

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
РУТ(МИИТ)

На правах рукописи

Заторская Лада Павловна

ЗАЩИТА СМЕЖНЫХ ПИТАЮЩИХ ЛИНИЙ ТЯГОВОЙ СЕТИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ РЕЛЕ-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ
ШУНТОВ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Гречишников Виктор Александрович

Москва 2019

Оглавление

Введение.....	5
1. Обоснование необходимости разработки схемы защиты смежных питающих линий тяговой сети постоянного тока на базе реле-дифференциальных шунтов	11
1.1. Влияние повышения скорости движения поездов на качество электроснабжения	11
1.2. Процесс перехода электровоза с питаемой зоны на смежную	15
1.2.1. Анализ результатов испытания секционных изоляторов на влияние воздействия электрической дуги на электрические свойства изолирующих скользунов	17
1.3. Обзор существующих устройств защиты проводов контактной сети от воздействия электрической дуги и их недостатки	26
1.3.1. Устройство защиты в виде реле-дифференциального шунта (РДШ).....	27
1.3.2. Устройство защиты контактного провода от пережогов на воздушных промежутках Е.А. Борзенко.....	28
1.3.3. Устройство для защиты контактного провода от пережога Р.В. Катин, А.А. Порцелан, А.А. Порцелан	30
1.3.4. Устройство для защиты контактного провода от пережогов на изолирующих сопряжениях С.Л. Буталов, Ю.Л. Довгалев, Ю.М. Телеченкова, С.В. Мормышев.....	33
1.3.5. Устройство для защиты проводов контактной сети от пережогов на воздушных промежутках В.А.Чернявского и Л.П. Крюкова	35
1.3.6. Устройство для защиты контактных проводов электрифицированных железных дорог постоянного тока от пережогов на воздушном промежутке В.А. Савченко	37
1.4. Обобщенный анализ существующих устройств защиты проводов ИВП.....	39
2. Моделирование проезда электровоза под током по ветвям изолирующего воздушного промежутка	41
2.1. Причины пережогов проводов.....	41
2.1.1. Предпосылки создания модернизированного устройства защиты ПЛТС постоянного тока	43
2.1.2. Характеристики срабатывания ВАБ-49	45
2.2. Определение длины дуги между токоприемником и ветвью ИВП ...	48
2.3. Определение тока Э	54
2.4. Разработка принципиальной схемы РДШ(М).....	58
2.4.1. Расчет параметров РДШ(М).....	59
2.4.2. Расчет индуктивности магнитопровода РДШ(М).....	61
2.4.3. Расчет индуктивности пакетов железа на тонкой шине РДШ(М).....	63
2.4.4. Определение постоянной времени РДШ(М) и разницы токов в его шинах	65

2.5. Проезд Э под током ИВП	67
2.6. Имитационное моделирование переходных процессов в тяговой сети постоянного тока при проходе токоприемника Э под током по ветвям ИВП и определение напряжения на зажимах ДК РДШ(М).....	73
2.6.1. Описание первого этапа моделирования	78
2.6.2. Описание второго этапа моделирования	79
2.6.3. Описание третьего этапа моделирования	80
2.7. Обработка результатов моделирования переходных процессов в шинах РДШ(М).....	86
3. Разработка схем блокировки (варианты) на базе РДШ(М)	89
3.1. Принцип работы схемы блокировки смежных ПЛТС постоянного тока на базе РДШ(М)	89
3.1.1. Схема блокировки – вариант 1.....	90
3.1.2. Принцип работы схемы блокировки – вариант 1.....	91
3.1.3. Схема блокировки – вариант 2.....	92
3.1.4. Принцип работы схемы блокировки – вариант 2.....	93
3.1.5. Схема блокировки – вариант 3.....	94
3.1.6. Принцип работы схемы блокировки – вариант 3.....	95
3.1.7. Схема блокировки – вариант 4.....	96
3.1.8. Принцип работы схемы блокировки – вариант 4.....	97
3.2. Определение количества витков ДК для создания противотока, демпфирующего основной магнитный поток в магнитопроводе РДШ(М)	98
3.3. Определение количества витков ДК РДШ(М) и разработка схемы для подключения реле напряжения схемы блокировки к выводам ДК РДШ(М).....	102
3.4. Проведение испытаний схемы блокировки на базе РДШ(М)	108
4. Оценка эффективности инвестиционного проекта по оснащению ПЛТС постоянного тока схемой блокировки на базе РДШ(М).....	112
4.1. Определение стоимостных показателей	112
4.1.1. Определение капитальных вложений на создание схемы блокировки	113
4.1.2. Определение затрат на обслуживание схемы блокировки	114
4.1.3. Определение амортизационных отчислений.....	115
4.2. Определение экономического эффекта от использования схемы блокировки	116
4.2.1. Определение срока окупаемости	120
4.2.2. Определение коэффициента экономической эффективности	121
4.2.3. Определение рентабельности инвестиционного проекта	122
4.3. Определение натуральных показателей.....	123
Выводы	125
Список литературы	127
Приложение 1. Показатели работы хозяйства электрификации и электроснабжения АО «РЖД» за 2012 год.....	134

Приложение 2. Тексты программ обработки данных на Delphi	138
Приложение 3. Протокол испытаний быстродействующего автоматического выключателя	144

Введение

Актуальность темы исследования. Железные дороги являются одним из важнейших звеньев в системе жизнедеятельности страны. В современных условиях задача обеспечения бесперебойного движения осложняется. Число пережогов контактных проводов постоянно возрастает, что, в основном, связано повышением нагрузки на систему тягового электроснабжения из-за открытия новых направлений и соединительных линий, ростом скоростей и массы поездов, повышением удельного числа современного электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями в эксплуатируемом парке локомотивов.

В работе тяговой сети чрезвычайные ситуации чаще всего возникают вследствие короткого замыкания (КЗ). Устройство защиты от КЗ, реализуемой с помощью быстродействующих выключателей (БВ), оборудованных реле-дифференциальным шунтом (РДШ) позволяет отключить питающую линию тяговой сети (ПЛТС) при меньших значениях тока, относительно уставки максимальной токовой защиты, при быстрых положительных изменениях тока.

Однако, при большом приращении тока в сети из-за прераспределения питания во время прохода токоприемника электровоза (Э) под током по ветвям изолирующего воздушного промежутка (ИВП) неселективная работа устройств защиты приводит к ложным срабатываниям и отключению зоны питания тяговой сети, въезду электровоза под током на отключенную зону, возникновению электрической дуги и пережогу контактного провода, остановке поезда. Такая неселективная работа защиты является прямым следствием специфических свойств электро-магнитно-механической системы РДШ и являются причиной ложных отключений БВ смежных ПЛТС.

Актуальность работы заключается в устранении существенного недостатка электро-магнитно-механических систем защит питающих линий тяговой сети путём создания модернизированного реле-дифференциального шунта (РДШ(М) и разработкой схем блокировки действия защит (варианты), как способа борьбы с пережогами проводов тяговой сети постоянного тока в зоне ИВП.

Большой научный потенциал Российских ученых, трудящихся в области энергоснабжения электрического железнодорожного транспорта, позволил определить пути решения проблемы, и реализовать концепцию построения защиты смежных ПЛТС для уменьшения числа пережогов. Известны труды Савченко В. А., Бардина А. М., Сердинова С. М., Пупынина В. Н., Фигурнова Е. П., Марквардта К. Г., Горошкова Ю. И., Гречишникова В.А., Косарева Б.И., Бадёра М.П. и других специалистов.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка способа повышения уровня селективности схемы защиты от токов КЗ, осуществляемой с помощью неполяризованных выключателей и первичных датчиков защиты, путем построения системы блокировки несанкционированного срабатывания БВ смежных ПЛТС постоянного тока при проходе Э под током по ветвям ИВП.

Объект исследования. Схема защиты от токов КЗ смежных ПЛТС постоянного тока, осуществляемая с помощью неполяризованных выключателей и РДШ, включая конструктивные элементы контактной сети.

Методы исследований. В диссертационной работе при решении поставленных задач были применены методы системного анализа и обобщения материалов экспериментальных исследований и статистических данных. Применены методы имитационного моделирования на базе современных программных пакетов. Использованы методы автоматического составления обобщённых систем дифференциальных уравнений второго порядка. Использовались

численные методы решения жёстких систем дифференциальных уравнений на основе комбинации неявного метода Эйлера 2-ого порядка и метода трапеции 2-3-го порядка с адаптивным выбором шага интегрирования. Применён метод натурных испытаний разработанной модели устройства на базе модернизированной схемы защиты от токов КЗ.

Научная новизна диссертационной работы состоит в получении следующих научных результатов:

- разработаны научные подходы к вариантам блокировки несанкционированного срабатывания БВ смежных ПЛТС постоянного тока при проходе Э под током по ветвям ИВП, позволяющие исключить отжиги и пережоги проводов контактной сети электрической дугой;
- предложена методика расчета демпфирующего потока в сердечнике РДШ для разработки элементов схемы блокировки несанкционированных срабатываний БВ;
- разработана методика определения параметров ДК – модернизируемого элемента РДШ(М);
- определены параметры элементов схем блокировки несанкционированных отключений БВ;
- разработана имитационная модель работы РДШ(М) при проходе электровоза под током по ветвям ИВП, позволяющая оценить качественные показатели внедряемой технологии;
- обосновано применение схем блокировки для снижения числа пережогов проводов ИВП электрической дугой во время прохода по ним Э под током;
- создана и испытана экспериментальная модель схемы блокировки несанкционированного срабатывания БВ.

Степень достоверности результатов исследований. Достоверность результатов обеспечивается сходимостью процессов в элементах РДШ для условий исследуемого процесса движения электровоза, полученных на основании имитационного моделирования и в экспериментах. Степень

достоверности предварительно обоснована теоретически. Достоверность результатов расчетов параметров элементов схемы блокировки несанкционированного срабатывания БВ с использованием РДШ(М) подтверждены результатами натурных испытаний на оборудовании действующей тяговой подстанции Московско-Курской дистанции электроснабжения.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработаны и внедрены способы борьбы с причинами возгорания электрической дуги при помощи не влияющих на конструкцию и массу контактной подвески электрических схем, подтверждающие преимущества перед механическими приспособлениями.
2. Разработаны экспериментальные образцы устройств, прошедшие натурные испытания на действующей тяговой подстанции.
3. Рассчитаны время, за которое ток Э достигает нулевого значения при заезде на отключенную зону питания, в течение которого будет гореть электрическая дуга, а также величина тока электровоза. Определено, что время горения дуги в несколько раз превышает указанное в литературе расчетное значение.
4. Создана экспериментальная модель схемы блокировки несанкционированного срабатывания БВ с РДШ(М).
5. Получен и использован огромный массив данных в результате имитационного моделирования процессов в тяговой сети на базе разработанной общей электрической схемы движения Э, а также учете и имитации перехода Э на смежную зону ПЛТС.
6. Установлено: количество витков ДК для создания демпфирующего потока в магнитопроводе РДШ(М), невозможность установки большого числа витков ДК из-за ограниченности по габаритным размерам, нежелательный фактор вмешательства в работу самого РДШ(М) при создании демпфирующего противотока в магнитопроводе, необходимость и достаточность предложенных

решений для подключения реле напряжения схемы блокировки, учитывая наводимое напряжение от оборудования подстанции.

7. Сделано технико-экономическое обоснование использования схемы блокировки несанкционированного срабатывания БВ с РДШ(М).
8. Введены новые понятия в теории релейной защиты ПЛТС постоянного тока, связанные с блокировкой действия защит по анализу работы смежных питающих линий.
9. Представлены методические рекомендации по расчету магнитной проводимости воздушного зазора между подвижной и неподвижной частью магнитопровода и магнитной проводимости воздушного зазора пакетов железа на шинах РДШ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Способ модернизации существующей схемы РДШ.
2. Схемы блокировки (варианты) несанкционированного срабатывания БВ смежных ПЛТС постоянного тока.
3. Имитационная модель работы РДШ(М).
4. Экспериментальная модель схемы блокировки несанкционированного срабатывания БВ смежных ПЛТС.
5. Показатели, подтверждающие неизбежность возгорания электрической дуги и разрушение элементов тяговой сети от ее воздействия при заезде Э под током на отключенную зону.
6. Показатели, позволяющие определить эффективность и целесообразность использования схем блокировок (варианты) несанкционированного срабатывания БВ постоянного тока.

Апробация работы. Материал диссертационной работы докладывался на 7-м Российском международном конгрессе по интеллектуальным транспортным системам в 2015 году, на научно-практических конференциях «Безопасность движения поездов» МГУ ПС в 2002 и 2017 годах. Результаты диссертационной работы рассматривались

на заседании кафедры «Электроэнергетика транспорта» МИИТ в 2018 и 2019 годах.

Публикации. По материалам диссертации имеется 10 научных работ: из них 2 патента на изобретение; 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений, списка используемых источников (67 наименований). Работа содержит 146 страниц печатного текста, 10 таблиц, 63 рисунка.

1. Обоснование необходимости разработки схемы защиты смежных питающих линий тяговой сети постоянного тока на базе реле-дифференциальных шунтов

1.1. Влияние повышения скорости движения поездов на качество электроснабжения

Развитие высокоскоростного движения выдвигает на первый план необходимость обеспечения непрерывного токосъема.

При повышенных скоростях резко возрастает уровень потребления тока подвижным составом. Обеспечение движения при таких условиях усложняет динамические характеристики взаимодействия токоприемника с контактным проводом вызывая искрение и отжиги и ведет к ускоренному износу элементов, при этом понижая надежность работы системы электроснабжения [67]. Кроме того следует сказать о высокой вероятности возгорания электрических дуг на элементах контактной сети по различным причинам (ударов молнии во время грозовых периодов, неселективной работе устройств защиты от токов короткого замыкания, различных аварий на контактной сети), что приводит к разрушению конструктивных элементов сети и обрыву проводов.

Первоочередной задачей при решении вопросов непрерывного токосъема является обеспечение длительного срока службы конструкций, участвующих в токообеспечении электровоза путем скользящего электрического контакта. Таким образом, необходима гарантированная работа данных устройств без повреждений и негативного воздействия на сопряженные элементы.

Например, основываясь на результатах опыта Российских железных дорог [40] можно сделать вывод: если не учитывать погодные условия, то качество токосъема определяется техническими параметрами контактной подвески и токоприемника. А высокая скорость движения подразумевает

повышенные требования к техническим характеристикам системы токосъема.

С целью определения основных параметров качества токосъема были проведены испытания на линии Санкт-Петербург – Москва при движении электроподвижного состава со скоростью более 160 км/ч. По итогам которых приняты следующие параметры оценки:

- стабильность контактного нажатия и его среднее значение;
- частота и продолжительность искрения;
- величина отжатия контактного провода.

Для системы постоянного тока значение контактного нажатия значительно выше и достигает 350 Н при скорости выше 160 км/ч по сравнению с 250 Н для системы переменного тока. Это обусловлено большей массой токоприемников из-за больших значений рабочих токов.

Износ взаимодействующих элементов состоит из двух составляющих – электрической и механической. При большей плотности тока и меньшем нажатии электрическая составляющая больше. При повышении нажатия – повышается механическая составляющая износа. Следовательно, износ приводит к отказам контактной сети.

По данным, предоставленным ВНИИЖТ в соответствии с «Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения за 2012 год» наибольшее количество нарушений безопасности, сбоя графика движения, увеличение времени задержек поездов за год (рисунок 1) происходит из-за отказов контактной сети и отказа оборудования на тяговых подстанциях.

В соответствии с указанным документоционным отчетом в 2012 году произошло 143 таких транспортных события, что составило 90.5%, 6 случаев электроснабжения СЦБ – 3.8%, 6 случаев электроснабжения ССПС – 3.8%, 3 случая отказов на тяговых подстанциях - 1.9% (рис. 1).

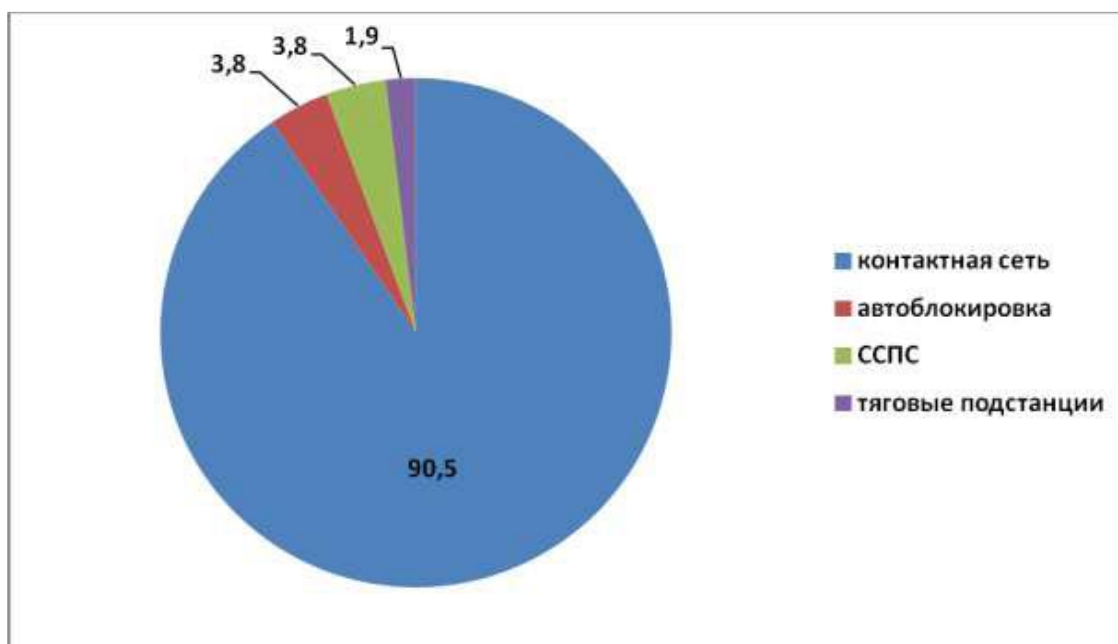


Рисунок 1. Динамика отказов контактной сети в 2012 году

Одной из определяющих причин отказов контактной сети являются обрывы и перегоры проводов – 17% (рис. 2). В сравнении с предыдущим годом наблюдается рост количества отказов по этому показателю. Из таблицы «Сравнительная динамика отказов за 2011-2012 год» видно, что произошел количественный рост отказов контактной сети по причине обрыва и перегоры - 145 случаев по отношению к 84 случаям. Доля повреждения 17% по отношению к 11%.

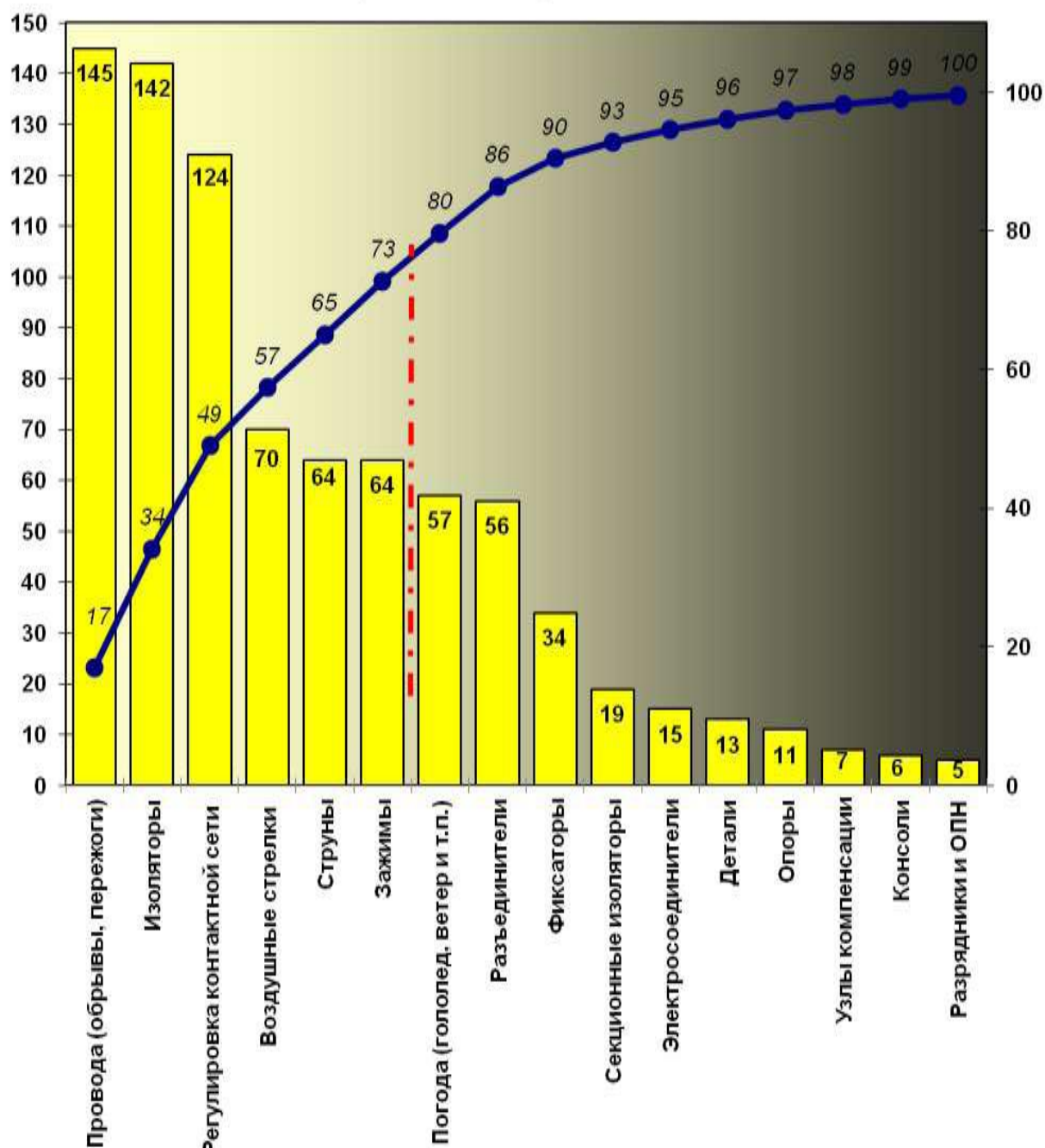


Рисунок 2. Статистический анализ причин отказов контактной сети за 2012 год

Таблица 1. Сравнительная динамика отказов за 2011-2012 год

Распределение причин отказов контактной сети	2011 г.		2012 г.	
	Кол-во	Доля, %	Кол-во	Доля, %
Изоляторы	157	21	142	17
Регулировка контактной сети	98	13	124	15
Провода, тросы	84	11	145	17
Зажимы контактной сети	72	10	64	8
Воздушные стрелки	68	9	70	8

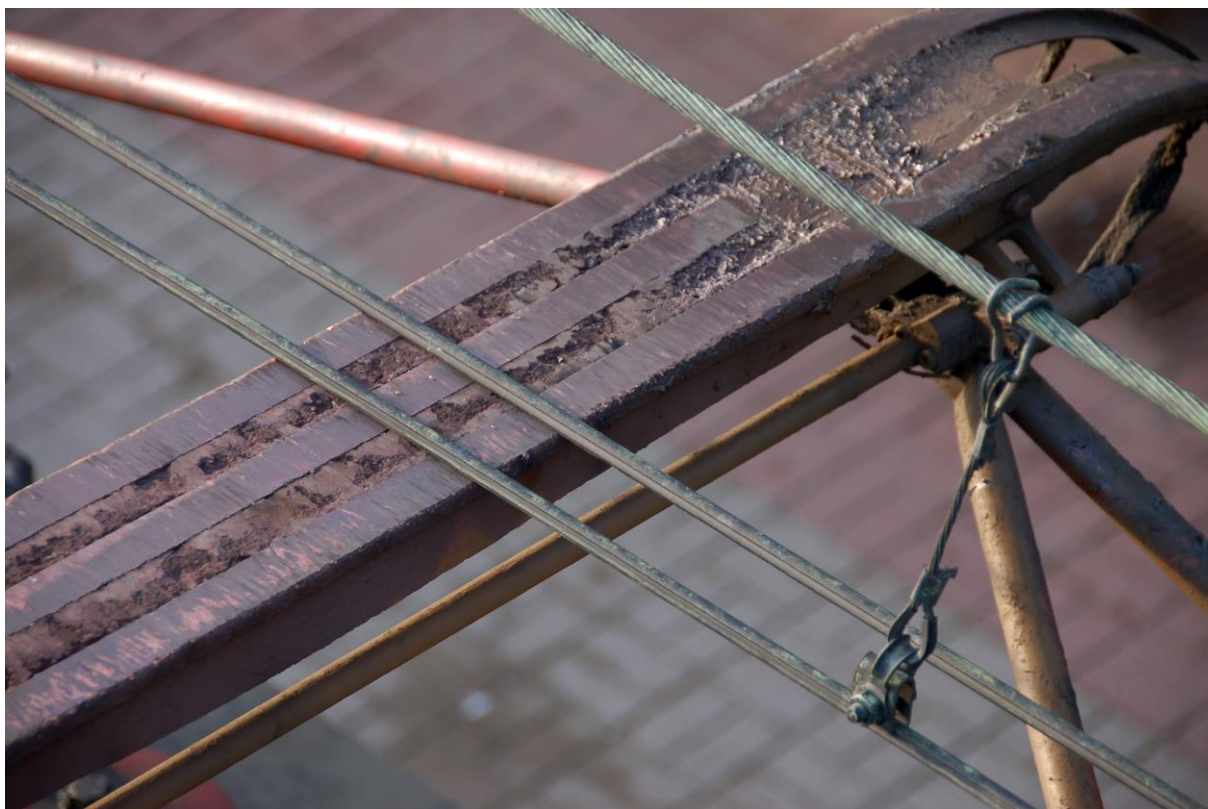
Таблица 2 Изменения по продолжительности задержек поездов за 2012 год по отношению к 2011 году (в часах и минутах)

	2011 год	2012 год
Октябрьская	18:24	67:01
Дальневосточная	4:15	35:15
Южно-Уральская	4:49	10:44
Северная	3:32	8:43
Западно-Сибирская	22:22	16:26

Одной из наиболее распространенных причин отказов из оборудования тяговых подстанций остается ложное срабатывание автоматических выключателей постоянного тока – 24 случая в 2012 году (столько же 2011 году). В то же время ложное срабатывание релейной защиты составило 16 случаев (против 28 в 2011 году).

1.2. Процесс перехода электровоза с питаемой зоны на смежную

Пережог контактного провода при взаимодействии с токоприемником является распространенным повреждением контактной сети, которое отражается на движении поездов. При скольжении токоприемника по контактным проводам и элементам ИВП, они подвергаются ударным нагрузкам, искрению, отжигу, метеорологическим воздействиям, пережогам от теплового действия электрической дуги [38].



Процесс контакта лыжи токоприемника с проводами и элементами ТС являлся предметом многочисленных исследований. Так велась работа Всероссийским научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта в соответствии с «Программой и методикой проведения испытаний секционных изоляторов СИ-4, МСИ-11М и СИ-7» [10], утвержденной ЦЭ МПС в части испытаний секционных изоляторов в сборе. Испытания проводились на экспериментальном кольце ВНИИЖТа.

Данные, полученные при испытаниях, о влиянии воздействия электрической дуги на электрические свойства изолирующих скользунов секционных изоляторов при заезде на отключенную зону питания могут быть использованы для анализа процесса съезда токоприемника с ветви ИВП на обесточенную зону тяговой сети.

1.2.1. Анализ результатов испытания секционных изоляторов на влияние воздействия электрической дуги на электрические свойства изолирующих скользунов

Описание условий эксплуатации секционных изоляторов, а также условия возгорания, время и результаты воздействия электрической дуги на конструктивные элементы является основой для дальнейшего исследования и разработки технических устройств защиты тяговой системы.

Переход электровоза с одной питающей зоны тяговой сети на смежную происходит во время движения токоприемника по ветвям ИВП, конструктивно схожего с воздушным промежутком секционного изолятора. И поэтому результатами испытаний секционных изоляторов возможно воспользоваться для описания процесса проезда электровоза под током по ветвям ИВП.

Целесообразно обратиться к материалам испытаний секционных изоляторов в рабочем и аварийном режимах работы.

Всероссийским научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта проведены испытания секционных изоляторов различного типа. Результаты изложены в: «Протокол испытаний влияния воздействия электрической дуги на электрические свойства изолирующих скользунов секционных изоляторов. Рекомендации по применению секционных изоляторов.». Тема 14.02.47.93.94.95. аппараты дугогашения (роговые разрядники, разъединители, секционные изоляторы) [10]. Москва, 1994 г. Целью испытаний являлась проверка соответствия представленных на испытания секционных изоляторов «Техническим требованиям к секционным изоляторам контактной сети электрифицированных железных дорог», утвержденных Управлением электрификации и электроснабжения 12 марта 1993 года с разработкой предложений по совершенствованию их работы. Кроме того, целью испытаний являлась разработка предложений по корректировке пунктов

вышеуказанных требований в части нормирования требований к дугогасящей системе секционных изоляторов.

Испытания на дугогашение проводились на экспериментальном кольце ВНИИЖТа. Для проведения испытаний в режиме заезда на обесточенную секцию контактной сети при скорости 10 – 70 км/ч использовался прямолинейный участок контактной сети. Длина обесточенного участка составляла около 150 м. Контактная сеть с одним контактным проводом. Натяжение контактного провода – 10 кН. При испытаниях использовался электровоз ВЛ80^т с составом весом 2 000 т. На пантографе электровоза были установлены новые угольные вставки. Процессы дугогашения осциллографировались электронным осциллографом при помощи трансформаторов напряжения.

Для визуального контроля применялась видеосъемка.

Испытания на эффективность дугогашения в рабочем режиме при отличающихся напряжениях на секциях контактной сети проходили на тяговой подстанции. Процессы дугогашения регистрировались светолучевым шлейфовым осциллографом.

Заезды на обесточенную секцию контактной сети проводились при токах электровоза 40-350 А и скоростях 15-70 км/ч. Наиболее тяжелым оказался режим с малыми скоростями и токами 50-150 А.

При скорости 15 км/ч и токе 90 А дуга горела в течение 36 с. В этом случае дуга горела все время, пока электровоз двигался по обесточенной секции контактной сети (около 150 м). И в других случаях, когда изолятору удавалось разорвать рабочий ток, время гашения было велико и достигало 30 с. Такое длительное горение дуги приводило к интенсивному обгоранию стальных дугогасительных рогов и стеканию раскаленных капель металла на вагоны и путь.

Очень малая высота дугогасительных рогов СИ-7 (а после нескольких опытов и полное их отсутствие) приводит к тому, что дуга горит на элементах крепления скользунов и даже на контактном проводе. В

результате появились дефекты на поверхности скольжения контактного провода, а также повреждена резьба в болтовых соединениях.

Как и для других типов секционных изоляторов наблюдается более быстрое гашение электрической дуги при высоких скоростях движения электровоза.

Проведенные испытания показали, что время гашения дуги на обесточенную секцию контактной сети составляет не менее 8 – 9 с.

Секционный изолятор является не только изолирующим, но и дугогасительным устройством, поэтому возможно применить нормативы по дугогашению, установленные для коммутационных аппаратов в части гашения малых токов. В соответствие с ними время гашения малых токов не должно превышать 1 с для аппаратов напряжением 3 кВ [46].

Величина зазора в воздушном промежутке была 65 мм. Опыты проведены при разности напряжений между секциями в 800 В постоянного тока. В зависимости от величины протекающего тока время гашения дуги составляло 0.1 - 0.4 с.

Осциллограммы, снятые в этом режиме представлены на рис. 8 в, г.

Осмотр секционного изолятора после испытаний показал, что на дугогасительных рогах видны следы дуги, а на их концах медь слегка оплавилась.

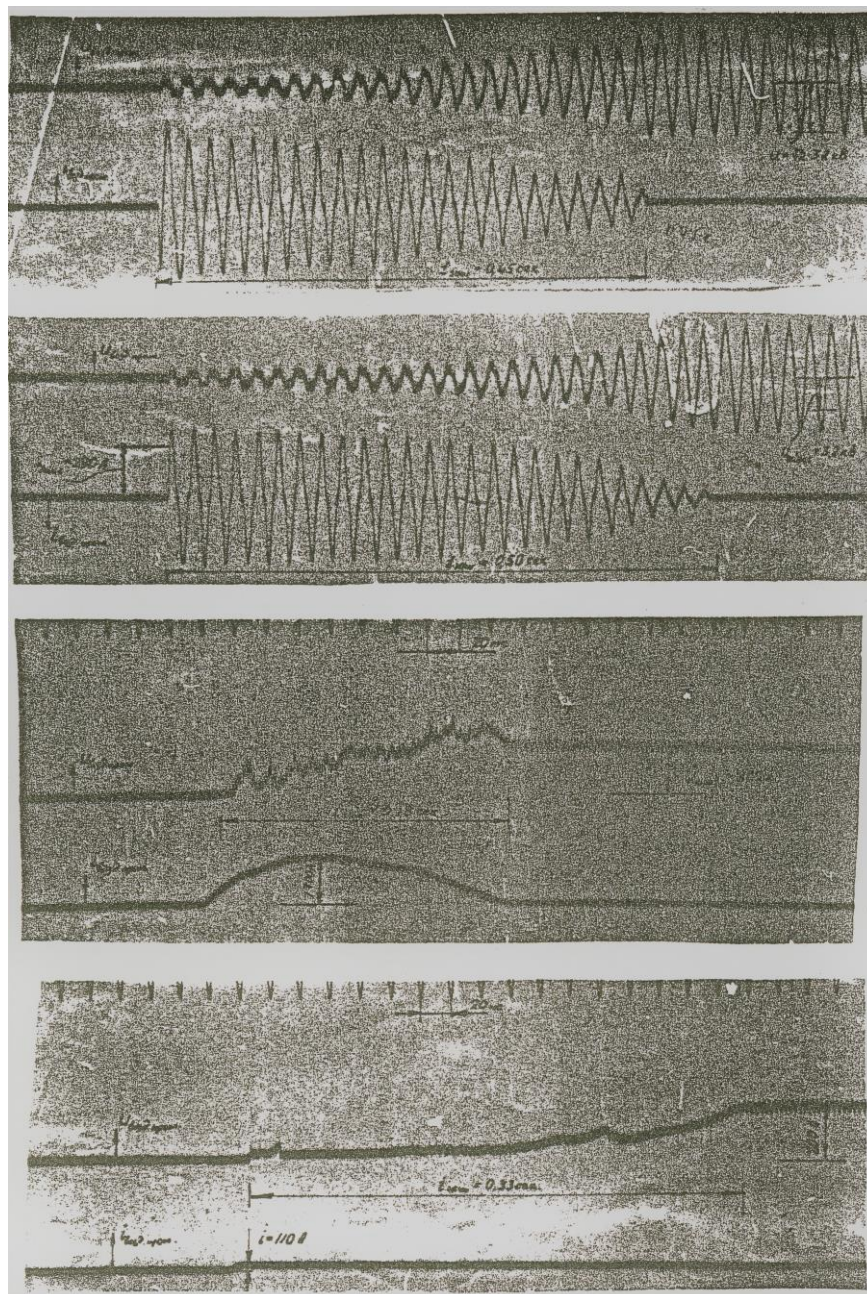


Рисунок 3. Осциллограммы процессов дугогашения воздушными промежутками секционных изоляторов на переменном и постоянном токе. Сверху вниз: на переменном токе при разности напряжений между секциями контактной сети 3.2 кВ и токе 290 А; то же; на постоянном токе при разности напряжений между секциями контактной сети 800 В и токе цепи 2500 А; на постоянном токе при разности напряжений между секциями контактной сети 800 В и токе цепи 110 А.

Испытания секционного изолятора СИ-4 проводились Всероссийским научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта. Материалы изложены в: «Протокол испытаний секционных изоляторов для секционирования контактной сети электрифицированных

железных дорог по теме 14.02.47.93.95.95. Аппараты дугогашения (роговые разрядники, разъединители, секционные изоляторы) [11].

Целью испытаний являлась проверка соответствия характеристик секционных изоляторов МСИ-ИМ-27.5 и СИ-4 «Техническим требованиям к секционным изоляторам контактной сети электрифицированных железных дорог», утвержденных управлением электрификации и электроснабжения 12 марта 1993 г., с разработкой предложений по совершенствованию их работы. Испытания проводились в соответствии с «Программой и методикой проведения испытаний секционных изоляторов СИ-4, МСИ-ИМ и СИ-7».

Испытания на дугогашение были проведены на экспериментальном кольце ВНИИЖТ. Испытуемые изоляторы врезались в контактный провод на прямолинейном участке пути. При этом натяжение контактного провода составляло 10 кН. Для образования обесточенной секции контактной сети на расстоянии 150 м от испытуемого врезался другой секционный изолятор. Испытания проходили при следующих погодных условиях: температура воздуха от -1 до +1°C, скорость ветра до 8 м/с, направление ветра преимущественно продольное по ходу движения электровоза.

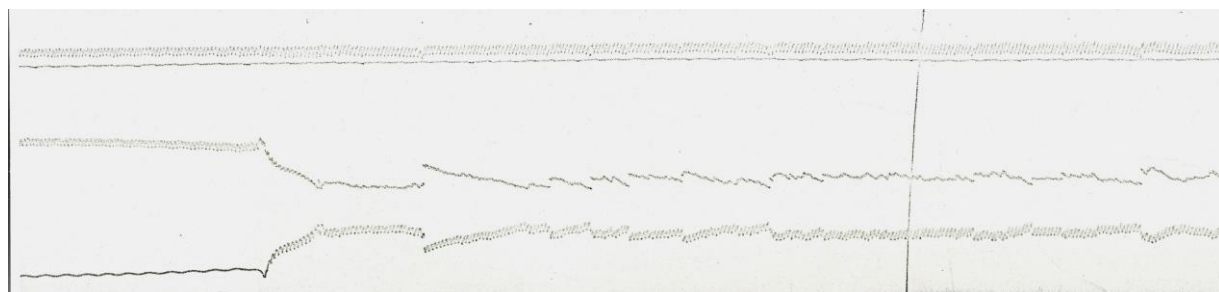
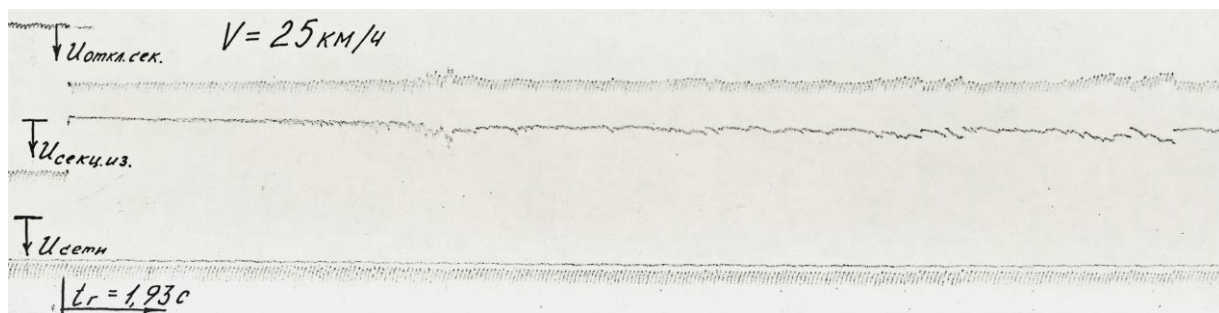
Для испытаний использовался электровоз ВЛ22 с составом весом 800 т. При постоянном токе контактная сеть питалась от тягового агрегата мощностью 6300 кВА и напряжением 3.4 кВ.

