с разделением его на три класса: I класс $0,006 \div 0,008$ с, II класс $0,003 \div 0,005$ с, III класс $0,001 \div 0,002$ с. Широко применяющимся защитным аппаратом является выключатель с ручным управлением АВ-8А (производства ЗАО «Динамо-Плюс» г. Москва), но его место установки предусмотрено только внутри кабины водителя троллейбуса, что приводит к появлению в этой зоне кабелей высокого напряжения. В аппарате используется двухступенчатая щелевая дугогасительная камера (ДК) без пламегасителя, работа которой сопровождается выбросом ионизированных газов за ее пределы.

Обзор существующих конструкций АВ и АБВ отечественного и зарубежного производства показал, что двухполюсные АБВ отсутствуют. Троллейбусы полностью изолированы от земли, а для трамваев рельс является минусовой шиной питания трамвайных вагонов. Для защиты электрообору-

дования (ЭО) трамвая однополюсные аппараты применимы, но применение двухполюсных аппаратов предпочтительнее тем, что при коммутации таких выключателей происходит отделение электрической схемы от обоих проводов контактной сети и, тем самым, напряжение снимается полностью, что обеспечивает надежное отключение цепи и гальваническую развязку. Многие аппараты имеют критическую зону гашения дуги, особенно дуги малых индуктивных токов (МИТ), а также неотключаемые токи. По ГОСТу 12.1.038 «Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновений и токов» полное время отключения токов любых значений защитной аппаратурой не должно превышать 80 мс. Таким образом, известные отечественные конструкции АБВ постоянного тока для наземного ГЭТ не полностью удовлетворяют всем требованиям нормативных документов, а их зарубежные аналоги при сопоставимой мощности имеют высокую цену, и это определяет необходимость разработки новых конкурентоспособных АБВ для ГЭТ, что в конечном итоге определяет актуальность выбранной темы:

1. Защита пассажиров и самих подвижных объектов ГЭТ от токов КЗ, утечки и прикосновения; от тепловых воздействий тех токов, которые возникают в режиме перегрузки во время эксплуатации; защита современной электронной аппаратуры, установленной в подвижных объектах ГЭТ.
2. Разработка принципов таких коммутационных аппаратов для увеличения надежности защиты пассажиров и техники.
3. Применение автоматической быстродействующей защиты, притом – дистанционного управления.
4. Исключение неотключаемых токов в АБВ.

Целью работы является разработка и исследование конкурентоспособных АБВ постоянного тока для наземного ГЭТ с повышенной надежностью для обеспечения пожаро- и электробезопасности пассажиров, что формирует следующие **задачи** разработки и исследования:

1. Обоснование разработок и исследований новых АБВ для ГЭТ.
2. Разработать и исследовать новые электромагнитные приводные механизмы АБВ для ГЭТ.

3. Разработать и исследовать новые дугогасительные системы, а также разработать и исследовать новые системы управления АБВ для ГЭТ.

4. Разработать и исследовать гибридный АБВ для ГЭТ.

5. Разработать инженерные методики для определения оптимальных параметров новых АБВ для ГЭТ.

6. Довести результаты разработок АБВ для ГЭТ до опытно-промышленных испытаний и серийного производства.

Научная новизна выполненных исследований состоит в следующем:

1. Научно обоснованы принципы разработки и создания новых АБВ для ГЭТ.

2. Разработаны инженерно-математические модели для анализа нелинейных процессов в электромагнитных механизмах (ЭММ) новых АБВ для ГЭТ.

3. Разработаны экспериментально-математические методики для анализа нелинейных процессов в дугогасительных системах новых АБВ для ГЭТ.

4. На базе разработанных принципов синтезирован ряд новых АБВ для наземного ГЭТ.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработанные принципы построения новых электрических аппаратов использованы при синтезе новых АБВ для ГЭТ.

2. Разработанные инженерно-физические расчетные методики использованы для определения оптимальных параметров ЭММ новых АБВ для ГЭТ.

3. Разработанные экспериментально-математические методики использованы для определения оптимальных параметров ДС новых АБВ для ГЭТ.

4. Практическая ценность подтверждается тем, что на основании проведенных исследований получено большое количество патентов, многие из которых нашли применение в новых внедренных АБВ для ГЭТ.

Методы исследования. При теоретических исследованиях были использованы методы теории электрических аппаратов, в том числе электрических цепей, теория магнитных цепей, теория электромагнитных и динамических процессов в ЭММ, включая аналоговые и цифровые модели для ЭВМ.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Принципы построения и новые устройства ЭММ АБВ для ГЭТ.

2. Принципы построения и новые ДС АБВ для ГЭТ.
3. Принципы построения и новые системы управления АБВ для ГЭТ.
4. Разработка и исследование гибридного АБВ для ГЭТ.
5. Разработка инженерных методик для определения оптимальных параметров новых АБВ для ГЭТ.
6. Результаты внедрения разработанных АБВ в серийное производство.

Достоверность полученных результатов обоснована корректным использованием элементов теории электрических аппаратов, многочисленными экспериментальными исследованиями, использованием результатов исследований в серийном производстве разработанных электрических аппаратов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 229 наименований, 5 приложений и содержит 317 страниц (с приложениями), 170 рисунков, 48 таблиц.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на региональной научно-практической конференции «Проблемы и достижения в промышленной энергетике» (г. Екатеринбург, 2003), региональной научно-практической конференции «Энергосберегающие техника и технологии» (г. Екатеринбург, 2000), Международной научно-практической конференции «Электрические аппараты и электротехнические комплексы» (г. Ульяновск, 2011), научно-практических конференциях «Электротехника 2010 г.: Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии» на VI и VII симпозиумах (Московская обл., 2001 и 2003 гг.) и «Электротехника 2030 год: Перспективные технологии электроэнергетики» на IX симпозиуме (Московская обл., 2007 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 98 работ, из них 7 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК; 70 патентов РФ на изобретение, 13 патентов РФ на полезные модели, 2 патента РФ на промышленные образцы; 6 монографий.

17 работ выполнены автором единолично.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, разработке новых АБВ для ГЭТ и расчетных методик и в руководстве опытно-

промышленными испытаниями новых АБВ для ГЭТ, подготовке публикаций к печати и апробации результатов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности работы, сформулирована ее цель и задачи, намечены пути и методы их решения, показана новизна научных результатов и их практическая ценность.

В **первой главе** рассматриваются особенности работы АБВ постоянного тока в составе подвижных объектов ГЭТ с учетом факторов, влияющих на их работу, обзор существующих конструкций АБВ для подвижных объектов наземного ГЭТ, обоснование новых разработок АБВ, обеспечивающих БЗ подвижных объектов наземного ГЭТ, критическая коммутационная способность электрического аппарата и методики исследований АБВ для наземного ГЭТ. В кратком анализе факторов, влияющих на работу АБВ, установленных на крышах подвижных объектов ГЭТ, приведены наиболее существенные: внешние силовые воздействия, атмосферные и климатические воздействия, качество питания и нестабильность напряжения ($U_{\text{упр}} = 16,8 \div 30 \text{ В}$; $U_{\text{с.п.}} = 400 \div 720 \text{ В}$), изменчивость параметров цепи электрического тока и воздействия электродуговых процессов. Эти аппараты оснащаются собственной оболочкой, которая затрудняет теплообмен с внешней средой и в приложении приведен полный тепловой расчет ТВС АБВ ВБ 11/1-250/6.

