

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»
(СамГУПС)

на правах рукописи



Калякулин Алексей Николаевич

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИИ
НА КОРПУС В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ТЕПЛОВОЗОВ

Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Гордеев Игорь Петрович

Самара - 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ ОТ ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИИ НА КОРПУС.....	11
1.1 Анализ работ по системам защиты от замыканий на землю в электрических цепях постоянного тока.....	16
1.1.1 Анализ систем защиты на основе контроля падения напряжения относительно корпуса.....	20
1.1.2 Анализ систем защиты на основе мостовых схем с использованием дополнительного источника и без него	26
1.1.3 Анализ систем защиты с использованием дополнительного источника переменного напряжения.....	30
1.1.4 Анализ систем защиты с использованием дополнительного источника постоянного напряжения.....	37
1.1.5 Анализ систем защиты на основе емкостного метода.....	39
1.2 Постановка цели и задач диссертационной работы.....	41
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОЙ ЦЕПИ ТЕПЛОВОЗА С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.....	43
2.1 Выбор методики исследования.....	43
2.2 Анализ схем замещения силовых цепей локомотивов.....	48
2.3 Разработка схемы замещения и математической модели силовой цепи тепловоза с учетом параметров изоляции.....	54
2.4 Определение значений емкости изоляции для моделирования путем проведения эксперимента.....	59
2.5 Моделирование токов и напряжение в изоляции в штатном режиме силовой цепи.....	69

2.6 Моделирование токов и напряжение в изоляции в аварийном режиме силовой цепи.....	74
Выводы по главе 2.....	78
3. РАЗРАБОТКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ОТ ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИИ НА КОРПУС В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ТЕПЛОВОЗОВ	80
3.1 Предлагаемые метод и устройство для обнаружения и защиты от пробоя изоляции на корпус в силовых цепях тепловозов.....	80
3.2 Моделирование процессов в устройстве и проверка адекватности математической модели.....	85
3.3 Повышение ресурса тяговых электродвигателей после выравнивания напряжений в обмотках при внедрении устройства на тепловозе	88
Выводы по главе 3.....	98
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИИ НА КОРПУС.....	100
4.1 Составляющие экономического эффекта.....	101
4.2 Расчет экономического эффекта от уменьшения количества неплановых ремонтов.....	102
4.3 Расчет экономического эффекта от уменьшения времени простоев локомотивов на плановых ремонтах.....	103
4.4 Расчет экономического эффекта от увеличения ресурса ТЭД в эксплуатации.....	104
4.5 Расчет чисто дисконтированного дохода (ЧДД) от внедрения системы защиты.....	106
4.6 Определение коэффициента экономической эффективности.....	109
4.7 Рентабельность инвестиционного проекта.....	109
Выводы по главе 4.....	110

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	112
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Параметры силовой цепи тепловоза 2ТЭ25КМ.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Графики токов и напряжений в силовой цепи тепловоза, а также зарядно-разрядные процессы в изоляции при переключении позиций контроллера машиниста (1-15).....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Документ, подтверждающий новизну технической разработки.....	182
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.....	185
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Графики нарастания напряжения на конденсаторах С1 и С2 при переключении позиций контроллера машиниста (1-15) в предложенной силовой цепи тепловоза.....	188

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Основными причинами повреждений являются межвитковые замыкания и пробой корпусной изоляции якорей тяговых электродвигателей (ТЭД), доля которых, по данным ОАО «РЖД», составляет 30-40 % от общего числа неисправностей двигателя.

Особенно опасны двойные замыкания на корпус из-за шунтирования части витков обмотки двигателя, при которых уменьшается сопротивление обмотки и в ней появляется повышенный ток, создающий перегрев и вызывающий дальнейшие разрушения в месте повреждения. Если оперативно не обесточить силовую цепь предусмотренной для этого системой защиты от пробоя изоляции на корпус, результатом может быть возникновение пожара, который быстро распространяется на всю секцию тепловоза и приводит к большому экономическому ущербу.