Расстояние от тяговой подстанции до места врезки испытуемых изоляторов составляло 2.5 км. В процессе испытаний осциллографировались кривые напряжения на концах секционных изоляторов относительно рельса, а также напряжение на самом изоляторе. Ток КЗ измерялся при помощи трансформатора типа ТПОЛ-10. Испытательное оборудование было размещено на дрезине контактной сети, расположенной на соседнем пути.

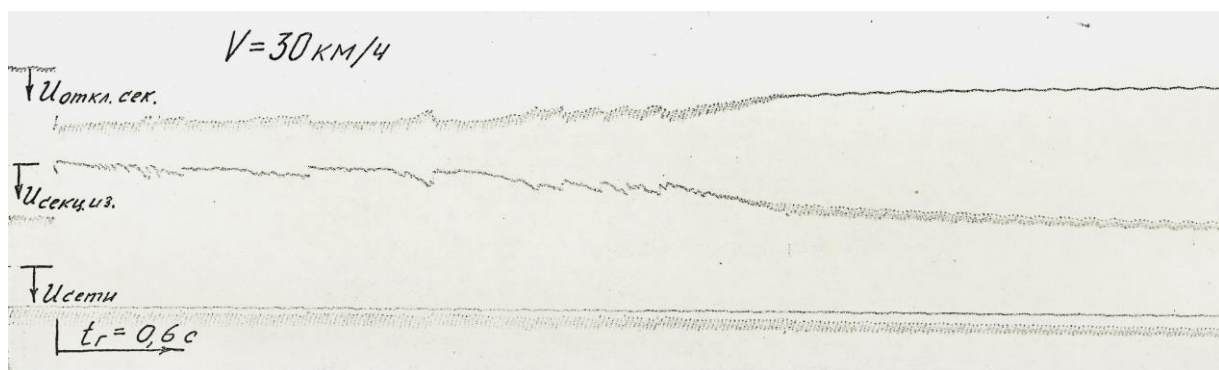
Изолятор СИ-4 испытывался в режиме заезда электровоза с токами 0 – 1000 А на отключенную секцию контактной сети со скоростью 25 – 65

км/ч. Результаты обработки осциллограмм, снятые в этом режиме, приведены в таблице 4, а характеристики осциллограммы помещены на рис.7.

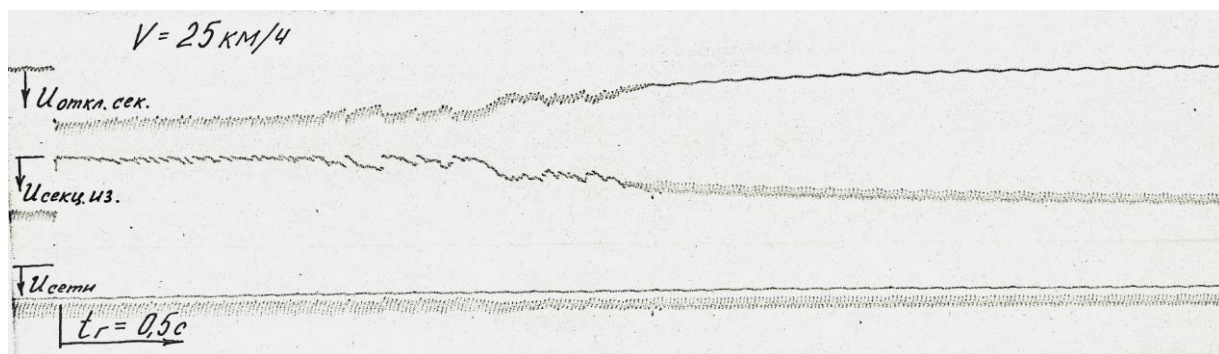
а)



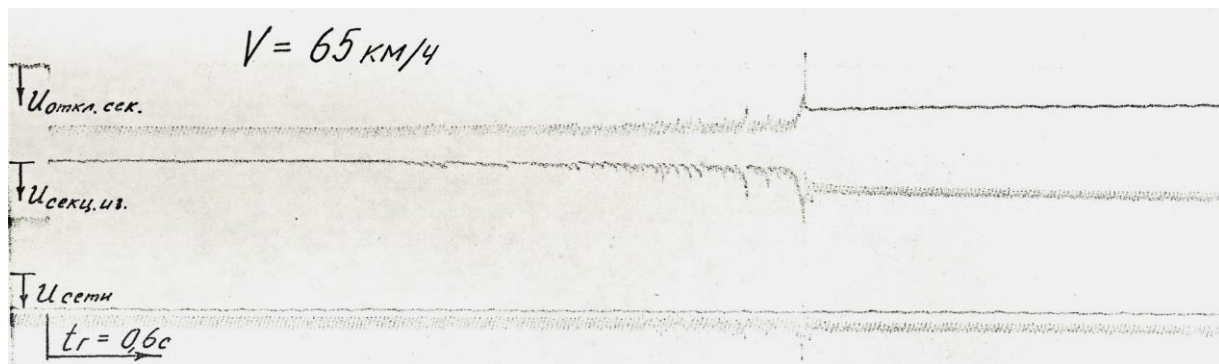
б)



в)



г)



д)

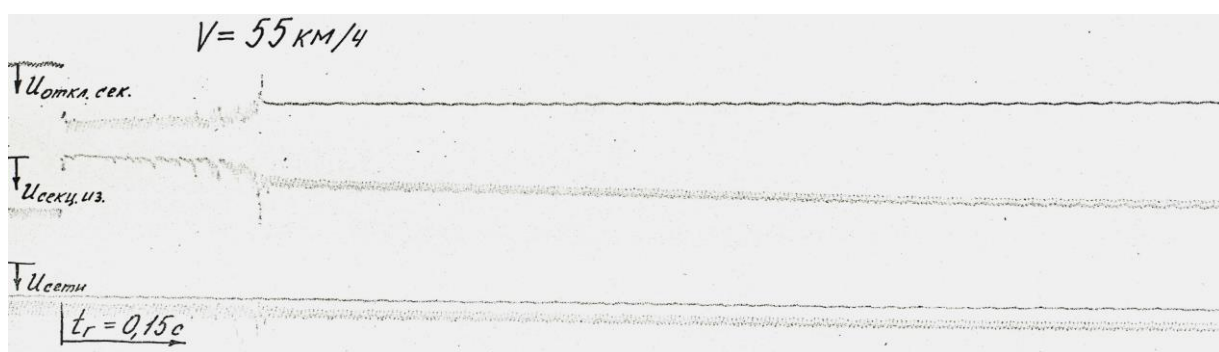


Рисунок 4. Осциллограммы работы секционного изолятора СИ-4 в режиме заезда на отключенную секцию контактной сети: а) при токе электровоза - 300 А; б) при токе электровоза – 700 А; в) при токе электровоза – 700 А (без дугогасительной камеры); г) при токе электровоза 450 А; д) при токе электровоза - 450 А.

Таблица 3. Зависимость времени горения дуги от скорости и тока электровоза

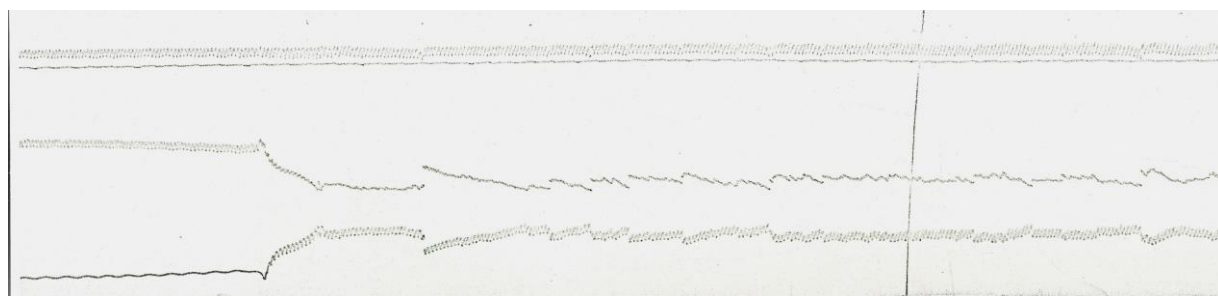
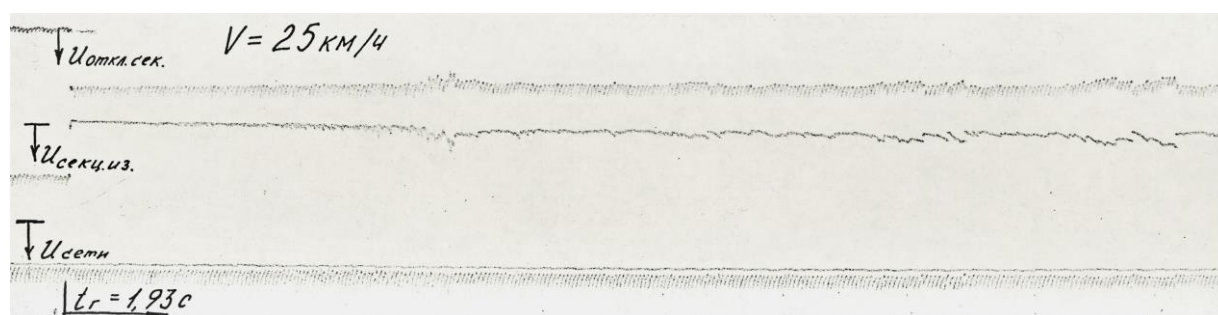
Скорость электровоза, км/ч	Ток электровоза, А	Время гашения дуги, с	Примечание
25 – 30	0	0.07	Без дугогасительной камеры
	0	0.06	
	150	0.69	
	300	1.93	
	700	0.20	
	700	0.60	
55 - 65	300	0.26	
	450	1.13	
	450	0.60	
	450	0.15	

Испытания показали, что при скорости 25 – 30 км/ч не наблюдалось искрений и местных дуг. При скорости 55 – 65 км/ч наблюдалось искрение.

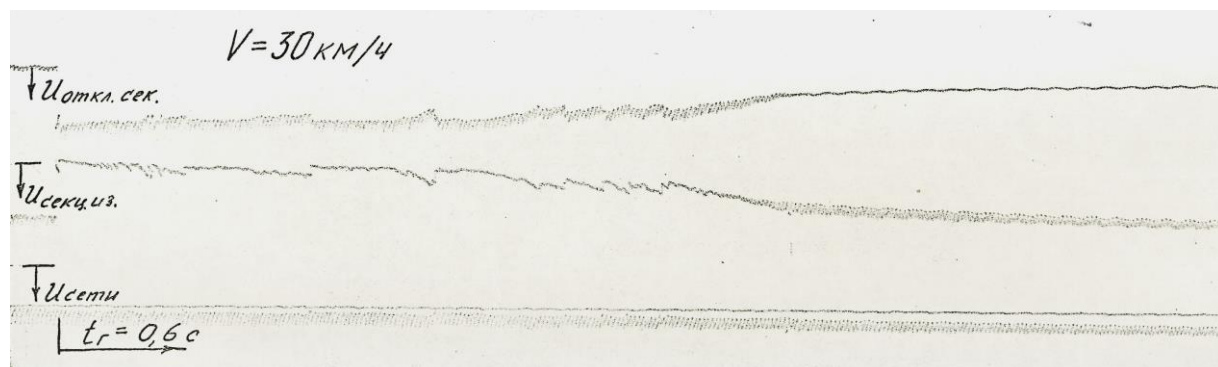
При испытаниях под тяговым током время гашения в большей степени определяется направлением и скоростью порывов ветра, чем величиной тока и скоростью прохода токоприемника. Максимально зафиксированное время гашения не превысило 2 с. Во время осмотра изолятора обнаружены следы дуги на струнках. Объясняется это сильными продольными порывами ветра, растягивавшие дугу до такой длины.

При сравнении осциллограмм отключений выявлено, что при скорости 25-30 км/ч и токе электровоза 700 А время гашения составило от 0.2 до 0.6 с.

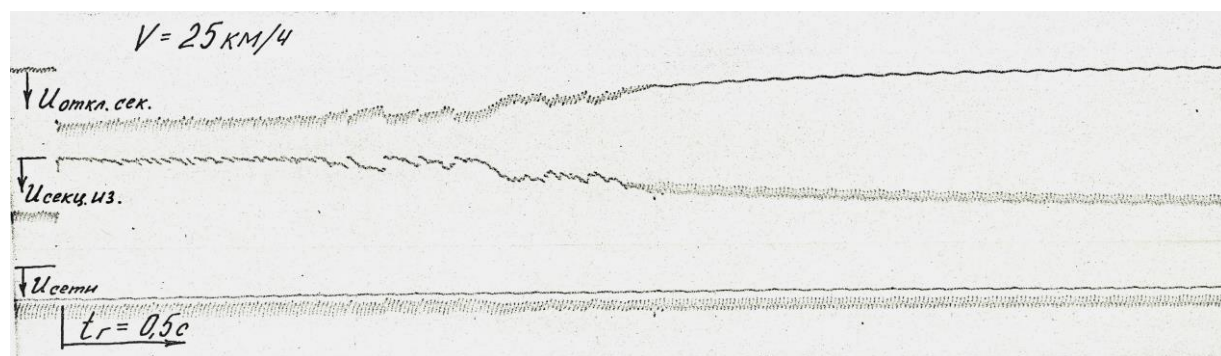
а)



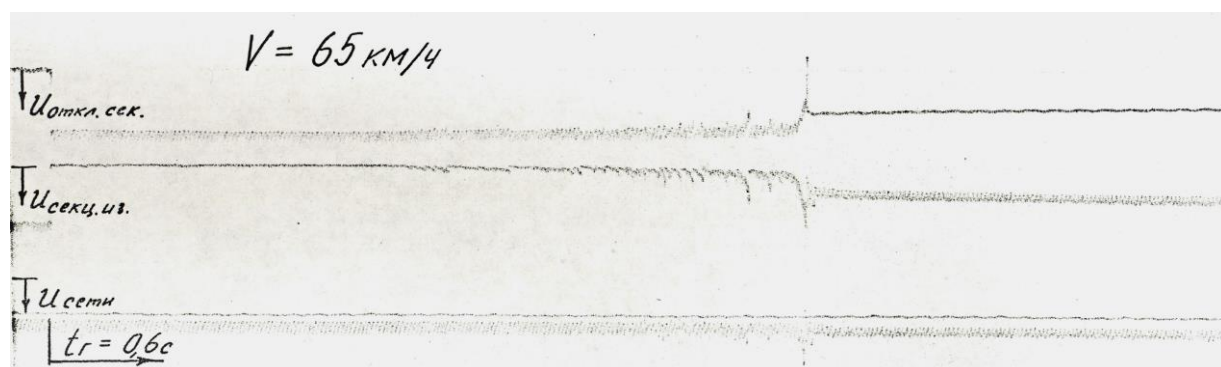
б)



В)



Г)



Д)

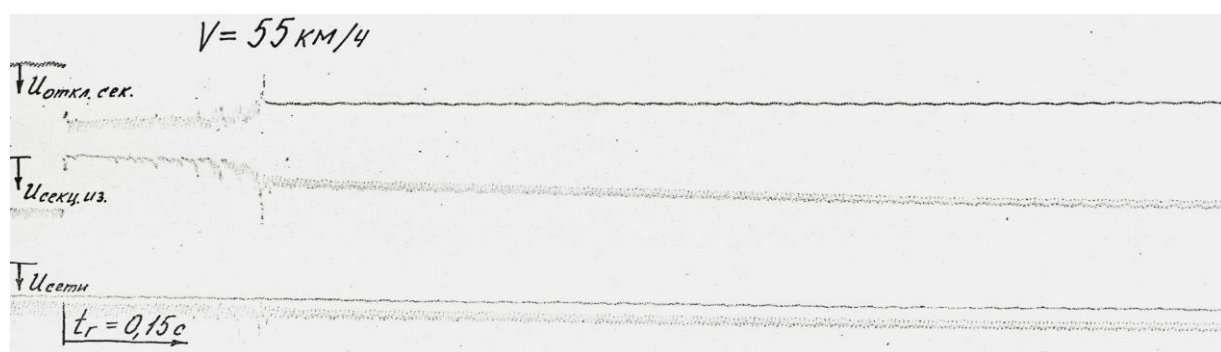


Рисунок 5. Осциллограммы работы секционного изолятора СИ-4 в режиме заезда на отключенную секцию контактной сети: а) при токе электровоза - 300 А; б) при токе электровоза - 700 А; в) при токе электровоза - 700 А (без дугогасительной камеры); г) при токе электровоза 450 А; д) при токе электровоза - 450 А.

Описывая переход электровоза с одной питающей зоны тяговой сети на другую, на основе полученных данных можно утверждать, что проход токоприемника по ветвям ИВП в рабочем режиме происходит с возникновением коротких дуг или искрения. А при заезде на отключенную зону питания тяговой сети – сопровождается возгоранием дуги с временем

ее гашения от 0.2 с до 36 с. Причем процесс горения зависит от погодных условий – направлением и скоростью порывов ветра.

Горение дуги приводит к мгновенному перегоранию проводов и конструкций контактной подвески. Но и искрение также крайне нежелательно, так как приводит к отжигу контактного провода и сокращению его срока эксплуатации.

1.3. Обзор существующих устройств защиты проводов контактной сети от воздействия электрической дуги и их недостатки

Государственные стандарты не устанавливают нормы времени гашения дуги для воздушных промежутков. Однако, учитывая, что секционный изолятор является не только изолирующим, но и дугогасительным устройством, можно применять нормативы по дугогашению, установленные для коммутационных аппаратов в части гашения малых токов [3].

В соответствии с ними время гашения малых токов не должно превышать 1 с для аппаратов напряжением 3 кВ.

Одним из условий возникновения электрической дуги на ветвях ИВП может быть заезд электровоза под током на отключенную зону питания.

Если электрическая дуга возникает и горит между контактным проводом и токоприемником, то возможен пережог только этого провода. Если же горение электрической дуги приведет к электрическому перекрытию ИВП, тогда дуговой процесс будет развиваться между проводами обеих секций, и возможен пережог любого из проводов.

Существует ряд конструкций, позволяющих «перехватывать» возникающую электрическую дугу, либо предотвращать ее появление.

1.3.1. Устройство защиты в виде реле-дифференциального шунта (РДШ)

Защитное устройство в виде реле-дифференциального шунта (РДШ) [45] является индуктивным шунтом быстродействующего выключателя ВАБ-49. Представляет собой две параллельные шины 1 и 2 неравного сечения, соединенные в начале и конце, на шине меньшего сечения 2 насажены пакеты из изолированных листов железа 3, имеющих воздушные зазоры и эти шины проходят в разных направлениях внутри разомкнутого магнитопровода 9 с подвижным якорем 7 на оси 8, удерживаемом в разомкнутом положении ориентирующей пружиной 6. На подвижном якоре 7 изолированно укреплен подвижный контакт 5, а на изолирующем основании реле — неподвижный контакт 4, причем указанные контакты нормально-замкнуты и через них от источника оперативного постоянного тока (+, -) питается держащая катушка выключателя 10.

Устройство работает следующим образом. При изменении тока в сети сила притяжения якоря 7 РДШ к магнитопроводу 9 потоком в магнитопроводе становится больше силы пружины 6. Контакты 4 и 5 размыкаются, в силу чего прекращается питание держащей катушки 10 выключателя и БВ отключается.

Из-за наличия пакетов железа 3 на шине 2 РДШ меньшего сечения срабатывание его зависит от величины и скорости нарастания тока [45] и позволяет отключить ПЛТС при малом значении быстро изменяющегося тока КЗ.

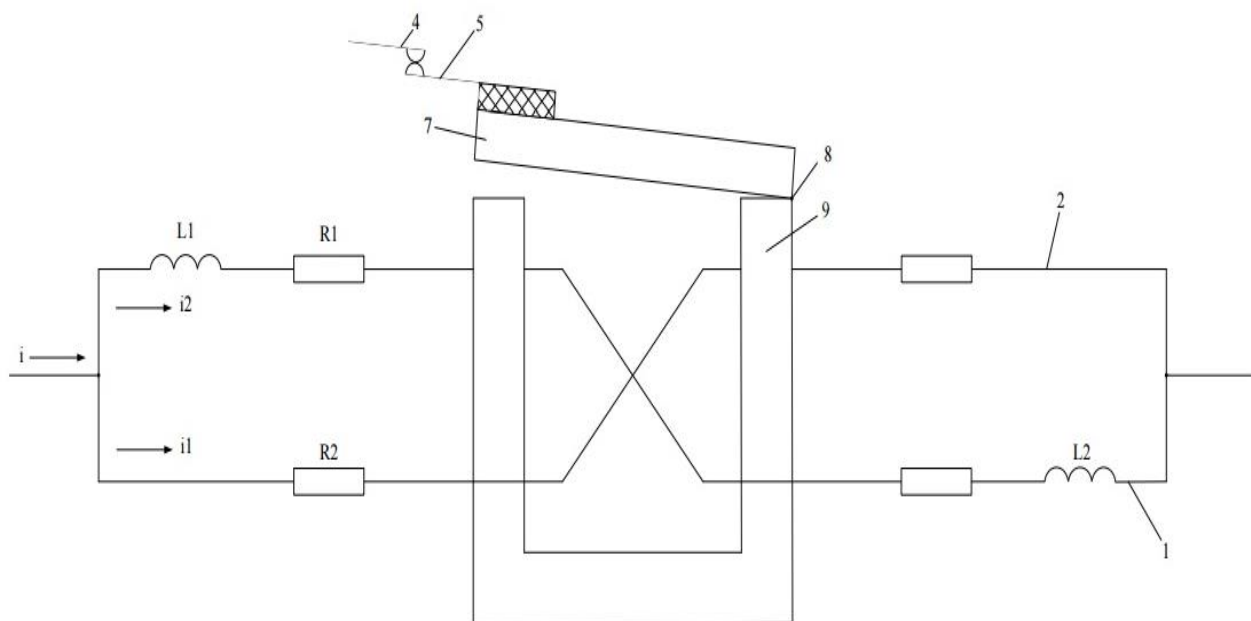


Рисунок 6. Схема РДШ

Недостатком такой защиты является:

- по-разному реагируя на медленные и быстрые изменения тока ПЛТС, является причиной ложных отключений БВ;
- инициирует при въезде Э под током на отключенную зону питания появление электрической дуги между пантографом и ветвью ИВП, находящейся под напряжением.

1.3.2. Устройство защиты контактного провода от пережогов на воздушных промежутках Е.А. Борзенко

Разработанное Е.А. Борзенко устройство [5] предназначено для защиты от пережогов электрической дугой контактного провода на воздушных линейных промежутках при заезде на обесточенный участок Э с большим током нагрузки.

Схема данного устройства состоит из шунта 1 (рисунок 7а), который крепится при помощи скобы 2 и зажимов 3 к контактным проводам 6 ветвей ИВП. Шунт 1 крепится в предположительном месте возникновения

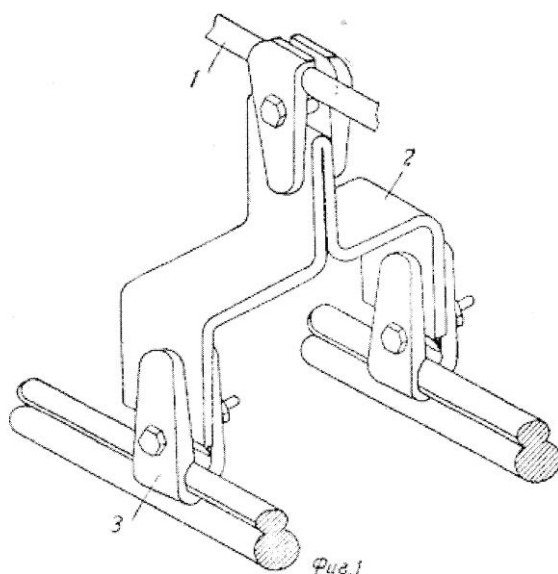
дуги и пристыкован к контактному проводу сверху. С целью повышения эффективности защиты шунт выполнен из материала с более высокой температурой плавления, чем контактный провод, например из стального прутка диаметром 12.8 мм. Монтируется из отдельных звеньев длиной порядка 6.5 м соединенных с помощью накладок 4, достигая общей длины 50-60 м (рисунок 7б).

С помощью стяжной муфты 5 на шунт передается 700-650 кг тяжения контактного провода. При этом чтобы дуга не могла пережечь несущий трос, струны необходимо разместить в шахматном порядке, несущие тросы на консоли раздвинуть на максимально-возможную величину, а несущий трос в месте возникновения дуги покрыть изоляционным лаком.

Недостатком такой защиты является:

- не исключает вероятность возникновения дуги;
- сложная регулировка;
- вероятность старения и разрушения изоляционных материалов;
- дополнительная весовая нагрузка на провода от массы шунта.

а)



б)

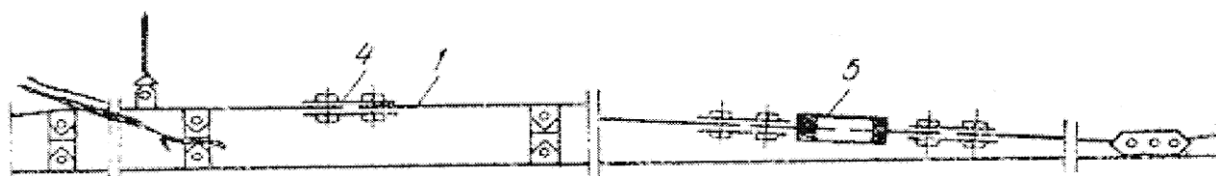


Рисунок 7. Схема устройства защиты контактного провода от пережога на воздушных промежутках Е.А. Борзенко

1.3.3. Устройство для защиты контактного провода от пережога Р.В. Катин, А.А. Порцелан, А.А. Порцелан

Изобретение [31] может быть использовано для защиты контактных проводов от воздействия электрической дуги на ИВП. Устройство для защиты контактного провода от пережога содержит закрепленные на контактном проводе экранирующие полосы, которые охватывают его с двух сторон и имеют в нижней части профиль, соответствующий пазу контактного провода, и болтовые соединения полос. Устройство снабжено изолирующим узлом, которое выполнено в виде трубок различного диаметра, установленных на контактном проводе, при этом трубка меньшего диаметра размещена в трубке большего диаметра на части ее длины. Трубка меньшего диаметра установлена встык между концом полосы и струновым зажимом, размещенным на контактном проводе, и размещена в трубке большего диаметра на расстоянии 0,5-1,0 м. Стыки полос с разных сторон провода выполнены со сдвигом на, по меньшей мере, два болтовых соединения. В верхней части полос выполнены выступы, которые обеспечивают плотное прилегание полос к пазу контактного провода. Общая длина полос составляет 5,5-6,5 м, трубка большего диаметра имеет длину 1,4-1,6 м и длина трубки меньшего диаметра составляет 5,5-6,5 м. Достижимый технический результат -

повышение надежности работы устройства, увеличение конструктивного расстояния между ветвями воздушного промежутка, препятствующего распространению электрической дуги на 30-40%.

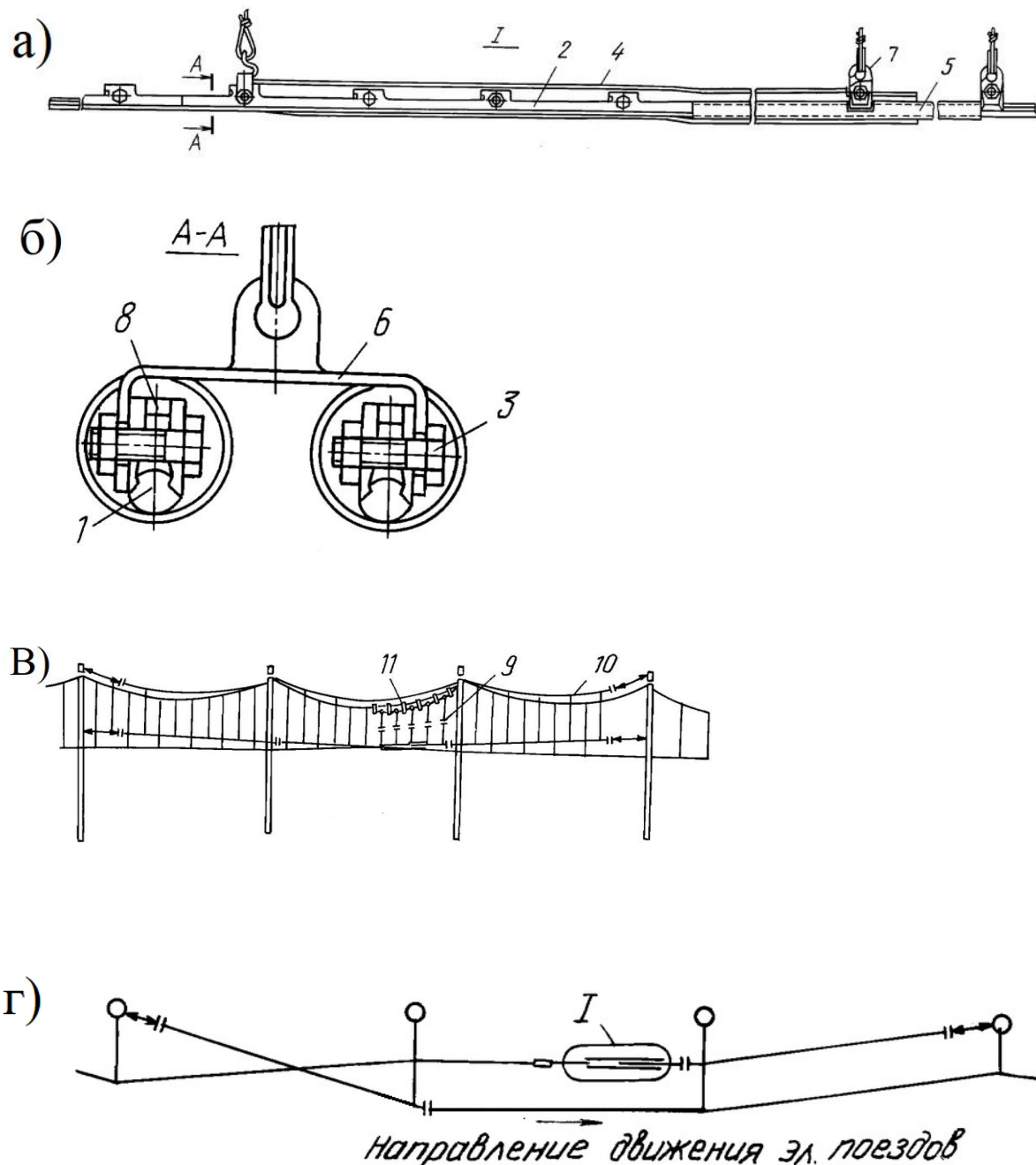


Рисунок 8. Схема устройства для защиты контактного провода от пережога Р.В. Катин, А.А. Порцелан, А.А. Порцелан: а – общий вид устройства; б – разрез А-А; в – схема ИВП; г – вид сверху схемы ИВП.

Устройство монтируется на ветвях ИВП, с которых съезжает Э, на последней трети мачтового пролета по ходу движения. Защитные полосы 2 устанавливаются в переходном пролете на контактные провода 1 таким образом, чтобы точки отрыва полоза токоприемника от контактного провода приходились на середину защитных полос. Трубка 5 устанавливается вплотную между концом полосы 2 и струнным зажимом 7. Трубка 5 размещена в трубке 4 на расстоянии 0,4-1,0 м.

Для одновременной работы обоих контактных проводов в зоне отрыва полоза токоприемника от контактных проводов через каждые три метра между контактными проводами устанавливаются соединительные скобы 6.

С целью повышения надежности работы воздушного промежутка в струны цепной подвески, поддерживающие контактный провод 1, расположенные в зоне перехода, должна быть врезана изоляция 9, а конструктивная высота цепной подвески в этой зоне должна быть более 2 м. В случае меньшей конструктивной высоты над полосами на несущем тросе 10 устанавливается предохранительный шунт 11 из провода ПБСМ 70, который связывается с несущим тросом одноболтовыми соединительными зажимами, которые устанавливаются на несущем тросе снизу через каждые 0,5 м. Длина шунта составляет 8 м.

Недостатком такой защиты является:

- не исключает возникновение электрической дуги;
- сложные монтаж и регулировка элементов устройства;
- требования к строгому соблюдению размеров и соотношений, а также размещения элементов защиты;
- вероятность старения и разрушения изоляционных материалов;
- дополнительная весовая нагрузка на провода от массы устанавливаемого оборудования, особенно при гололеде.

1.3.4. Устройство для защиты контактного провода от перегорев на изолирующих сопряжениях С.Л. Буталов, Ю.Л. Довгалева, Ю.М. Телеченкова, С.В. Мормышев

Устройство относится к области электрических железных дорог, а именно к электрифицированному транспорту и может быть использовано для защиты контактных проводов от воздействия электрической дуги сбегающей ветви на ИВП [6], в том числе и при отсутствии напряжения на набегающей ветви контактного провода. Задача - повышение эффективности устройства для защиты контактного провода от перегорев на изолирующих сопряжениях. Устройство (рисунок 9) содержит защитный кожух, устанавливаемый на контактом проводе 1 на изолирующем сопряжении и выполненный из стальной оцинкованной трубы, собранной, по меньшей мере, из двух трубок 11. Труба имеет в нижней части прорезь, края которой имеют форму, соответствующую форме паза контактного провода 1. Трубки 11 установлены без сдвига относительно друг друга и в зоне их стыковки скреплены между собой посредством крепежных элементов 12 планкой 13. Устройство содержит также изолирующий узел, выполненный в виде двух трубок разного диаметра, размещенных одна в другой и охватывающих контактный провод 1. Трубка 14 меньшего диаметра установлена в трубке 15 большего диаметра встык, между концом защитного кожуха, размещенным там же, в трубке 15, и струновым зажимом 6, закрепленным на контактом проводе 1. Заявляемое устройство снабжено также упорами 16, смонтированными на контактом проводе 1 по обе стороны защитного кожуха и соединенными с ним посредством крепежных элементов 12 планкой 13.

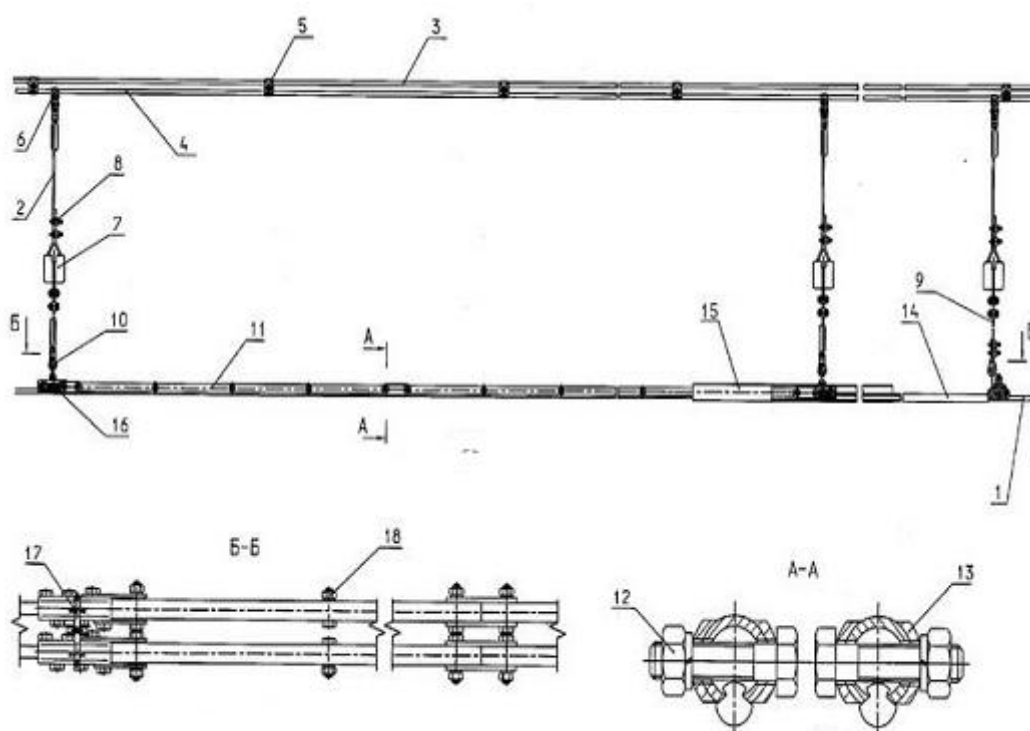


Рисунок 9. Схема устройства для защиты контактного провода от пережогов на изолирующих сопряжениях С.Л. Буталов, Ю.Л. Довгалева, Ю.М. Телеченкова, С.В. Мормышев

Трубки защитного кожуха в месте их стыковки друг с другом и со стыковыми зажимами контактного провода соединены планками. В качестве упоров использованы стыковые зажимы контактного провода. А планки снабжены двумя отверстиями и прикреплены к трубкам защитного кожуха посредством болтов.

Такое снабжение устройствами позволит в случае пережога контактного провода предохранить его от падения путем передачи усилия от натяжения контактного провода на защитный кожух, оба конца которого соединены упорами, а трубки соединены между собой посредством планок. Оба конца пережонного провода соединяются между собой кожухом за счет того, что на них жестко установлены упоры, соединенные между собой кожухом, который и воспринимает усилие натяжения контактного провода. Кроме того, при пережоге провода в зоне соединения трубок изгиба кожуха в горизонтальной плоскости не

происходит вследствие равномерной передачи нагрузки от одной трубки к другой через соединительные планки. Так как усилие от натяжения контактного провода воспринимается кожухом, отпадает необходимость создавать в зоне соединения кожуха и контактного провода значительные усилия для обеспечения соответствующей силы трения. Болты предназначены только для фиксации кожуха на контактном проводе.

Недостатком такой защиты является:

- не исключается возникновение дуги;
- сложная регулировка;
- требования к строгому соблюдению размеров и соотношении, а также размещения элементов защиты;
- вероятность старения и разрушения изоляционных материалов;
- дополнительная весовая нагрузка на провода от массы устанавливаемого оборудования.