В разделе 1.4 и в его приложениях рассматриваются методы расчетов и методики исследований АБВ для подвижных объектов наземного ГЭТ, кроме того приведены основные параметры АБВ, технические условия для АБВ ГЭТ; коммутации аварийных токов в индуктивной цепи с параметрами: 1,4 мГн – 16 кА; 4,8 мГн – 8 кА; 10,3 мГн – 6 кА; 15,0 мГн – 4 кА. По ГОСТу 9219 нормируемое полное время отключения выключателем аварийного тока в безындуктивной цепи не должно превышать $t_{\text{отк}} = 0,025 \text{ с}$. Приведены расчеты термической и электродинамической нагрузки элементов ТВС.

Надежность коммутаций АБВ постоянного тока определяется его приводом. Электромагнитный привод выполняет ключевые рабочие операции

включения и быстродействующего отключения в холодном и прогретом состоянии в широком диапазоне температур от -50 до $+40^{\circ}\text{C}$. Для оптимизации массово-габаритных показателей элементов привода использованы базовые расчетные методы теории магнитных цепей (МЦ), метод участков как алгебраизация системы нелинейных дифференциальных уравнений, характеризующих распределение магнитного потока и методы теории поля в варианте программного комплекса ELCUT.

В приложениях приведены конструктивные особенности, расчеты важных узлов, технические характеристики и параметры магнитопроводов (МП) быстродействующих выключателей ВБ 3/2-400/6 и ВБ 7/2-250/6.

Во **второй главе** рассматриваются вопросы повышения защитных и эксплуатационных показателей АБВ, улучшения технических характеристик электромагнитных приводов. В **коммутации отключения** основным параметром быстродействия АБВ является **собственное время отключения**, которое задается параметрами магнитной системы.

В исходном положении этапа отключения МЦ ЭМ замкнута, его намагничивающая катушка длительно нагружена током I_y обычно около 1 А, который создает необходимой величины МДС F_y достаточной для удержания якоря притянутым. Индуктивность L_k магнитной системы (МС) в замкнутом положении имеет предельное значение; в ней сосредоточена энергия магнитного поля $W_{мп} = 0,5 L_k I^2$ значительной величины. Якорь удерживается силой P_y , с необходимым запасом превышающей итоговую составляющую силы сопротивления P_c отключающих и контактных пружин.

С энергетической точки зрения для отключения цепи удерживающего ЭМ необходимо освободить МС от запасенной в ней энергии, то есть размагнитить ее МП. Естественным путем это происходит рассеянием энергии на всех активных сопротивлениях МС. Сокращение продолжительности размагничивания против ее естественной величины решается отбором части энергии МП и преобразованием ее в форму энергии электростатического поля. Временная диаграмма ускоренного процесса отключения ЭМ представлена на рисунке 1. Продолжительность размагничивания $t_{\text{маг}}$ – лишь часть общего

времени отключения выключателя. Если за начало отсчета времени принять момент достижения отключаемым током величины уставки срабатывания, то лишь через время срабатывания датчика t_d может начаться снижение удерживающего тока (кривая 1) в ЭМ при соответствующем изменении схемы его включения контактами датчика. Это вызывает падение электромагнитной силы (ЭМС) $P_3(t)$ от начальной величины P_y до силы сопротивления P_c за счет размагничивания МС, снижения в ней индукции и величины магнитного потока. Этот процесс протекает во времени и имеет продолжительность $t_{\text{маг}}$ – времени гашения магнитного поля до параметров отпуска якоря. Следовательно, **время размыкания** контактов выключателя t_p имеет две составляющие: $t_p = t_d + t_{\text{маг}}$, если подвижный контакт (ПК) жестко связан с якорем МП. Механизм для передачи движения от якоря МС к подвижным контактам добавляет к времени размыкания дополнительную составляющую $t_{\text{мех}}$.

Сокращение времени гашения поля в МС привода выполняется включением в цепь удерживающего тока конденсатора при срабатывании датчика

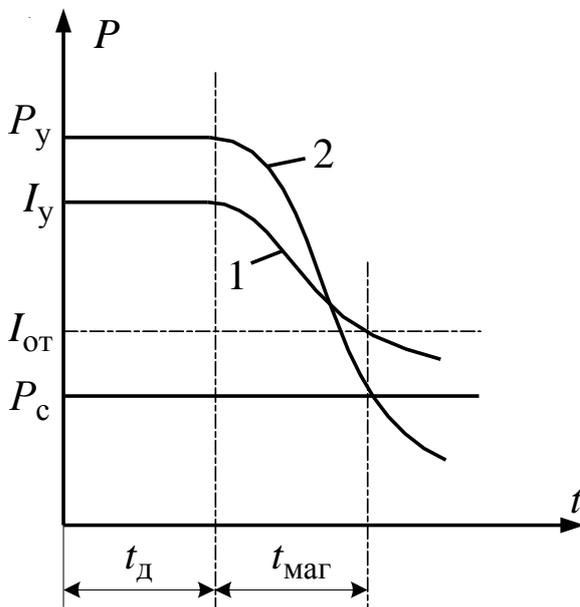


Рисунок 1 – Временная диаграмма работы привода при отключении выключателя
1 – кривая тока в катушке $I(t)$
2 – изменение удерживающей силы $P_3(t)$

тока (ДТ). Электрическая схема цепи удерживающего ЭМ на стадии размагничивания МП принимает вид, представленный на рисунке 2. Активизация процесса размагничивания начинается размыканием контактов датчика тока КА; при этом в цепь тока катушки ЭМ включается емкость C конденсатора. Составляющая $t_{\text{маг}}$, обусловленная уменьшением намагничивающего тока i , определяется режимом заряда конденсатора в цепи ДТ, который обусловлен его параметрами и условиями равновесия электрической цепи:

$$U_0 = ir + L_{\text{к}} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t idt . \quad (1)$$

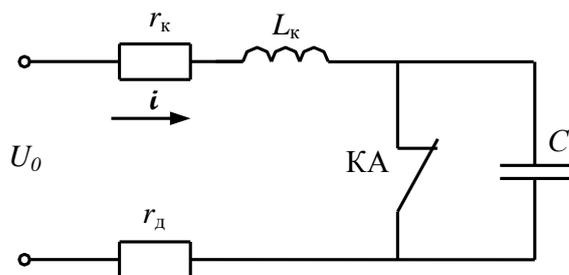


Рисунок 2 - Схема привода на стадии начала размагничивания магнитной системы
 U_0 – напряжение цепи управления,
 r_k – активное сопротивление катушки,
 r_d – добавочное сопротивление.
 КА – контакты датчика
 C – конденсатор
 L_k – индуктивность катушки.