За последние 5 лет с 2013-2018 гг. на сети железных дорог РФ произошло 6 случаев пожаров на тепловозах, когда причиной возникновения являлось повреждение изоляции тяговых электродвигателей. Кроме этого, по данным дирекций тяги, имеющих в своем распоряжении парк тепловозов, ежегодно происходит как минимум 5 случаев остановок поездов в пути следования по причине пробоя изоляции в обмотке якоря. Совершенно очевидно, что ежегодные случаи пожаров на тепловозах, а также остановок на перегонах связаны с недостатками установленной системы защиты от пробоев изоляции на корпус.

Системы защиты, установленные на современных тепловозах и разработанные еще в 80-х годах, обладают рядом недостатков. Во-первых, система характеризуется большим временем обнаружения пробоев по причине наличия двухкатушечного электромагнитного реле; во-вторых, система не позволяет определить номер тягового электродвигателя с пробоем изоляции, а предоставляет лишь информацию о наличии замыканий в плюсовой или минусовой цепи;

дальнейший ручной поиск аварийного двигателя приводит к остановке поезда в пути следования и экономическим потерям из-за его задержки.

Необходимо отметить, что на втором этапе реализации Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» (2021-2025 годы и на перспективу до 2030 года) предусматривается создание новых локомотивов, в которых будут использоваться перспективные «интеллектуальные технологии», в том числе реализация возможности управления локомотивом в полностью автоматическом режиме с повышением уровня безопасности движения поездов. Существующий метод обнаружения пробоев на основе разности потенциалов относительно корпуса не позволит устранить указанные недостатки системы. Таким образом, необходим другой метод определения пробоя изоляции на корпус.

На современном этапе развития отечественного тепловозостроения разработка метода и системы защиты от пробоя изоляции на корпус с целью повышения быстродействия и расширения возможностей диагностирования является актуальной задачей. Предпочтительным вариантом построения системы защиты является использование параметров изоляции силовой цепи тепловоза.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в построение систем контроля состояния изоляции и защиты от замыканий на корпус в электрических цепях внесли: И.М. Бородянский, А.В. Булычев, В.Н. Вавин, В.К. Ванин, И.П. Гордеев, С.И. Ким, В.И. Лачин, О.А. Марковская, Ю.Н. Набатчиков, О.И. Новиков, С.С. Сарычев, А.В., М.В. Федотов В.Я. Шмурьев и другие авторы.

Большой вклад в рассмотрение основных физических процессов в неоднородной высоковольтной изоляции внесли: В.Д. Авилов, В.Г. Галкин М.Д. Глущенко, И.П. Гордеев, Г.Б. Дурандин, Ш.К. Исмаилов, М.Ф. Карасев, В.И. Карташев, А.С. Космодамианский, Е.Ю. Логинова, А.С. Серебряков, В.П. Смирнов, Н.Д. Сухопрудский, В.В. Харламов, А.М. Худоногов и многие другие.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка системы защиты от пробоя изоляции на корпус в силовых цепях тепловозов на

основе использования изменения электрической емкости и сопротивления изоляции.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие задачи.

1. Исследовать процессы в неоднородной изоляции в штатном и аварийном режимах силовой цепи тепловоза на основе созданных математических и компьютерных моделей. Определить диагностические параметры для оценки наступления пробоя в изоляции силовой цепи тепловоза.

2. Разработать новое схмотехническое решение для системы контроля и защиты электрических цепей тепловозов от пробоя изоляции на корпус.

3. Провести экспериментальное исследование для проверки и подтверждения достоверности полученных результатов и адекватности созданных математических и компьютерных моделей.

4. Провести технико-экономическое исследование, позволяющее экономически обосновать предложенное техническое решение.

Научная новизна. Научная новизна диссертации заключается в следующем.

1. Обосновано представление изоляционных конструкций в виде сосредоточенных емкостей (конденсаторов) на схеме замещения силовой цепи тепловоза.

2. Впервые предложено использовать свойство изменения емкости изоляции обмоток тяговых электродвигателей тепловоза в качестве диагностического параметра для оценки наступления пробоя на корпус.