1.3.5. Устройство для защиты проводов контактной сети от пережогов на воздушных промежутках В.А.Чернявского и Л.П. Крюкова

Предложенное Чернявским В.А. и Крюковым Л.П. изобретение [34] представляет собой устройство, исключающее появление дуги на проводах изолирующего промежутка путем шунтирования их искровыми защитными промежутками (Рисунок 10). Содержит электрический датчик 1, установленный в створе воздушного промежутка, образованного двумя проводами 2 и 3 контактной подвески, разъединитель 4, запальный трансформатор 6, один вывод первичной обмотки которого соединен с тяговым рельсом 7, разделяющий конденсатор 5, искровые промежутки 8 и 9 с вспомогательными электродами. Второй вывод первичной обмотки запального трансформатора подключен через разделяющий конденсатор и контакт разделителя к электрическому датчику, выводы вторичной

обмотки запального трансформатора соединены соответственно с вспомогательными электродами искровых промежутков, нейтральные элементы которых соединены друг с другом и подключены к среднему выводу вторичной обмотки запального трансформатора, а крайние элементы искровых промежутков соединены с соответствующими проводами воздушного промежутка контактной сети.

Схема работает следующим образом. При замыкании токоприемником одной из ветвей 2 и 3 воздушного промежутка с электрическим датчиком 1 на рогах искровых защитных промежутков 8 и 9 посредством импульса запального трансформатора 6 образуется электрический разряд, возникающий между вспомогательными электродами и нейтральными элементами рогов, соединенными со средней точкой вторичной обмотки. В результате ионизации среды происходит электродуговое перекрытие искровых защитных промежутков, шунтирующее воздушный промежуток контактной сети и препятствующее образованию на ветвях воздушного промежутка дуги при проходе электровоза под током.

Недостатком такой защиты является:

- не исключает вероятность возникновения дуги;
- не исключает ложного срабатывания устройств защиты ПЛТС;
- сложные монтаж и регулировка элементов системы;
- дополнительная весовая нагрузка на провода, особенно при гололеде.

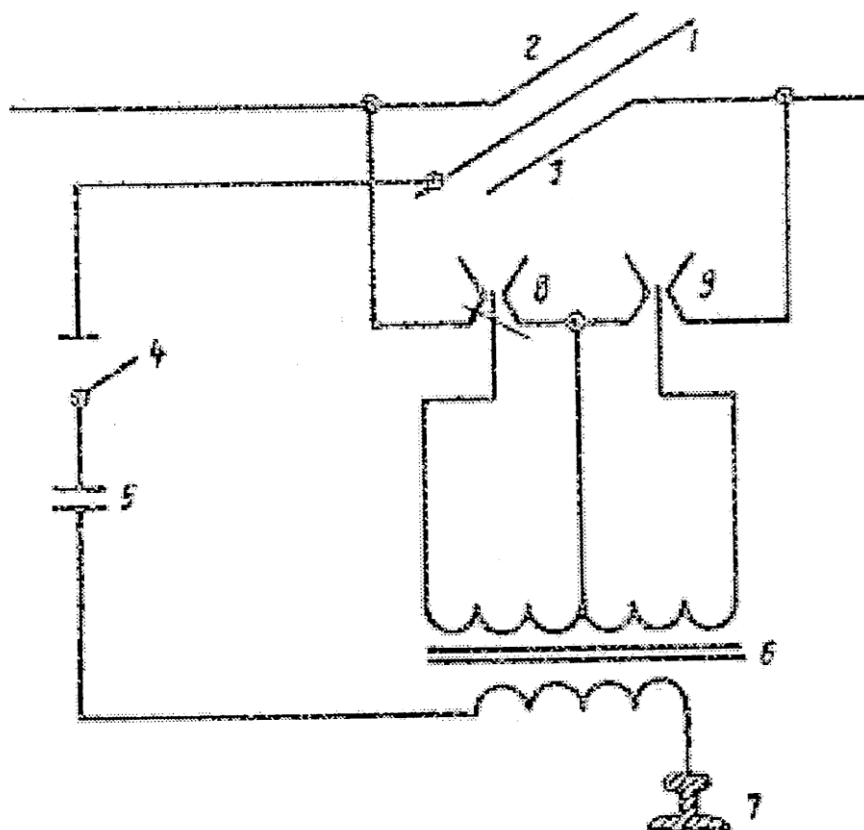


Рисунок 10. Схема устройства для защиты проводов контактной сети от пережогов на воздушных промежутках В.А.Чернявского и Л.П. Крюкова

1.3.6. Устройство для защиты контактных проводов электрифицированных железных дорог постоянного тока от пережогов на воздушном промежутке В.А. Савченко

Для предупреждения повреждений проводов контактной сети дугой при проходе пантографа электровоза воздушного промежутка В.А. Савченко [50] предложено устройство (Рисунок 11) с использованием дугогасящего рога 6, размещенного в зоне нормального нажатия пантографа на оба провода 1 и 2 ИВП. Это позволяет искусственно создать постоянную точку отрыва пантографа 4 в месте его схода с рога 6 на изоляцию 5. Данная точка должна обладать достаточной износостойкостью и располагаться вне

воздушного промежутка. Рог 6 устанавливается на контактный провод 2 изолированно от него.

Электрическая часть рога с отходящей ветвью осуществляется через специальный шунт 7, также расположенный изолированно от контактного провода. В зоне разрыва дуги, на длине 4.5 – 5 м, шунт покрыт изоляцией.

Таким способом обеспечивается противоположность направлений токов в шунте и дуге, а это вызывает их взаимное отталкивание. Сила отталкивания зависит от величины тока.

На рисунке 11 изображен воздушный промежуток – вид сбоку и вид сверху соответственно. Приняты следующие обозначения: 1 – контактный провод одной секции, 2 – контактный провод другой секции, 3 – несущий трос первой секции, 4 – лыжа пантографа, 5 – изоляция на контактном проводе и шунте первой секции, 6 – дугогасительный рог, 7 – шунт, 8 – компенсирующие грузы.

Предлагаемая конструкция основана на строго фиксированном на роге продольном (за отходящим пантографом) и поперечном (с помощью магнитного вытеснения) удлинении электрической дуги с одновременным удержанием ее только с внешней стороны воздушного промежутка.

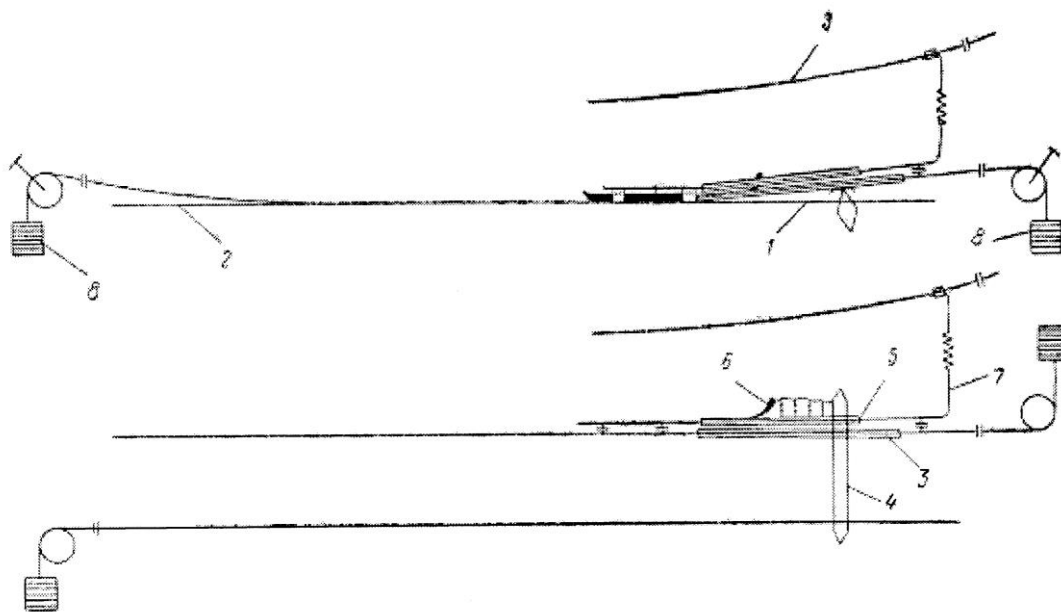


Рисунок 11. Схема устройства для защиты контактных проводов электрифицированных железных дорог постоянного тока от пережогов на воздушном промежутке В.А.

Савченко

Недостатком такой защиты является:

- не исключается возникновение дуги;
- существует процесс старения и разрушения изоляционных материалов;
- появляется дополнительная весовая нагрузка на провода от массы устройства.

1.4. Обобщенный анализ существующих устройств защиты проводов ИВП

По результатам анализа принципа работы устройств защиты проводов контактной сети ИВП от повреждений электрической дугой можно утверждать, что большинство конструкций не исключает появления дуги, а лишь в лучшем случае принимают на себя ее воздействие. Устройства имеют сложную конструкцию, большинство из них требует сезонной регулировки [15].

Устанавливаемое дополнительное защитное оборудование не обеспечивает плавности хода токоприемника по контакному проводу, что

ухудшает токосъем при повышенных скоростях. Устанавливаемые защитные накладки на контактных проводах кроме создания дополнительной весовой нагрузки на провода, увеличивают парусность контактной подвески. А сложный монтаж большинства устройств, монтируемых на контактной подвеске, обусловлен большим количеством соединительных элементов и потребностью в точности сборки.

Релейные защиты, хотя и не несут дополнительной нагрузки на контактную подвеску, но в ряде случаев инициируют отключения зон питания из-за неселективной работы, особенно при удаленных КЗ [8].

2. Моделирование проезда электровоза под током по ветвям изолирующего воздушного промежутка

2.1. Причины пережогов проводов

В отличие от переменного тока, в которых отключение цепи короткого замыкания выключателем с дугогашением происходит в момент естественного перехода тока через ноль, отключить цепь постоянного тока той же мощности и напряжения значительно труднее [37]. Из-за наличия в цепи постоянного тока индуктивности, спадание тока до нуля должно происходить относительно плавно.

Спадание тока до нуля в индуктивной цепи постоянного тока необходимо обеспечивать источником встречного напряжения. И элементом, размыкающим цепь после достижения током нулевого значения, может рассматриваться электрическая дуга.

Процесс возникновения дуги объясняется стремлением системы тяговой сети поддерживать питание движущегося электровоза при заезде его на отключенную зону [63]. При этом существование дуги на протяжении нескольких секунд позволяет ей растянуться на несколько метров.

Если дуга горит длительно, происходит ее переброс на несущий трос и последний также перегорает. Как было доказано в первой главе, длительность горения дуги может составить несколько секунд.

Для отключения цепей постоянного тока при КЗ [35] используют контактные дуговые выключатели, в которых приведение тока к нулю перед отключением цепи происходит при помощи дуги. На практике часто задают выключателю уставку больше минимального тока КЗ.

Кроме аварийных режимов работы тяговой сети существуют штатные ситуации, при которых параметры токов и напряжений ПЛТС близки по значению к параметрам токов КЗ. В этих случаях значение тока ПЛТС изменяется мгновенно, что из-за неселективной работы устройства

защиты БВ приводит к отключению зоны питания, возникновению электрической дуги и пережогу контактного провода, остановке поезда.

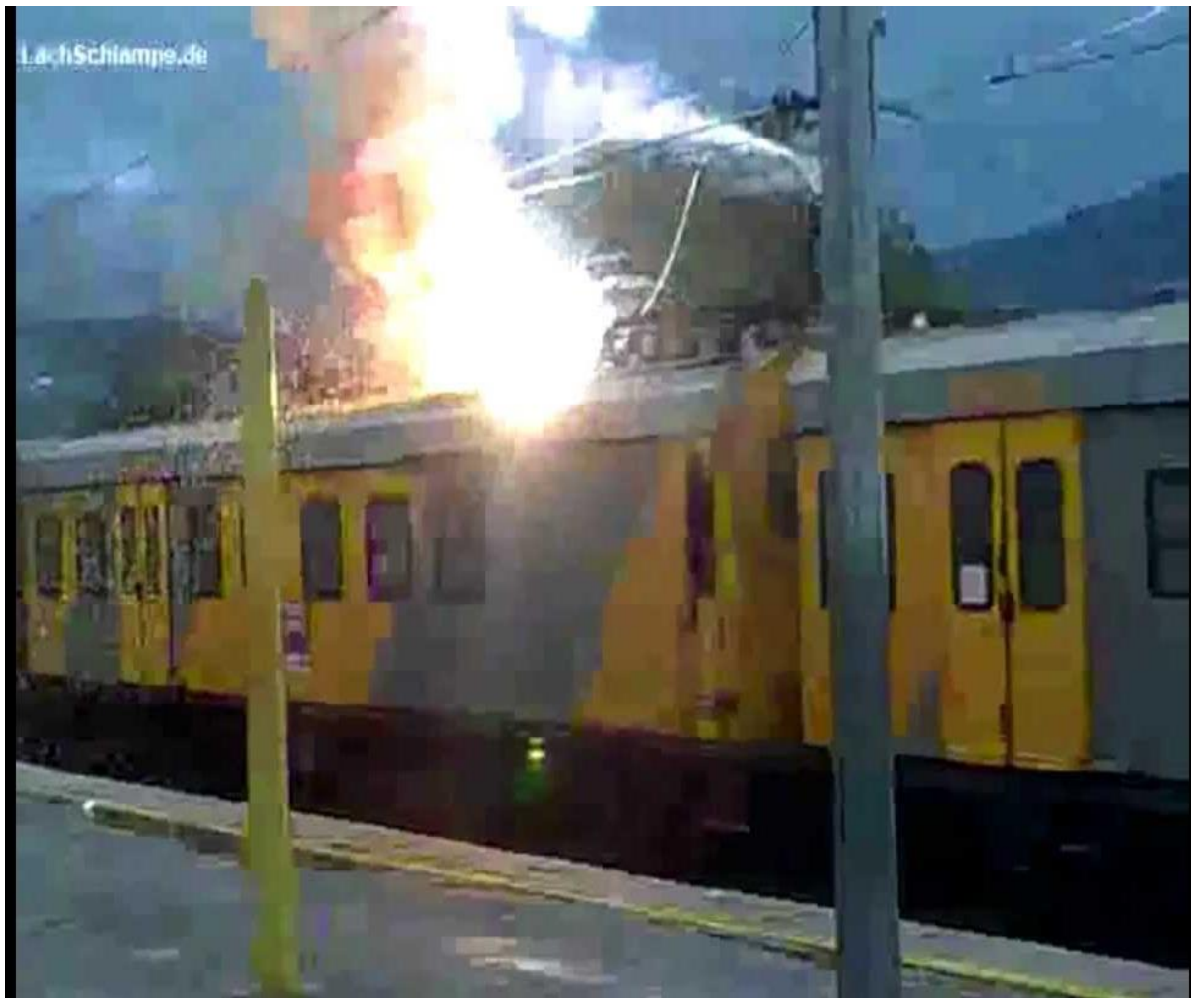


Рисунок 12. Возгорание электрической дуги между токоръемником и контактным проводом

Соизмеримость значений токов в различных ситуациях требует повышенной селективности в работе устройств защиты от токов КЗ в тяговой сети постоянного тока. Необходимо отметить, что для определения возможной причины отключения БВ следует на протяжении длительного времени осциллографировать процесс изменения тока в тяговой сети (переходные процессы тока и напряжения ПЛТС непосредственно перед отключением и во время него). Одной из основных

задач такого исследования процессов в сети является определение множества параметров и построение характеристик.

Защита смежных ПЛТС от токов КЗ осуществляется при помощи РДШ на ВАБ-49. РДШ позволяет отключить ПЛТС при малом значении быстро изменяющегося тока и используется как избирательное устройство защиты [45]. Но именно это свойство РДШ является причиной ложных отключений БВ смежных ПЛТС при въезде на ИВП Э под током.

При въезде токоприемника Э на ИВП и несанкционированном срабатывании защиты, предназначенной для отключения удаленных КЗ, происходит краткосрочное обесточивание линии [7] и возможна незапланированная остановка Э. Это сопровождается возгоранием электрической дуги между контактным проводом и пантографом Э, который соединяет участки тяговой сети, питающиеся от разных тяговых подстанций. Важно отметить, что как правило отключения БВ ПЛТС, с которой съезжает Э при этом не происходит. Причина пережогов проводов изолирующего промежутка заключается в ложной работе РДШ по приращению тока и, следовательно, устранить причину пережогов можно лишь устранив ложные отключения РДШ.

Дуга возникает при отрыве токоприемника от питающей ветви ИВП и влечет за собой износ и обгорание обоих, сокращая их срок службы и надежность работы. Температура столба дуги достигает больших величин: 600 – 25 000 К.

2.1.1. Предпосылки создания модернизированного устройства защиты ПЛТС постоянного тока

Многочисленными наблюдениями установлено, что при проходе по ИВП Э под током, вследствие мгновенного перераспределения токов между питающими линиями тяговой сети (ПЛТС) происходит несанкционированное срабатывание БВ ветви, на которую въезжает Э [19].

В момент размыкания токоприемника и ветви ИВП, с которой съезжает Э, между ними загорается электрическая дуга, пережигаящая провода и конструкции ТС. Горение дуги протекает очень стабильно, так как поддерживается значительной по величине индуктивностью первичной питающей сети, трансформаторов и реакторов сглаживающего устройства тяговой подстанции.

Надо отметить, что одни устройства защиты подразумевают механическую защиту проводов [42] от воздействия электрической дуги на элементы контактной сети. Достижимую при помощи дополнительных конструкций, усложняющих и утяжеляющих контактную сеть, при этом не исключая возникновения самой электрической дуги. Важным фактором на текущий момент является работа энергосистемы в условиях повышения массы поездов, неизбежно влекущей увеличение тока и напряжения для тяги электроподвижных составов [9]. В связи с чем растет вероятность и количество пережогов проводов из-за возгорания электрической дуги.

И другие известные средства защиты предназначены для диагностики и мгновенного реагирования на процессы в сети в ряде случаев. Но зачастую они недостаточно чувствительны, либо недостаточно селективны. Как уже указывалось, осуществляемая с помощью РДШ на ВАБ-49 защита допускает ложные срабатывания.

Следовательно, появляются предпосылки для создания устройства на базе имеющейся защиты от токов КЗ, объединяющего в себе: с одной стороны, способность различать параметры изменения тока в сети, и, с другой стороны, обеспечить срабатывание защиты в режиме КЗ. Реализовать идею возможно путем симбиоза механической части, функционирование которой основано на известных физических законах, и автоматической схемы, реализующей своевременное срабатывание.

2.1.2. Характеристики срабатывания ВАБ-49

Представляется целесообразным рассмотреть характеристики срабатывания ВАБ-49 – неполяризованного выключателя с реле-дифференциальным шунтом (РДШ) [45].

Следует отметить, что выключатели предыдущего поколения АБ-2/4 и ВАБ-43 использовались при защите от малых токов КЗ из-за своего свойства четко реагировать на мгновенное изменение тока.



Рисунок 13. Пережог контактного провода электрической дугой



Рисунок 14. Обрыв контактного провода

Выключатели типа ВАБ-49 имеют характеристики срабатывания защитного реле РДШ [44].

Защитное устройство в виде РДШ, с его характеристиками позволяет отключить БВ при малом значении быстро изменяющегося тока КЗ и именно по этой причине широко используется на ПЛТС электрических железных дорог.

Если принять, что нарастание тока происходит по экспоненциальному закону [53], тогда характеристики срабатывания РДШ описываются тремя параметрами (рисунок 15):

1. величиной установившегося тока, предшествующего приращению тока I_{1*} ;
2. величиной приращения тока ΔI_{1*} ;
3. постоянной времени приращения тока T_1 .

Из рисунка 12 (величины I_{1*} и ΔI_{1*} указаны в относительных единицах) ясно, например, что при предшествующей нагрузке на ПЛТС I_{2*} и последующем приращении тока ΔI_{2*} реле сработает, если постоянная времени приращения тока равна T_1 (область срабатывания реле для нарастания тока с постоянной времени T_1 отштрихована) и не сработает, если постоянная времени равна T_2 [45].

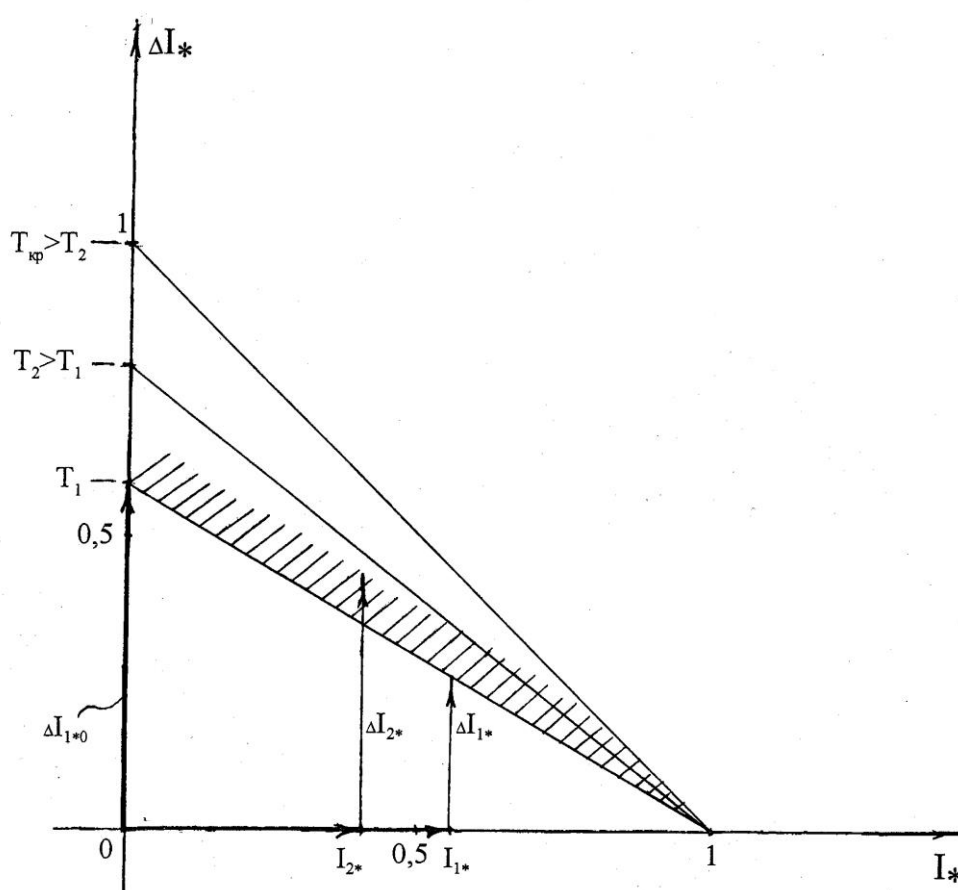


Рисунок 15. Характеристики срабатывания РДШ

Как следует из защитных характеристик РДШ это устройство позволяет отключить ПЛТС при малом значении быстро изменяющегося тока, причем, граничное значение ΔI_{1*} тем меньше, чем больше предшествующее ему значение установившегося тока I_* .

Так, применительно к экспоненциальному нарастанию тока, при $I_{1*} = 0$ величина приращения тока, вызывающая срабатывание реле, должна

быть больше ΔI_{1*o} . Но при значении предшествующего тока величиной ΔI_{1*} , для срабатывания реле требуется уже значение приращения тока $\Delta I > \Delta I_{1*} < \Delta I_{1*o}$.

Именно по указанным причинам РДШ и используется на ПЛТС, как избирательное устройство защиты от малых токов КЗ. Однако это же свойство РДШ и является причиной ложных отключений БВ при въезде Э под током на ИВП. Следовательно, именно это свойство РДШ и является причиной, инициирующей появление на ИВП электрической дуги, пережигаящей провода. Из характеристик срабатывания ВАБ-49 вытекает следующее: для БВ, имеющего характеристики срабатывания РДШ – указанное приращение тока вызовет срабатывание.

2.2. Определение длины дуги между токоприемником и ветвью ИВП

Основываясь на многочисленных опытах и теоретических исследованиях, выдающийся ученый Пупынин В.Н. утверждал, что с максимальной долей достоверности можно считать длину дуги величиной пропорциональной длине пройденного Э пути от места отрыва токоприемника от ветви ИВП до места возможной остановки. Чем больше скорость Э и потребляемый им ток, тем больше вероятность отключения БВ. Кроме того, чем больше скорость Э, тем больше длина дуги. И тем тяжелее последствия аварии такого рода.

Процесс скольжения токоприемника под током с одной зоны питания на другую (отключенную) (рисунок 16) по скользянам секционного изолятора аналогичен процессу движения по ветвям ИВП [49]. В процессе исследования выяснено (Таблица 3), что в режиме въезда на отключенную (не питаемую) зону неизбежно возникновение электрической дуги, так как в индуктивной цепи, которой является тяговая сеть, моментальное спадание тока до нулевого значения невозможно.

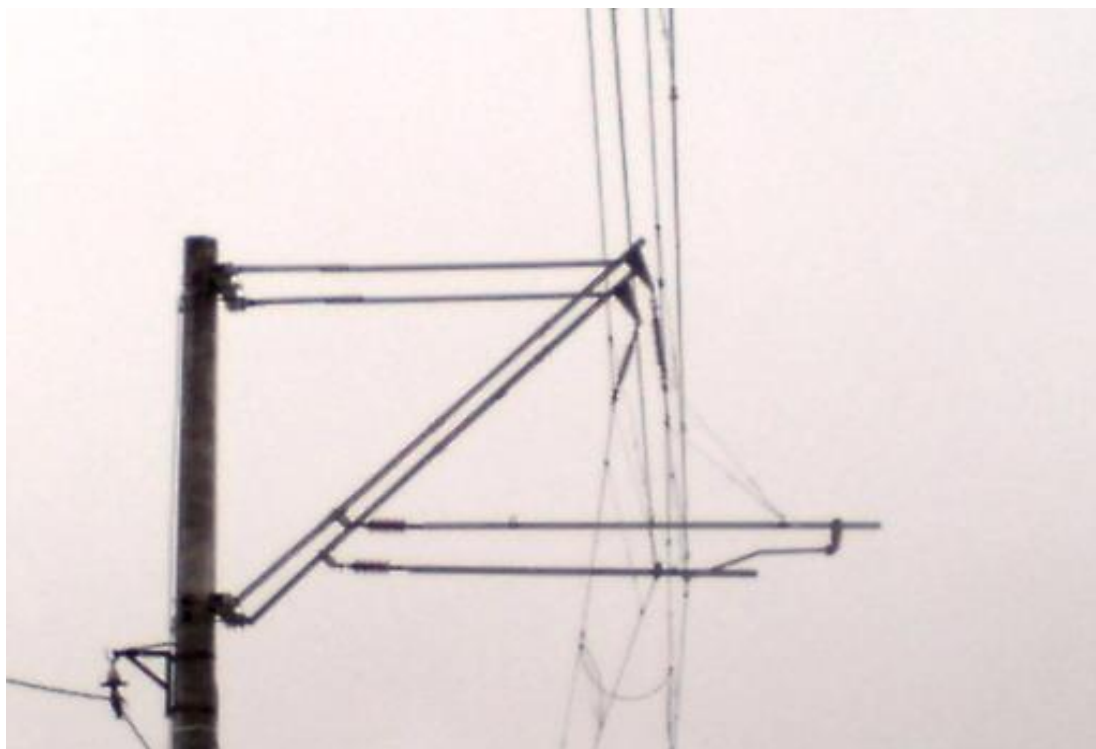


Рисунок 16. Провода ИВП при съезде с питаемой зоны

Действие возникающего при этом противо-ЭДС (ЭДС дуги – e_d) направлено на поддержание тока в цепи. Так как токоприемник с питаемого провода перемещается на второй, не питаемый, подключенный к аварийной зоне, между токоприемником и питаемым проводом образуется воздушный промежуток с частицами расплавленного металла. Под действием большого количества тепловой энергии образовавшийся промежуток заполняется дугой, способствующей протеканию электрического тока от питаемого провода к токоприемнику Э [4].

Как было сказано ранее, длина дуги увеличивается пропорционально времени, так как зависит от скорости движения Э (рисунок 17).

$$l_d = f(t) \quad (1)$$

$$l_d = 1.57x \quad (2)$$

где x – расстояние, на которое переместился токоприемник электровоза за время t .

Сказанное соответствует следующей схеме (рисунок 17).

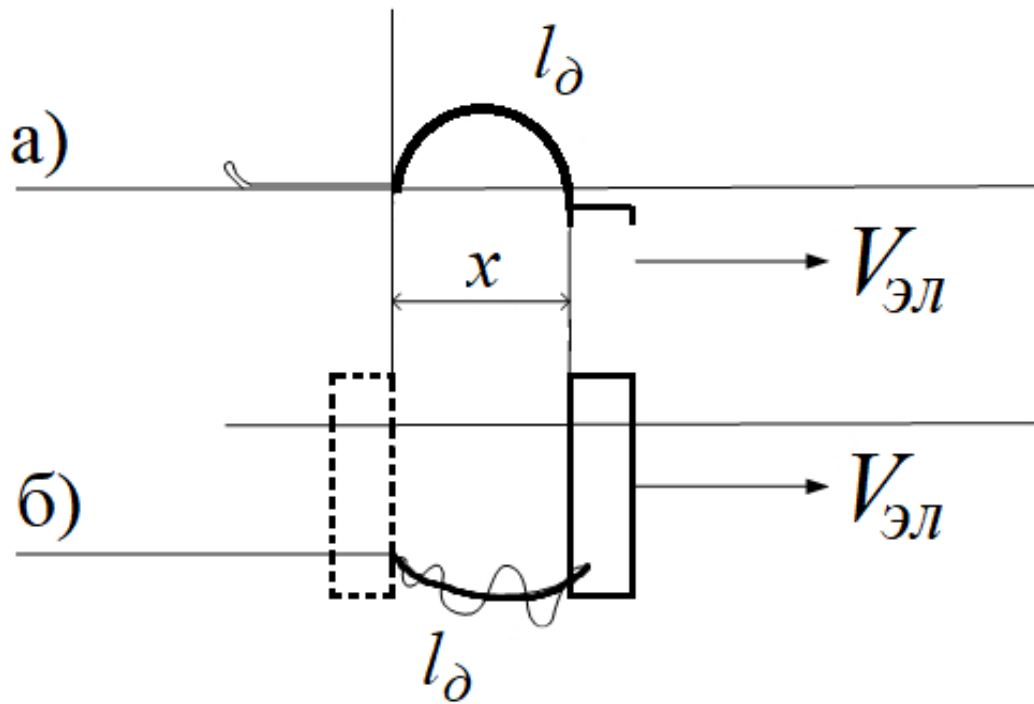


Рисунок 17. Перемещение лыжи токоприемника с питаемой на непитаемую зону: а – вид сбоку; б – вид сверху (l_δ – длина дуги; $V_{эл}$ – скорость движения Э)

Для определения коэффициента скорости нарастания напряжения в дуге k_d , пользуются следующей формулой:

$$e_\delta = k_\delta t \quad (3)$$

$$\text{С другой стороны, } l_\delta = k_1 t \quad (4)$$

$$\Delta U_\delta \cdot l_\delta = e_\delta \quad (5)$$

$$U_\delta \cdot k_1 = k_\delta \quad (6)$$

$$\text{Таким образом } \Delta U_\delta \cdot l_\delta = \Delta U_\delta \cdot k_1 \cdot t \quad (7)$$

Максимальная длина дуги определяется действующим напряжением в цепи и минимальным градиентом дуги ΔU_{δ} , при котором еще возможно поддержание ее горения. Примем $\Delta U_{\delta} = 10 \text{ В}$.

Также зададимся маркой электровоза: ВЛ-10 (8 двигателей); скоростью электровоза $V_{эл} = 10 \text{ км/ч} - 70 \text{ км/ч}$; профилем пути: горизонтальный; типом подвески: М120+МФ100+А185.

Для дальнейших расчетов построим электрическую схему замещения (рисунок 18), где: $I_{эл}$ – ток электровоза;

L_{mc}, R_{mc} – индуктивное и активное сопротивление тяговой сети соответственно;

E – напряжение на двигателях Э;

$L_{эл}, R_{эл}$ – индуктивное и активное сопротивление Э соответственно;

L_p, R_p – индуктивное и активное сопротивление рельсовой цепи соответственно;

L_{mn}, R_{mn} – индуктивное и активное сопротивление тяговой подстанции соответственно;

$\Delta U_{\delta o}$ – напряжение ТП.

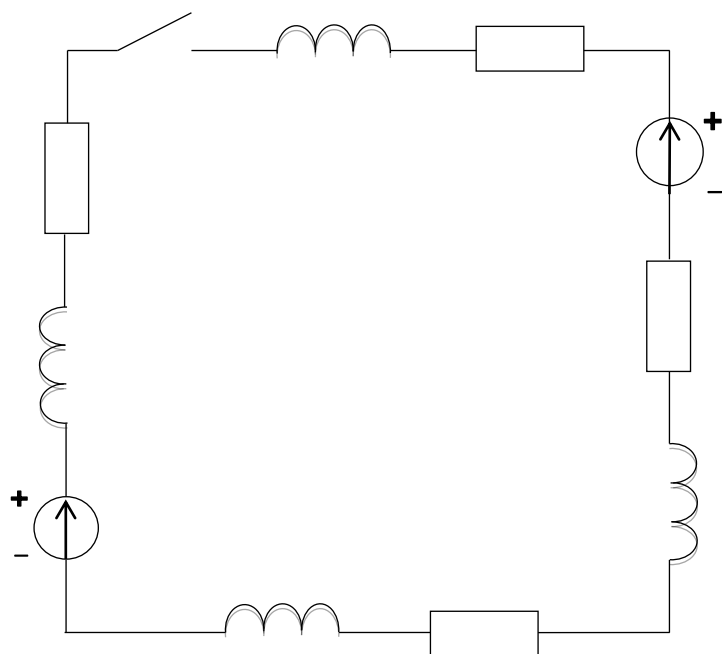


Рисунок 18. Электрическая схема замещения тяговой сети

Поведение дуги на контактной сети (рисунок 19а) в рассматриваемой схеме совершенно аналогично поведению дуги в БВ постоянного тока (рисунок 19б), отключающего ток [3].

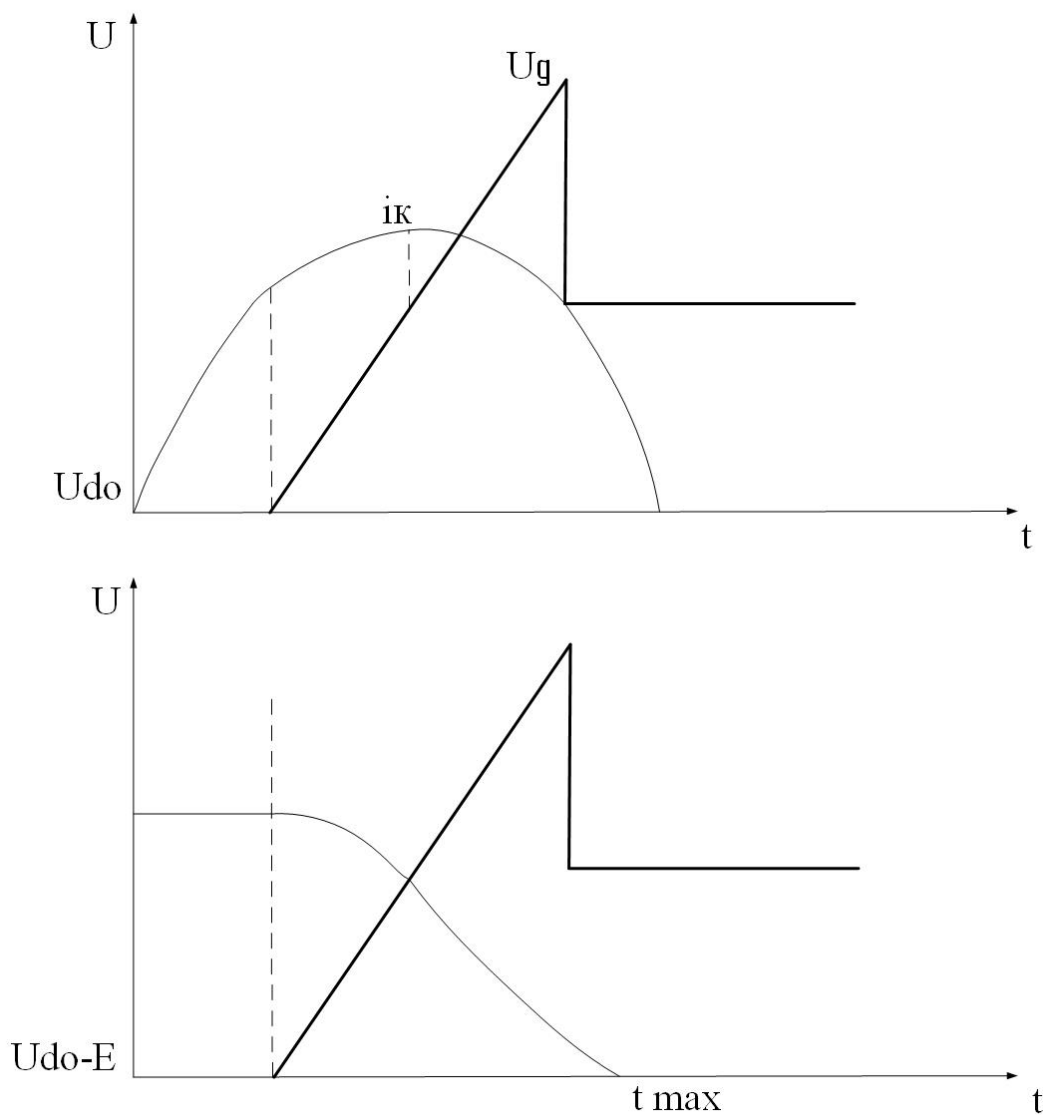


Рисунок 19. а – отключение тока КЗ быстродействующим выключателем; б – отключение тока нагрузки быстродействующим выключателем.

Исходя из сказанного, решение задачи на определение максимального напряжения на дуге e_{dmax} аналогично алгоритму определения максимального значения перенапряжения на зажимах выключателя. Из графиков видно, что параметр «время горения дуги» t_{max} , аналогичен параметру «время отключения тока нагрузки» t .

То есть: $e_{dmax} = k_d t_{max}$ (8)

где t_{max} – время горения дуги.

Так как длина дуги l_{δ} зависит от величины пройденного пути x , можно найти зависимость изменения скорости нарастания напряжения на столбе дуги от времени.

$$l_{\delta} = 1.57x = V / 3.6 \cdot t \cdot 1.57 \quad (9)$$

тогда $e_{\delta} = \Delta U_{\delta} \cdot l_{\delta} = \Delta U_{\delta} \cdot V / 3.6 \cdot t \cdot 1.57 \quad (10)$

с другой стороны $e_{\delta} = k_{\delta} t \quad (11)$

$$k_{\delta} = \Delta U_{\delta} \cdot V / 3.6 \cdot 1.57 = 109 \text{ В/с} \quad (12)$$

2.3. Определение тока Э

Зададимся условием, что электровоз движется на полном поле при последовательно соединенных восьми двигателях на скорости 25 км/ч и потребляет ток 130 А. Расстояние от подстанции до ИВП $l_{\delta} = 2$ км (рисунок 20, рисунок 21).