Его решение для колебательного режима при ненулевых начальных условиях $i(0) = I_y$

$$i(t) = I_y \frac{\omega_0}{\omega} \cos(\omega t - \varphi) \cdot e^{-\alpha t} \quad (2)$$

$$\text{Здесь } \alpha = \frac{r}{2L}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_k C}},$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{\alpha}{\omega}$$

Для АБВ диапазон изменения величины индуктивности МС в замкнутом состоянии, определяемый вариацией ее габаритов по требованию согласования с механической нагрузкой и возможной нестабильностью величины воздушного зазора и магнитных характеристик стали, находится в пределах $L_k = (1,0 \div 1,5)$ Гн. Поэтому при емкости конденсатора в схеме управления отключением ЭМ в диапазоне $C = (0,5 \div 1,5)$ мкФ критическое сопротивление контура будет иметь величину $r_{кр} = (2 \div 4)$ кОм и значительно превосходить активное сопротивление

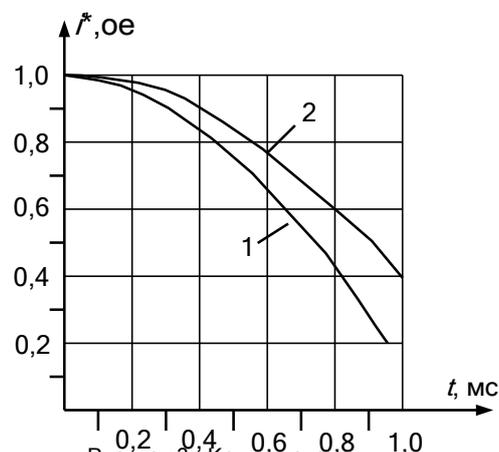


Рисунок 3 - Кривые спада тока при управляемом размагничивании системы привода
 Кривая 1 - $L = 0,81$ Гн,
 кривая 2 - $L = 1,09$ Гн,
 емкость конденсатора $C = 1,0$ мкФ.

цепи $r = (25 \div 35)$ Ом. Следовательно, переходный процесс размагничивания в рассматриваемых случаях всегда будет иметь колебательный характер с изменением тока по (2). Для выключателя ВБ-11 с ускоряющим конденсатором $C = 1,0$ мкФ в схеме управления отключением расчетные кривые спада тока при размагничивании МС привода в относительных единицах

$$i^* = \frac{i(t)}{I_y} \text{ при двух значениях конечной величины воздушного зазора и со-}$$

ответственно индуктивности L_k приведены на рисунке 3. Управляемое размагничивание завершается за время, не превышающее четверти периода колебаний (до одной мс).

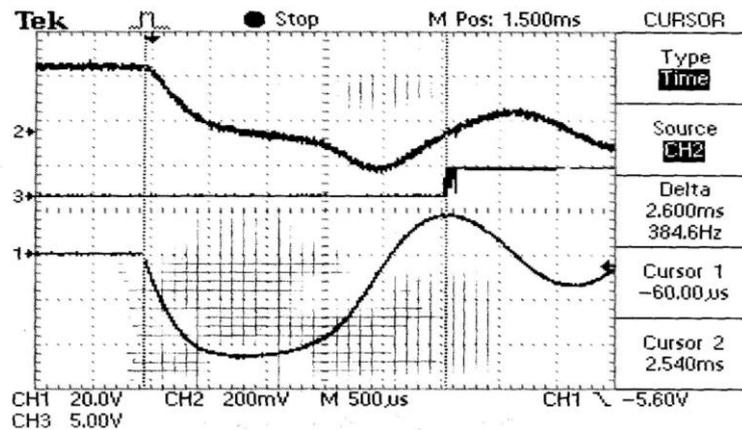


Рисунок 4 – Осциллограмма управляемого отключения электромагнита

Основные особенности рассматриваемых процессов иллюстрирует представленная на рисунке 4 осциллограмма отключения приводного ЭМ быстрогодействующего выключателя ВБ-11. Изменение тока (кривая 2) и напряжения на конденсаторе (кривая 1) имеют форму колебаний с частотой, зависящей от положения якоря. С началом его движения частота повышается, поскольку индуктивность МС начинает падать. Полное время спада тока до нулевого значения составляет всего 0,6 мс.

На этапе отключения в ЭМ имеет место уменьшение величины индукции $B(t)$, задаваемое изменением тока в катушке $i_k(t)$. Составляющая $t_{\text{маг}}$, обусловленная уменьшением индукции, определяется процессом **затухания магнитного потока**. Во время переходного процесса с момента размыкания контактов датчика и включения в цепь управления конденсатора магнитное поле в сердечнике поддерживается уменьшающимся во времени током катушки, и, соответственно, будет уменьшаться величина магнитного потока Φ . Идеализированная схема МС без учета вторичных контуров тока на этой стадии процесса может быть представлена по рисунку 5. К началу переходного процесса в МП существовал установившийся поток, распределенный по сечению МП S равномерно, т.е. все элементы поперечного сечения были намагничены одинаково ($B_y = \text{const}$), поэтому и в режиме размагничивания величину индукции в разных точках сечения следует принимать одинаковой. Воздушный зазор в притянутом положении составляет $\delta = (0,05 \div 0,1)$ мм. При этом магнитное поле практически полностью сосредоточено в сердечни-

ках, потоки рассеивания не превышают нескольких процентов от основного потока, который, следовательно, допустимо принимать неизменным по контуру МП.

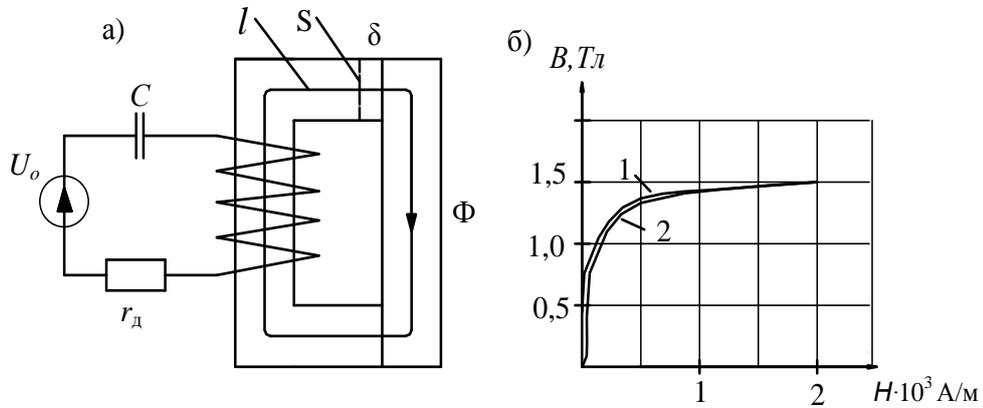


Рисунок 5 – Идеализированная магнитная система (а) и ее характеристика размагничивания (б)

С учетом принятых допущений уравнение равновесия электрических величин целесообразно представить в форме

$$ir + w \frac{d\Phi}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t idt = U_0. \quad (3)$$

Без учета активного сопротивления r , после перехода к индукции B , получим интегро-дифференциальное уравнение $wS \frac{dB}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t idt = U_0$, которое после дифференцирования и приведения к канонической форме с учетом

$$i = (l_3/w) H \text{ и } m^2 = \frac{l_3}{Cw^2 S} \text{ запишется } \frac{d^2 B}{dt^2} + m^2 H = 0, \quad (4)$$

принимает окончательную форму однородного нелинейного дифференциального уравнения второго порядка, связывающего во времени магнитные величины B и H , определяемые только кривой намагничивания.