3. Установлено, что основная часть выходного напряжения тягового выпрямителя относительно корпуса в силовой цепи тепловоза приходится на изоляцию обмотки якоря, что объясняет большую повреждаемость обмотки в эксплуатации.

4. Разработаны метод и алгоритм защиты от пробоя изоляции на корпус на основе контроля изменения емкости изоляции силовой цепи тепловоза с помощью мостовой схемы с источником переменного тока.

5. Предложен способ диагностики изоляции силовой цепи после подачи питания в низковольтную цепь тепловоза, что существенно упрощает диагностирование состояния цепи, делает процесс безопасным при проверке работоспособности тепловоза.

6. Получен эффект снижения рабочего напряжения относительно корпуса в изоляции якорной цепи тепловоза, что позволит снизить повреждаемость обмоток и увеличить ресурс тяговых электродвигателей в эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке научно обоснованных положений и технических решений по повышению эффективности работы силовых цепей тепловозов.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Разработанные математические модели могут найти применение при модернизации эксплуатируемых и проектировании новых тепловозов.

2. Предложенная система защиты от пробоев изоляции на корпус в силовых цепях тепловозов позволит повысить быстродействие по сравнению с существующей, а также установить, какой именно тяговый электродвигатель является аварийным для оперативного его отключения.

Практическая значимость результатов диссертации подтверждена актами внедрения ООО «ТМХ-Сервис» и Куйбышевской дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД».

Методология и методы исследования. Поставленные задачи решались аналитическими методами исследования электрического и магнитного полей. Для математического и компьютерного моделирования использовались методы дифференциального и интегрального исчисления, аналитические и численные методы. Числовые решения выполнены на основе программного пакета *Matlab R2017*.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие положения.

1. Математическая модель силовой цепи тепловоза, впервые учитывающая электрическую емкость и сопротивление изоляции обмоток тяговых электродвигателей.
2. Результаты математического моделирования зарядно-разрядных процессов в изоляции силовой цепи тепловоза в штатном и аварийном режимах ее работы.
3. Новое схемное решение для силовой цепи тепловоза, позволяющее повысить быстродействие системы выявления и защиты от замыканий на корпус, а также установить, какой именно тяговый электродвигатель является аварийным для оперативного его отключения.
4. Математическая модель силовой цепи тепловоза, измененной с учетом предложенной схемы системы защиты от пробоя изоляции на корпус.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность основных научных положений и результатов обеспечивается корректностью принятых допущений и математических формулировок задач, а также подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований (7 %).

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных конференциях: XXXVI, XXXVII научная конференция студентов и аспирантов (г. Самара, 2009 г., 2010 г.); VI Всероссийская дистанционная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы развития транспортного комплекса» (г. Самара, 2010 г.); Международная научно-техническая конференция «ТРАНСПОРТ XXI ВЕКА: Исследования. Инновации. Инфраструктура» (г. Екатеринбург, 2011 г.); V, VII Международная научно-практическая конференция «Наука и образование транспорту» (г. Самара, 2012 , 2014 гг.); на заседании кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС (г. Санкт-Петербург, 2013 г.); III Всероссийская научно-техническая конференция с

международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» (г. Омск, 2015 г.); II Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» (г. Москва, 2015); III Международная научно-техническая конференция «Локомотивы. XXI век» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.); VI Международная научно-техническая конференция «Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт – 2019») (г. Ростов-на-Дону, 2019 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 19 научных работах, в том числе в 10 работах в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикаций результатов исследований на соискание ученых степеней кандидата наук.

По теме диссертации получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 120 наименований и приложений, размещенных на 196 страницах машинописного текста, включая 52 рисунка, 9 таблиц.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ ОТ ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИИ НА КОРПУС

Анализ данных ОАО «РЖД» о выходе из строя тяговых электродвигателей (ТЭД) показал, что основной причиной этого является неудовлетворительная электрическая изоляция. Доля межвитковых замыканий и пробоя корпусной изоляции якоря составляет 30-40 % от общего числа неисправностей двигателя. Нарушение нормального состояния связано прежде всего с потерей ею способности выполнять изолирующие функции, чему, как правило, предшествует длительный процесс ухудшения ее диэлектрических свойств [1].