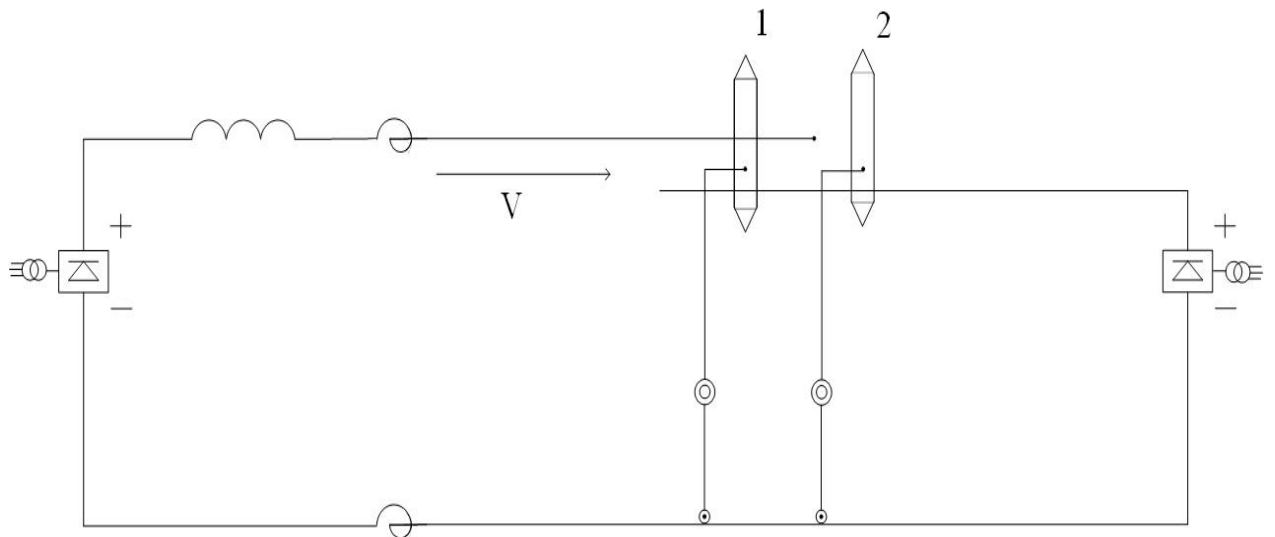


Рисунок 20. Схема перемещения токоприемника Э по ветвям ИВП

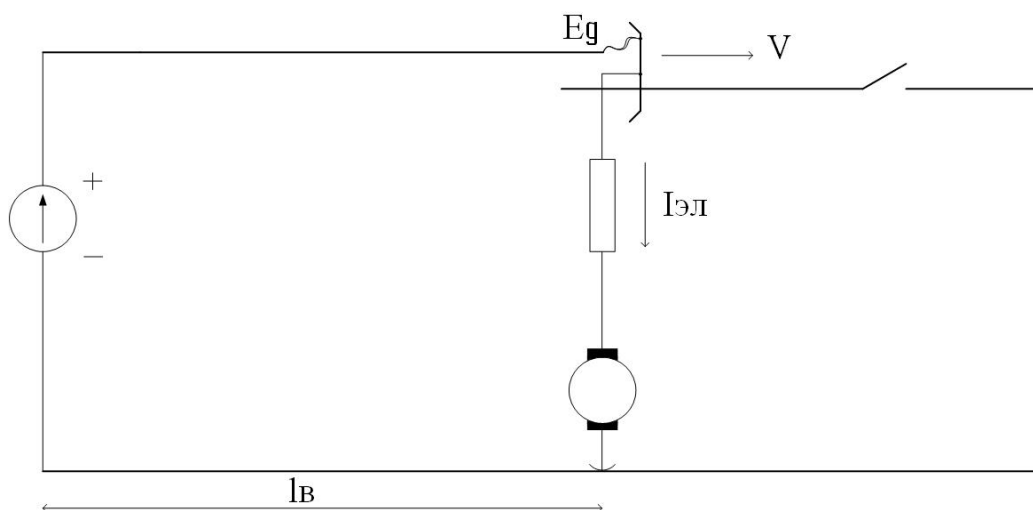


Рисунок 21. Электрическая схема замещения процесса перемещения Э по ветвям ИВП

Внутреннее сопротивление тяговой подстанции ρ_{mn} при $U_{xx} = 3560\text{В}$, $U_{ном} = 3300\text{В}$, $I_{ном} = 3000\text{А}$ определяется по формуле:

$$\rho_{mn} = \Delta U / I_{ном} \quad (13)$$

$$\rho_{mn} = 0.1 \text{ Ом}$$

Перейдем к обобщенной электрической схеме замещения энергоснабжения Э (рисунок 22).

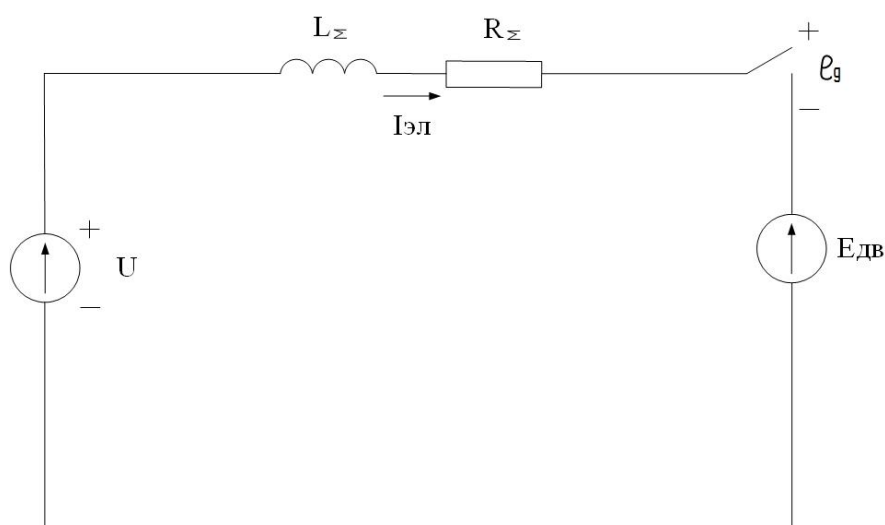


Рисунок 22. Обобщенная схема замещения энергоснабжения Э

$$L_{\Sigma} = L_{mc} + L_{эл} + L_p = 36 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (14)$$

$$R_{\Sigma} = \rho_{mn} + R_{mc} + R_{эл} = 1.028 \text{ Ом} \quad (15)$$

Величину потребляемого Э тока $I_{эл}$ можно найти из следующей формулы для определения напряжения на двигателях $E_{дв}$:

$$E_{дв} = U - I_{эл} \cdot R_{\Sigma} = 3 \, 521 \text{ В} \quad (16)$$

Обратимся к схеме замещения тяговой сети (рисунок 23):

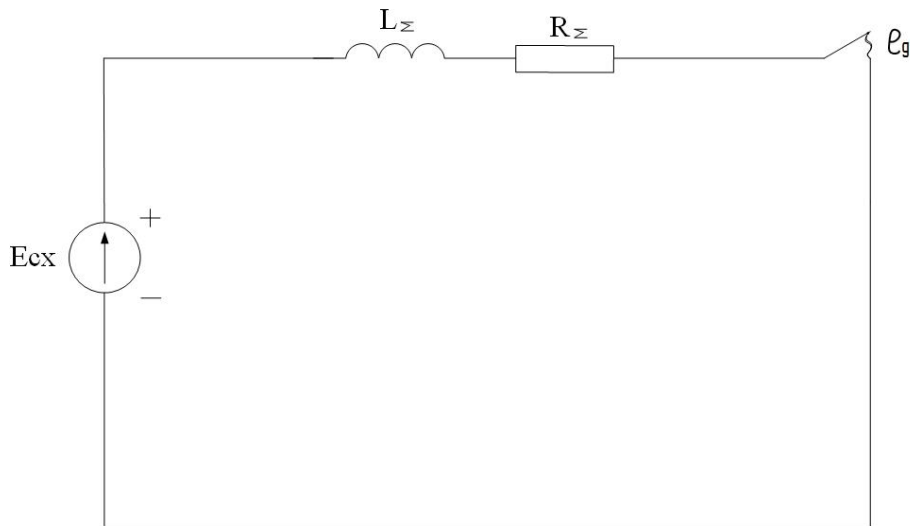


Рисунок 23. Схема замещения тяговой сети

$$E_{сх} = U - I_{эл} \cdot R_{\Sigma} = U - E_{дв} \quad (17)$$

$$I_{эл} = (U - E_{дв}) / R_{\Sigma} + (k_{\delta} \cdot L_{\Sigma}) / R_{\Sigma}^2 \cdot (1 - e^{-a' t}) - k_{\delta} / R_{\Sigma} \cdot t \quad (18)$$

Где $a' = R_{\Sigma} / L_{\Sigma}$

Результаты расчетов по определению тока Э в зависимости от времени с момента съезда Э с ветви ИВП на отключенную зону питания до остановки Э сведены в таблицу.

Таблица 4. Изменения тока $I_{эл}$ при съезде Э на отключенную зону питания

t , с	$I_{эл}$, А
0.1	118.4
0.5	72.5
1	19.47

И соответственно время t_0 , за которое ток $I_{эл}$ достигнет нулевого значения (рисунок 24) равно:

$$t_0 = ((U - E_{до}) / R_{\Sigma}) / (k_{\partial} / R_{\Sigma}) = 1.18 \text{ с} \quad (19)$$

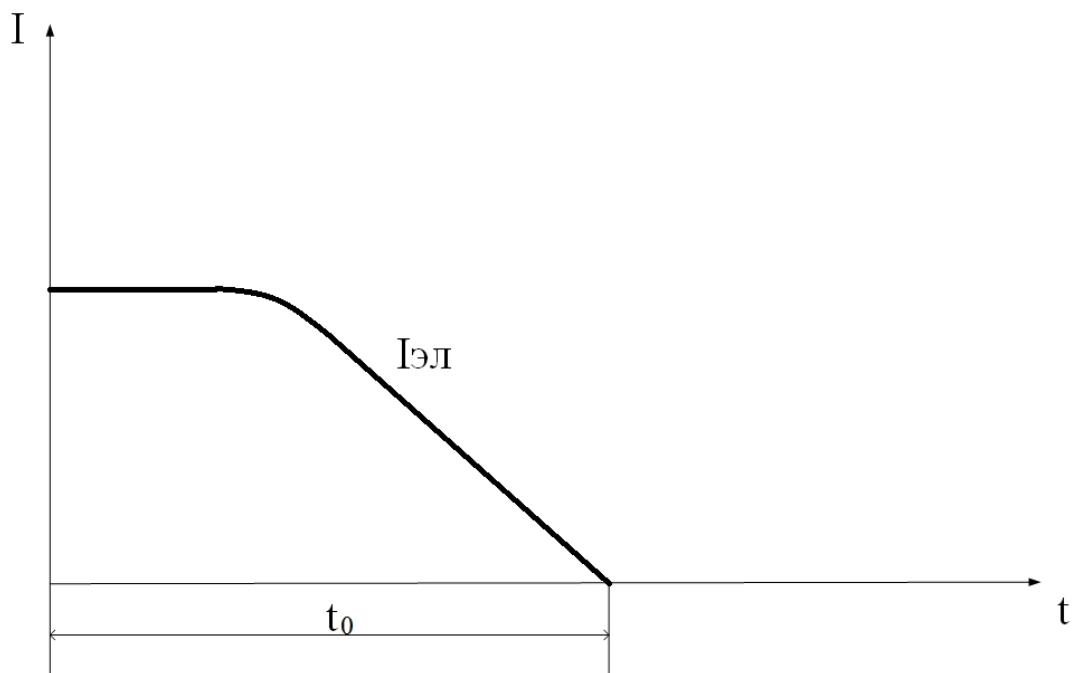


Рисунок 24. Время достижение $I_{эл}$ нулевого значения

Таким образом, максимальная величина дуги составит:

$$l_{\text{max}} = V / 3.6 \cdot t \cdot 1.57 = 12.86 \text{ м} \quad (20)$$

и максимальная величина пройденного пути равна:

$$x_{max} = V / 3.6 \cdot t_0 = 8.2 \text{ м} \quad (21)$$

а величина пройденного пути за 1 секунду равна:

$$x_1 = V / 3.6 \cdot t = 6.944 \text{ м}$$

2.4. Разработка принципиальной схемы РДШ(М)

Основным направлением в решении проблемы несанкционированного срабатывания БВ от мгновенного нарастания тока является модернизация устройства защиты с учетом ограниченности ресурсов.

Решением служит модернизация существующего устройства таким образом, чтобы сохранить защиту по приращению тока как эффективное средство от удаленных КЗ, и в то же время исключить несанкционированное срабатывание БВ при проходе Э под током по ветвям ИВП.

В качестве модернизации предлагается установить на магнитопроводах РДШ смежных ПЛТС по дополнительной катушке (ДК) 11 (рисунок 25). А в свою очередь выводы этих ДК связать между собой собственно схемой блокировки. Функционирование блокировки реализуется при одновременном возникновении в сети одинаковых по величине, но разных по значению приращений тока: отрицательного на ПЛТС, с которого съезжает, и положительного на ПЛТС, на который въезжает Э под током.

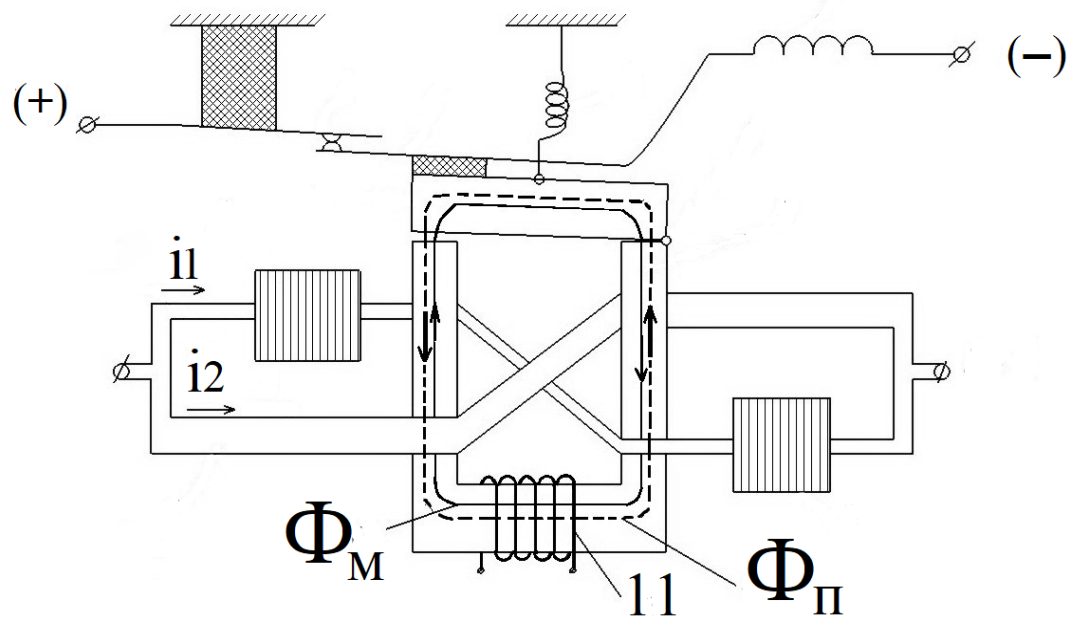


Рисунок 25. Схема модернизированного РДШ – РДШ(М)

2.4.1. Расчет параметров РДШ(М)

Для создания схемы блокировки и расчета ее элементов необходимо иметь параметры известной модели РДШ (рисунок 26).

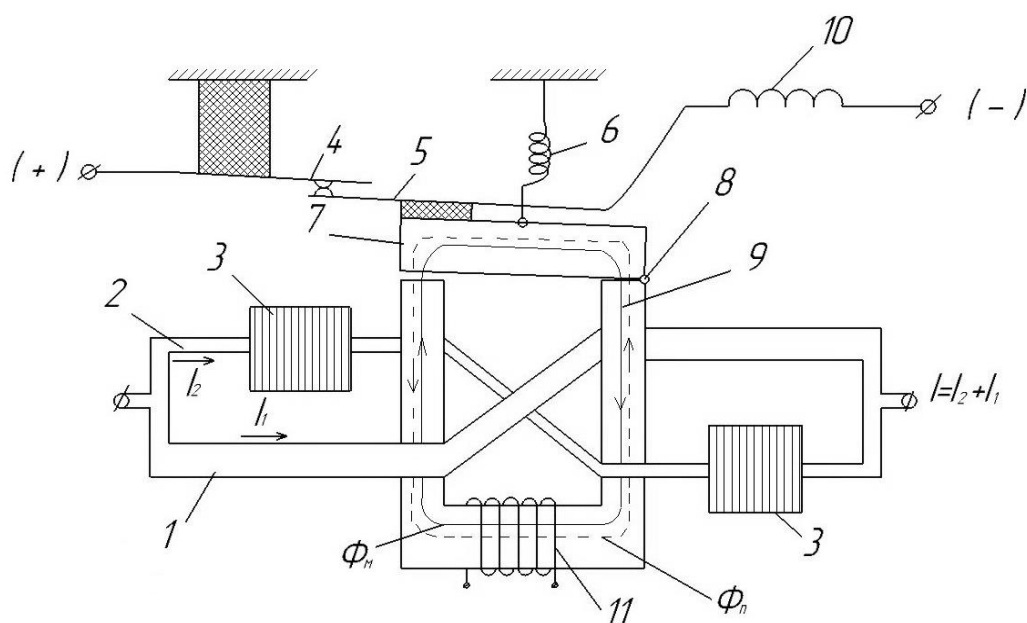


Рисунок 26. Схема РДШ: 1 – шина большего сечения, 2 – шина меньшего сечения, 3 – сосредоточенные индуктивности в виде пакетов железа, 4 – неподвижный контакт, 5 – подвижный контакт, 6 – ориентирующая пружина, 7 – подвижная часть магнитпровода (якорь), 8 – ось, 9 – неподвижная часть магнитпровода, 10 – держащая катушка, 11 – ДК.

Из [45] используем следующие параметры.

Активные сопротивления РДШ левой ПЛТС:

- для шины с меньшим сечением $R_{1л}$;
- для шины с большим сечением $R_{2л}$.

Активные сопротивления РДШ правой ПЛТС:

- для шины с меньшим сечением $R_{1пр}$;
- для шины с большим сечением $R_{2пр}$.

Индуктивности РДШ левой ПЛТС :

- для шины с меньшим сечением $L_{1л}$
- для шины с большим сечением $L_{2л}$.

Индуктивности шин РДШ правой ПЛТС:

- для шины с меньшим сечением $L_{1пр}$;

- для шины с большим сечением L_{2np} .

Результаты расчетов параметров элементов РДШ для левой и правой ПЛТС сведены в таблицу (таблица 5)

Таблица 5. Параметры элементов РДШ для левой и правой ПЛТС

	R_1 , мкОм	R_1 , мкОм	L_1 , мкГн	L_2 , мкГн
Левая ПЛТС	9.5	6.7	1.414	0.227
Правая ПЛТС	9.5	6.7	1.414	0.227

2.4.2. Расчет индуктивности магнитопровода РДШ(М)

Индуктивность магнитпровода определяется величиной воздушного зазора δ между подвижной частью магнитпровода (якорем) и его неподвижной частью, нормально разомкнутыми. Магнитная проводимость которого несоизмеримо мала по сравнению с магнитной проводимостью металла. Таким образом, для определения индуктивности магнитпровода надо определить магнитную проводимость воздушного зазора δ .

Для определения индуктивности магнитпровода надо определить магнитную проводимость воздушного зазора между его неподвижной частью и подвижной (якорем), нормально разомкнутыми (рисунок 27).

Исходя из данных формы и размеров магнитпровода 9 и подвижного якоря 7 и величины воздушного зазора δ в разомкнутом состоянии, расчет магнитной индукции производится следующим образом.

Общая проводимость воздушного зазора определяется как сумма проводимостей элементарных геометрических фигур (рисунок 28), потоки проходящие по этим фигурам параллельны друг другу [66].

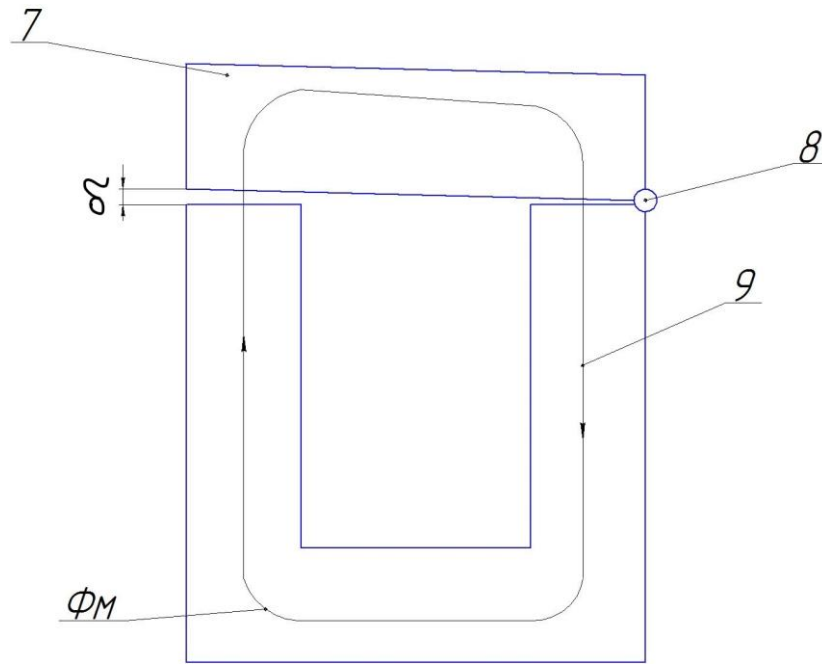


Рисунок 27. Магнитопровод РДШ: Φ_M – основной магнитный поток, 7 – якорь магнитопровода, 8 – ось якоря, 9 – неподвижная часть магнитопровода, δ – воздушный зазор магнитопровода.

Величина воздушного зазора $\delta = 0.2$ см.

$$G_{\text{магн}} = G_0 + 2G_1 + 2G_2 + 4G_3 + 2G_4 + 2G_5 + 4G_6 \quad (22)$$

$$G_0 = \frac{\mu_0 a}{\delta} \quad (23)$$

$$G_1 = \mu_0 \times 0.26 \times b \quad (24)$$

$$G_2 = \mu_0 \times 0.26 \times a \quad (25)$$

$$G_3 = \mu_0 \times 0.077 \times \delta \quad (26)$$

$$G_4 = \frac{\mu_0 b}{\pi} \ln \left(1 + \frac{2\Delta}{\delta} \right) \quad (27)$$

$$G_5 = \frac{\mu_0 a}{\pi} \ln \left(1 + \frac{2\Delta}{\delta} \right) \quad (28)$$

$$G_6 = \frac{\mu_0 \Delta}{4} \quad (29)$$

$$G_{\text{магн } 0.2} = L_{\text{магн}} = 102.17 \times 10^{-8} \text{ Гн}$$

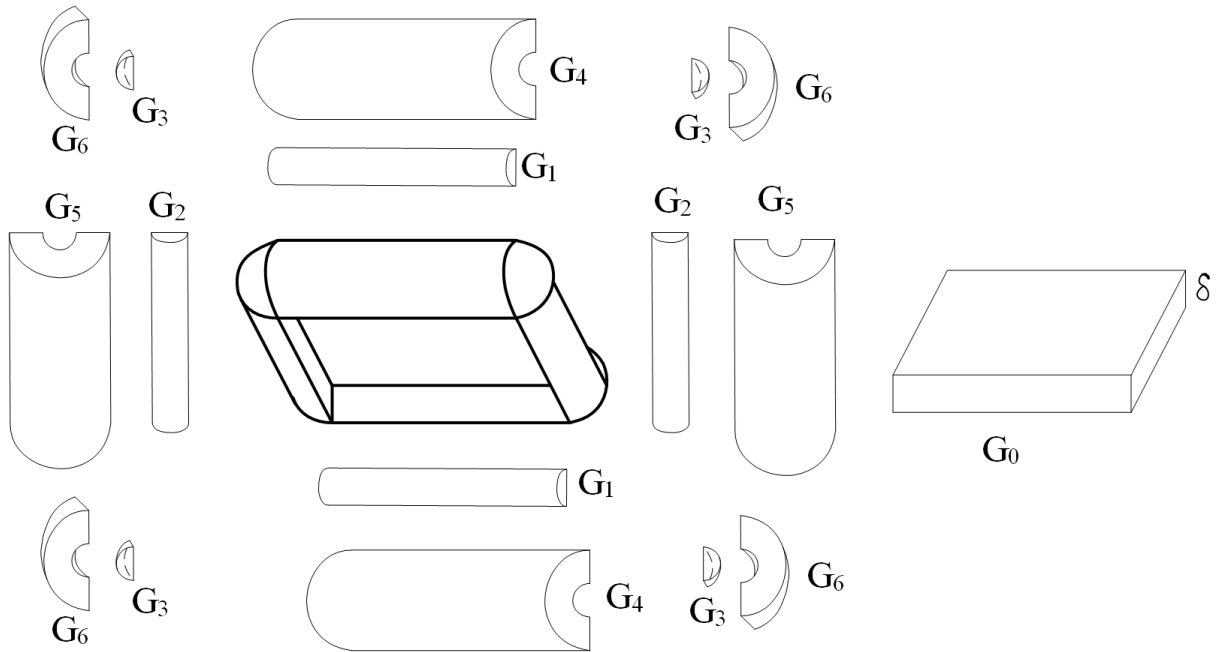


Рисунок 28. Форма воздушного зазора магнитопровода РДШ(М)

2.4.3. Расчет индуктивности пакетов железа на тонкой шине РДШ(М)

Сосредоточенные индуктивности, насаженные на шину меньшего сечения, представляют собой 2 пакета с железом, имеющие равные размеры и величину воздушного зазора (рисунок 29: длина $a = 8$ см, высота $b = 2.6$ см, ширина $\delta = 0.5$ см. Кроме того, ширина верхней части пакета: $\Delta = 2.4$ см.

Суммарная индуктивность пакетов железа влияет на величину разницы токов в шинах РДШ. Кроме того, из-за их наличия срабатывание РДШ зависит от величины приращения тока в сети ΔI и скорости его нарастания T_1 .

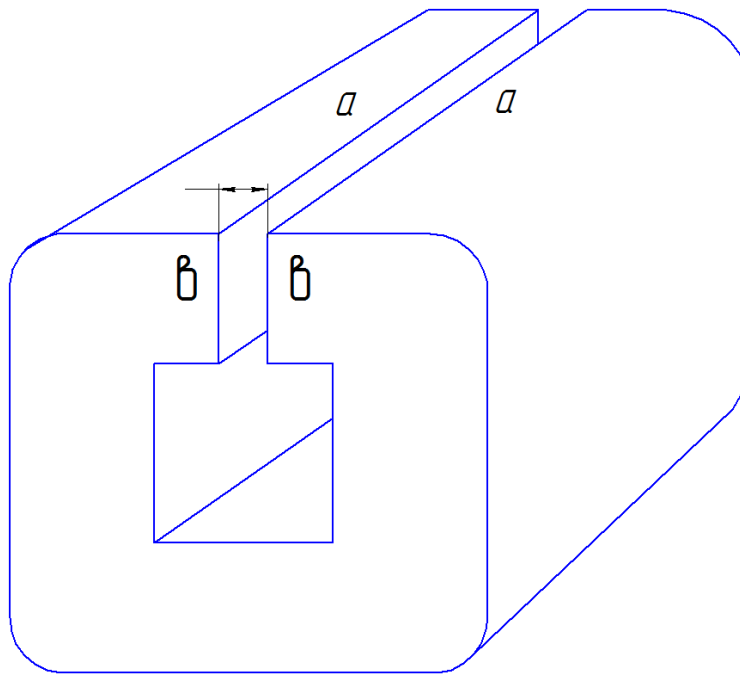


Рисунок 29. Форма пакета железа и его воздушного зазора

Индуктивность шин определяется величиной данного воздушного зазора, магнитная проводимость которого несоизмеримо мала по сравнению с магнитной проводимостью железа. Для определения индуктивности пакетов с железом надо определить магнитную проводимость воздушного зазора:

$$L_{\text{пак}} = G_{\text{возд}} \quad (30)$$

Общая проводимость воздушного зазора определяется как сумма проводимостей элементарных геометрических фигур (рисунок 30), потоки проходящие по этим фигурам параллельны друг другу.

$$G_{\text{возд}} = G_0 + 2 G_2 + G_3 + 2G_4 + 2G_5 + G_6 + 2G_7 \quad (31)$$

$$G_0 = \mu_0 ab \quad (32)$$

$$G_2 = \mu_0 \times 0.26 \times a \quad (33)$$

$$G_3 = \mu_0 \times 0.26 \times b \quad (34)$$

$$G_4 = \mu_0 \times 0.077 \times \delta \quad (35)$$

$$G_5 = \frac{\mu_0 b}{\pi} \ln \left(1 + \frac{2\Delta}{\delta} \right) \quad (36)$$

$$G_6 = \frac{\mu_0 a}{\pi} \ln \left(1 + \frac{2\Delta}{\delta} \right) \quad (37)$$

$$G_7 = \frac{\mu_0 \Delta}{4} \quad (38)$$

$$G_{\text{нак}} = L_{\text{нак}} = 2 \times 69.9 \times 10^{-8} = 140 \times 10^{-8} \text{ Гн}$$

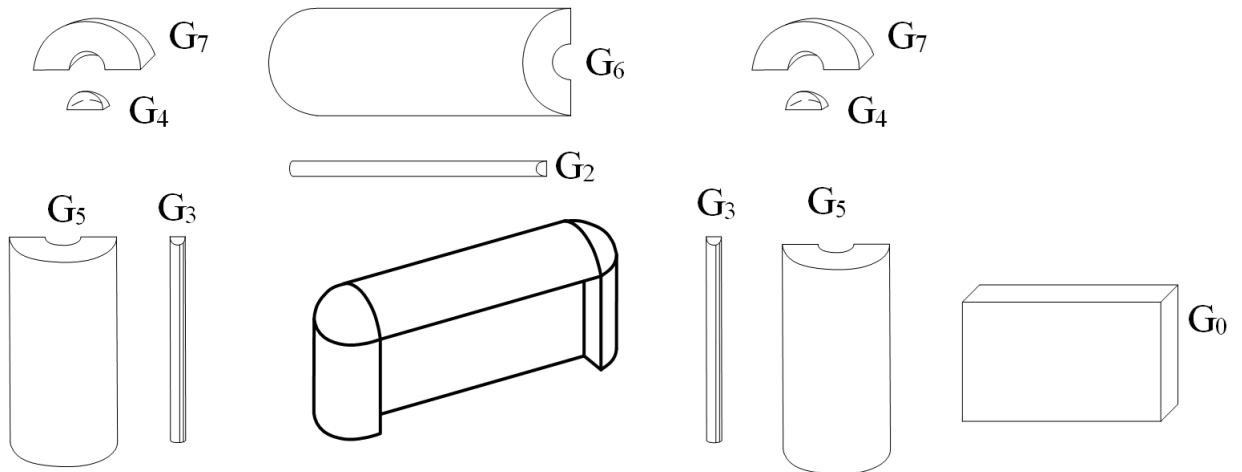


Рисунок 30. Форма воздушного зазора пакетов железа

2.4.4. Определение постоянной времени РДШ(М) и разницы токов в его шинах

При небольших значениях постоянной времени сети T_1 на перераспределение токов в шинах и вытеснение тока в шину большего сечения оказывает влияние индуктивность пакетов железа $L_{1ж}$ на шине меньшего сечения [45]. Кроме того в этом процессе участвуют:

индуктивности обеих шин - меньшего и большего сечения $L_{1ш}, L_{2ш}$ соответственно - с взаимоиндуктивностью $M_{1-2ш}$, и индуктивность магнитопровода с подвижным якорем $L_{2м}$, зависящая от величины воздушного зазора δ .

В соответствии с [45] известно выражение:

$$\begin{aligned} \frac{d(i_2 - i_1)}{dt} = & \frac{2\Delta I}{AT_{ш}} \times e^{-Bt/AT_{ш}} - \frac{2\Delta I(T_{ш} - T_1)}{(BT_1 - AT_{ш})T_1} \times e^{-t/T_1} + \\ & + \frac{2\Delta I(T_{ш} - T_1)B}{(BT_1 - AT_{ш})AT_{ш}} \times e^{-Bt/AT_{ш}} - \frac{\Delta I}{T_1} \times e^{-t/T_1} \quad (39) \end{aligned}$$

где $T_{ш}$ – постоянная времени нарастания тока шунта ;

T_1 – постоянная времени нарастания тока сети ;

L_1 – индуктивность сети ;

$L_{ш}$ – индуктивность шунта ;

R_1 – активное сопротивление сети ;

$R_{ш}$ – активное сопротивление шунта ;

L_p – индуктивность размагничивающего витка выключателя ;

R_p – активное сопротивление размагничивающего витка выключателя.

Изменение разницы токов во времени для расчетных величин постоянной времени сети T_1 и постоянной времени ветви шунта $T_{ш}$, принято для величины приращения тока ПЛТС $\Delta I = 1000$ А.

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} \quad (40)$$

$$T_{ш} = \frac{L_1 + 2L_2}{R_1} \quad (41)$$

Расчет разницы токов в шинах РДШ, постоянной времени шунта $T_{ш}$, постоянной времени сети T_1 для времени $t = 0.2$ секунды сведены в таблицу 6.

Таблица 6. Расчет разницы токов в шинах РДШ

ΔI , А	T_1 , сек	$T_{ш}$, сек	$(i_2 - i_1)$, А
1000	0.1	0.15	- 0.57

Таким образом кривые зависимости разницы токов в шинах РДШ от постоянной времени нарастания тока в цепи в некотором интервале времени могут принимать отрицательные значения. Это объясняется тем, что при нарастании тока цепи, за счет пакетов железа в ветви с током i_1 характеристика разницы токов $(i_2 - i_1)$, может иметь горбообразный характер. Такой характер кривых будет всегда при малых значениях T_1 и может не быть при больших значениях T_1 .

2.5. Проезд Э под током ИВП

Для исследования процесса проезда Э по ветвям ИВП составлена схема его питания смежными ПЛТС (рисунок 31).

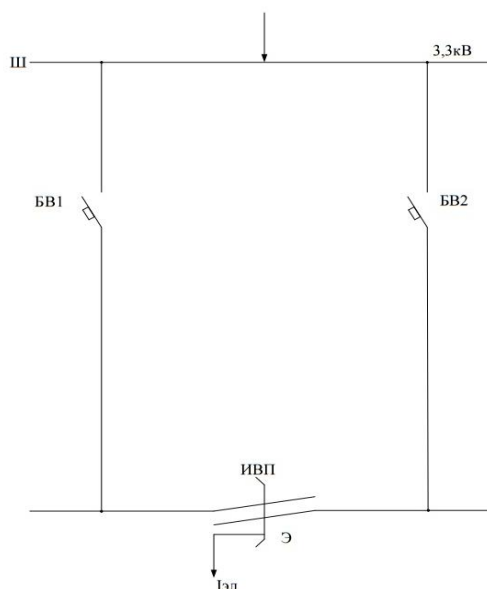


Рисунок 31. Схема питания Э смежными ПЛТС: Ш – шины тяговой подстанции, БВ1, БВ2 – БВ левой и правой ПЛТС соответственно.

Тяговая сеть постоянного тока на протяжении между тяговыми подстанциями представляется в виде длинной линии, состоящей из ряда подобных сегментов.

Переход питания электровоза с одной зоны питания на смежную происходит на промежутке пути между ПЛТС, представляющем собой трехпролетное сопряжение тяговой сети постоянного тока [51]. Поэтому рассматриваемый к моделированию участок сети представляется как сегмент тяговой сети, не являющийся длинной линией (рисунок 28).

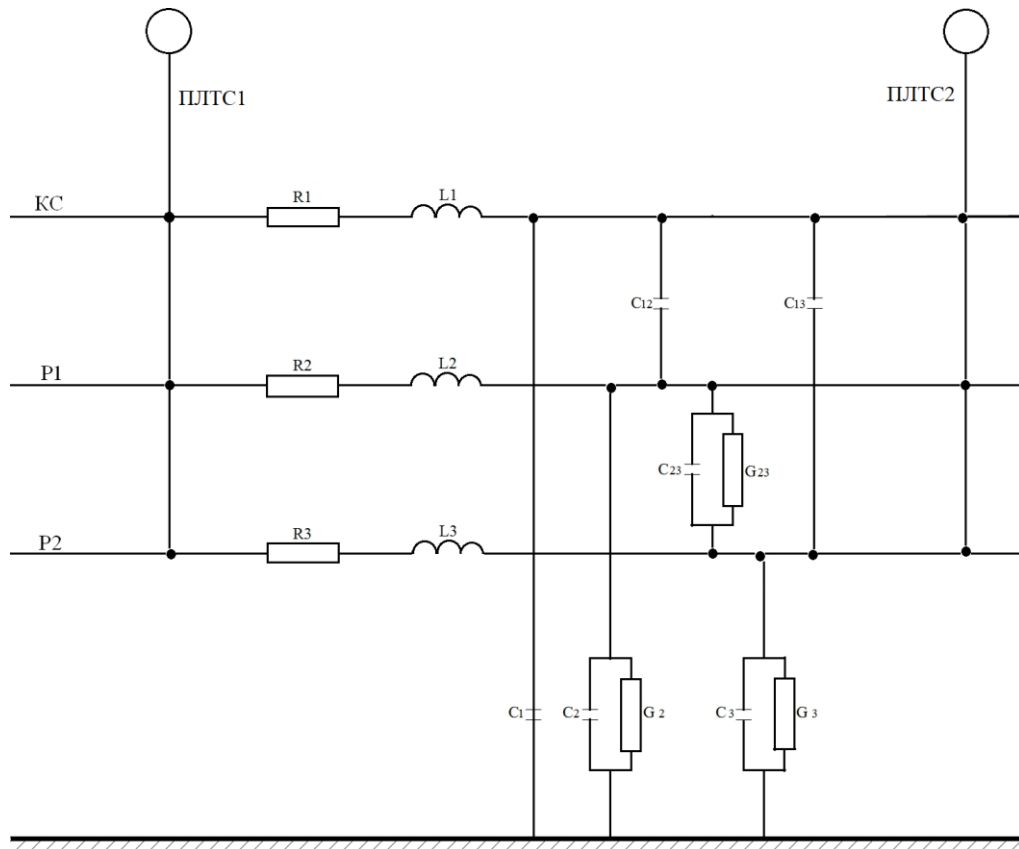


Рисунок 32. Схема тяговой сети постоянного тока между смежными ПЛТС: КС – контактная сеть; P1, P2 – рельсы №1 и №2 соответственно; R1, R2, R3 – активное сопротивление контактной сети, рельс №1 и №2 соответственно; L1, L2, L3 – индуктивность контактной сети, рельс №1 и №2 соответственно; C1, C2, C3, C12, C13, C23 – емкость контактная сеть-земля, рельс №1-земля, рельс №2-земля, контактная сеть-рельс №1, контактная сеть-рельс №2, рельс №1-рельс №2 соответственно, G2, G3, G23 – проводимость рельс №1-земля, рельс №2-земля, контактная сеть-рельс №2 соответственно.