Его интегрирование выполняется методом разделения переменных. Для этого

введем новую переменную $y = \frac{dB}{dt}$ и умножим на нее уравнение (4)

$$y \frac{dy}{dt} + m^2 H \frac{dB}{dt} = 0, \text{ которое приводится к форме с разделяющимися переменными, одно слагаемое которой зависит только от } y, \text{ второе – от } B$$

одно слагаемое которой зависит только от y , второе – от B

$$y dy + m^2 H dB = 0. \quad (5)$$

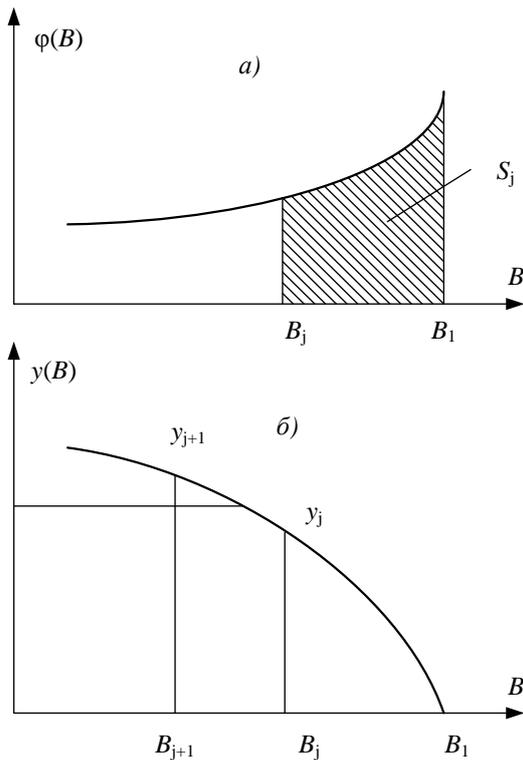


Рисунок 6 – Графоаналитический метод расчета затухания потока

Начальные условия решения уравнения (5) определяются следующими соотношениями. В исходном состоянии индукция имеет величину B_y и по законам коммутации контуров LC не может изменяться скачкообразно, следовательно, при $t = 0$ $B_1 = B(0) = B_y$; $y(0) = 0$. На временном промежутке до произвольного момента t для величин y и B справедливо:

$$\int_0^y y dy = - \int_{B_1}^B m^2 H dB = \int_B^{B_1} m^2 H dB.$$

Левый интеграл вычисляется непосредственно; следовательно вспомогательная

переменная y есть функция B $y = z(B) = \sqrt{\int_B^{B_1} 2m^2 H dB}$ (6)

и определяется интегралом в подкоренном выражении. Вычисление его выполняется графоаналитическим методом по заданной характеристике намагничивания. Для этого предварительно строится график подынтегральной функции $\varphi(B) = 2m^2(B)H(B)$. В качестве исходного значения аргумента этой зависимости принимается начальная величина $B_1 = B_y$ и с интервалом ΔB задается множество N точек на оси B $B_j = B_1 - (j - 1) \Delta B$; $1 \leq j \leq N$ (рис. 6).

Данные расчета гашения поля в приводе ВБ-11 по разработанной методике графоаналитического способа решения уравнения (6) представлены на рисунке 7. Интервал падения индукции в процессе размагничивания принимался $\Delta B = 0,074$ Тл (0,05 о.е.). В этих условиях за время в 0,87 мс индукция в МП падает до 0,5 от исходной. Однако скорость изменения индукции несколько ниже соответствующей скорости падения тока в намагничивающей катушке – до той же относительной величины примерно за 0,7 мс (рис.3, кривая 1). Ускорить этот процесс возможно за счет некоторого снижения B_y так,

чтобы ее величина стала ближе к колену основной кривой намагничивания. Составляющая времени размыкания выключателя $t_{\text{маг}}$ может составлять доли миллисекунды. Следовательно, ЭМ с быстрым отключением может использоваться в качестве приводного механизма в выключателях самого высокого по быстродействию третьего класса (t_p до 2 мс).

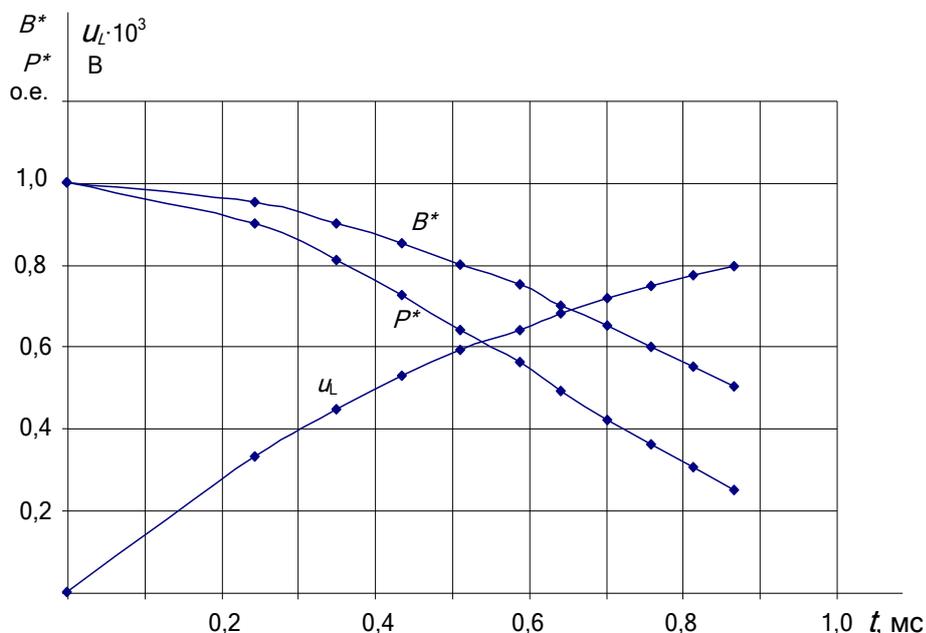
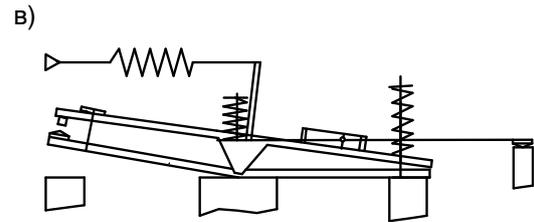
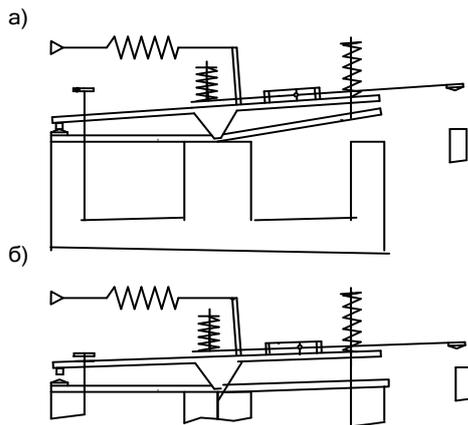
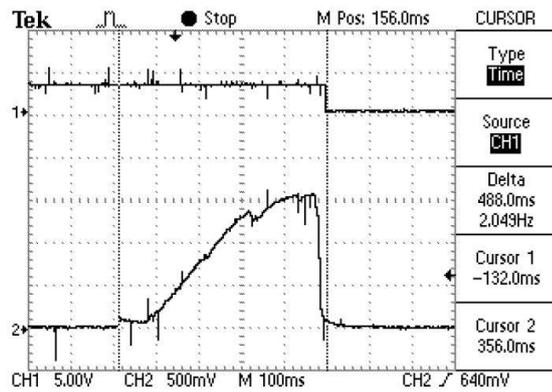
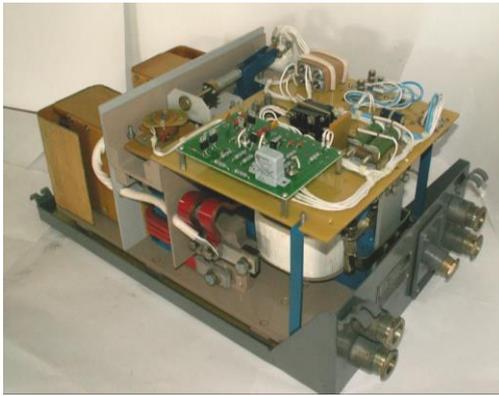


Рисунок 7 – Характеристики гашения поля

В режиме включения АБВ надежность коммутации определяется созданием предвключенного положения, в котором часть подвижной системы, связанная с подвижным контактом, останавливается и задерживается на время, пока существуют условия повторного включения в схеме управления приводом, лишь при исчезновении этих условий контакты выключателя замыкаются; коммутация включения завершается.