Изоляция ТЭД деградирует в течение всего жизненного цикла двигателя под влиянием различных воздействий, характерных для нормального рабочего режима. В эксплуатации изоляция подвержена влиянию пяти основных воздействий, которые приводят к ухудшению ее технического состояния:

- механическое воздействие;
- химическое воздействие;
- термическое воздействие;
- воздействие окружающей среды;
- электрическое воздействие.

В процессе эксплуатации тепловозов изоляция обмоток якоря и главных и добавочных полюсов, выводов катушек и кабелей работает в тяжелых условиях внешних и внутренних воздействий. Нарушение электрической прочности изоляции происходит в результате механических воздействий вибрации в вертикальной и горизонтальной плоскостях, передавливания, растяжения, ударов. Механические повреждения могут быть вызваны воздействием пути на ТЭД, нарушением балансировки, частыми пусками и остановками, износом и разрушением моторно-осевых и моторно-якорных подшипников.

Химическое воздействие проявляется при работе в условиях высокой влажности, кислых сред, может быть вызвано попаданием грязи внутрь ТЭД.

Термическое воздействие связано в большей мере с моментами пуска и перегрузками при работе, например, при затяжных подъёмах поезда по уклонам. При нахождении материала диэлектрика в высокотемпературном поле происходит частичное разложение материала, которое идет тем интенсивнее, чем выше температура. С течением времени происходит постепенное увеличение пористости изоляционного материала. Это приводит к возникновению местных электрических неоднородностей, сказывающихся на изменении локальной диэлектрической проницаемости, что, в свою очередь, приводит к возникновению местных перенапряжений при наложении на изоляционный материал электрического поля. Если на равнинных и равнинно-холмистых участках железных дорог доля теплового износа изоляции ТЭД составляет 30-40 % износа, то при работе на ПЖД с токами более номинального режима доля теплового износа становится преобладающей и составляет 80-90 % износа изоляции при токах, равных 1,4-1,5 номинального тока. Таким образом, среди различных факторов, определяющих срок службы изоляции тяговых электродвигателей, одним из основных является тепловое старение [2].

Окружающая среда способна оказывать серьезное влияние на состояние изоляции. Здесь существует множество факторов: от степени запыленности воздуха до высоты эксплуатации ТЭД над уровнем моря и другими факторами.

Электрическое воздействие связано с наличием перенапряжений в процессе эксплуатации ТЭД и может привести к разрушению или отслаиванию изоляции. Фактор электрической природы завершает процесс разрушения материала диэлектрика электрическим пробоем изоляции обмоток.

Очевидно, что воздействие указанных факторов носит комплексный характер и некоторый фактор может вызывать, усиливать или снижать степень воздействия других.

Процессы, протекающие в изоляции электрических машин под воздействием указанных выше эксплуатационных факторов, приводят к необратимому ухудшению ее свойств, называемому старением изоляции. Следствием старения изоляции являются ее отказы (повреждения), выражающиеся в снижении электрической прочности, в неспособности длительно выдерживать рабочее напряжение и кратковременно перенапряжения. Отказы, в свою очередь, приводят к остановке поезда на перегоне. Как показывает статистика отказов Куйбышевской дирекции тяги, ежегодно происходит как минимум 5 случаев остановок поездов в пути следования по причине пробоя изоляции в обмотке якоря тягового электродвигателя тепловоза.

Особенно опасны двойные замыкания на корпус из-за шунтирования части витков обмотки двигателя: уменьшается сопротивление обмотки, и в ней появляется повышенный ток, создающий перегрев и вызывающий дальнейшие разрушения в месте повреждения. Результатом может быть возникновение пожара, который быстро распространяется на всю секцию тепловоза и приводит к большому экономическому ущербу [3,4,5].

Анализ пожарной безопасности показал, что всего за период 2008-2017 гг. и 9 месяцев 2018 года произошло 374 случая пожара на тепловозах [6]. Ранжирование узлов тепловоза, явившихся причинами пожаров, показано на рис. 1.1.