Средний геометрический радиус (рисунок 32) рассчитывается по следующей формуле [43] :

$$r_{cp} = \sqrt[n]{r_{\varepsilon} a_{cp}^{n-1}} \quad (42)$$

где: n - число проводов в фазе (системе);

a_{cp} - среднее геометрическое расстояние между проводами системы;

r_{ε} -эквивалентный радиус провода, равный 95% от фактического.

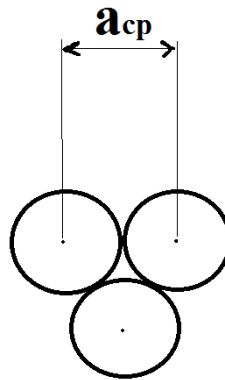


Рисунок 33. Средний геометрический радиус трехпроводной линии

В схеме замещения тяговой сети постоянного тока для расчета подводящей линии (рисунок 33) использовать следующие обозначения:

$L_{\phi 1}, L_{\phi 2}$ – индуктивности левой и правой ПЛТС соответственно;

$R_{\phi 1}, R_{\phi 2}$ – активные сопротивления левой и правой ПЛТС соответственно;

$I_{эл}$ – ток Э;

M_{1-2} – взаимная индукция левой и правой ПЛТС.

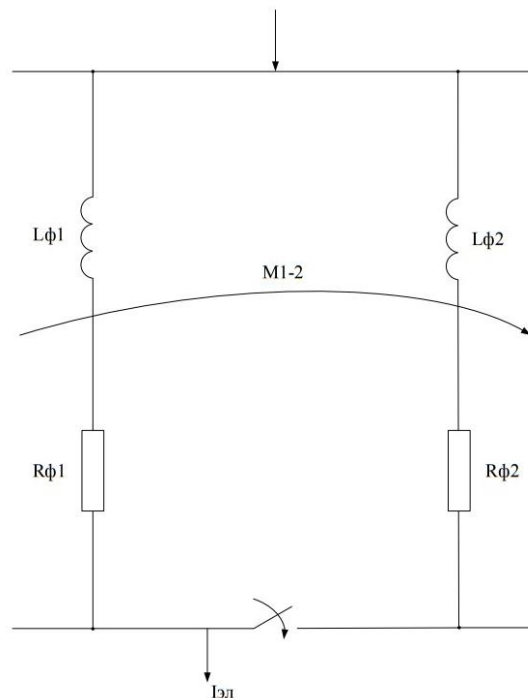


Рисунок 34. Схема замещения тяговой сети постоянного тока для расчета подводящей
линии

Расчет параметров схемы замещения производится для питающей линии [48] в виде трехпроводной (рисунок 34) воздушной линии (ВЛ) (рисунок 35) с применением провода марки А-185 и длиной 200 м.

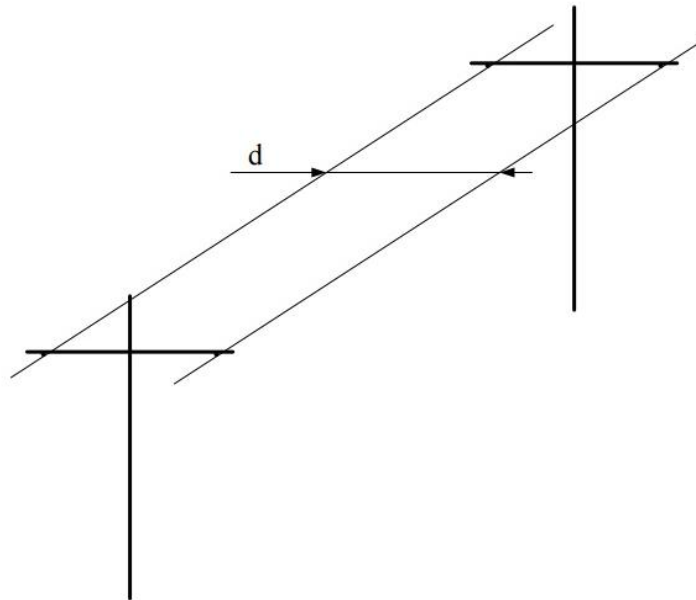


Рисунок 35. Воздушная линия

Параметры провода	Диаметр d , мм	сечение S_n , мм ²	Длина l , м
А-185	17.5	183	200

Для расчета омического сопротивления 1 км провода А-185 используется формула [36]:

$$R_n = \frac{10^9 \rho}{S_n} \quad (43)$$

где R_n – сопротивление 1 км линии для системы из n проводов ;

n – число проводов системы ;

ρ - удельное сопротивление, для алюминия равно 31.0 Ом мм²/ км ;

S_n – площадь поперечного сечения системы, мм².

Площадь поперечного сечения:

$$S_n = \pi r_{cp}^2 \quad (44)$$

При расчетах сопротивлений необходимо ввести понятие поверхностного эффекта – увеличения активного сопротивления. Воспользовавшись результатами исследования, изложенных в работах профессора Б. И. Косарева [33], примем, что при расчетах переходных процессов в тяговой сети постоянного тока можно принять величину эквивалентной частоты ω , приблизительно равной 20 Гц или угловую частоту, равной 125 Рад/с. При такой частоте поверхностный эффект учитывается коэффициентом:

$$K_\omega = 1.04$$

Таким образом, уравнение () примет вид:

$$R_n = \frac{10^9 \rho}{S_n} \times K_\omega \quad (45)$$

Индуктивность одного провода (для случая использования земли в качестве обратного провода) рассчитывается по формуле [5] :

$$L(1)_{nn} = (1 + 2 \ln \frac{10^4}{1.78r \sqrt{10\pi\omega\gamma}} - j \frac{\pi}{2}) \times 10^{-4} \quad (46)$$

где r – радиус провода, м ;

$\omega = 2\pi f$ - угловая частота, рад/с ;

f – частота тока, Гц.

γ - удельная проводимость земли.

В случае, когда земля используется в качестве обратного провода :

$$\gamma = 0.001 \text{ См/м} .$$

Взаимная индуктивность двух проводов рассчитывается по формуле:

$$M(1)_{nn} = (1 + 2 \ln \frac{10^4}{1.78d \sqrt{10\pi\omega\gamma}} - j \frac{\pi}{2}) \times 10^{-4} \quad (47)$$

где d – расстояние между осями проводов, м.

Для случая подвески проводов на одних опорах принимается :

$$d = 2 \text{ м.}$$

Результаты расчета для подводящей линии с длиной 0.2 км в виде трехпроводной воздушной линии (ВЛ) с применением провода марки А-185 сведены в таблицу 7:

Таблица 7 Параметры подводящей линии

Средний геометрический радиус, r_{cp} , мм	Площадь поперечного сечения системы, S_3 , мм ²	Омическое сопротивление R_3 , Ом	Индуктивность одного провода L_{nn} , мГн	Взаимная индуктивность двух проводов M_{nn} мГн
13.65	585.05	0.011	0.53	0.33

2.6. Имитационное моделирование переходных процессов в тяговой сети постоянного тока при проходе токоприемника Э под током по ветвям ИВП и определение напряжения на зажимах ДК РДШ(М)

Моделирование данного переходного процесса [16] заключается в формировании нескольких электрических схем, последовательно во времени сменяющих друг друга. Весь процесс моделирования разделяется на три этапа (рисунок 36):

1. электровоз движется по участку, находящемуся до ИВП, и питается от левой ПЛТС №1;

2. Э движется по ИВП, перекрывая его токоприемником, и питается от двух ПЛТС – левой №1 и правой №2;
3. Э движется по участку, находящемуся после ИВП и питается от правой ПЛТС №2.

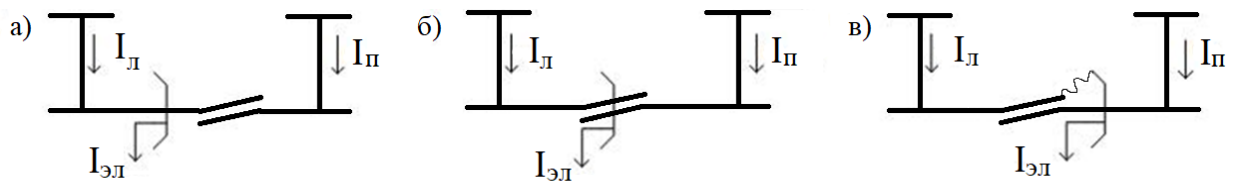


Рисунок 36. Этапы моделирования движения Э по ветвям ИВП

Имитационное моделирование осуществлялось с помощью электронной лаборатории Electronics Workbench Version 4.1. Данный программный пакет был разработан фирмой Interactive Image Tachnologies (www.interactive.com) в 1998 году и предназначен для моделирования и расчета как цифровых, так и аналоговых электрических схем. Особенностью программы является возможность включения в цепи схемы контрольно-измерительных приборов, по внешнему виду и характеристикам приближенных к их промышленным аналогам.

Целью моделирования прохождения поездом ИВП является формирование общей электрической схемы (рисунок 37) и определение зависимости токов от времени в конкретных ветвях данной схемы.

С помощью типовых элементов программы составляется моделируемый участок тяговой сети постоянного тока в виде электрической схемы.

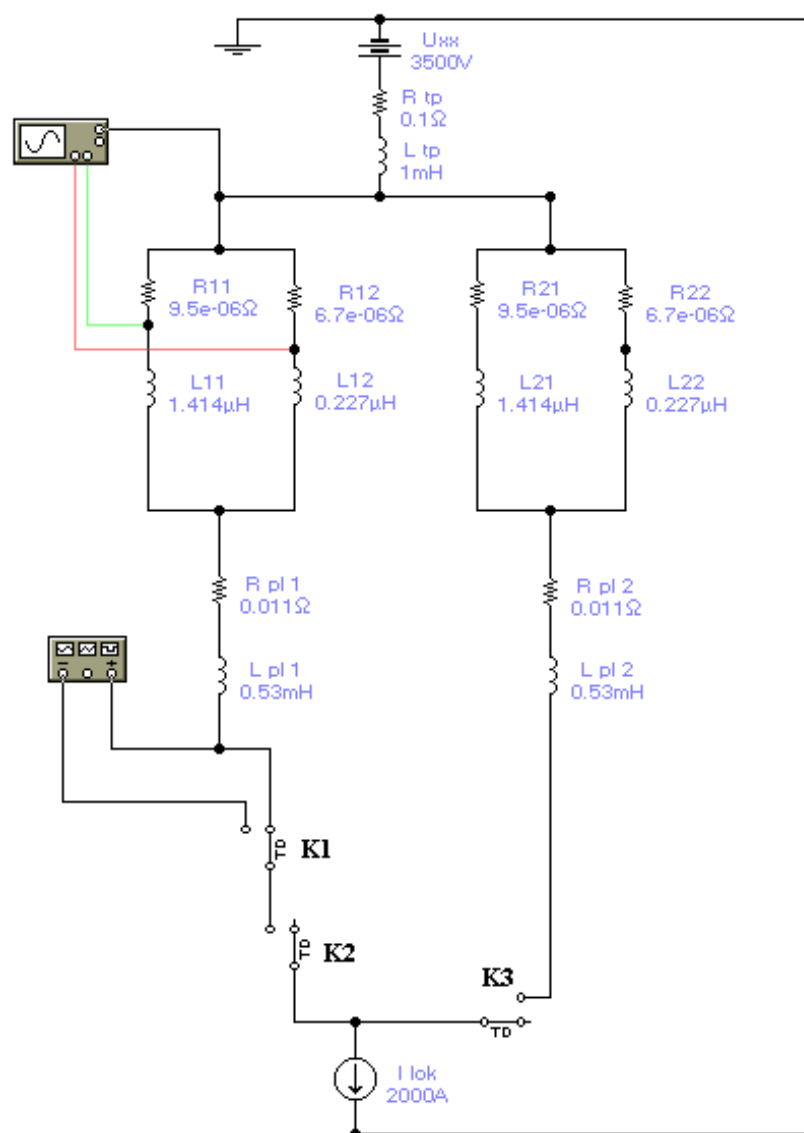


Рисунок 37. Общая электрическая схема для моделирования переходного процесса

В составленной из типовых элементов программы электрической схемы моделируемого участка сети приняты следующие обозначения:

U_{xx} – напряжение холостого хода тяговой подстанции (3500В);

R_{tp} – внутреннее активное сопротивление тяговой подстанции (0.1 Ом);

L_{tp} – внутренняя индуктивность тяговой подстанции (1 Гн);

$R_{11}R_{22}$ – активные сопротивления ветвей шунта левой ПЛТС №1 (9.5 мкОм; 6.7 мкОм);

$L_{11}L_{12}$ – индуктивности ветвей шунта левой ПЛТС №1 (1.414 мкГн; 0.227 мкГн);

$R_{21}R_{22}$ – активные сопротивления ветвей шунта правой ПЛТС №2 (9.5 мкОм; 6.7 мкОм);

$L_{21}L_{22}$ – индуктивности ветвей шунта правой ПЛТС №2 (1.414 мкГн; 0.227 мкГн);

$R_{p11}L_{p11}$ – активное сопротивление и индуктивность подводящей линии левой ПЛТС №1 (0.011 Ом; 0.53 мГн);

$R_{p12}L_{p12}$ – активное сопротивление и индуктивность подводящей линии правой ПЛТС №2 (0.011 Ом; 0.53 мГн);

I_{Lok} – источник тока, имитирующий ток Э (2000 А) (Рисунок 38).

Все измерения в моделируемой схеме производится с помощью виртуального осциллографа () , который условно снимает показания с чисто активных сопротивлений, что позволяет без искажений определить форму тока на данных сопротивлениях.

Кроме того, в измерительной схеме имеется генератор импульсов () , который позволяет имитировать источник напряжения специальной формы.

Полное время моделирования составляет 12 секунд. За это время Э должен пройти все три этапа моделирования.

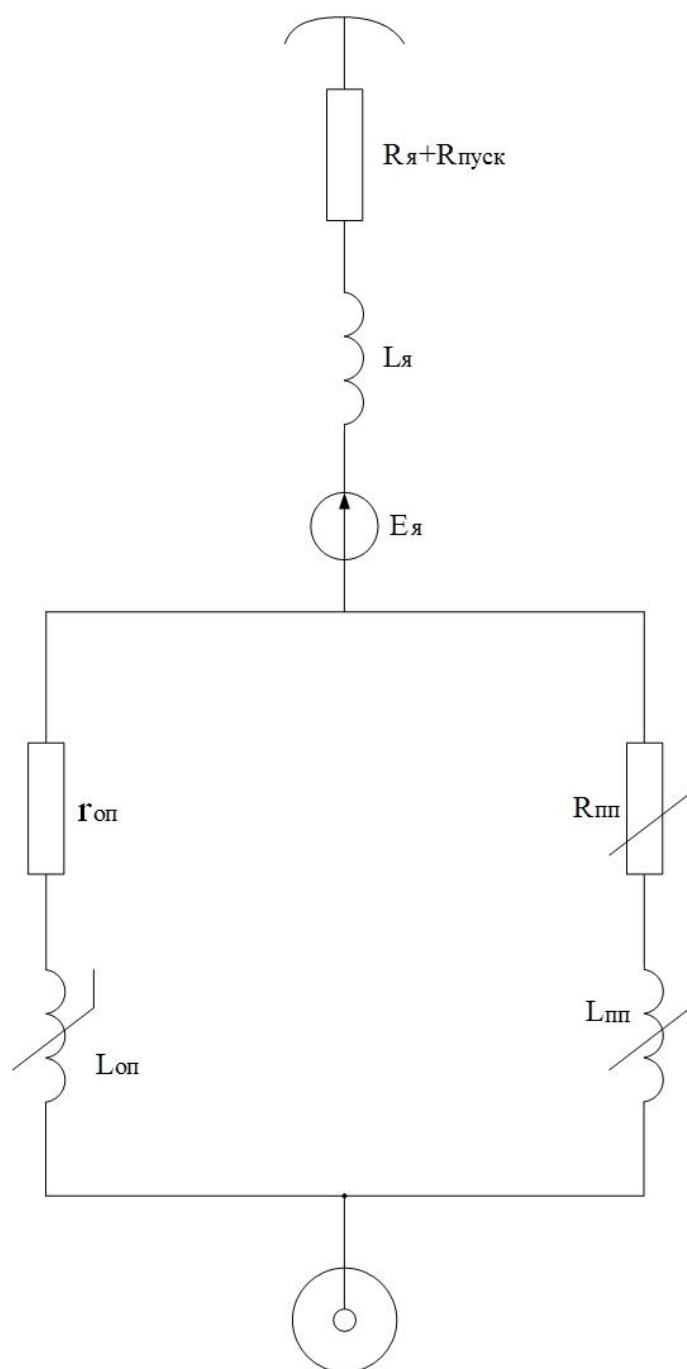


Рисунок 38. Модель Э, имитируемая источником тока: $R_я$ – омическое сопротивление якоря Э, $R_{пуск}$ – пусковое сопротивление Э, $L_я$ – индуктивность якоря Э, $E_я$ – ЭДС якоря Э, $R_{пп}$ – омическое сопротивление, $L_{пп}$ – индуктивность, $r_{оп}$ – омическое сопротивление, $L_{оп}$ – индуктивность

2.6.1. Описание первого этапа моделирования

В измерительной схеме помимо типовых элементов, отображающих электрические характеристики моделируемого участка имеются три ключа (K1, K2, K3), при переключении которых схема изменяется во времени (рисунок 39), имитируя переход питания Э от одной ПЛТС на другую (с левой №1 на правую №2).

В начальный момент времени ключ K1 замкнут, ключ K2 замкнут на «+» генератора сигналов, ключ K3 разомкнут. Это соответствует первому этапу моделирования: Э питается от левой ПЛТС №1.

Такое положение длится 1 секунду, после чего замыкается ключ K3, что соответствует наезду токоприемника Э под током на второй контактный провод ИВП, питающегося от правой ПЛТС №2. Это начало второго этапа моделирования.

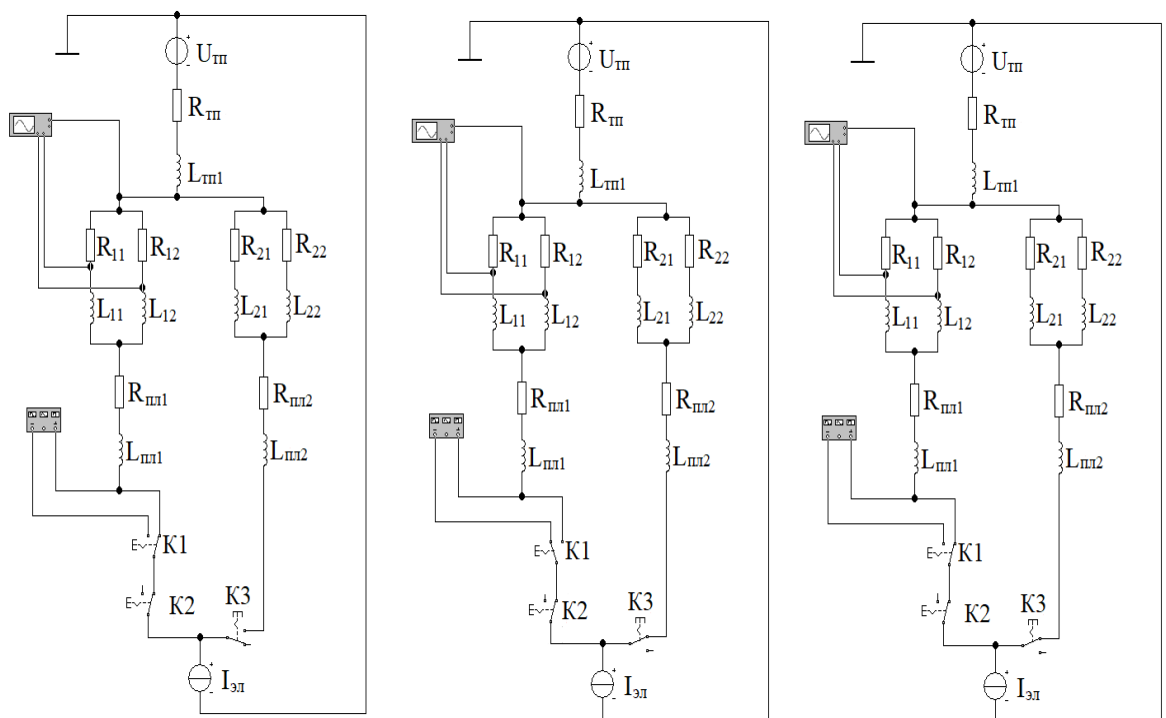


Рисунок 39. Имитационные схемы моделирования по трем этапам движения Э

2.6.2. Описание второго этапа моделирования

На рисунке 40 показана осциллограмма момента перехода Э с первого этапа моделирования на второй. На ней показаны ток левой ПЛТС №1 (нижняя кривая, соответствующая в начале величине тока 2 000 А) и ток правой ПЛТС №2 (верхняя кривая, соответствующая в начале величине тока 0 А), которые после окончания переходного процесса сливаются воедино и соответствуют величине тока 1000 А. следует заметить, что данные кривые отображают падение напряжения на активных сопротивлениях, и для перехода к натуральным величинам токов следует произвести пересчет с соответствующим коэффициентом.

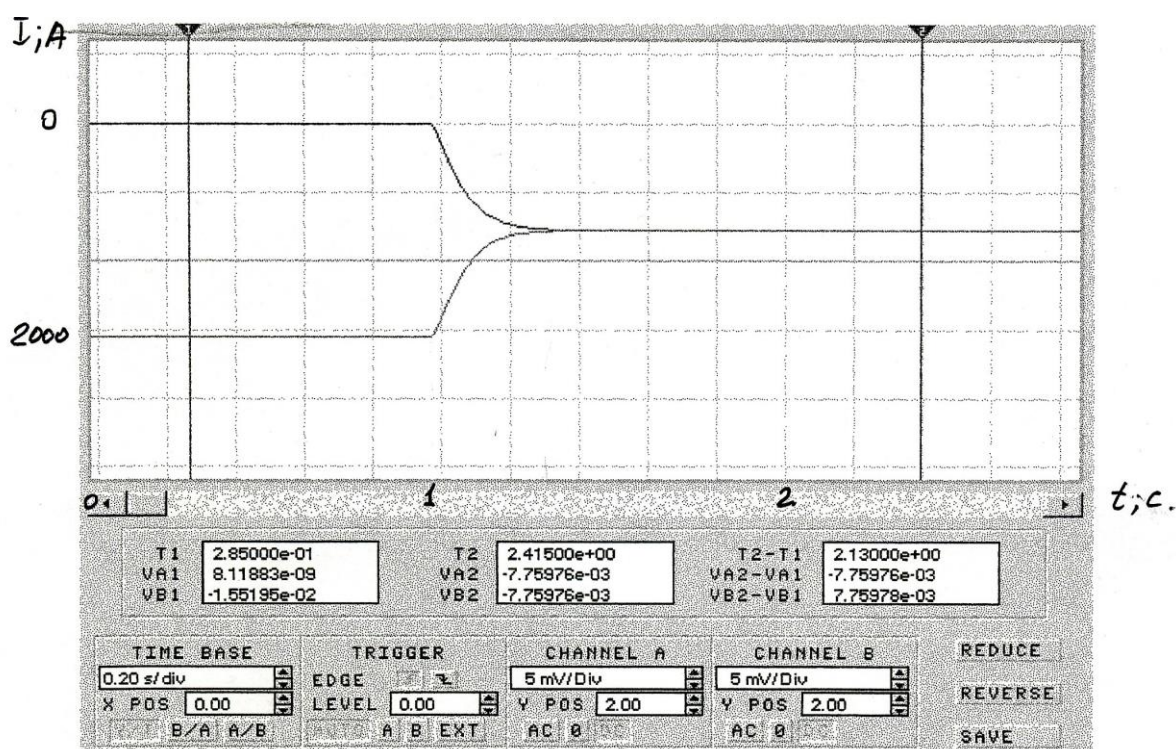


Рисунок 40. Зависимость токов ПЛТС №1 и №2 от времени при переходе от первого этапа моделирования ко второму

Второй этап моделирования длится 9 секунд с момента включения ключа К3. Все это время поезд питается от двух фидеров. После этого ключ К1 замыкается на «-» генератора сигналов, что имитирует съезд токоприемника с первого контактного провода.

2.6.3. Описание третьего этапа моделирования

Третий этап моделирования начинается с момента когда ключ К1 замыкается на «—» генератора сигналов, что имитирует съезд токоприемника с первого контактного провода, питающегося от левой ПЛТС №2, а питание с него осуществляется через дугу, имитирующую как раз генератор сигналов.

На рисунке 41 показана зависимость напряжения генератора сигналов от времени. На рисунке видно, что зависимость линейно возрастает в течение 5 секунд от 0 до 400 вольт. Таким образом, данное приложенное напряжение генератора, включенное обратно току, в течение ограниченного времени имитирует электрическую дугу, которая возникла при съезде токоприемника с первого контактного провода ПЛТС №1 и увеличивается по мере отдаления токоприемника от провода. Напряжение генератора импульсов возрастает в течение порядка 0.3 секунды, после чего ключ К2 разрывает цепь левой ПЛТС №1. Этот момент соответствует обрыву электрической дуги и питание поезда полностью осуществляется через правую ПЛТС №2.

На рисунке 42 показан переход от второго этапа моделирования к третьему этапу. Здесь верхняя кривая это кривая тока левой ПЛТС №1 (снижается до 0 А), а нижняя – кривая тока правой ПЛТС №2 (возрастает до 2000 А).

Третий этап моделирования начинается после полного отключения левой ПЛТС №1 и длится 1.5 секунды, в течение которых и далее питание Э осуществляется через правую ПЛТС №2.

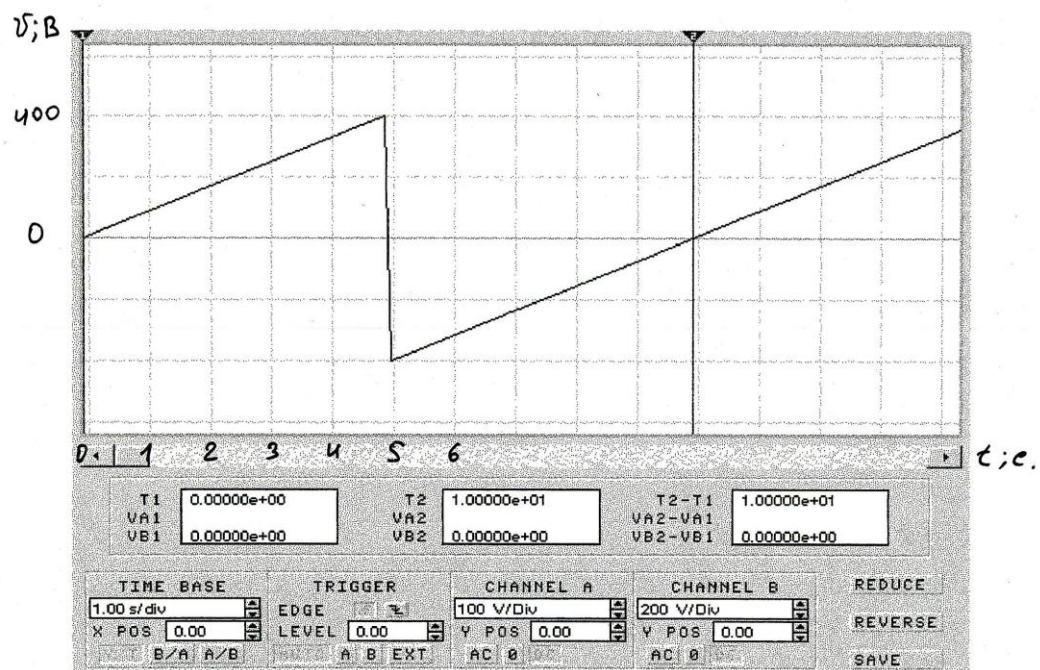


Рисунок 41. Форма напряжения на генераторе сигналов

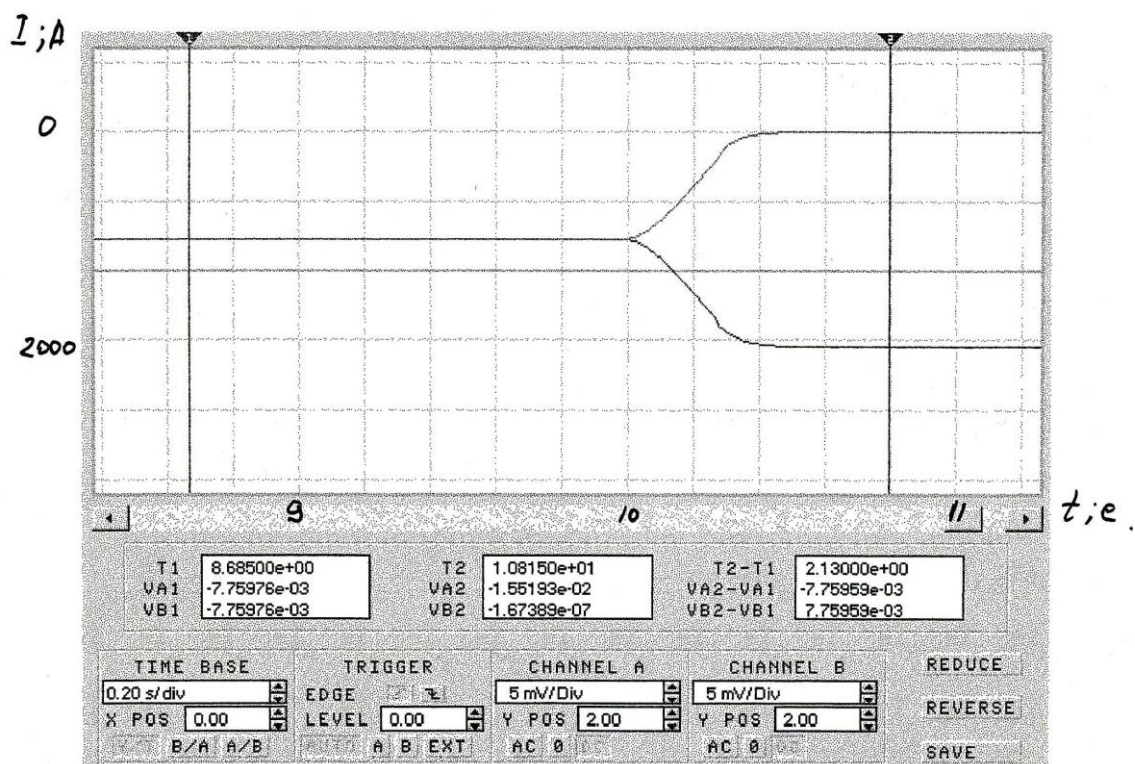


Рисунок 42. Зависимость токов ПЛТС №1 и №2 от времени при переходе от второго этапа моделирования к третьему

Помимо информации по токам левой и правой ПЛТС, в процессе моделирования была получена информация по токам ветвей РДШ(М)

левой ПЛТС №1 в функции времени. Эти данные в последующем необходимы для определения параметров ДК для РДШ(М).

Конечным результатом расчетной программы является зависимость наводящегося напряжения в дополнительной катушке модернизированного реле-дифференциального шунта в функции времени.

Как уже говорилось, полное время моделирования составляет около 12 секунд, за которые поезд проходит моделируемую зону. Конечным результатом моделирования является массив данных, записанный в текстовом файле. Данный массив отображает в табличном виде зависимости падений напряжения на активных сопротивлениях ветвей РДШ(М) (R11R22) в функции времени. Такой вид записи данных наиболее удобен для просмотра, корректировки и считывания другими средствами для дальнейшего использования. В последующем через соответствующие коэффициенты можно перейти и к токам по шинам РДШ(М). Некоторые фрагменты данного текстового файла отображены на рисунке 43.

Текущее время (секунды)	U1 (В)	U2 (В)
0.000000000000e+00	-7.8638e-03	-7.8638e-03
1.000000000000e-02	-7.8557e-03	-7.8613e-03
2.000000000000e-02	-7.8560e-03	-7.8610e-03
3.000000000000e-02	-7.8562e-03	-7.8607e-03
4.000000000000e-02	-7.8563e-03	-7.8604e-03
5.000000000000e-02	-7.8565e-03	-7.8602e-03
6.000000000000e-02	-7.8566e-03	-7.8600e-03
7.000000000000e-02	-7.8568e-03	-7.8598e-03
8.000000000000e-02	-7.8569e-03	-7.8596e-03
9.000000000000e-02	-7.8570e-03	-7.8595e-03
1.000000000000e-01	-7.8571e-03	-7.8594e-03
1.100000000000e-01	-7.8572e-03	-7.8592e-03
1.200000000000e-01	-7.8573e-03	-7.8591e-03
1.300000000000e-01	-7.8573e-03	-7.8590e-03
1.400000000000e-01	-7.8574e-03	-7.8589e-03
1.500000000000e-01	-7.8575e-03	-7.8588e-03
1.600000000000e-01	-7.8575e-03	-7.8588e-03
1.700000000000e-01	-7.8576e-03	-7.8587e-03
1.800000000000e-01	-7.8576e-03	-7.8586e-03
1.900000000000e-01	-7.8576e-03	-7.8586e-03
2.000000000000e-01	-7.8577e-03	-7.8585e-03
.....		
9.800000000000e-01	-7.8580e-03	-7.8580e-03
9.900000000000e-01	-7.8580e-03	-7.8580e-03
1.000000000000e+00	-7.3235e-03	-7.7229e-03
1.010000000000e+00	-6.3703e-03	-7.4561e-03
1.020000000000e+00	-5.6260e-03	-7.1974e-03
1.030000000000e+00	-5.0485e-03	-6.9493e-03
1.040000000000e+00	-4.6039e-03	-6.7134e-03
1.050000000000e+00	-4.2650e-03	-6.4906e-03
1.060000000000e+00	-4.0097e-03	-6.2814e-03
1.070000000000e+00	-3.8205e-03	-6.0859e-03
1.080000000000e+00	-3.6833e-03	-5.9040e-03
1.090000000000e+00	-3.5867e-03	-5.7352e-03
1.100000000000e+00	-3.5217e-03	-5.5791e-03

```

1.110000000000e+00 -3.4811e-03 -5.4351e-03
1.120000000000e+00 -3.4591e-03 -5.3026e-03
1.130000000000e+00 -3.4513e-03 -5.1808e-03
1.140000000000e+00 -3.4540e-03 -5.0690e-03
1.150000000000e+00 -3.4643e-03 -4.9667e-03

```

.....

```

1.100000000000e+01 7.4532e-07 -1.0568e-06
1.101000000000e+01 6.7520e-07 -9.5738e-07
1.102000000000e+01 6.1168e-07 -8.6731e-07
1.103000000000e+01 5.5414e-07 -7.8572e-07
1.104000000000e+01 5.0201e-07 -7.1180e-07
1.105000000000e+01 4.5478e-07 -6.4484e-07
1.106000000000e+01 4.1200e-07 -5.8417e-07
1.107000000000e+01 3.7324e-07 -5.2921e-07
1.108000000000e+01 3.3812e-07 -4.7943e-07
1.109000000000e+01 3.0631e-07 -4.3433e-07
1.110000000000e+01 2.7750e-07 -3.9347e-07
1.111000000000e+01 2.5139e-07 -3.5645e-07
1.112000000000e+01 2.2774e-07 -3.2292e-07
1.113000000000e+01 2.0632e-07 -2.9254e-07
1.114000000000e+01 1.8691e-07 -2.6502e-07
1.115000000000e+01 1.6932e-07 -2.4008e-07
1.116000000000e+01 1.5339e-07 -2.1750e-07
1.117000000000e+01 1.3896e-07 -1.9704e-07
1.118000000000e+01 1.2589e-07 -1.7850e-07

```

Рисунок 43. Фрагмент текстового файла полученного массива данных

Ниже приведены полученные данные по токам в шинах бoльшего и меньшего сечения РДШ(М) (рисунок 44), их сумма и разность (рисунок 45). Также определена форма наводимого напряжения на зажимах одного витка дополнительной катушки e_{1s} (рисунок 45). На рисунке 46 изображен увеличенный фрагмент формы токов при переходе с первого на второй этап моделирования и на рисунке 47 увеличенный фрагмент формы токов при переходе со второго на третий этап моделирования.