Разработанный автором способ промежуточной остановки подвижного контакта при включении аппарата на основе встраиваемого П-образного электромагнита свободного расцепления в силовой электромагнит тоже П-образного типа реализован в ряде вариантов:

А. Условно Ш-образная система. Общая намагничивающая катушка объединяет сердечники двух П-образных электромагнитов. Фотография и кинематическая схема ВБ 3/2-400/6 показана на рисунке 8. Время выключения аппарата составляет не более 500 мс.

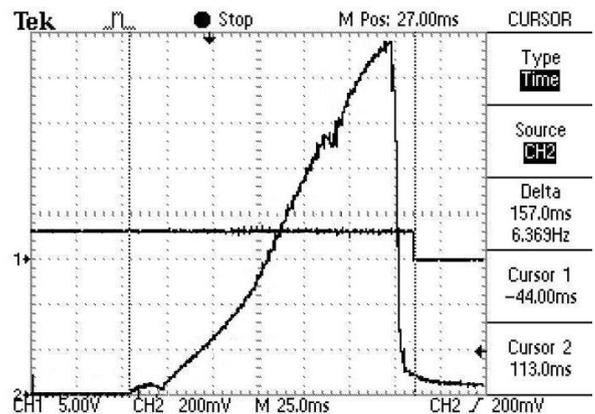
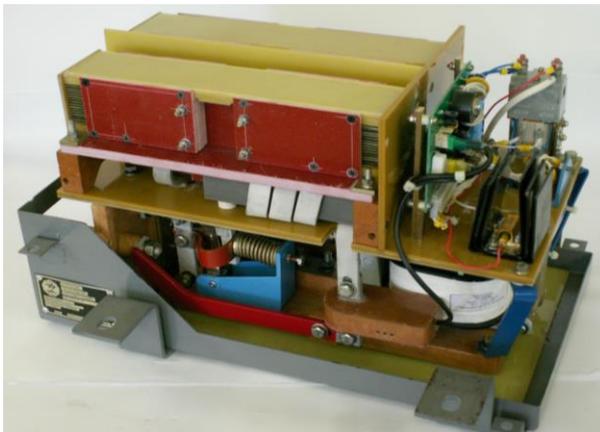


Номинальный ток – 400 А;
 Номинальное напряжение – 550 В;
 Собственное время отключения – не более 8 мс;
 Отключающая способность – более 16 кА (в безындуктивной цепи);

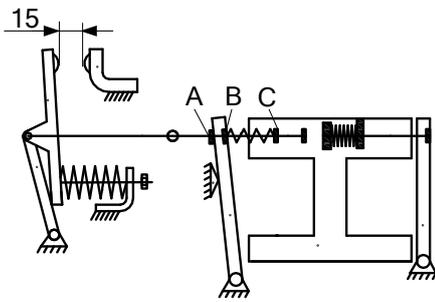
Рисунок 8 – Выключатель ВБ 3/2-400/6 без кожуха, осциллограмма его включения, технические параметры и кинематическая схема механизма:

а) отключенное, б) предвключенное, в) включенное положения

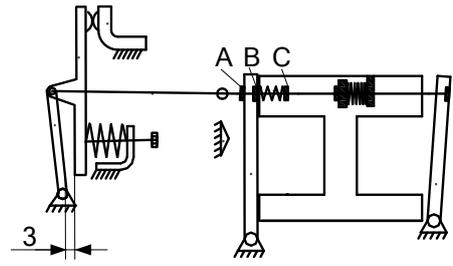
Б. Система Н-типа – два П-образных электромагнита объединяются основаниями, образуя ультраплоский приводной механизм (рис.9).



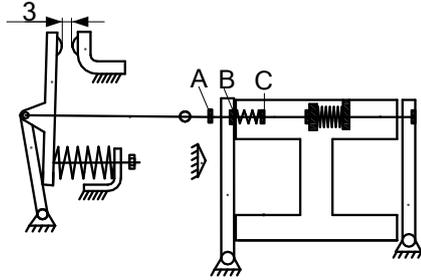
При применении комбинированного магнитного дутья исключаются неотключаемые и критические токи; время полного отключения любого тока в любом направлении его протекания не превышает 80 мс; время выключения аппарата составляет не более 200 мс (по ГОСТу 9219 не более 0,5 с);



а) отключенное положение



в) включенное положение

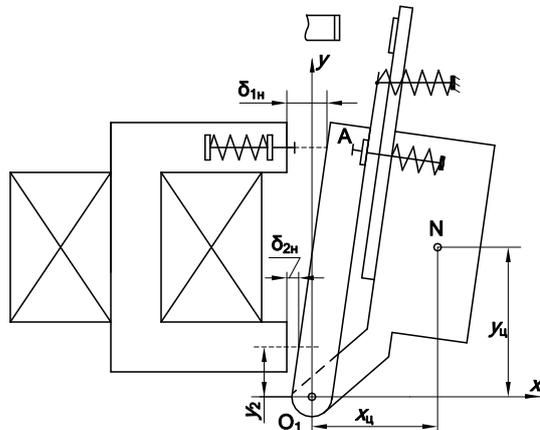
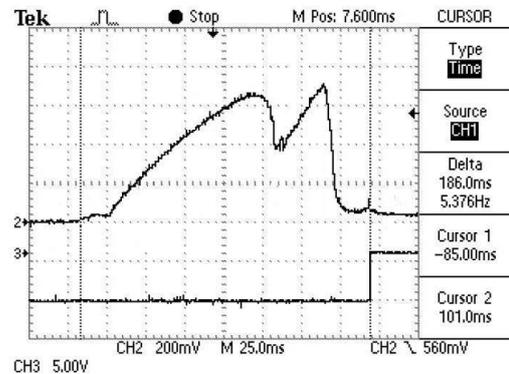


б) предвключенное положение

Номинальный ток – 250 А;
 Номинальное напряжение – 550 В;
 Собственное время отключения – не более 6 мс;
 Отключающая способность – более 16 кА (в безындуктивной цепи)
 Масса аппарата – не более 45 кг.

Рисунок 9 – Выключатель ВБ 7/2м-250/6 без кожуха, осциллограмма его включения, технические параметры и кинематическая схема механизма

В. Привод с независимым отдельным электромагнитом свободного расцепления (рис.10).



Номинальный ток – 250 А;
 Номинальное напряжение – 550 В;
 Собственное время отключения – не более 5 мс;
 Отключающая способность – более 16 кА (в безындуктивной цепи);
 Исключены неотключаемые токи
 Величина критического тока прямого направления, 0,8 ÷ 14,9 А;
 обратного направления, 3,9 ÷ 25 А;

Рисунок 10 – Выключатель ВБ 11/1-250/6 без кожуха, осциллограмма его включения, технические параметры и конструктивная схема привода

При таком способе комплектации электромагнитный привод АБВ представляет двухступенчатую систему с главным силовым П-образным включающим ЭМ, на якоре которого установлен облегченный ЭСР такого же типа, с собственными намагничивающими катушками. Полное время отключения цепи с критическим током не более 250 мс.