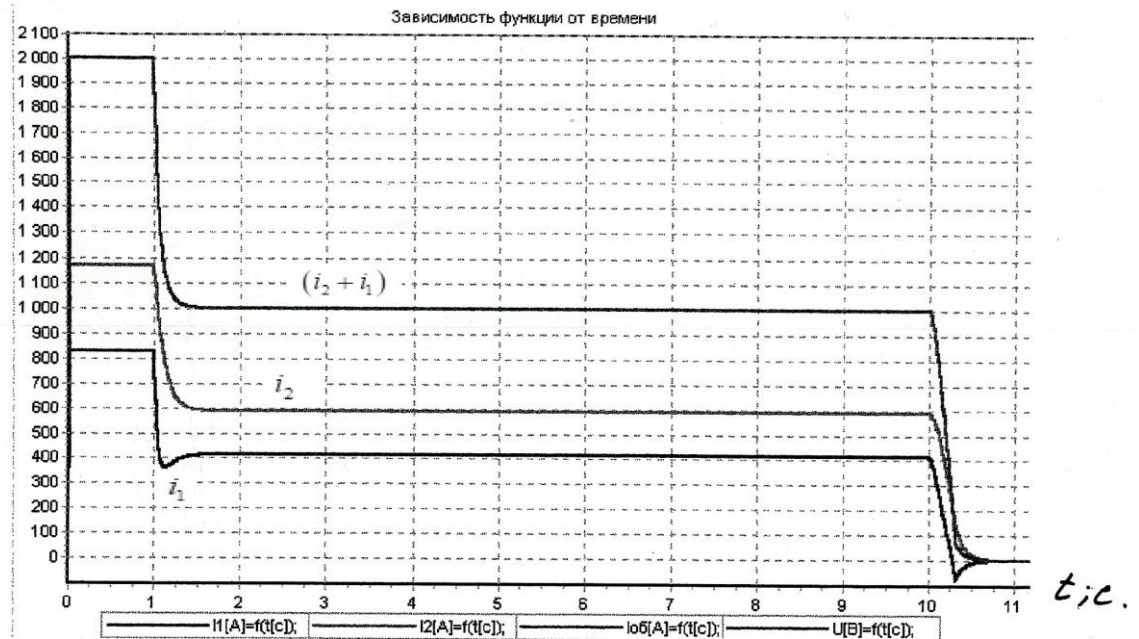


Рисунок 44. Форма токов по ветвям РДШ(М): i_1 - в шине меньшего сечения, i_2 - в шине большего сечения, и их сумма $(i_2 + i_1)$ в функции времени в течении всего времени моделирования

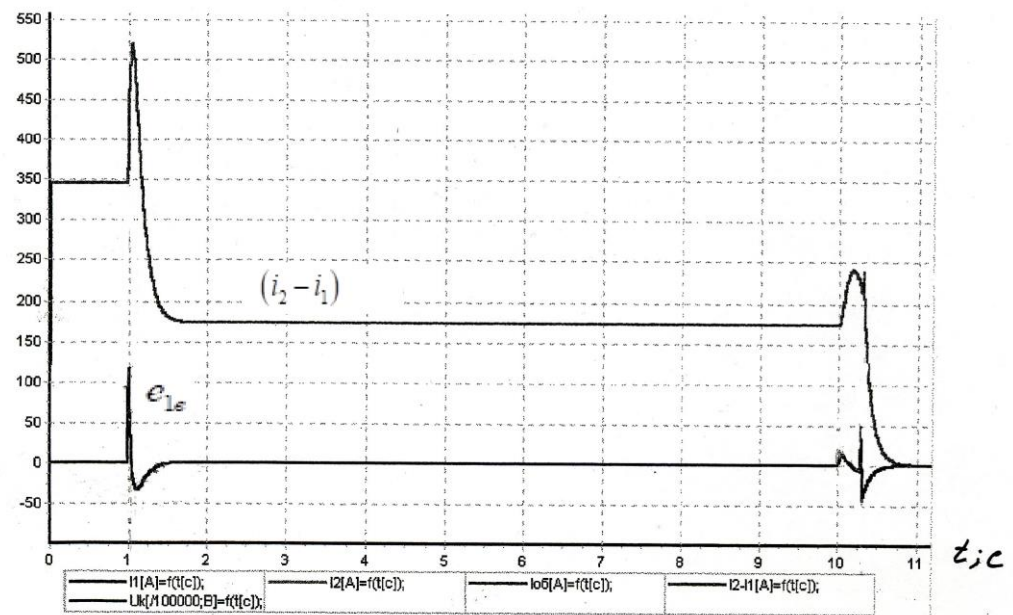


Рисунок 45. Форма разницы токов по ветвям РДШ(М) $(i_2 - i_1)$ или основного потока Φ_M в магнитопроводе РДШ(М), а также форма наводимого им напряжения e_{1e} в одном витке ДК в функции времени в течении всего времени моделирования

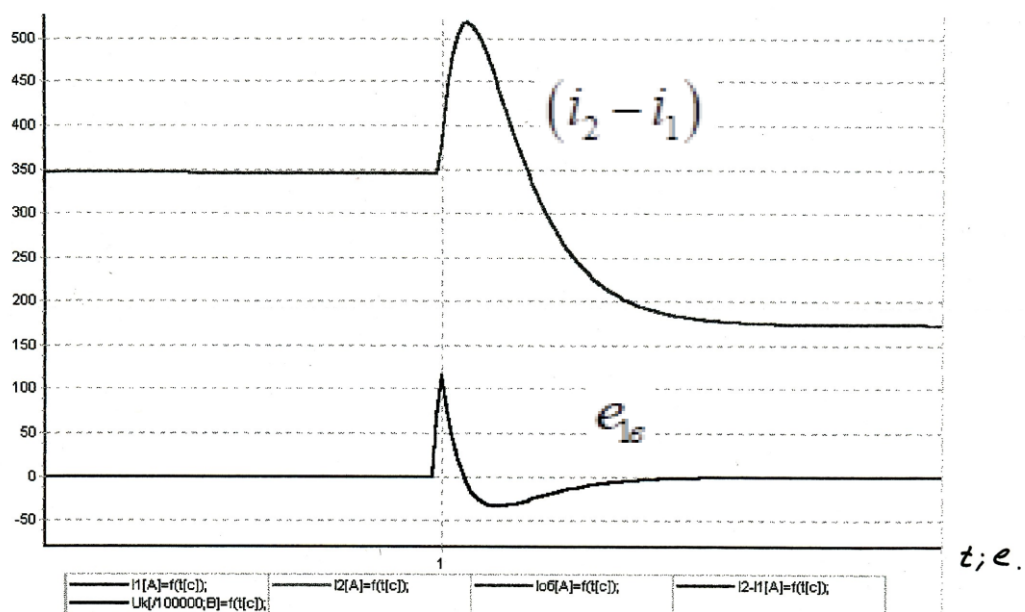


Рисунок 46. Увеличенный фрагмент формы токов при переходе с первого на второй этап моделирования

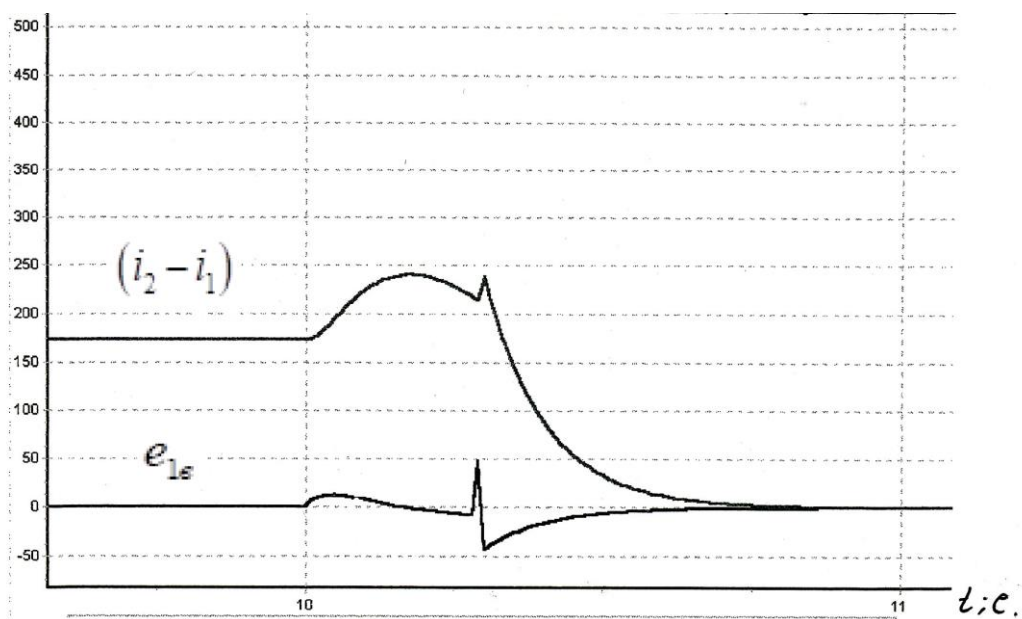


Рисунок 47. Увеличенный фрагмент формы токов при переходе со второго на третий этап моделирования

2.7. Обработка результатов моделирования переходных процессов в шинах РДШ(М)

При моделировании переходных процессов с помощью электронной лаборатории Electronics Workbench получен огромный массив данных, требующий обработки. Для этой цели в ПЭВМ была разработана специальная программа считывания и обработки данных. Программа создана на объектно-ориентированном языке Delphi фирмы Borland. Программа состоит из двух частей. Тексты приведены в приложении.

Первая часть программы, при нажатии определенных кнопок на форме 1 (рисунок 48), позволяет последовательно считать необходимую информацию из текстового файла, произвести необходимый расчет и вывести результаты. На рисунке 48 показана форма 1, в окнах которой находится информация по токам в шинах РДШ(М).

Расчет токов ветвей РДШ и потока в магнитопроводе.

Открыть

Файл прочитан

R1 изм. (Ом)
0,0000095

R2 изм. (Ом)
0,0000067

G маг.пром.(Гн)
0,000000192

Wk (кол. витков)
1

Расчет

Расчет выполнен

Вывод

Запись

Графика

Выйд

T : c	I : A
0,00000	827,76800
0,01000	826,91600
0,02000	826,94700
0,03000	826,96800
0,04000	826,97900
0,05000	827,00000
0,06000	827,01100
0,07000	827,03200
0,08000	827,04200
0,09000	827,05300
0,10000	827,06300
0,11000	827,07400
0,12000	827,08400
0,13000	827,08400
0,14000	827,09500
0,15000	827,10500
0,16000	827,10500
0,17000	827,11600
0,18000	827,11600
0,19000	827,11600
0,20000	827,12600
0,21000	827,12600
0,22000	827,12600
0,23000	827,13700
0,24000	827,13700
0,25000	827,13700
0,26000	827,13700
0,27000	827,14700
0,28000	827,14700
0,29000	827,14700
0,30000	827,14700

T : c	I : A
0,00000	1173,70000
0,01000	1173,33000
0,02000	1173,28000
0,03000	1173,24000
0,04000	1173,19000
0,05000	1173,16000
0,06000	1173,13000
0,07000	1173,10000
0,08000	1173,07000
0,09000	1173,06000
0,10000	1173,04000
0,11000	1173,01000
0,12000	1173,00000
0,13000	1172,99000
0,14000	1172,97000
0,15000	1172,96000
0,16000	1172,96000
0,17000	1172,94000
0,18000	1172,93000
0,19000	1172,93000
0,20000	1172,91000
0,21000	1172,91000
0,22000	1172,90000
0,23000	1172,90000
0,24000	1172,90000
0,25000	1172,88000
0,26000	1172,88000
0,27000	1172,88000
0,28000	1172,87000
0,29000	1172,87000
0,30000	1172,87000

T : c	I : A (U:B)
0,00000	2001,47000
0,01000	2000,24000
0,02000	2000,23000
0,03000	2000,21000
0,04000	2000,17000
0,05000	2000,16000
0,06000	2000,14000
0,07000	2000,14000
0,08000	2000,12000
0,09000	2000,11000
0,10000	2000,11000
0,11000	2000,09000
0,12000	2000,08000
0,13000	2000,07000
0,14000	2000,06000
0,15000	2000,06000
0,16000	2000,06000
0,17000	2000,06000
0,18000	2000,04000
0,19000	2000,04000
0,20000	2000,04000
0,21000	2000,04000
0,22000	2000,02000
0,23000	2000,03000
0,24000	2000,03000
0,25000	2000,02000
0,26000	2000,02000
0,27000	2000,03000
0,28000	2000,01000
0,29000	2000,01000
0,30000	2000,01000

Окно 1

☒ I1
☐ I2
☐ I1+I2

Окно 2

☐ I1
☒ I2
☐ I1+I2

Окно 3

☐ I1
☐ I2
☒ I1+I2
☐ I1-I2
☐ UK

Рисунок 48. Форма 1

Вторая часть программы запускается при нажатии кнопки «Графика» на форме 1. При этом открывается интерфейс программы, позволяющей отобразить результаты расчетов в более наглядном – графическом виде. На рисунке 49 показана форма 2, в графическом окне которой отображены все искомые зависимости.

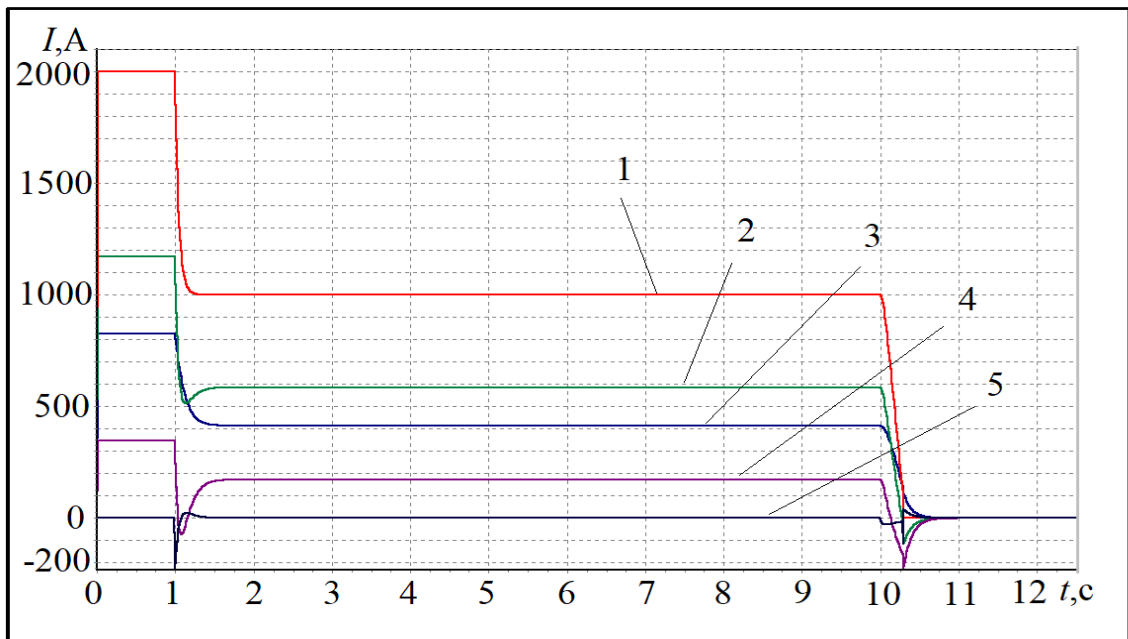


Рисунок 49. Форма 2. Зависимости токов по ветвям РДШ(М): 1 – $(i_2 + i_1)$, 2 – (i_2) , 3 – (i_1) , 4 – $(i_2 - i_1)$ и 5 - напряжения ДК $U_{кат}$ в функции времени в течение всего времени моделирования на левой ПЛТС, с которой съезжает Э

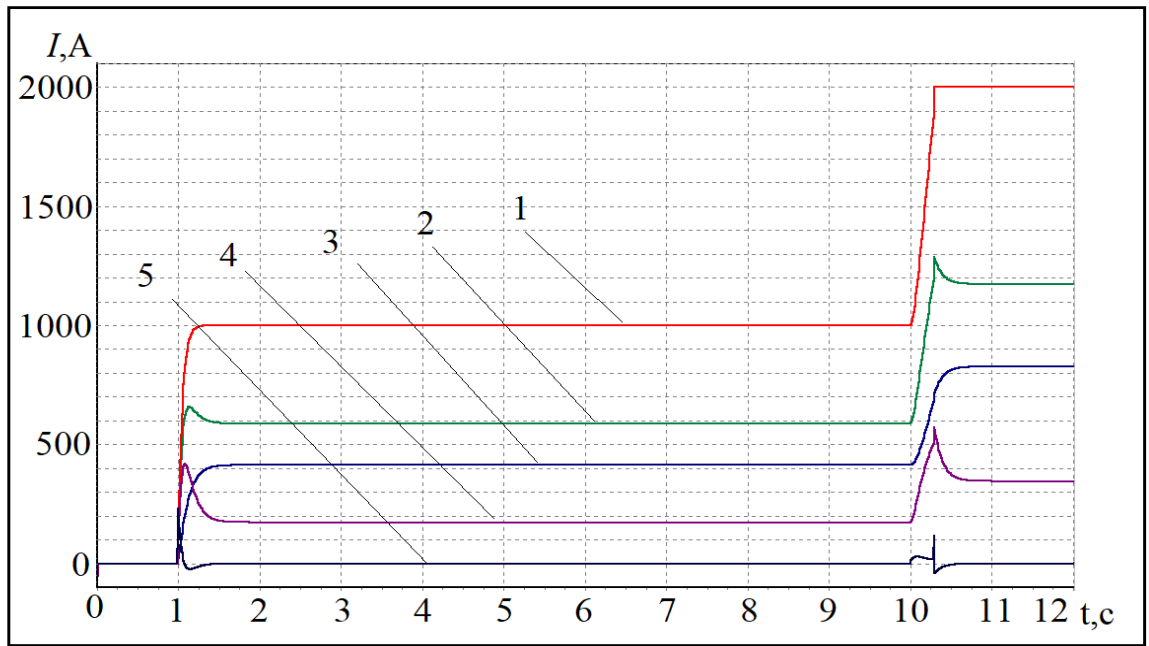


Рисунок 50. Форма 2. Зависимости токов по ветвям РДШ(М): 1 – $(i_2 + i_1)$, 2 – (i_2) , 3 – (i_1) , 4 – $(i_2 - i_1)$ и 5 - напряжения ДК U_{kam} в функции времени в течение всего времени моделирования на правой ПЛТС, на которую въезжает Э

3. Разработка схем блокировки (варианты) на базе РДШ(М)

3.1. Принцип работы схемы блокировки смежных ПЛТС постоянного тока на базе РДШ(М)

Следует отметить, что при проезде электровоза под током по ИВП, отрыв токоприемника от его ветви нормально сопровождается искрением и появлением коротких дуг. Однако существует большая вероятность возгорания мощной электрической дуги.

При реакции РДШ на мгновенное нарастание тока возможно отключение БВ ветви ИВП, на которую въезжает Э. Как следствие – въезд Э под током на отключенную зону питания. При этом между токоприемником и ветвью ИВП, с которой он съезжает, возникает мощная электрическая дуга. Для избежания этого необходимо каким-либо образом исключить ложное срабатывание БВ от приращения тока при описанной ситуации.

Основной идеей модернизации РДШ является установка дополнительных катушек 11 на магнитопроводах 9 указанных РДШ (рисунок 25).

Решить проблему ложного срабатывания БВ по приращению тока возможно используя на смежных ПЛТС модернизированные РДШ – РДШ(М) – и «связав» их посредством схемы блокировки, обеспечив этим согласованную работу БВ смежных ПЛТС.

Варианты схем блокировки будут подробно описаны далее.

Схемы блокировки смежных ПЛТС относятся к защитным устройствам тяговых подстанций постоянного тока и может быть использована в системах электроснабжения железнодорожного и промышленного транспорта.

РДШ с намотанной на его сердечнике ДК это первичный датчик защиты - РДШ(М). Защитное устройство представляется как соединение выводов дополнительных катушек РДШ(М) между собой собственно

К ДК11 РДШ(М) левой ПЛТС, питающей ветвь сети с которой съезжает Э под током, через диод 12 подключено первое реле напряжения 13. К одному выводу нормально открытого контакта этого реле подведен плюс напряжения оперативного постоянного тока, другой вывод подсоединен к началу катушки второго реле напряжения 14 правой ПЛТС, к концу которой подведен минус напряжения оперативного тока, а через нормально открытые контакты этого реле через диод 16 подключена ДК 11 РДШ(М) правой ПЛТС, на которую въезжает Э. Причем диоды 12 и 15 в цепях ДК левой и правой ПЛТС включены таким образом, что через диод 12 левой ПЛТС начинает протекать ток под действием ЭДС, наводимой в цепи ДК 11 при отрицательном приращении тока $-\Delta I\phi_1$ левой ПЛТС. А через диод 15 правой ПЛТС — при положительном приращении тока $+\Delta I\phi_2$ правой ПЛТС и замкнутых контактах реле напряжения 14 правой ПЛТС.

3.1.2. Принцип работы схемы блокировки – вариант 1

Схема блокировки (вариант 1) работает следующим образом: при касании токоприемником Э обеих ветвей ИВП (точка II, рисунок 47) возникают одинаковые по величине приращения тока — отрицательный $-\Delta I\phi_1$ на левой ПЛТС и положительный $+\Delta I\phi_2$ — на правой ПЛТС. Отрицательным приращением тока на левой ПЛТС наводится напряжение на ДК 11 левой ПЛТС, которое заставляет сработать реле напряжения 13, так как направление тока в цепи его катушки при этом совпадает с проводящим направлением диода 15. Вследствие этого реле 13 замыкает свои нормально разомкнутые контакты, через которые подается напряжение оперативного постоянного тока на катушку реле напряжения 14 правой ПЛТС. Последнее срабатывает и своими контактами замыкает ДК 11 РДШ(М) правой ПЛТС через диод 16.

В это же время положительное приращение тока на правой ПЛТС наведет в ДК 11 РДШ(М) напряжение, направление которого совпадает с проводящим направлением диода 16. В результате по этой ДК 11 начинает протекать ток. Поток Φ_p в магнитопроводе РДШ(М) правой ПЛТС, создаваемый этим током, по закону Ленца, противоположен потоку Φ_m , создаваемому положительным приращением тока $+\Delta I\phi_2$ в магнитопроводе 9 РДШ(М) правой ПЛТС. Поэтому суммарный поток магнитопровода $(\Phi_m - \Phi_p)$ будет близок к нулю и РДШ(М) правой ПЛТС на положительное приращение тока не прореагирует, т.е. его ложные срабатывания будут исключены и исключен заезд Э под током на отключенную зону. Величина приращения тока $-\Delta I\phi_1$, вызывающая указанную работу устройства, регулируется величиной уставки по напряжению реле напряжения 13 левой ПЛТС.

3.1.3. Схема блокировки – вариант 2

В схеме блокировки – вариант 2 на магнитопроводах РДШ(М) левой и правой ПЛТС (рисунок 52) установлены по ДК 11. К ДК 11 РДШ(М) левой ПЛТС 3 через диод 20, подключен регулируемый резистора 19. К ДК 11 РДШ(М) правой ПЛТС 4 подключен тиристор 21, управляющий электрод которого подключен к подвижному контакту регулируемого резистора 19, а катод тиристора подключен к концу регулируемого резистора со стороны, соединенной с анодом диода 20. Причем диод и тиристор подключены к смежным ДК 11 таким образом, что ток в цепи диода и тиристора протекает только под действием ЭДС, наводимой в ДК 11 левой ПЛТС отрицательным приращением тока $-\Delta I\phi_1$ на левой ПЛТС, а в цепи тиристора (если он открыт) — только при ЭДС, наводимой в ДК правой ПЛТС положительным приращением тока $+\Delta I\phi_2$ на правой ПЛТС.

Реализуемые при этих условиях напряжения на зажимах обеих ДК показаны на рис. знаками +, - .

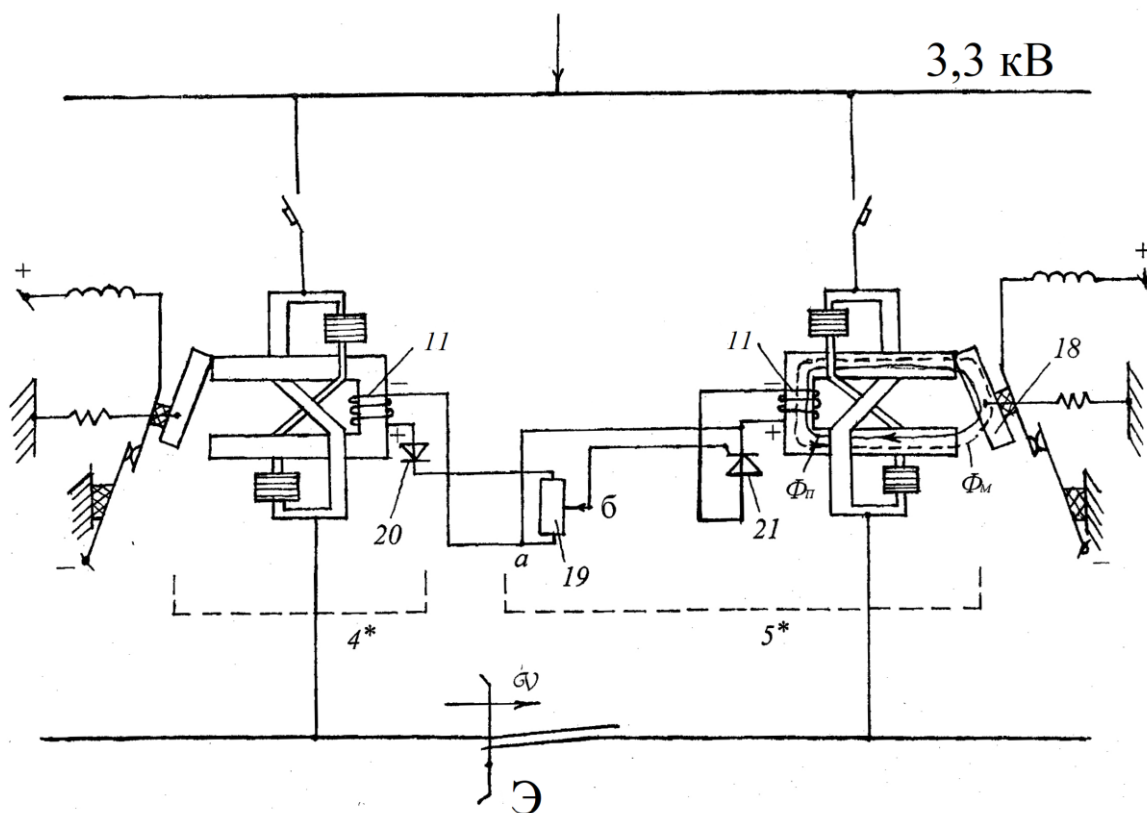


Рисунок 52. Схема блокировки – вариант 2.

3.1.4. Принцип работы схемы блокировки – вариант 2.

Схема блокировки – вариант 2 (рисунок 52) работает следующим образом: при замыкании токоприемником Э ветвей ИВП, возникают одинаковые по величине приращения тока — отрицательное $-\Delta I\phi 1$ на левой ПЛТС и положительное $+\Delta I\phi 2$ — на правой ПЛТС (рис.). Отрицательным приращением тока $-\Delta I\phi 1$ на левой ПЛТС наводится напряжение на ДК 11 левой ПЛТС и по цепи этой ДК через диод 20 и резистор 19 течет ток, образующий на резисторе 19 напряжение U_{a-b} , открывающее тиристор 21.

В это же время положительное приращение тока $+\Delta I\phi 2$ на правой ПЛТС наведет в ДК 11 РДШ(М) напряжение, под действием которого по цепи ДК 11 РДШ(М) правой ПЛТС через тиристор 21 потечет ток, совпадающий с проводящим направлением тиристора. Поток Φ_n , создаваемый этим током, по закону Ленца, противоположен потоку Φ_m , создаваемому положительным приращением тока $+\Delta I\phi 2$ в магнитопроводе 9 РДШ(М) правой ПЛТС. Поэтому суммарный поток магнитопровода $(\Phi_m - \Phi_n)$ будет близок к нулю и РДШ(М) правой ПЛТС на положительное приращение тока не прореагирует. Таким образом, его ложные срабатывания будут исключены. Величина приращения тока $+\Delta I\phi 1$, вызывающая указанную работу устройства, регулируется подвижным контактом резистора 21.

3.1.5. Схема блокировки – вариант 3

Схема блокировки – вариант 3 (рисунок 53) смежных ПЛТС тяговой сети постоянного тока, разделенных ИВП, состоит из неполяризованных БВ и первичных датчиков защиты – РДШ(М). В данной схеме первый вывод ДК 11 левой ПЛТС подключен к реле напряжения 10 с нормально замкнутыми контактами, а второй вывод ДК 11 подсоединен к первому выводу ДК 11 правой ПЛТС, питающей ветвь ТС, на которую въезжает Э. Второй вывод ДК 11 правой ПЛТС подключен к оставшемуся выводу реле напряжения 10. В свою очередь контакты этого реле напряжения подключены параллельно к контактам РДШ(М) 4 правой ПЛТС.

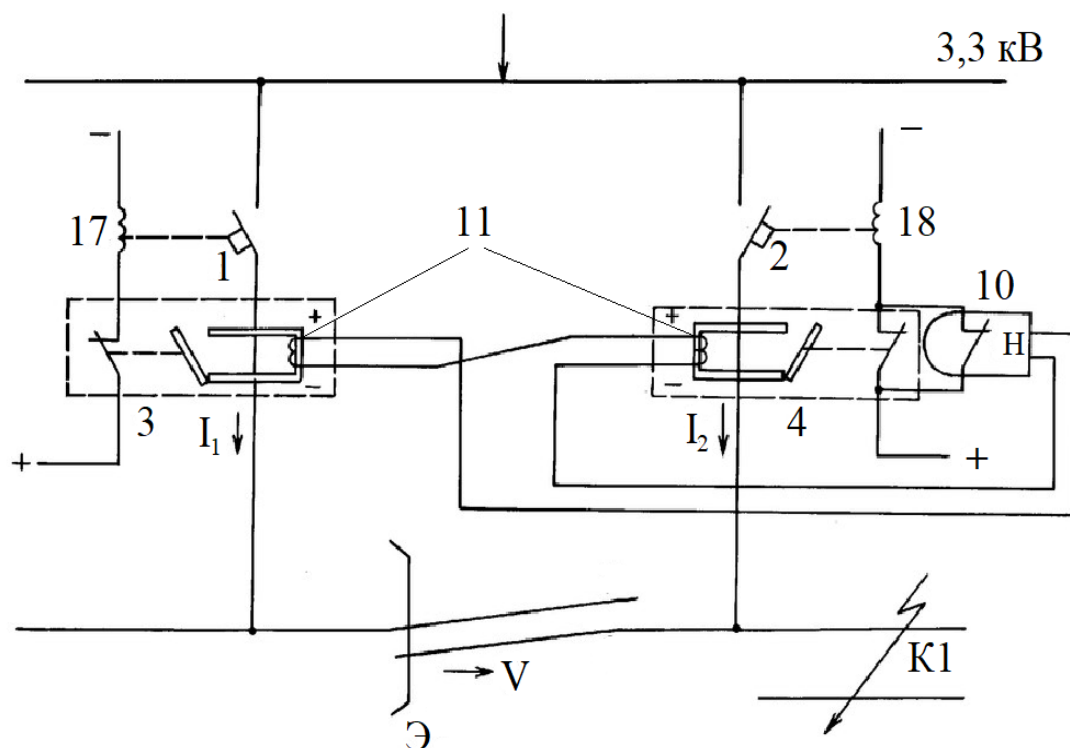


Рисунок 53. Схема блокировки – вариант 3.

3.1.6. Принцип работы схемы блокировки – вариант 3.

Схема блокировки – вариант 3 (рисунок 53) работает следующим образом. При замыкании токоприемником Э ветвей ИВП ток левой ПЛТС I_1 , мгновенно изменяется (уменьшается) на величину $-\Delta I\phi 1$. Очевидно, на такую же величину $+\Delta I\phi 2$ увеличивается ток I_2 правой ПЛТС. При таких изменениях тока в ДК 11 РДШ(М) 3 и 4 левой и правой ПЛТС наводятся напряжения. Однако ДК РДШ(М) смежных ПЛТС соединены последовательно таким образом, что их суммарное напряжение, подводимое к реле напряжения 10, в случае, если одновременно в одной из смежных ПЛТС происходит отрицательное, а в другом положительное приращение тока одинаковой величины, равно нулю. Поскольку в этом случае напряжения на выходах ДК 11 РДШ(М) 3 и 4 компенсируют (уничтожают) друг друга. Поэтому, если реле напряжения 10 задать уставку по напряжению, большую нуля, но меньшую величины

напряжения, наводимого в ДК 11 каждого РДШ(М), то при указанной ситуации оно не срабатывает. И, несмотря на срабатывание РДШ(М) 4 правой ПЛТС от приращения тока и соответственно размыкания его контактов, отключения БВ 2 не произойдет, так как катушка управления БВ 13 будет продолжать обтекаться током через нормально замкнутые контакты реле напряжения 10.

С другой стороны, если произойдет КЗ в ветви, на которую въезжает Э (например, в точке К1, рисунок 53), то БВ 2 этой ПЛТС отключит это КЗ, потому что в этом случае сработает РДШ(М) 4 этой ПЛТС и разомкнет свои нормально замкнутые контакты. И одновременно сработает реле напряжения 10, поскольку подводимое к нему напряжение в этом случае будет значительным, большим чем величина уставки этого реле напряжения и являться напряжением, наводимым в ДК 11 РДШ(М) 4 ПЛТС ветви, на которой произошло КЗ (в данном случае ветви, на которую въезжает Э).

3.1.7. Схема блокировки – вариант 4

Схема блокировки – вариант 4 состоит (рисунок 54) из неполяризованных БВ 1 и 2 и РДШ(М) 3 и 4 с ДК 11. В схеме первые выводы ДК11 каждой ПЛТС соединены между собой, оставшиеся выводы ДК 11 подключены к реле напряжения 9 и 10 соответственно с нормально замкнутыми контактами, установленными параллельно РДШ(М) своей ПЛТС, а свободные выводы каждого реле напряжения соединены между собой.

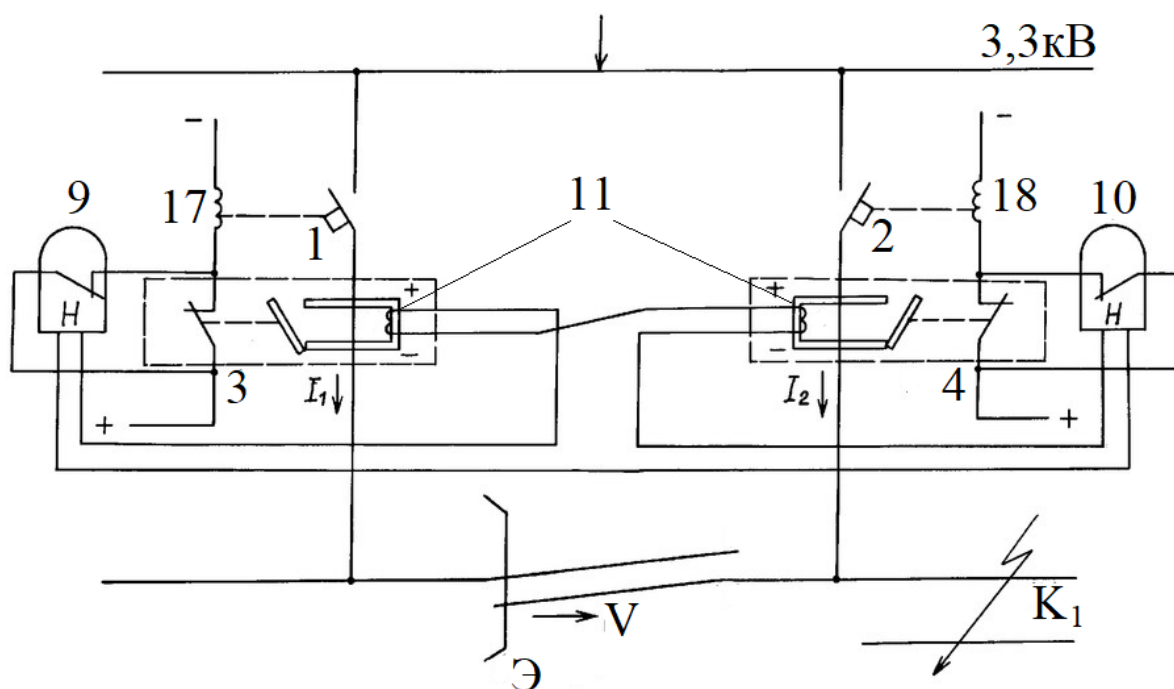


Рисунок 54. Схема блокировки – вариант 4.

3.1.8. Принцип работы схемы блокировки – вариант 4.

Схема блокировки – вариант 4 (рисунок 54) работает следующим образом. При замыкании токоприемником Э ветвей ИВП ток I_1 левой ПЛТС протекающий через БВ 1 и РДШ(М) 3, мгновенно изменяется. При приращении тока, в ДК 11 РДШ(М) 3 и 4 смежных ПЛТС наводятся напряжения. Однако ДК РДШ(М) 3 и 4 смежных ПЛТС соединены последовательно таким образом, что их суммарное напряжение, подводимое к реле напряжения 9 и 10, в случае, если одновременно в одной из смежных ПЛТС происходит отрицательное, а в другом положительное приращение тока одинаковой величины, теоретически равно нулю, поскольку в этом случае напряжения на выходах ДК РДШ(М) 3 и 4 компенсируют (уничтожают) друг друга. Поэтому, если обоим реле напряжения 9 и 10 задать уставки по напряжению, большие нуля, но меньшие величины напряжения, наводимого в ДК каждого РДШ(М) 3 и 4, то при указанной ситуации ни одно из них не сработает. И, несмотря на

срабатывание РДШ(М) 4 от приращения тока или даже в случае отрыва токоприемника от ветвей ИВП и срабатывания РДШ(М) любого из БВ от приращения тока, отключения БВ 1, 2 не произойдет, так как катушка управления выключателя 17, 18 будет продолжать обтекаться током через нормально замкнутые контакты своего реле напряжения 9,10.

С другой стороны, если произойдет КЗ в ветви правой ПЛТС (например, в точке К1, рисунок 50), то БВ 2 этой ПЛТС отключит это КЗ, потому что в этом случае сработает РДШ(М) 4 этой ПЛТС и разомкнет свои нормально замкнутые контакты. И одновременно сработают и разомкнут свои нормально замкнутые контакты оба реле напряжения 9 и 10, поскольку подводимые к ним напряжения в этом случае будут значительными, большими чем величины их уставок, и являться половиной напряжения, наводимого в ДК 11 РДШ(М) 4 правой ПЛТС. Отключения БВ смежной ПЛТС при этом не произойдет, так как в момент размыкания контактов его реле напряжения 9 катушка управления 17 БВ 1 будет продолжать получать питание через нормально замкнутые контакты своего РДШ(М) 3.

3.2. Определение количества витков ДК для создания противотока, демпфирующего основной магнитный поток в магнитопроводе РДШ(М)

Приращение тока в тяговой сети ΔI вызывает изменение токов в шинах РДШ. В свою очередь разность токов в шинах $(i_2 - i_1)$, зависящая от индуктивности пакетов железа на шине меньшего сечения, возбуждает магнитный поток Φ_m в магнитопроводе РДШ. Этот магнитный поток Φ_m возбуждает поток и электродвижущую силу в ДК, намотанной на магнитопроводе. Вследствие чего в ней начинает протекать ток i_k и на зажимах появляется напряжение e_l .

То есть величина напряжения e_l , наводимого в ДК, зависит от величины разницы токов $(i_2 - i_1)$ в шинах РДШ.

Для определения величины напряжения e_l на выходе ДК используются полученные путем моделирования зависимости разницы токов $(i_2 - i_1)$ от постоянной времени (рисунок 44).

Наводимый ток i_k и напряжение e_l на зажимах ДК зависит от количества витков w в ней и магнитной индукции $G_{\text{магн}}$ магнитопровода:

$$e_l = \frac{d\Phi_m}{dt} = w_k G_{\text{магн}} \frac{d(i_2 - i_1)}{dt} \quad (48)$$

При помощи программы моделирования переходного процесса при проходе Э под током по ветвям ИВП, получена цифровая информация о токах в шинах РДШ(М), произведен расчет и получены результаты в графическом виде.

Наводящееся на зажимах ДК напряжение в функции времени зависит от разницы токов в каждой шине РДШ(М). Получены данные о распределении токов в момент замыкания ветвей ИВП токоприемником Э и в момент отрыва токоприемника от ветви ИВП, питаемой левой ПЛТС, с которой съезжает Э и выполнен расчет напряжения в ДК в функции времени.

На магнитопроводе РДШ(М) установлена ДК (рисунок 51, 52). При приращении тока в сети ΔI в магнитопроводе возникает магнитный поток Φ_m :

$$\Phi_m = \frac{d(i_2 - i_1)}{dt} L_2 \quad (49)$$

под действием которого в ДК наводится ЭДС. Под действием этой ЭДС в ДК появляется ток i_k и напряжение $e_l = u_k$ на ее зажимах.

Ток в ДК i_k и напряжение на ее зажимах u_k зависит от количества витков w_k ДК и магнитной проводимости G магнитопровода.

Как было сказано ранее, за магнитную проводимость магнитопровода $G_{\text{магн}}$ принимается магнитная проводимость воздушного зазора $G_{\text{возд}}$, то есть:

$$G = G_{\text{возд}}$$

Для определения величины напряжения на выходе ДК используются зависимости разницы токов в ветвях от постоянной времени :

$$u_{\kappa} = e_l = \frac{w_k d(i_2 - i_1)}{dt} L_{\kappa} = w \frac{d\Phi_{\text{м}}}{dt} \quad (50)$$

$$i_{\kappa} = \frac{w_k d(i_2 - i_1)}{dt} \times \frac{L_{\kappa}}{R_{\kappa}} \quad (51)$$

$$L_{\kappa} = W_k^2 \times L_{\text{витка}} \quad (52)$$

$$L_{\text{витка}} = \frac{\mu_0 S}{l_{\text{провода}}} \quad (53)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 12.56 \times 10^{-7} \text{ Гн / м ;}$$

$$R_{\kappa} = r_{\text{пров}} l_{\text{пров}} = \frac{\rho_{\text{м}} l_{\text{пров}}}{S} \quad (54)$$

где μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость ;

R_{κ} - активное сопротивление ДК

L_{κ} - индуктивность ДК

Исходя из размеров магнитопровода РДШ(М), один виток ДК $l_{\text{провода}} = 0.15$ м. Возникший ток i_{κ} создает в сердечнике магнитопровода противопоток Φ_n , направленный противоположно основному магнитному потоку $\Phi_{\text{м}}$:

$$\Phi_n = i_k L_k. \quad (55)$$

Причем, противопоток Φ_n должен быть такой величины, чтобы демпфировать поток Φ_m в магнитопроводе, т.е. должно выполняться соотношение:

$$\Phi_n \geq \Phi_m$$

При моделировании процесса прохода поезда под током по ветвям ИВП получены кривые 1 и 2 (рисунок 50) изменения токов в ветвях РДШ (М), кривая 3 разницы токов $(i_2 - i_1)$ и кривая 4 наводимого данной разницей токов напряжения $u_k = e_L$ на зажимах ДК.

Кривая изменения потока Φ_m повторяет форму кривой разницы токов $(i_2 - i_1)$, взятой с коэффициентом $G_{возд}$.

При разнице токов $(i_2 - i_1) = 100$ А рассчитаны величина основного магнитного потока в магнитопроводе РДШ(М) и следующие параметры ДК, сведенные в таблицу 8.

Исходя из параметров РДШ(М):

$$G_{магн0.2} = L_{магн} = 102.17 \times 10^{-8} \text{ Гн};$$

$$\Phi_m = \frac{d(i_2 - i_1)}{dt} L_2 = 102.17 \times 10^{-6} \text{ Вб}$$

Таблица 8. Параметры ДК

w	$L_k = w_k^2 L$ Гн	$i_2 - i_1$ А	$R_k = R_{к1} w_k$ Ом	$i_k = \frac{w_k d(i_2 - i_1)}{dt} \times \frac{L_k}{R_k}$ А	$\Phi_n = i_k L_k$ Вб
Ø0.8					
1	41.86×10^{-13}	100	0.0054	775185×10^{-13}	32449251×10^{-26}
100	418600×10^{-13}	100	0.54	$7751851 \times 10^{-13} = 77.5 \times 10^{-8}$	32441500×10^{-21}
500	10.4×10^{-7}	100	2.7	190000×10^{-7}	$1976000 \times 10^{-14} = 1.9 \times 10^{-8}$
850	30.2×10^{-7}	100	4.59	561000×10^{-7}	$16942200 \times 10^{-14} = 16.9 \times 10^{-8}$

920	35.4×10^{-7}	100	4.97	653200×10^{-7}	2312328×10^{-14} $= 23.12 \times 10^{-7}$
1000	41.86×10^{-7}	100	5.4	$775\,185.2 \times 10^{-7}$	32449251×10^{-14} $= 3.2 \times 10^{-7}$
1500	94.2×10^{-7}	100	8.1	$1744\,444.4 \times 10^{-7}$	$164326667 \times 10^{-14}$ $= 16.4 \times 10^{-7}$
2000	167.4×10^{-7}	100	10.8	3100000×10^{-7}	$518940000 \times 10^{-14}$ $= \mathbf{51.89 \times 10^{-7}}$ $= 518.9 \times 10^{-8}$
3600	542×10^{-7}	100	19.44	10080000×10^{-7}	$5463360000 \times 10^{-14}$ $= \mathbf{54.63 \times 10^{-6}}$
4200	$738410400 \times 10^{-13} =$ 738×10^{-7}	100	22.68	$13\,650\,000 \times 10^{-7}$	$100737000000 \times 10^{-14}$ $= \mathbf{100.7 \times 10^{-6}}$
Магнитопровод					
w / d	$G_{\text{возд}} = L_2$ Гн	$i_2 - i_1$ А			$\Phi_m = (i_2 - i_1) L_2$ Вб
1 / 0.2	102.17×10^{-8}	100			102.17×10^{-6}

3.3. Определение количества витков ДК РДШ(М) и разработка схемы для подключения реле напряжения схемы блокировки к выводам ДК РДШ(М)

По результатам моделирования переходного процесса и построенным зависимостям тока и напряжения от времени задается величиной напряжения одного витка ДК, расположенной на магнитопроводе РДШ(М), которая равна :

$$U_{1\phi} = e_{1\phi} = 25 \cdot 10^{-5} \text{ В} \quad (56)$$

Схема подключения реле напряжения типа 5П14А к выводам ДК показана на рисунке 55 со следующими параметрами :

$$R_p = 28 \text{ Ом}$$

$$I_p = 25 \text{ мА}$$

$$U_p = 0,7 \text{ В}$$

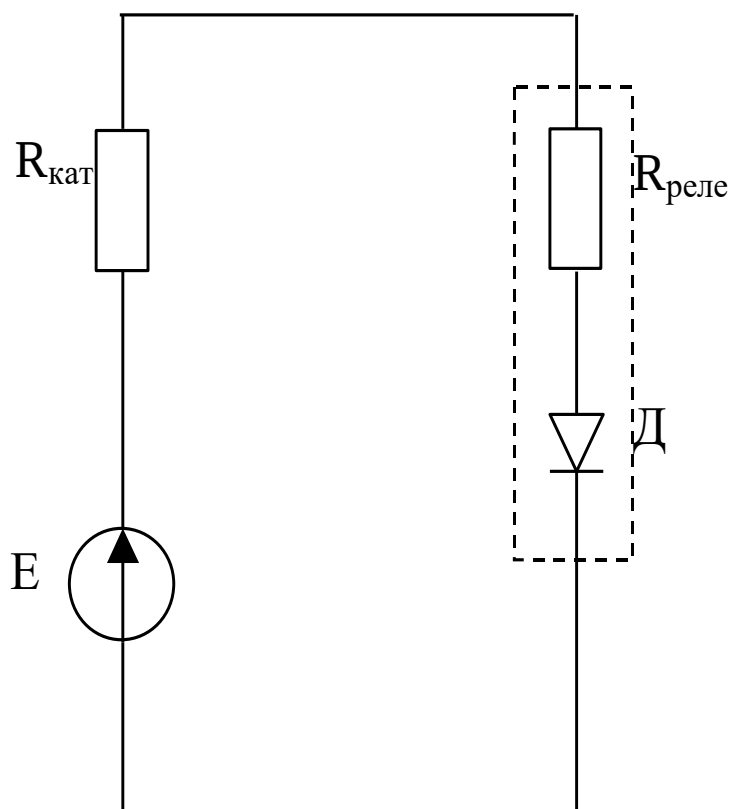


Рисунок 55. Схема подключения реле напряжения к выводам ДК

Исследуем два режима работы схемы.

1. Примем величину сопротивления дополнительной катушки равной 0 :

$$R_{кат} = 0$$

Тогда, при использовании катушки с количеством витков $w = 1$, можно записать выражение для тока в схеме :

$$I = \frac{e_{1\theta}}{R_p} = \frac{25 \cdot 10^{-5}}{28} = 1 \cdot 10^{-5} = 10 \text{ мкА} \quad (57)$$

Так как необходимо обеспечить ток реле в 25 мкА, полученная в данном режиме величина мала.

2. Примем величину сопротивления катушки значительно превышающую величину сопротивления реле напряжения :

$$R_{кат} > R_p$$

Тогда, при использовании катушки с количеством витков $w = 1$ из медного провода диаметром 0.1 мм и длиной витка 15 см (в соответствии с размерами магнитопровода), сопротивление которой равно :

$$R_{1\phi} = R_{провода} l_{провода} = 2.23 \cdot 0.15 = 0.34 \text{ Ом}$$

можно записать выражение для определения тока в цепи следующим образом:

$$I = \frac{e_{1\phi} \times w}{R_{1\phi} \times w} = 8 \text{ мА} \quad (58)$$

При таких параметрах схемы, как и в первом случае, необходима величина тока в 25 мА не обеспечивается.

Из этого можно сделать вывод, что для срабатывания реле необходимо увеличить ток на выходе ДК при помощи операционного усилителя. Тогда схема примет вид, указанный на рисунке 52.

По рассчитанным выше параметрам выбираем усилитель УД6, имеющий входное сопротивление $R_{вх\ y}$ и входной ток $I_{вх\ y}$, выходное сопротивление $R_{вых\ y}$ и выходной ток $I_{вых\ y}$ следующих величин :

$$R_{вх\ y} = 1000 \text{ Ом}$$

$$I_{вх\ y} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ А}$$

$$R_{вых\ y} = 50 \text{ Ом}$$

$$I_{вых\ y} = 25 \times 10^{-3} \text{ А}$$

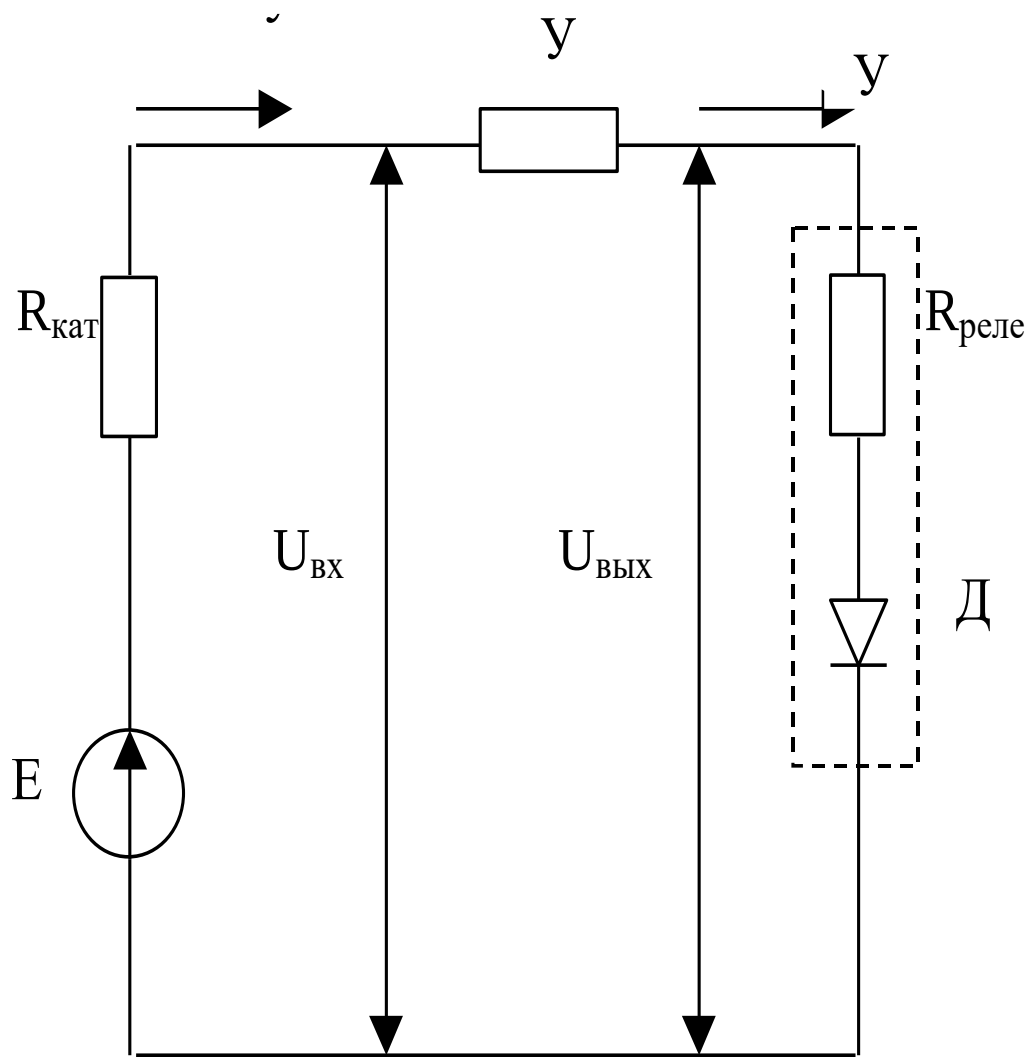


Рисунок 56. Схема подключения реле напряжения к выводам ДК с операционным усилителем

Для определения выходного напряжения, для правой части схемы, запишем уравнение (рисунок 56):

$$U_{\text{вых } y} = I_{\text{вых } y} R_{\text{вых } y} + I_{\text{вых } y} R_p = 2 B \quad (59)$$

Для определения количества витков катушки, для левой части схемы, запишем уравнение:

$$E = I_{\text{ex } y} R_{\text{кат}} + I_{\text{ex } y} R_{\text{ex } y} \quad (60)$$

$$\text{или } we_{1\theta} = R_{1\theta} w I_{\text{ex } y} + I_{\text{ex } y} R_{\text{ex } y} \quad (61)$$

$$w(e - R_{1\phi} I_{\phi y}) = I_{\phi y} R_{\phi y}$$

$$w = \frac{I_{\phi y} R_{\phi y}}{e - R_{1\phi} I_{\phi y}} = 0.2 \quad (62)$$

То есть достаточно одного витка, чтобы обеспечить работу усилителя по входящим характеристикам.

По полученным данным можно сказать, что величина напряжения на выводах ДК, равное входному напряжению усилителя, мала. А наводимое напряжение от оборудования, смонтированного вблизи данной установки, сравнимо по величине с рассчитанным напряжением одного витка $e_{1\phi}$ (рисунок 3). Это можно записать следующим образом:

$$e_{1\phi} \approx e_{\text{навед}} \quad (63)$$

Для налаженной работы схемы необходимо обеспечить условие:

$$e_{1\phi} \gg e_{\text{навед}}, \quad (64)$$

чего можно добиться увеличением числа витков катушки, т.е.

$$e_{1\phi} w \gg e_{\text{навед}}$$

В связи с чем предлагается включить в схему делитель напряжения (рисунок 57), позволяющий при увеличенном токе катушки обеспечить работу выбранного усилителя с его параметрами.

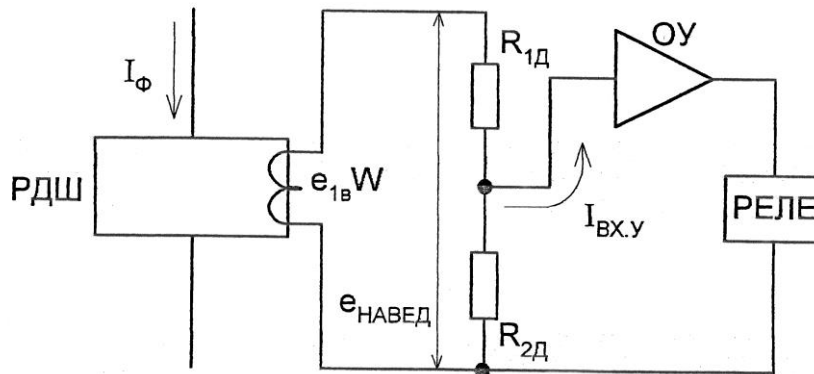


Рисунок 57. Схема подключения реле напряжения к выводам ДК с операционным усилителем и с делителем наяржения

По 1-му закону Кирхгофа составим уравнение для узла:

$$I_{кат} = I_{2\partial} + I_{ex\ y} \quad (65)$$

где: $I_{кат}$ – ток катушки;

$I_{2\partial}$ – ток, проходящий через второй резистор.

С другой стороны:

$$I_{кат} = \frac{e_{1\delta} w}{R_{1\partial} + \frac{R_{2\partial} R_{ex\ y}}{R_{2\partial} + R_{ex\ y}}} \quad (66)$$

где: $R_{1\partial}$ – сопротивление первого резистора делителя напряжения.

Объединив (10) и (11), запишем выражение для определения тока, проходящего через второй резистор делителя тока:

$$I_{2\partial} = \frac{e_{1\delta} w}{R_{1\partial} + \frac{R_{2\partial} R_{ex\ y}}{R_{2\partial} + R_{ex\ y}}} - I_{ex\ y} \quad (67)$$

По соотношению токов в ветвях $a - b$ и $a - y$ найдем:

$$\frac{I_{2\partial}}{I_{ex\ y}} = \frac{R_{ex\ y}}{R_{2\partial}} \quad (68)$$

Подставив (13) в (12) найдем:

$$\frac{R_{ex\ y}}{R_{2\partial}} = \frac{e_{1\delta} w}{(R_{1\partial} + \frac{R_{2\partial} R_{ex\ y}}{R_{2\partial} + R_{ex\ y}}) I_{ex\ y}} - 1 \quad (69)$$

Зададимся соотношением $\frac{R_{1\partial}}{R_{2\partial}} = 200$, т.е. $R_{1\partial} = 200 R_{2\partial}$

Тогда (14) примет вид:

$$\frac{R_{ex\ y}}{R_{2\partial}} = \frac{e_{1\delta} w}{I_{ex\ y} (R_{1\partial} + \frac{R_{2\partial} R_{ex\ y}}{R_{2\partial} + R_{ex\ y}})} - 1 \quad (70)$$

Из полученного выражения найдем количество витков дополнительной катушки, необходимое и достаточное для работы схемы,

зададимся соотношением: $R_{2д} \ll R_{вх\ y}$; $R_{вх\ y} = 1000\ \text{Ом}$; $R_{2д} = 10\ \text{Ом}$; $R_{1д} = 2000\ \text{Ом}$

$$w = \left(\frac{R_{ex\ v}}{R_{2д}} + 1 \right) \times \frac{I_{ex\ v}}{e_{1б}} \times \left(200R_{2д} + \frac{R_{ex\ v} R_{2д}}{R_{2д} + R_{ex\ v}} \right) \quad (71)$$

$w = 40$ витков

Таким образом, для достижения помехоустойчивости схемы блокировки с использованием реле напряжения достаточно установить ДК с количеством витков, равным 40.

И, согласно расчетам, необходимо 4 200 витков ДК для создания демпфирующего магнитного потока Φ_n в магнитопроводе РДШ(М).

Однако, габариты магнитопровода не позволяют установку ДК с $w=4\ 200$. Кроме того, при демпфировании потока, происходит вмешательство в работу самого РДШ(М), что усложняет работу оборудования подстанции в реальных условиях и негативно сказывается на работе БВ. Установка же ДК с $w=40$ возможна. И положительным фактором является то, что, схема блокировки с использованием реле напряжения не вносит изменений в работу самого РДШ(М) и более доступна в исполнении.

3.4. Проведение испытаний схемы блокировки на базе РДШ(М)

Схема блокировки с использованием реле напряжения, подсоединяемая к выводам ДК РДШ(М), доступна в исполнении, как видно на рисунке 58. Это было доказано экспериментально при проведении натурных испытаний на действующей тяговой подстанции Московско-Курской дистанции электроснабжения (рисунок 59, 60). Это подтверждено документально. Протокол испытаний представлен в диссертации (приложение 3).

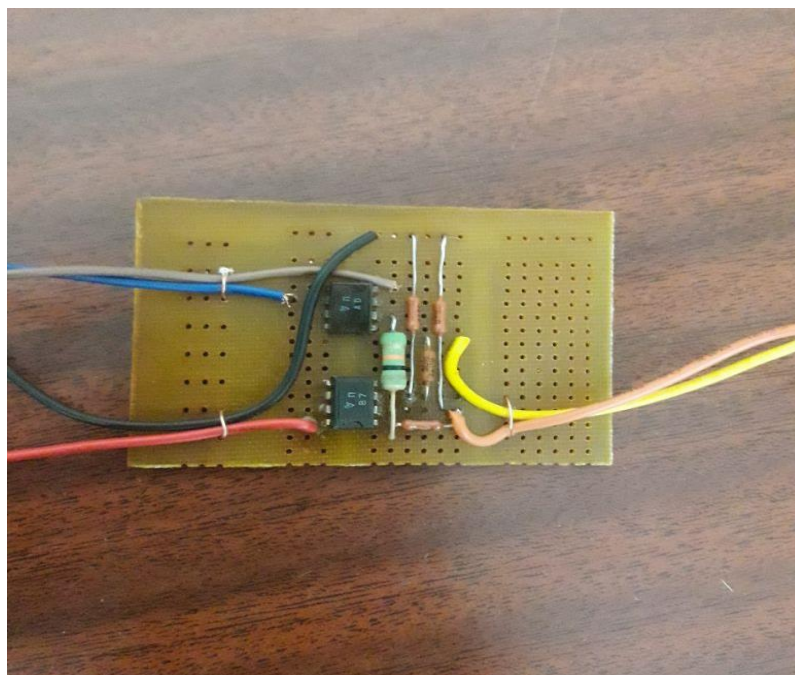


Рисунок 58. Экспериментальный образец схемы блокировки – вариант 3

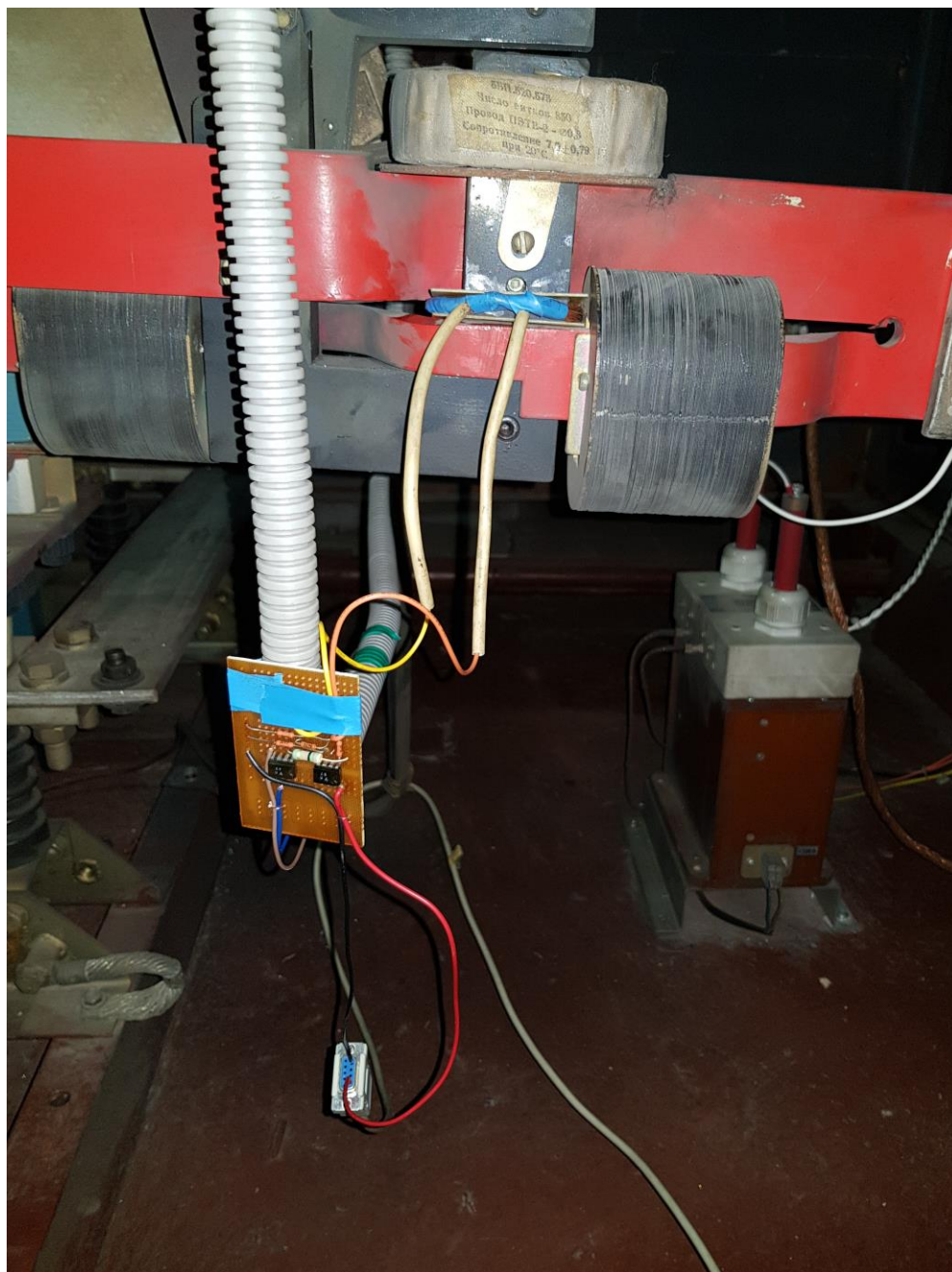


Рисунок 59. Размещение ДК на магнитопроводе РДШ(М) с подсоединенной схемой блокировки



Рисунок 60. ВАБ-49 действующей тяговой подстанции, оборуданный схемой блокировки с РДШ(М)

4. Оценка эффективности инвестиционного проекта по оснащению ПЛТС постоянного тока схемой блокировки на базе РДШ(М)

4.1. Определение стоимостных показателей

В усиленном режиме работы при пропуске поездов повышенной массы с увеличенными скоростями возникают чрезвычайные ситуации, связанные с повреждением контактного провода. Аварийная ситуация несомненно ведет к финансовой потере, складывающейся из стоимости проводов и конструкций самой контактной подвески, затрат, зависящих от продолжительности монтажных и ремонтных работ на контактной сети и восстановления электроснабжения участка сети, потерь средств при сбое в графике движения поездов из-за остановки поезда на перегоне, штрафных мероприятий за срыв срока доставки грузов.

В настоящее время повышается актуальность экономии цветных металлов, а также проблемы затрат рабочего времени на ремонтно-монтажные работы, на восстановление графика движения поездов.

При оценке эффективности инвестиционного проекта по оснащению БВ смежных ПЛТС, разделенных ИВП, блокировкой несанкционированного срабатывания РДШ(М) необходимо рассчитать систему натуральных и стоимостных показателей, которые дают обоснование целесообразности внедрения данной конструкции.

К стоимостным показателям инвестиционного проекта относятся:

- капитальные вложения на создание РДШ(М);
- ежегодные затраты на обслуживание РДШ(М);
- ежегодные затраты на восстановление проводов контактной сети от пережога или отжига;
- ежегодные потери средств от сбоя в графике движения поездов при пережоге проводов;
- амортизационные отчисления.

Для определения ежегодных затрат на восстановление проводов контактной сети после пережогов от несанкционированного срабатывания БВ необходимо достоверно знать количество таких аварий в год. На сегодняшний день можно знать только общее количество аварий в год.

Сложно вести статистику, выделяя из общего количества сбоев и аварий градацию по причине повреждения проводов. А для определения затрат на восстановление проводов контактной сети после пережогов при несанкционированном отключении БВ, то есть ложного срабатывания, необходимо достоверно знать количество именно такого рода аварий в год. Поэтому в дальнейшем расчете эти данные не учитываются.

Существует большое количество факторов, влияющих на интенсивность движения и объем перевозок на каждом участке на всем протяжении железных дорог. И так как по каждому участку ситуация различна, трудно определить потери средств от сбоя в графике движения поездов и затраты на восстановительные работы. А использовать в расчете некий усредненный показатель потерь от сбоев в графике движения поездов невозможно, так как данного рода информация является коммерческой тайной ОАО РЖД.

Учитывая эти обоснования, остановимся только на расчете следующих стоимостных показателей.

4.1.1. Определение капитальных вложений на создание схемы блокировки

Капитальные вложения, необходимые для создания и монтажа устройства будут составлять:

$$Q = C_{РДЦ(М)} + C_{монт} \quad (72)$$

где $C_{РДЦ(М)}$ – стоимость устройства;

$C_{монт}$ - стоимость монтажа устройства.

По просьбе кафедры «Электроэнергетика транспорта» МИИТ специалистами Московского электромеханического завода (МЭЗ) был выполнен расчет стоимости устройства и стоимость монтажа и наладки, в соответствии с которым:

$$C_{РДШ(М)} = 33\,127 \text{ рублей};$$

$$C_{монт} = 10\,712 \text{ рублей}.$$

Таким образом по формуле (1) :

$$Q = 43\,839 \text{ рублей}.$$

4.1.2. Определение затрат на обслуживание схемы блокировки

Затраты на обслуживание схемы блокировки с РДШ(М) складываются из стоимости работы специалистов. По действующим нормативам обслуживание БВ производится 1 раз в год. Соответственно и обслуживание РДШ(М), как составного элемента БВ, должно проводиться с той же периодичностью. Мероприятия по обслуживанию выполняются двумя специалистами по ремонту электрооборудования и контактной сети:

1. электромонтер 5 разряда – 1 человек;
2. электромеханик – 1 человек.

$$\mathcal{E}_{обсл.} = \mathcal{E}_{ЗП \text{ эл-монт.}} + \mathcal{E}_{ЗП \text{ эл-мех.}} \cdot (73)$$

Время работы примем равным двум часам. Соответственно затраты на обслуживание устройства будут состоять из оплаты труда электромонтера $\mathcal{E}_{ЗП \text{ эл-монт}}$ и электромеханика по ремонту электрооборудования $\mathcal{E}_{ЗП \text{ эл-мех}}$ в течении двух часов. По данным службы электрификации и электроснабжения Московской железной дороги затраты на оплату труда составят (Таблица 9).

Таблица 9. Расчет фонда заработной платы

Расчет фонда заработной платы		
Электромеханик – 1 человек		
Месячный оклад	руб	26655
Часовая тарифная ставка	руб/час	151,45
Выплаты, связанные с режимом работ, условиями труда	%	20
	руб/час	30,29
Текущее премирование	%	40
	руб/час	60,58
Коммиссионные выплаты (региональная допл.)	%	30
	руб/час	45,44
Всего фонд заработной платы электромеханику	руб/час	287,76
Фонд заработной платы (1 электромеханик по ремонту электрооборудования)	руб	575,52
Электромонтер контактной сети 5 разряда – 1 человек		
Часовая тарифная ставка	руб/час	96,07
Выплаты, связанные с режимом работы, условиями труда	%	20
	руб/час	19,21
Текущее премирование	%	100
	руб/час	96,07
Коммиссионные выплаты (региональная доплата)	%	45
	руб/час	43,23
Всего фонд заработной платы электромонтеру контактной сети 5 разряда	руб/час	254,58
Фонд заработной платы (1 электромонтер 5 разряда)	руб	509,16

Таким образом, общая сумма оплаты труда за обслуживание в год составит:

$$\mathcal{E}_{\text{обсл.}} = 1\,084.68 \text{ руб./год}$$

4.1.3. Определение амортизационных отчислений

Амортизационные отчисления определяются по следующей формуле:

$$A_m = \lambda \times Q \quad (74)$$

где λ – норма амортизационных отчислений;

Q – единовременные затраты на создание РДШ(М).

Норма амортизационных отчислений – величина, обратная величине срока службы оборудования - РДШ(М) - и определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{T_{сл}}$$

где $T_{сл}$ – срок службы РДШ(М).

Норма амортизационных отчислений при сроке службы 25 лет составляет 0.04%. И в соответствии с формулой (74) величина амортизационных отчислений составит:

$$Ам = 1\,753.56 \text{ руб/год}$$

4.2. Определение экономического эффекта от использования схемы блокировки

В связи с недоступностью статистических данных по количеству пережогов контактных проводов по определенным причинам, вызвавшим их, применяется методика оценки экономической пользы, основанная на необходимости наличия устройства. Поскольку использование схемы блокировки с РДШ(М) в первую очередь должно приводить к экономии затрат, которые были бы направлены на восстановление проводов контактной сети после пережога, в случае отсутствия данного устройства. Для определения экономического эффекта от оснащения БВ смежных ПЛТС, разделенных ИВП, блокировкой с РДШ(М) и целесообразности ее внедрения, необходимо рассчитать:

1. срок окупаемости;
2. коэффициент экономической эффективности капитальных вложений;
3. приведенные эксплуатационные затраты.

Экономический эффект от внедрения устройства характеризует абсолютный экономический результат, полученный при использовании блокировки с РДШ(М). Учитывая, что рассматриваются два режима работы системы энергоснабжения - до внедрения блокировки на смежных

ПЛТС и после ее установки, назовем их «Состояние I» и «Состояние II» соответственно.

Режим работы системы энергоснабжения участка сети по «Состоянию I» характеризуется вероятностью ложного отключения зоны питания при въезде на нее Э под током. Результатом этого является пережог контактного провода и элементов ИВП электрической дугой.

Приведенные эксплуатационные затраты определяются по формуле:

$$\mathcal{E}_{np i} = \mathcal{E}_i + E_n \cdot Q_i \quad (75)$$

где $\mathcal{E}_i$ - эксплуатационные затраты по i-тому варианту;

E_n - нормативный коэффициент;

Q_i - капитальные затраты по i-тому варианту.

Для элементов новой техники $E_n = 0.15$.

По «Состоянию I» капитальные затраты $Q_1 = 0$.

Тогда приведенные эксплуатационные затраты до использования блокировки с РДШ(М) равны:

$$\mathcal{E}_{np 1} = \mathcal{E}_1 + E_n \cdot 0 = \mathcal{E}_1$$

Целесообразно определить приведенные эксплуатационные затраты на восстановление проводов при одном ($n_{пер} = 1$), двух ($n_{пер} = 2$), трех ($n_{пер} = 3$) случаях пережогов за год на одном участке пути.



Рисунок 61. Выполнение работ по монтажу проводов ИВП

Эксплуатационные расходы на восстановление проводов и элементов ИВП после их пережога (рисунок 61) рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_1 = n_{\text{пер}} \cdot \mathcal{E}_{\text{пер}} \quad (76)$$

где $\mathcal{E}_{\text{пер}}$ – эксплуатационные расходы на восстановление проводов ИВП после одного пережога;

$n_{\text{пер}}$ – количество пережогов в год.

По данным службы электрификации и электроснабжения Московской железной дороги стоимость работ по восстановлению контактной сети после одного пережога проводов ИВП составляет 42 850 рублей.

Режим работы системы энергоснабжения участка сети по «Состоянию II» отличается безаварийной работой - без ложного

отключения зоны питания, на которую въезжает Э под током. Путем внедрения блокировки с РДШ(М) на смежных ПЛТС достигается результат скольжения токоприемника Э по ветвям ИВП без искрения и горения дуги.

Поэтому после установки устройства – приведенные затраты будут равны:

$$\mathcal{E}_{np\ II} = \mathcal{E}_2 + E_n \cdot Q$$

Эксплуатационные расходы при этом равны:

$$\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_{обсл} + Ам \quad (77)$$

$$\mathcal{E}_2 = 2\,838.24 \text{ руб/год}$$

Приведенные эксплуатационные затраты «Состояния II» соответственно составят:

$$\mathcal{E}_{np\ II} = 9\,414.09 \text{ руб/год}$$

Экономический эффект от внедрения блокировки с РДШ(М) определяется как разность приведенных затрат по двум «Состояниям»:

$$\Delta \mathcal{E}_{np} = \mathcal{E}_{npI} - \mathcal{E}_{npII} \quad (78)$$

где $\mathcal{E}_{np\ I}$ - приведенные эксплуатационные затраты по «Состоянию I» – при пережоге проводов ИВП;

$\mathcal{E}_{np\ II}$ - приведенные эксплуатационные затраты по «Состоянию II» – при внедрении блокировки с РДШ(М).

Результаты расчета экономического эффекта от внедрения блокировки с РДШ(М) при количестве пережогов: одном ($n_{пер} = 1$), двух ($n_{пер} = 2$), трех ($n_{пер} = 3$) пережогах в год сведены в Таблицу 10.

4.2.1. Определение срока окупаемости

Срок окупаемости блокировки с РДШ(М) является ведущим критерием экономической оценки от внедрения данного устройства защиты, который характеризует период времени, в течение которого окупятся вложенные инвестиции, и определяется по формуле:

$$T_{ок} = \frac{Q}{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2} \quad (79)$$

где $\mathcal{E}_1$ – эксплуатационные расходы в год на восстановление проводов изолирующего воздушного промежутка после пережога;

$\mathcal{E}_2$ – эксплуатационные расходы на устройство блокировки с РДШ(М);

Q – единовременные затраты на блокировку с РДШ(М).

При капитальных затратах на устройство $Q = 43\,839$ руб., срок окупаемости при одном ($n_{пер} = 1$), двух ($n_{пер} = 2$), трех ($n_{пер} = 3$) предотвращенных случаях пережогов в год составит:

Известно, что для элементов новой техники срок окупаемости составляет:

$$T_n = 6.7 \text{ года.}$$

Сравнивая имеющиеся данные можно сделать вывод, что даже при одном предотвращенном пережоге проводов в год, срок окупаемости блокировки с РДШ(М) $T_{ок(n1)}$ меньше нормативного T_n :

$$T_{ок(n1)} < T_n$$

Тогда минимальное количество пережогов в год $n_{перmin}$, при котором срок окупаемости будет равен нормативному, и при котором применение блокировки с РДШ(М) будет оправдана. То есть при условии:

$$T_{ок} = T_n \quad (79)$$

$$T_{ок} = \frac{Q}{n_{пер} \times \mathcal{E}_{пер} - \mathcal{E}_2}$$

отсюда:

$$n_{перmin} = \frac{\frac{Q}{T_{ок}} + \mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_{пер}} \quad (80)$$

$$n_{перmin} = 0.22 \text{ пер/год}$$

В условиях эксплуатации контактной сети при повышенных скоростях и увеличенной массе поездов, при проходе его по ИВП возможны не только возгорания электрической дуги но и отжиг проводов, приводящий в дальнейшем к обрыву в любой момент при скольжении по нему токоприемника Э. Без применения блокировки с РДШ(М) проезд практически любого подвижного состава грозит аварией, и можно считать установку этого устройства мгновенно окупаемой.

4.2.2. Определение коэффициента экономической эффективности

Коэффициент экономической эффективности капитальных вложений взаимосвязан со сроком окупаемости и рассчитывается по формуле:

$$E_o = \frac{1}{T_{ок}} \quad (81)$$

Зная срок окупаемости при минимальном ($n_{пер} = 0.22$) , одном ($n_{пер} = 1$), двух ($n_{пер} = 2$), трех ($n_{пер} = 3$) случаях пережогов в год можно определить коэффициент экономической эффективности.