Приведенные конструкции обеспечивают в реальных аппаратах устойчивую их работу. В приложениях к этой главе рассмотрены способы регулирования тяговых характеристик, магнитная система выключателя ВБ 11, конструктивные особенности быстродействующих выключателей ВБ 5/1-400/6 и ВБ 11/1-250(400)/6 и способы защиты от повторного включения.

В третьей главе рассматриваются вопросы по разработке и исследованию ДС, а также исследованию процессов дугогашения. Процесс отключения постоянного тока является результатом взаимодействия целого ряда нелинейных элементов и процессов, поэтому этот процесс не описывается замкнутыми аналитическими зависимостями. Замена экспериментальной зависимости удельной объемной проводимости нагретого газа от температуры

$\sigma = f(T)$ зависимостью $\sigma = f(S)$, где $S = \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT$ – так называемая обобщенная теплопроводность нагретого газа, а $\lambda(T)$ – теплопроводность этого газа,

позволила с помощью функций Бесселя описать процессы в статической дуге

$$\text{следующим уравнением: } S_1 = 1,248K \ln \frac{0,519KaE}{q}, \quad (7)$$

которое после несложных преобразований с учетом рассматриваемого метода

$$\text{приводится к виду: } S_1 = 0,1592 \frac{(U_d - U_{\text{прэ}})I_d}{l_d} \ln 0,0662 \frac{aI_d (U_d - U_{\text{прэ}})^2}{q}, \quad (8)$$

где S_1 и a – параметры линеаризации; U_d , I_d , l_d – напряжение, ток и длина дуги; $U_{\text{прэ}} = U_a + U_k$ – суммарное падение напряжения вблизи положительного (анода) и отрицательного (катода) электродов (здесь контактов коммутационного аппарата); q – коэффициент теплоотдачи с поверхности дуги.

Из совместного решения последнего уравнения (8) с электросетевым уравнением для питающей сети: $U_n = I_d R_c + L_c dI_d/dt + U_d$, (9)

где R_c и L_c – активное сопротивление и индуктивность питающей сети, были получены семейства ВАХ статической дуги с удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных результатов.

Например, для питающей сети постоянного тока с напряжением $U_{п} = 220$ В и активным сопротивлением сети $R_c = 22$ Ом расчетная критическая длина дуги составила $l_{д\ крит\ расч} = 1,87$ см, а экспериментальная критическая длина дуги для этих же параметров сети составила $l_{д\ крит.эксп} = 1,4$ см.

Отсутствие неотключаемых токов и гашение дуги МИТ с соблюдением норм по ГОСТу 12.1.038-82 для защитной аппаратуры, установленной на троллейбусах, необходимое условие. В выключателе ВБ 3/2-400/6 малый обратный ток величины порядка $5 \div 10$ А может гореть между контактами столь длительное время, что вызывает разрушение асбоцементных перегородок ДК или гашение дуги затягивается до $0,6 \div 1,2$ с. Были проведены различные эксперименты: увеличение числа витков в катушке МД, инерционное воздушное дутье, подключение к контактам выключателя предварительно заряженного конденсатора, который после размыкания контактов разряжался в том же направлении, что и отключаемый ток. Все эти способы устойчивого эффекта не дали. Далее теоретически и экспериментально были исследованы последовательное МД с простым П-образным МП; последовательное МД с усилением напряженности магнитного поля полюсными наконечниками; последовательное МД с усилением напряженности магнитного поля постоянными магнитами; параллельное МД; комбинированное МД.

Лучший результат был получен при применении комбинированного МД. Учитывая то, что при последовательном МД надежность гашения дуги в области номинальных токов, вплоть до токов КЗ, высока, отключение этих токов производилось последовательным МД, а диапазон КТ исключался с параллельным МД от управляемого независимого источника питания (рис.11). Проведенные испытания по коммутации токов в диапазоне $0 \div 250$ А показали, что применение комбинированного МД отключение всех токов любого направления полностью обеспечивает, к тому же диапазон времени гашения дуги соответствует требованиям всех нормативных документов (табл.1).

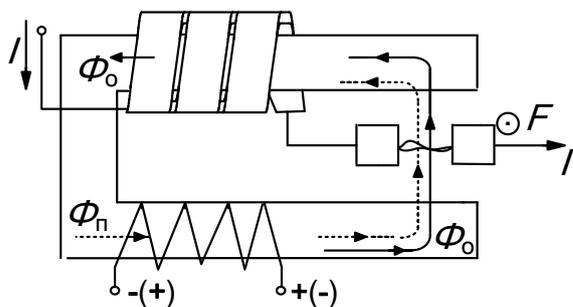


Рисунок 11 – Комбинированное магнитное дутье

I – ток главной цепи, Φ_o – магнитный поток последовательного дутья, F – сила Лоренца, Φ_p – магнитный поток параллельного дутья

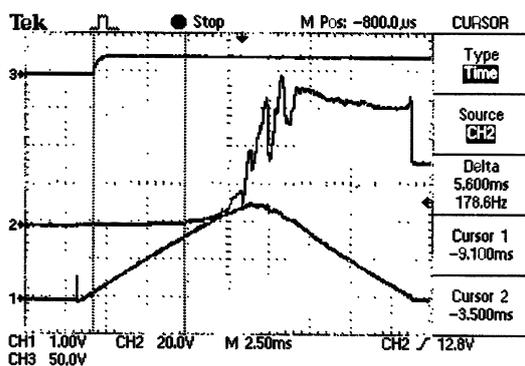


Рисунок 12 – Осциллограмма отключения тока КЗ при комбинированном МД

1 - ток КЗ; 2 - напряжение на коммутирующих контактах; 3 - сигнал управления

Таблица 1 – Результаты опытов с комбинированным МД в выключателе ВБ 7 (прямое и обратное направления)

$I_{\text{дуги}}$ расч, А	t_{max} , мс прямое направление	t_{max} мс обратное направление
249	24,4	20,3
121	26,9	23,6
74	28,6	30,3
57	32,2	30,5
36,6	34,7	26,6
27,9	33,6	29,2
14,7	35,3	33,6
7,4	28,6	30,8
3,8	31,1	30,5
0,84	22,0	22,5

Осциллограмма отключения тока КЗ при комбинированном МД приведена на рис.12. Разработанный промышленный образец электрической схемы (рис. 13) был установлен на аппарате ВБ 6/2-400/6, который успешно прошел «полевые» испытания на одном

из троллейбусов Северного депо ТТУ г. Екатеринбурга. В дальнейшем разработанные с высоким коэффициентом унификации выключатели ВБ 13/1-400/6 и ВБ 13/2-400/6, кроме комбинированного МД, были укомплектованы электронным тепловым расцепителем и устройством – «черным ящиком», запоминающим все параметры отключаемого тока, а также ведущим учет количества срабатываний аппарата. Ресурс по механической износостойкости этих аппаратов составил более 200 000 циклов.