Эффективность капитальных вложений достигается при условии, что коэффициент экономической эффективности E_o больше или равен

нормативному коэффициенту эффективности E_n . Как говорилось выше – для элементов новой техники $E_n = 0.15$. Результаты расчетов показали, что это условие выполняется. И коэффициент экономической эффективности капитальных вложений растет с увеличением числа пережогов контактных поводов за год (рисунок 63).

4.2.3. Определение рентабельности инвестиционного проекта

Рентабельность нововведения рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{Q} \times 100 \% \quad (82)$$

$$E_o = \frac{1}{T_{ок}} = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{Q} \quad (83)$$

$$R = \frac{1}{T_{ок}} \times 100 \%$$

Рентабельность от внедрения устройства определяется при минимальном ($n_{пер} = 0.22$), одном ($n_{пер} = 1$), двух ($n_{пер} = 2$), трех ($n_{пер} = 3$) случаях пережогов в год.

Даже при минимальном количестве пережогов в год ($n_{пер} = 0.22$), рентабельность составит 15% и будет возрастать по мере увеличения количества аварий за указанный период (рисунок 62).

Полученные выше данные сведены в таблицу 10.

Таблица 10. Стоимостные показатели внедрения блокировки РДШ(М)

$n_{пер}$ пер/год	$\mathcal{E}_{пр}$ руб/год		$\Delta \mathcal{E}_{пр}$ руб/год	$T_{ок}$ год	E_o	R_o %
	Состояние I	Состояние II				
0.22		9 414.9	0	6.7	0.15	15
1	42 856		33 441.91	1.09	0.53	53
2	85 712		76 297.91	0.53	1.89	189
3	128 568		119 153.91	0.35	2.89	289

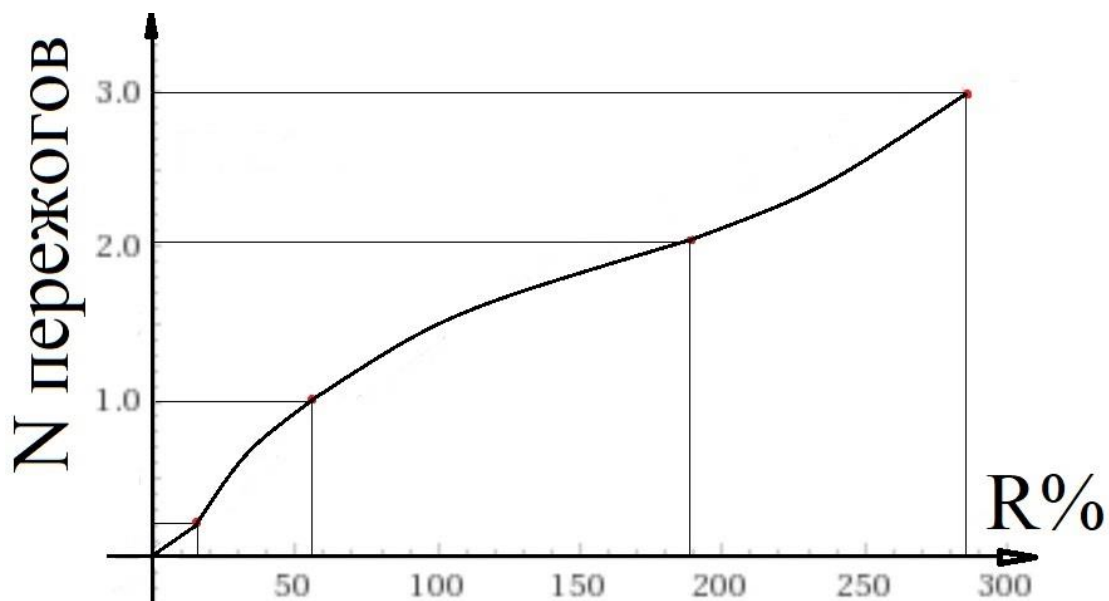


Рисунок 62. Зависимость рентабельности от количества пережогов контактного провода в год после внедрения блокировки с РДШ(М)

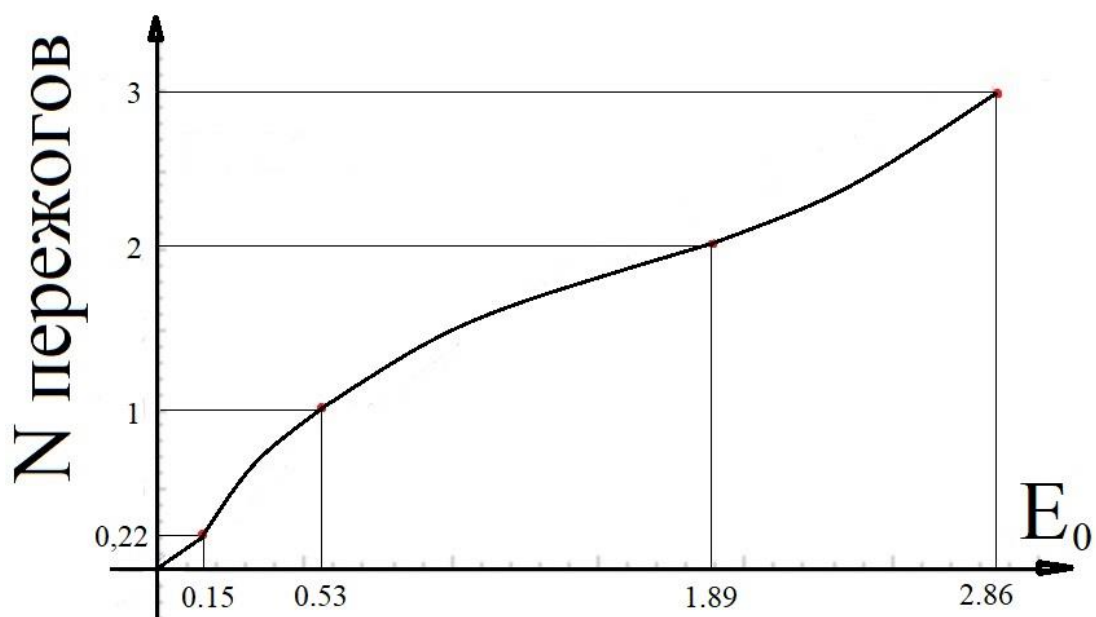


Рисунок 63. Зависимость экономической эффективности от количества пережогов контактного провода в год после внедрения блокировки с РДШ(М)

4.3. Определение натуральных показателей

Из вышеизложенных расчетов очевидна годовая экономическая польза от использования блокировки с РДШ(М) на смежных ПЛТС

постоянного тока, капитальные вложения единовременны и эффект получен сразу же после внедрения схемы.

Натуральные показатели нововведения характеризуют его технологическую сторону. Главная задача блокировки с РДШ(М) выражается в селективности ее работы – распознавании скорости нарастания тока в режиме КЗ и в рабочем режиме.

Применение блокировки с РДШ(М) позволяет производить перевод питания Э с одной зоны на другую по ветвям ИВП без реакции БВ на приращение тока и, соответственно, исключая прерывания в энергоснабжении Э. Что дает право говорить о повышении надежности энергоснабжения тяговых единиц, находящихся на перегоне.

Исключается возможность возгорания электрической дуги между токоприемником Э и ветвями ИВП. Кроме того, исключается искрение, приводящее к отжигу проводов, грозящему обрывом последних при любом механическом воздействии на них. Это позволяет достичь экономии материальных и трудовых ресурсов.

Таким образом, данное техническое нововведение в энергетическом обеспечении контактной сети позволяет достичь:

1. повышения надежности энергоснабжения;
2. повышения избирательности защиты;
3. снижения трудозатрат по ремонту контактной сети.

Выводы

1. Рассчитаны время, за которое ток Э достигает нулевого значения при заезде на отключенную зону питания, в течение которого будет гореть электрическая дуга, а также величина тока Э. Расчеты показали, что время горения дуги в несколько раз превышает указанное в литературе расчётное значение.
2. Доказана взаимосвязь работы смежных питающих линий при проходе воздушного промежутка электровоза под током и отрицательный фактор влияния на провода контактной сети при отсутствии анализа совместной работы смежных питающих линий тяговой сети. Идея работы схем блокировки базируется на распознавании одновременных нарастаний токов на смежных ПЛТС и компенсации наводимого при этом напряжения на выходах ДК РДШ(М).
3. Установлено, что количество витков 4200 для создания демпфирующего потока в магнитопроводе РДШ(М) велико и невозможна установка ДК из-за ограничений по габаритным размерам. Кроме того, нежелательно вмешательство в работу самого РДШ(М) при создании демпфирующего противотока в магнитопроводе. Однако количество витков 40 необходимо и достаточно для реализации схемы блокировки с использованием реле напряжения, основанной на одновременных приращениях тока на смежных ПЛТС, и учитывая наводимое напряжение от оборудования ТП. Что доказано экспериментально.
4. Доказана неизбежность возгорания электрической дуги и разрушение элементов тяговой сети от её воздействия при заезде Э под током на отключенную зону питания. Раскрыты противоречия и несоответствия существующих способов защиты изоляционного воздушного промежутка, основанные на механических решениях защиты проводов от воздействия электрической дуги, что проявляется, как минимум, в утяжелении конструкции контактной сети и повышении её парусности.

5. Разработаны и внедрены способы борьбы с причинами возгорания электрической дуги при помощи не влияющих на конструкцию и массу контактной подвески электрических схем, подтверждающего преимущество перед механическими приспособлениями. Проведена модернизация РДШ смежных ПЛТС путём установки на их магнитопроводах ДК, связанных между собой схемой блокировки при этом сохраняя защиту по приращению тока и, в то же время, исключая ложное срабатывание БВ. Разработаны экспериментальные образцы устройств, прошедшие натурные испытания на действующей тяговой подстанции. По итогам испытаний оформлен акт установленного образца.
6. Построена зависимость в функции времени наводящегося напряжения на зажимах ДК РДШ(М). Для чего использовано имитационное моделирование процессов в тяговой сети на базе разработанной общей электрической схемы движения Э, а также учёте и имитации перехода Э на смежную ПЛТС. Использована специальная программа считывания и обработки данных по токам в шинах РДШ(М) и представления результатов в графическом виде.

Список литературы

1. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное издание. - М.: «Финансы и статистика» 1983 г. – 472 с.
2. Астреина Л.А., Балдесов В.В., Беклешов В.К. и др.; Под редакцией Беклешова В.К. Техничко-экономическое обоснование дипломных проектов. – М.: Высшая школа, 1991 г. – 176 с.
3. Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н. Шалимов М.Г. Тяговые подстанции, М., «Транспорт», 1986, 320 с.
4. Белкин Г.С. Коммутационные процессы в электрических аппаратах. – М.:ЗНАК.2003 г. – 244 с.
5. Борзенко Е.А. Устройство для защиты контактного провода от пережога на воздушных промежутках. Описание изобретения к авторскому свидетельству 190404. 1966 г.
6. Буталов С.Л, Довгале Ю.Л., Телеченкова Ю.М., Мармышев С.В. Устройство для защиты контактного провода от пережогов на изолирующих сопряжениях. Описание полезной модели к патенту 71 937. 2008 г.
7. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей, М., «Высшая школа», 1967, 224 с.
8. Векслер М.И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания, М., «Транспорт», 1976, 120 с.
9. Воронин А.В. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт. 1983 – 496 с.
10. Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. Протокол испытаний влияния воздействия электрической дуги на электрические свойства изолирующих скользунов секционных изоляторов. Рекомендации по применению секционных изоляторов . предложения по корректировке пунктов ТТ к секционным изоляторам.

- Тема 14.02.47.93.94.95. «Аппараты дугогашения (роговые разрядники, разъединители, секционные изоляторы)». – М.: 1994 г.
11. Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. Протокол испытаний секционных изоляторов для секционирования контактной сети электрифицированных железных дорог по теме 14.02.47.93.95.95. «Аппараты дугогашения (роговые разрядники, разъединители, секционные изоляторы)». – М.: 1993 г.
 12. Джефф Дантеманн, Джим Мишел, Дон Тейлор Программирование в среде Delphi. – Киев. НИПФ «ДиаСофт Лтд.». 1995 г. – 608 с.
 13. Долин П.А. Вопросы электробезопасности в электроустановках. – М.: «Транспорт». 1985 г. – 336 с.
 14. DC Traction Network, Design and simulation, Secheron SA substations@secheron, www.Secheron.com Copyright 2007 Secheron SA
 15. Ерохин Е.А. Монтаж и капитальный ремонт контактной сети и воздушных линий. – М.: ГОУ «УМЦ». 2007 г. – 220 с.
 16. Заторская Л. П. Моделирование переходного процесса при проходе токоприемника по воздушному промежутку тяговой сети постоянного тока. – Вестник МИИТа, Выпуск 7, 2002, 38 с.
 17. Заторская Л.П. Оценка целесообразности использования блокировки от несанкционированного отключения участка контактной сети постоянного тока. – 7-й Российский международный конгресс по интеллектуальным транспортным системам. Сборник трудов №18. – М.: Международная академия транспорта 2015 г. – 105 с.
 18. Заторская Л.П. Защита проводов изолирующих воздушных промежутков тяговой сети постоянного тока от пережогов их электрической дугой. – М.: Вестник МИИТа. Выпуск 7, 2002 г. – с.32
 19. Заторская Л.П. Повышение эффективности защиты тяговой сети постоянного тока от пережогов проводов воздушного промежутка электрической дугой. – М.: Третья научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». Труды. 2002 г. – с.V-2

20. Заторская Л.П. Модернизация защиты фидеров. – М.: Мир транспорта №4, 2007 г. – с.72
21. Заторская Л.П. Расчет параметров блокирующего реле напряжения схемы защиты изолирующих промежутков от пережогов проводов. – М.: IV научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». Труды. 2003 г. – с.IV-35
22. Заторская Л.П. Оценка целесообразности использования блокировки несанкционированного отключения участка контактной сети постоянного тока. – М.: Наука и техника транспорта №3.2016 г. – 45 с.
23. Заторская Л.П. Схема блокировки как защита от возгорания дуги на изолирующем воздушном промежутке тяговой сети постоянного тока. – М.: XVII научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». Труды. 2016 г. – с.II-81
24. Заторская Л.П. Моделирование процессов в тяговой сети и параметры подключения блокировки. – М.: Мир транспорта №1, 2017 г. – с.76
25. Заторская Л.П. Проезд электровоза под током изолирующего воздушного промежутка тяговой сети постоянного тока. – М.: Наука и техника транспорта №3.2018г. – 66 с.
26. Заторская Л.П., Пупынин В.Н. Патент на изобретение №2254657. Схема защиты смежных фидеров тяговой сети постоянного тока (варианты). – 2005 г.
27. Заторская Л.П., Пупынин В.Н. Патент на изобретение №2207688. Схема защиты смежных фидеров тяговой сети постоянного тока (варианты). – 2002 г.
28. Инструкция о порядке работы и выбора уставки защиты тяговой сети постоянного тока. 2012 г. – 96 с.
29. Ibrahim Sengor, Yusuf Basegmez, Mugdesem Tanrioven. Direct

- Current Traction Power System Analysis in Electrical Railway Systems. -
IJAMAE, 19 October, 2015 - p.127 – 13
30. Калверт Ч. Delphi 2. Энциклопедия пользователя. – Киев. НИПФ
«ДиаСофт ЛТД.». 1996 г. – 736 с.
31. Катин Р.В., Порцелан А.А., Порцелан А.А. Устройство защиты
контактного провода от перегрева. Описание изобретения к
патенту 2165857. 2001 г.
32. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: «Наука».
1978 г. – 832 с.
33. Косарев Б.И., Щуров А.И., Фролов А.В., Ключников С.В. Синтез
двухэлементных нелинейных двухполюсников с потерями. –
Электричество. «Энергоатомиздат». 1992 г. – с.15 – 19
34. Крюков Л.П., Чернявский В.А. Устройство для защиты проводов
контактной сети от перегревов на воздушных промежутках.
Описание изобретения к авторскому свидетельству 629095. 1978 г.
35. Кучма К.Г., Марквардт Г.Г., Пупынин В.Н. Защита от токов
короткого замыкания в контактной сети, М.,
«Трансжелдориздат», 1960, 260 с.
36. Марквардт К. Г. Энергоснабжение электрических железных
дорог. М., «Транспорт», 1965, 464 с.
37. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных
железных дорог, М., «транспорт», 1982, 528 с.
38. Марквардт К.Г. Контактная сеть, М., «Транспорт», 1994, 336 с.
39. Минаев Е.И. Основы радиоэлектроники. - М.: «Советское радио». 1976
г. – 480 с.
40. Миронос Н.В., Тюрнин П.Г. Токоъем и тяговое электроснабжение при
высокоскоростном движении на постоянном токе. – М.: ОАО «Научно-
исследовательский институт железнодорожного транспорта». 2010 г. – 192
с.
41. Орлик С. Секреты Delphi на примерах. - М.: «Бином». 1996 – 325 с.

42. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог. МПС. ЦЭ-197. – М.: «Транспорт» 1994 г.
43. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог российской федерации, М., МПС РФ, ЦЭ-462, 1997, 80 с.
44. Прохорский А.А. Тяговые и трансформаторные подстанции. – М.: Транспорт. 1983 г. – 496 с.
45. Пупынин В.Н. Полная теория работы и характеристика параллельных индуктивных шунтов быстродействующих выключателей топов ВАБ-2, АБ-2/4, АБ-2/3 и реле дифференциальных шунтов выключателей ВАБ-28, Труды МИИТ №213 М., «Транспорт», 1965, с. 61-86.
46. Радченко В.Д. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги. - М., «Транспорт», 1975, 359 с.
47. Савченко В.А. Предупреждение перегорев проводов. М., «Транспорт», 1978, 98 с.
48. Савченко В.А., Счастный Е.Н. Совершенствование узлов и эксплуатации контактной сети, М., «Транспорт», 1980, 62 с.
49. Савченко В.А. Новые конструкции секционных изоляторов, Локомотивы, №6, 1994, с. 39-40.
50. Савченко В.А. Устройство для защиты контактных проводов электрифицированных железных дорог постоянного тока от перегорев на воздушном промежутке. Описание изобретения к авторскому свидетельству 217435. 1968 г.
51. Савченко В.А., Счастный Е.Н. Совершенствование узлов и технического обслуживания контактной сети, М., «Транспорт», 1987, 96 с.
52. Семенова Г. Англо-русский словарь по релейной защите и автоматизации энергосистем. – Вааса. Финляндия. 1994 г. – 54 с.

53. Сердинов С.М. Анализ работы и повышение надежности устройств энергоснабжения электрифицированных железных дорог. - М., «Транспорт», 1975, 366 с.
54. Сердинов С.М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог, М., «Транспорт», 1985, 302с.
55. Терехина И.П., Лapidус Б.М., Трихунков М.Ф. Экономика железно -дорожного транспорта. М.:УМП МПС России,2001г. – 596 с.
56. Типовые нормы времени на техническое обслуживание и текущий ремонт контактной сети электрифицированных железных дорог. – М.: МПС РФ Департамент электрификации и электроснабжения. 2001 г. – 179 с.
57. Фаронов В.В. Delphi 4. Учебный курс. - М.: «Нолидж». 1998 г. – 448 с.
58. Фигурнов Е.П. Релейная защита устройств энергоснабжения электрифицированных железных дорог. – М.: «Транспорт».1985 г. – 302 с.
59. Фигурнов Е.П. Релейная защита устройств электроснабжения железных дорог. – М.: «Транспорт».1981 г. – с.181-182
60. Фигурнов Е.П., Петрова Т.Е. Защита контактной подвески от токовых перегрузок. Железные дороги мира №7. 1992 г. – с.2-7.
61. Фигурнов Е.П. Релейная защита. Часть 2. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2009 г. – 604 с.
62. Фигурнов Е.П. Релейная защита. – М.: Желдориздат. 2002 – 720 с.
63. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. – М., Издательство иностранной литературы. 1961 г. – 369 с.
64. Харииков В.Ф. Защита контактной сети постоянного тока от ко-

- ротких замыканий, М., «Транспорт», 1987, 96 с.
65. Харкевич А.А. Основы радиотехники. – М.: «Связьиздат».1961 г. – 560 с.
66. Чунихин А.А. Электрические аппараты, М., «Энергоатомиздат», 1988, с.61-85.
67. Шеламов А.Ю. Износ контактного провода. Анализ способов его восстановления. – Всероссийская научно-техническая конференция студентов. Студенческая научная весна 2013.

Приложение 1. Показатели работы хозяйства электрификации и электроснабжения АО «РЖД» за 2012 год

Нарушения нормальной работы контактной сети в 2012г.

Дорога	Всего		нарушений по вине 3 и других служб		в т.ч. на перемном токе		нарушений по вине службы 3		Опоры		Попере- чины всех типов		Поддерж. Конструкции (консоли, кронштейны, фиксаторы)		Изоляторы		Секцион- ные изоля- торы		Провода, тросы		Воздуш. Стрелки		Зажимы, детали		Разрядники, разъединит ели		Струны		Дрос.тр-р. рельсовые цели		Прочи е устрой ства		Повреждено	
	3 и других служб	в т.ч. на перемном токе	нарушений по вине службы 3	Опоры	Попере- чины всех типов	Поддерж. Конструкции (консоли, кронштейны, фиксаторы)	Изоляторы	Секцион- ные изоля- торы	Провода, тросы	Воздуш. Стрелки	Зажимы, детали	Разрядники, разъединит ели	Струны	Дрос.тр-р. рельсовые цели	Прочи е устрой ства	токори- емн. из- за неиспра вности к/с	устр-в к/с из-за неис- прав- ности т/пр																	
ОКТ	132	42	80	0	0	0	6	6	16	6	5	4	36	11	13	6	10	10	19	19	11	8	7	0	18	0								
КЛГ	2	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0								
МСК	107	4	55	1	0	0	6	6	8	8	4	1	19	18	10	6	12	6	19	4	14	3	12	0	2	41	24							
ГОР	96	66	59	6	1	0	5	5	11	11	1	1	23	10	11	3	8	8	5	5	4	3	1	1	14	11								
СВБ	36	14	28	2	0	0	1	0	6	6	0	1	9	6	6	6	5	4	2	2	2	1	1	0	2	4	0							
СКВ	122	82	91	1	1	0	4	2	19	19	5	2	39	22	13	13	9	9	11	5	12	12	6	6	0	0	0							
ЮВС	31	24	31	0	0	0	2	2	7	7	1	1	6	6	5	1	6	6	2	2	1	1	0	0	5	12	0							
ПРВ	18	18	11	1	0	0	3	3	5	3	0	0	4	3	2	0	1	1	1	1	1	0	0	0	4	3								
КБШ	49	0	40	0	0	0	5	1	4	4	1	1	17	17	3	2	6	3	2	1	2	2	4	4	5	23	5							
СВР	61	1	55	1	1	0	0	0	10	10	3	3	14	13	5	1	4	2	5	5	9	9	2	2	8	0	0							
ЮУР	106	25	57	2	2	1	6	3	13	8	1	0	22	7	7	7	8	3	7	2	6	4	18	18	2	34	12							
ЗСБ	82	17	71	2	2	0	5	1	17	16	3	1	24	10	9	9	7	7	4	4	7	6	2	2	13	47	0							
КРС	35	22	24	1	1	0	0	0	13	10	2	2	5	1	1	1	6	3	3	3	1	1	0	0	2	13	12							
ВСБ	80	65	46	0	0	0	4	4	16	14	2	2	12	6	6	6	7	3	3	3	5	5	0	0	3	21	5							
ЗАБ	134	178	44	6	0	0	20	2	10	10	5	0	51	5	20	8	9	8	3	3	4	2	0	0	6	45	31							
ДВС	54	33	45	2	2	0	5	4	9	9	1	0	12	10	2	0	4	4	4	4	4	5	5	3	21	0								
2012г.	1145	591	739	25	11	1	73	40	164	142	34	19	294	145	114	70	102	77	90	63	83	64	59	45	62	300	103							
			100%		1,5%	0,1%	5,4%	19,2%	19,6%	9,5%	10,4%	8,5%	8,7%	6,1%	8,4%																			
2011г.	1133	619	846	15	14	1	55	43	182	157	32	25	212	68	84	68	94	87	55	50	90	51	93	62	220	157	61							
2010г.	1315	696	983	21	14	2	137	114	176	136	17	12	360	79	99	104	103	88	63	48	146	65	63	63	258	395	81							
2009г.	1238	694	911	24	21	4	60	48	156	143	33	23	224	121	120	103	180	123	65	47	58	52	36	29	195	424	61							
2008г.	1240	647	828	30	6	2	64	50	161	116	28	20	432	258	80	69	140	116	36	32	85	83	21	18	59	364	135							
2007г.	1099	590	735	31	3	0	64	48	130	87	32	25	388	224	83	77	129	119	30	24	68	62	10	9	57	356	109							
2006г.	1196	606	911	32	12	0	83	67	187	146	25	20	407	269	93	85	144	140	27	23	77	66	10	8	75	447	153							
2005г.	1283	634	878	37	10	1	51	45	213	155	28	24	424	240	96	87	140	126	40	33	95	85	14	11	62	367	114							

Удельные показатели эксплуатационной работы хозяйства электрификации и электроснабжения за 2012г.

Дорога	Удельная повреждаемость										Удельн. перерыв питания к/с, час на 100 км разверн. длины к/с	Количество повреждений к/с за Э на 1млрд т.км брутто
	к/с на 100 км разверн. длины				а/б на 100 км экспл.длины							
	Э				Всего по вине службы Э и других служб		Э					
	Всего по вине службы Э и других служб	В т.ч. на переменом токе	на	Э	Всего по вине службы Э и других служб	Э	Э	Э	Э	Э		
ОКТ	1,15	1,20	1,20	1,20	2,62	1,22	1,22	1,22	0,76	0,21	0,11	0,62
КЛГ	-	-	-	-	35,60	0,41	0,41	0,41	8,90	-	-	-
МСК	0,80	0,17	0,22	0,22	0,25	0,57	0,57	0,57	0,24	0,08	0,43	0,10
ГОР	1,01	0,83	0,53	0,53	0,93	0,45	0,45	0,45	0,59	0,22	0,01	0,14
СЕВ	0,49	0,32	0,23	0,23	0,42	0,55	0,55	0,55	0,20	0,19	0,49	0,06
СКВ	1,21	1,02	1,12	1,12	1,22	0,39	0,39	0,39	1,22	0,11	1,34	0,69
ЮВС	0,31	0,40	0,37	0,37	0,41	0,99	0,99	0,99	0,45	0,15	0,20	0,16
ПРВ	0,41	0,49	0,25	0,25	0,57	0,66	0,66	0,66	0,35	0,09	0,45	0,13
КБШ	0,50	0,00	0,45	0,45	0,55	0,62	0,62	0,62	0,42	0,06	0,30	0,15
СВР	0,45	2,08	0,55	0,55	0,39	0,43	0,43	0,43	0,39	0,17	0,84	0,18
ЮУР	1,20	0,82	0,99	0,99	1,16	0,82	0,82	0,82	0,96	0,05	0,56	0,29
ЗСБ	0,58	0,62	0,66	0,66	0,67	0,62	0,62	0,62	0,59	0,09	2,83	0,16
КРС	0,55	0,43	0,38	0,38	0,95	0,43	0,43	0,43	0,95	0,24	0,34	0,14
ВСБ	0,81	0,76	0,76	0,76	2,03	0,76	0,76	0,76	2,03	0,11	0,40	0,26
ЗАБ	1,71	2,64	1,71	1,71	16,49	2,64	2,64	2,64	0,96	0,38	0,21	0,41
ДВС	0,88	0,68	0,74	0,74	0,85	0,74	0,74	0,74	0,85	0,19	0,92	0,23
2012 г.	0,83	0,88	0,70	0,70	1,84	0,88	0,88	0,88	1,00	0,13	0,70	0,25
2011 г.	0,95	0,92	0,71	0,71	1,89	0,92	0,92	0,92	0,70	0,17	0,76	0,27
2010г.	1,11	1,04	0,82	0,82	1,60	1,04	1,04	1,04	1,00	0,18	0,72	0,29
2009г.	1,04	1,04	0,77	0,77	2,09	1,04	1,04	1,04	1,00	0,14	1,11	0,25
2008г.	1,05	0,97	0,74	0,74	2,28	0,97	0,97	0,97	1,00	0,11	0,76	0,24
2007г.	0,93	0,89	0,65	0,65	2,02	0,89	0,89	0,89	0,84	0,08	0,77	0,21
2006г.	1,02	0,92	0,77	0,77	2,43	0,92	0,92	0,92	1,14	0,08	1,08	0,28
2005г.	1,09	0,97	0,74	0,74	2,33	0,97	0,97	0,97	1,33	0,08	1,07	0,28

Приложение 2. Тексты программ обработки данных на Delphi

Текст первой части программы.

```
unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls;
type
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    OpenDialog1: TOpenDialog;
    Memo1: TMemo;
    Memo2: TMemo;
    Memo3: TMemo;
    Edit1: TEdit;
    Label1: TLabel;
    Button2: TButton;
    Edit2: TEdit;
    Label2: TLabel;
    Button3: TButton;
    GroupBox1: TGroupBox;
    RadioButton1: TRadioButton;
    RadioButton2: TRadioButton;
    RadioButton3: TRadioButton;
    GroupBox2: TGroupBox;
    RadioButton4: TRadioButton;
    RadioButton5: TRadioButton;
    RadioButton6: TRadioButton;
    GroupBox3: TGroupBox;
    RadioButton7: TRadioButton;
    RadioButton8: TRadioButton;
    RadioButton9: TRadioButton;
    Button4: TButton;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Button5: TButton;
    Label11: TLabel;
    Edit3: TEdit;
    Label12: TLabel;
    Edit4: TEdit;
    RadioButton10: TRadioButton;
    Button6: TButton;
    SaveDialog1: TSaveDialog;
    RadioButton11: TRadioButton;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure Button3Click(Sender: TObject);
    procedure Button4Click(Sender: TObject);
    procedure Button5Click(Sender: TObject);
    procedure Button6Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
```

```

var
  Form1: TForm1;
Var
  P1,P2,P3,P4,P5 : Array [0..100000] of Extended;
  I1,I2,Iob,I12,Uk : Array [0..100000] of Extended;
  R1,R2,G,Wk      : Extended;
  k,t,I           : Integer;
  S1,S2,S3,S4,S5  : String;
implementation
uses Unit2;
{$R *.DFM}

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var
  F : TextFile;
begin
  k:=0;
  t:=0;
  For i:=0 to 100000 do Begin
    P1[i]:=0;
    P2[i]:=0;
    P3[i]:=0;
    P4[i]:=0;
    P5[i]:=0;
  end;
  if OpenDialog1.Execute then
  begin
    AssignFile(F, OpenDialog1.FileName);
    Reset(F);
    while not Eof(F) do begin
      Read(F,P1[k],P2[k],P3[k]{,P4[k],P5[k]});
      k:=k+1;
    end;
    Label3.Caption:='Файл прочитан';
  end;
end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
  R1:=StrToFloat(Edit1.Text);
  R2:=StrToFloat(Edit2.Text);
  G:=StrToFloat(Edit3.Text);
  Wk:=StrToFloat(Edit4.Text);
  For i:=0 to k-1 do Begin
    I1[i]:=(-1)*P2[i]/R1;
    I2[i]:=(-1)*P3[i]/R2;
    Iob[i]:=I1[i]+I2[i];
    I12[i]:=I2[i]-I1[i];
  end;
  For i:=0 to k-1 do Uk[i]:=Wk*G*(I12[i+1]-I12[i])/(P1[2]-P1[1]);
  Label4.Caption:='Расчет выполнен';
end;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
  Memo1.Clear;
  Memo2.Clear;
  Memo3.Clear;
  For i:= 0 to k-1 do Begin
    {Memo1}

```

```

        If RadioButton1.Checked Then Begin
            S1:=FloatToStrF(P1[i], fffixed, 6, 5)+' '+'
            FloatToStrF(I1[i], fffixed, 6, 5);
            Memo1.Lines.Add(S1);
        end;
        If RadioButton2.Checked Then Begin
            S2:=FloatToStrF(P1[i], fffixed, 6, 5)+' '+'
            FloatToStrF(I2[i], fffixed, 6, 5);
            Memo1.Lines.Add(S2);
        end;
        If RadioButton3.Checked Then Begin
            S3:=FloatToStrF(P1[i], fffixed, 6, 5)+' '+'
            FloatToStrF(Iob[i], fffixed, 6, 5);
            Memo1.Lines.Add(S3);
        end;
    {Memo2}
        If RadioButton4.Checked Then Begin
            S1:=FloatToStrF(P1[i], fffixed, 6, 5)+' '+'
            FloatToStrF(I1[i], fffixed, 6, 5);
            Memo2.Lines.Add(S1);
        end;
        If RadioButton5.Checked Then Begin
            S2:=FloatToStrF(P1[i], fffixed, 6, 5)+' '+'
            FloatToStrF(I2[i], fffixed, 6, 5);
            Memo2.Lines.Add(S2);
        end;
        If RadioButton6.Checked Then Begin
            S3:=FloatToStrF(P1[i], fffixed, 6, 5)+' '+'
            FloatToStrF(Iob[i], fffixed, 6, 5);
            Memo2.Lines.Add(S3);
        end;
    {Memo3}
        If RadioButton7.Checked Then Begin
            S1:=FloatToStrF(P1[i], fffixed, 6, 5)+' '+'
            FloatToStrF(I1[i], fffixed, 6, 5);
            Memo3.Lines.Add(S1);
        end;
        If RadioButton8.Checked Then Begin
            S2:=FloatToStrF(P1[i], fffixed, 6, 5)+' '+'
            FloatToStrF(I2[i], fffixed, 6, 5);
            Memo3.Lines.Add(S2);
        end;
        If RadioButton9.Checked Then Begin
            S3:=FloatToStrF(P1[i], fffixed, 6, 5)+' '+'
            FloatToStrF(Iob[i], fffixed, 6, 5);
            Memo3.Lines.Add(S3);
        end;
        If RadioButton10.Checked Then Begin
            S4:=FloatToStrF(P1[i], fffixed, 6, 5)+' '+'
            FloatToStrF(Uk[i], fffixed, 11, 10);
            Memo3.Lines.Add(S4);
        end;
        If RadioButton11.Checked Then Begin
            S4:=FloatToStrF(P1[i], fffixed, 6, 5)+' '+'
            FloatToStrF(I12[i], fffixed, 11, 10);
            Memo3.Lines.Add(S5);
        end;
    end;

end;

procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);

```

```
begin
Form2.ShowModal;
end;

procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
begin
    Close;
end;

procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
begin
    If SaveDialog1.Execute then Begin
        Memo3.Lines.SaveToFile(SaveDialog1.FileName);
        End;
end;
end.
```

Текст второй части программы.

```

unit Unit2;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, TeEngine, Series, ExtCtrls, TeeProcs, Chart;
type
  TForm2 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    Chart1: TChart;
    Series1: TFastLineSeries;
    Series2: TFastLineSeries;
    Series3: TFastLineSeries;
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
    CheckBox1: TCheckBox;
    CheckBox2: TCheckBox;
    CheckBox3: TCheckBox;
    CheckBox4: TCheckBox;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Series4: TFastLineSeries;
    Series5: TFastLineSeries;
    CheckBox5: TCheckBox;
    Label3: TLabel;
    Edit3: TEdit;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
var
  Form2: TForm2;
implementation
uses Unit1;
{$R *.DFM}
procedure TForm2.Button1Click(Sender: TObject);
Var
  z      : Integer;
  Mnog: Extended;
begin
  I1[0]:=StrToFloat(Edit1.Text);
  I2[0]:=StrToFloat(Edit1.Text);
  Iob[0]:=StrToFloat(Edit1.Text);
  I12[0]:=StrToFloat(Edit1.Text);
  I1[k]:=StrToFloat(Edit2.Text);
  I2[k]:=StrToFloat(Edit2.Text);
  Iob[k]:=StrToFloat(Edit2.Text);
  I12[k]:=StrToFloat(Edit2.Text);
  Mnog:=StrToFloat(Edit3.Text);
  Series1.Clear;
  Series2.Clear;
  Series3.Clear;
  Series4.Clear;
  Series5.Clear;
  For z:= 0 to k do Begin
    If CheckBox1.Checked Then Series1.Addxy(P1[z],I1[z],',',ClTeeColor);
    If CheckBox2.Checked Then Series2.Addxy(P1[z],I2[z],',',ClTeeColor);
    If CheckBox3.Checked Then Series3.Addxy(P1[z],Iob[z],',',ClTeeColor);
  
```

```

        If CheckBox4.Checked Then Series4.Addxy(P1[z],I12[z],'',ClTeeColor);
        If CheckBox5.Checked Then Begin
Series5.Addxy(P1[z],Uk[z]*Mnog,'',ClTeeColor);
                Series5.Title:='Uk[' + FloatToStr(Mnog) +
                '];B=f(t[c]);';
                End;
        end;
end;
end.

```

Приложение 3. Протокол испытаний быстродействующего автоматического выключателя

Дорога Моск _____
Предприятие ЭЧ-1 _____
Цех РРУ _____

Форма ЭУ-105 [0361851]
Утверждена ОАО «РЖД» в 2004 г.

Лицензия № 12-ЭЛ
От " 1 " 04 20 06 г.

ПРОТОКОЛ № 1 от 17.01.2007г.
испытания быстродействующего автоматического выключателя

ЗБВ

тип ВАБ-49/1 заводской номер _____ на напряжение 3,3 кВ
предел регулировки 2000-5000 А

1.1 Механические параметры

№ п/п	Наименование параметров	Данные проверки	Примечания
1	2	3	4
1.	Тяжение пружины (гл. конт.\ дуг. конт.), кгс	50\15	
2.	Провал дугогасительного контакта ($\delta 1$), мм	2,4	
3.	Провал главного контакта ($\delta 2$), мм	2,5	
4.	Зазор между верхом дугогасительного контакта и ро-гом ($\delta 3$), мм	5	
5.	Расстояние между главными контактами, мм	20	
6.	Уставка ИКЗ, Ом	55	

1.2 Электрические параметры

№ п/п	Наименование параметров	Данные проверки	Примечания
1	Напряжение держащей катушки, В	1,7	
2	Ток держащей катушки, А	0,6	
3	Ток уставки, А - прямой	3000	
4	Сопротивление дополнительной катушки	6 Ом	
5	Ток дополнительной катушки	0,004 А	

Примечание: Уставка ИКЗ- 30 Ом

4. Заключение

Автоматы годны к работе

П Р И Б О Р Ы	№ п/п	Наименование прибора	Тип	№ прибора	Класс точности	Дата проверки	Примечания
	1	Ампервольтметр	M231	902	1,5	I 2007	
	2	Динамометр	ДПУ 0,5/2	2163	2	I 2007	
	3	Мегомметр	ЭСО202Г	76212	1,5	I 2007	
	4	Испыт. установка	АИД-70				
	5	Нагрузочная установка	ПРУС				

Испытание производили:

(Подпись)

Карпов

(Фамилия)

Протокол и работу принял –
начальник

(Подпись)

Баранов

(Фамилия)

Протокол проверил
Начальник РРУ



(Подпись)

Телепченков

(Фамилия)