Далее рассматриваются вопросы, затрагивающие ряд специальных мер для оптимизации конструкции ДК и роль дугогасительной решетки в ДС, где использованы дугогасительные пластины с клинообразными пазами. В приложениях приведены сравнительные экспериментальные данные различных дугостойких высокотемпературных безасбестовых листовых и литевых материалов.

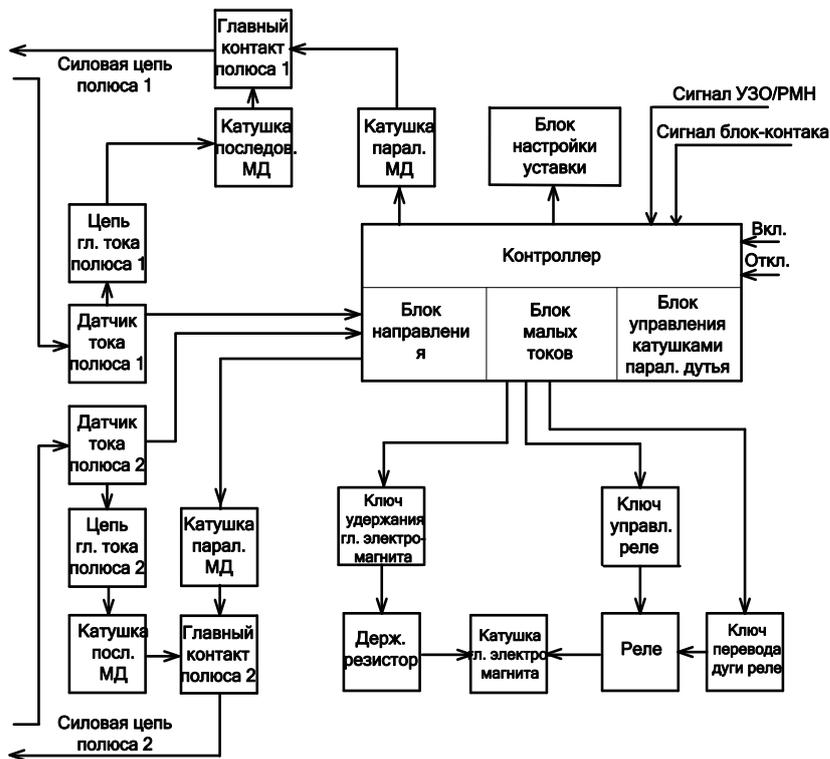


Рисунок 13 – Функциональная блок-схема ЭСУ
ВБ 6/2-400/6

В четвертой главе рассматриваются вопросы разработки и исследования автоматических систем управления, в том числе, разработка и исследование датчиков тока (ДТ) с использованием эффекта Холла прямого усиления, ДТ, формирующих сигнал отключения в функции модуля контролируемого тока безотносительно его

направления, ДТ с электрической системой защиты от аварийных перегрузок. Разработана универсальная ЭСУ для выключателей типа ВБ 7м и ВБ 11. В качестве основы для схемотехники ЭСУ используются однотипные блоки логики формирования управляющих сигналов на микрореле напряжения.

Далее рассматривается управление коммутациями, работоспособность и надежность ЭСУ, представлен расчет быстродействия ЭСУ. Общее время реакции электронной схемы на сигнал сенсора Холла не превышает 122,2 мкс.

Гибридный АБВ постоянного тока ВБ 15-250/6. Для увеличения ресурса выключателя следует повышать коммутационный ресурс отключения токов от нуля до номинального. Для снижения нагрузки на полупроводниковые приборы оставлена ДС с последовательным МД для отключения токов перегрузок и КЗ, а для отключения токов от нуля до номинального применена управляемая полупроводниковая система. В таком гибридном АБВ критические токи отсутствуют и коммутационный ресурс равен механическому. На рисунке 14 представлена структурная схема гибридного выключателя ВБ 15, который позволяет из определенных модулей создать разные типы исполнения выключателей на разные номинальные напряжения и ряды тока

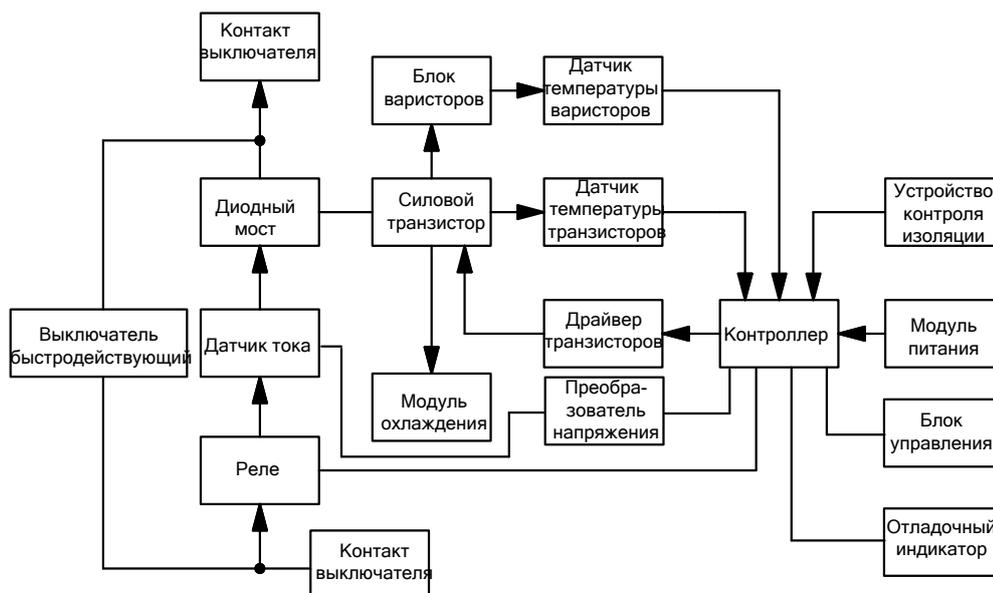


Рисунок 14 – Структурная схема гибридного выключателя ВБ 15-250/6

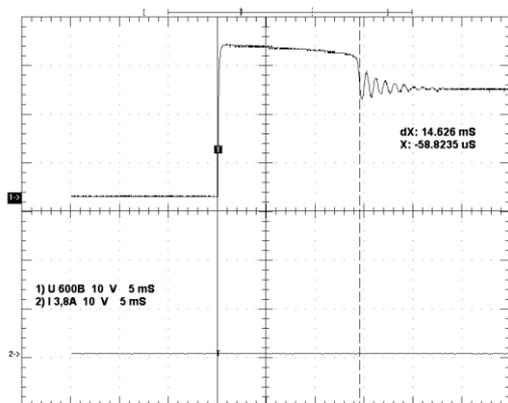


Рисунок 15 – Осциллограмма напряжения на контактах выключателя при отключении тока электронным модулем

номинальное напряжение – 600 В
 коммутируемый ток – 3,8 А
 индуктивность цепи – 2,76 Гн
 $L/R = 0,01312$ с
 максимальное перенапряжение – 800 В
 полное время отключения тока – 14,6мс

для различных условий работы по требованиям заказчика. Изготовленный модуль отключения тока показал хорошие результаты, в качестве примера на рисунке 15 приведена осциллограмма напряжения на контактах выключателя при отключении тока модулем.

В пятой главе приводятся требования к испытаниям АБВ основных нормативных документов – ГОСТ 9219-95 «Аппараты электрические тяговые», ГОСТ 2585-88 «Выключатели автоматические быстросрабатывающие постоянного тока», описание необходимых видов испытательного оборудования, в том числе, созданная в ООО «Технос» синтетическая схема для испытания АБВ в разных режимах, и виды испытания, схема испытания аппаратов на МИТ, результаты испытаний выключателей, результаты ресурсных испытаний выключателей ВБ 7м и ВБ 11 в «диком» режиме. В приложениях к этой главе результаты испытаний выключателей представлены обширным экспериментальным материалом.

Экономическая оценка. По представленной экономической справке ООО «Технос», с 1999 года по 12.2014 г., реализованы АБВ: 73 шт. ВБ 3/1-400/6, 533 шт. ВБ 3/2-400/6, 87 шт. ВБ 5/1-400/6, 1327 шт. ВБ 7/2-250/6, 1365 шт. ВБ 7/2м-250/6, 538 шт. ВБ 9/1-250/6, 165 шт. ВБ 11/1-250/6, 385 шт. ВБ 11/1-400/6, 23 шт. ВБ 13/1-400/6 и 42 шт. ВБ 13/2-400/6. То есть, 3267 троллейбусов и 1271 трамваев обеспечены БЗ. Стоимость двухполюсного аппарата составляет 70 тыс. рублей, а однополюсного – 65 тыс. рублей без НДС, что гораздо ниже всех зарубежных аналогов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа научно-технических публикаций по электрическим выключателям для городского наземного электротранспорта (трамвай, троллейбус) показано, что известные технические решения по указанным выключателям обладают некоторыми недостатками, что обуславливает актуальность исследований по их усовершенствованию.

2. Разработан, теоретически и экспериментально исследован целый ряд новых, защищенных патентами, быстродействующих ЭММ и дугогасительных систем, применяемых в разных типах выключателей для использования на подвижных объектах ГЭТ.

3. Разработан и исследован целый ряд новых, защищенных патентами вариантов и блоков автоматических систем управления для разных типов выключателей, в том числе разработан новый гибридный выключатель.

4. Рассмотрены вопросы различных видов испытаний выключателей в соответствии с требованиями нормативных документов. Приведены основные параметры испытательного оборудования.

5. Разработанные новые электромагнитные механизмы и дугогасительные системы могут быть рекомендованы для применения их в сильноточных (свыше 1000 А) АБВ для постоянного тока.

6. Разработка и исследование малогабаритных и надежных гибридных и электронных аппаратов, естественно, при обеспечении соответствующей элементной базы, является перспективой настоящей работы.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах: статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. **Мурадов Э.Ш.** Ток утечки как косвенный показатель электробезопасности троллейбуса / Э.Ш. Мурадов, А.А. Грицук // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2008. – № 5. – С. 24–27, (0,4 п.л./0,2 п.л.).

2. **Мурадов Э.Ш.** Двухполюсный автоматический быстродействующий выключатель ВБ 3/2 / Э.Ш. Мурадов, А.А. Грицук // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2008. – № 1. – С. 24–27, (0,4 п.л./0,2 п.л.).

3. **Мурадов, Э.Ш.** Быстродействующий автоматический выключатель для повышения электробезопасности городского электротранспорта / Э.Ш. Мурадов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 1. – С. 48–52.

4. **Мурадов, Э.Ш.** Однополюсный автоматический выключатель ВБ 11 / Э.Ш. Мурадов, А.А. Грицук // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2012. – № 1. – С. 28–32, (0,56 п.л./0,5 п.л.).

5. **Мурадов, Э.Ш.** Предвключенное положение как фактор надежности быстродействующих выключателей // Э.Ш. Мурадов, А.А. Грицук // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 6. – С. 15–20, (0,9 п.л./0,5 п.л.).

6. **Мурадов, Э.Ш.** Исследование процессов дугогашения в быстродействующих выключателях постоянного тока / Э.Ш. Мурадов // Электрооборудование : эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 7. – С.69-74.

7. **Мурадов, Э.Ш.** Гибридный быстродействующий автоматический выключатель на номинальный ток 250 А / Э.Ш. Мурадов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 3. – С. 35–40.

Патенты РФ на изобретения:

8. Пат. на изобретение № 2396631 Рос. Федерация : RU 2396631 С1 Н 01 Н 77/06. Выключатель автоматический быстродействующий / **Э.Ш. Мурадов** // заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Технос». – № 2009109665 ; заявл. 17.03.2009 ; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22. – 5 с. : ил.

9. Пат. на изобретение № 2375780 Рос. Федерация : RU 2375780 С1 Н 01 Н 77. Привод выключателя автоматического быстродействующего / **Э.Ш. Мурадов** // заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Технос». – № 2008132234; заявл. 04.08.2008 ; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 34. – 4 с. : ил.

10. Пат. на изобретение № 2396631 Рос. Федерация : RU 2396631 С1 Н 01 Н 77. Выключатель автоматический быстродействующий / **Э.Ш. Мурадов** // заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Технос». – № 2009109665 ; заявл. 17.03.2009 ; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22. – 5 с. : ил.

Патенты РФ на полезные модели:

11. Пат. на полезную модель № 80628 Рос. Федерация : RU 80628 С1 Н 01 Н 77/06. Выключатель автоматический быстродействующий постоянного тока / **Э.Ш. Мурадов** // заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Технос». – № 2008139584 ; заявл. 06.10.2008 ; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4. – 2 с. : ил.

Патенты РФ на промышленные образцы:

12. Пат. на пром.образец № 76376 Рос. Федерация: RU 76736 МКПО 13-03. Выключатель автоматический / **Э.Ш. Мурадов** // заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Технос». – № 2009500672 ; заявл. 17.03.2009 ; опубл. 10.10.2010, – 4 с. : ил.

13. Пат. на пром.образец № 82354 Рос. Федерация: RU 76736 МКПО 13-03. Выключатель автоматический / **Э.Ш. Мурадов** // заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Технос». – № 2011500506 ; заявл. 24.05.2012 ; опубл. 16.07.2012, – 4 с. : ил.

Монографии:

14. **Мурадов, Э.Ш.** Быстродействующие выключатели ООО «Технос»: монография / Э.Ш. Мурадов. – Екатеринбург : Полиграфист, 2008. – Ч.1 – 222 с. : ил.

15. **Мурадов, Э.Ш.** Автоматические быстродействующие выключатели для троллейбусов: монография / Э.Ш. Мурадов, В.В. Шипицын, Р.Е. Середко. – Екатеринбург : Полиграфист, 2005. – 163 с. : ил.

16. **Мурадов Э.Ш.** Силовые электромагнитные механизмы в быстродействующих выключателях: монография / А. А. Грицук, Э.Ш. Мурадов. – Екатеринбург : Банк культурной информации, 2014. – 316 с. : ил.

17. **Мурадов, Э.Ш.** Быстродействующие выключатели ООО «Технос»: монография / Э.Ш. Мурадов, А. А. Грицук. – Екатеринбург : Сред.-Урал. кн. изд-во, 2008. Ч.2. – 264 с.

18. **Мурадов, Э.Ш.** Электроника в быстродействующих выключателях: монография / Э.Ш. Мурадов, В.В. Шипицын, Н.В. Половинкина. – Екатеринбург : Полиграфист, 2005. – 258 с. : ил.

19. **Мурадов, Э.Ш.** Автоматические быстродействующие выключатели для трамваев: монография / Э.Ш. Мурадов, А.А. Грицук, А.В. Пузан. – Екатеринбург : Астра, 2006. – 236 с. : ил.