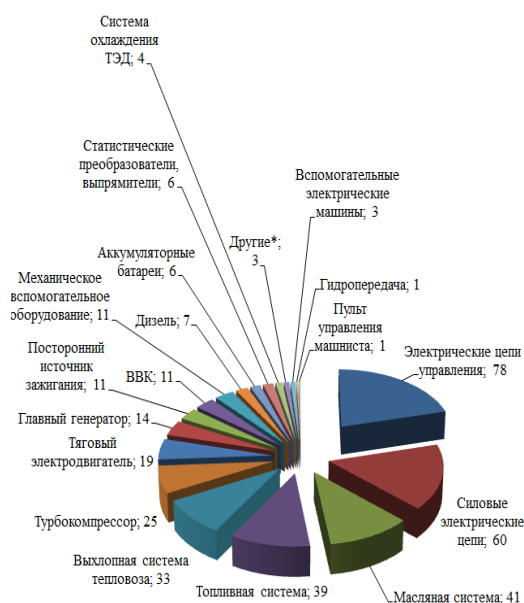


Рисунок 1.1 – Причины пожаров на тепловозах

Информация по неисправностям тяговых электродвигателей, которые стали причинами пожаров на тепловозах представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Информация по неисправностям тяговых электродвигателей, которые стали причинами пожаров на тепловозах

№ п/п	Причина пожара	Информация о причинах пожаров	Серия тепловоза	Тип тягового электродвигателя
1.	Магнитная система якоря - 1 случай	Переброс кругового огня по коллектору тягового электродвигателя	2ТЭ10МК	ЭД118А
2.	Выводные кабели – 4 случая	Наличие переходного сопротивления в наконечнике выводного кабеля тягового электродвигателя, что привело к нагреву кабеля	2ТЭ10В	ЭД118Б
3.		Короткое замыкание выводных кабелей тягового электродвигателя в клицах крепления	2ТЭ116	ЭД133
4.		Термическое разрушение покровной изоляции выводных кабелей тягового электродвигателя в результате повышенного переходного сопротивления из-за ослабления соединения	2ТЭ10М	ЭД118А
5.		Электрический пробой изоляции выводного кабеля тягового электродвигателя (потеря диэлектрических свойств кабеля)	2ТЭ10В	ЭД118А
6.	Магнитная система остова - 1 случай	Пробой магнитной системы остова (изоляции дополнительного полюса) тягового электродвигателя	2ТЭ10М	ЭД118А

7.	Щеточный механизм – 2 случая	Переброс кругового огня по коллектору тягового электродвигателя	2ТЭ10МК	ЭД118А
8.		Ослабление болтового соединения первого щеткодержателя тягового электродвигателя	3ТЭ10М	ЭД118Б
9.	Нажимной конус якоря	Размотка бандажа прижимного конуса коллектора двигателя с образованием трения стекловолокна	2ТЭ10У	ЭД118А

Основная часть пожаров на тепловозах возникает в:

- 1) электрических цепях управления – 22 %;
- 2) силовых электрических цепях – 16 %;
- 3) масляной системе (дизельного двигателя) – 10 %;
- 4) топливной системе (дизельного двигателя) – 10 %;
- 5) выхлопной системе (дизельного двигателя) – 10 %;
- 6) турбокомпрессорах – 6 %.

Таким образом, за 5 лет с 2013 г. по 2018 г. произошло 6 случаев пожаров на тепловозах, когда причинами возникновения являлось повреждение изоляции тяговых электродвигателей.

При обнаружении замыкания на корпус в цепи высокого напряжения тепловоза должна включаться действующая на отключение защита. Последствия повреждения изоляции в виде ежегодно случающихся пожаров, а также случаев остановки поезда в пути следования, свидетельствуют о неэффективности существующих защит и необходимости поиска иных методов построения системы. Для этого предлагается проанализировать все существующие в противоаварийной автоматике методы.

1.1 Анализ работ по системам защиты от замыканий на землю в электрических цепях постоянного тока

В настоящее время находят применение различные системы, контролирующие возникновение замыкания на землю. Качество изоляции определяется многими параметрами, однако, учитывая то, что главное назначение изоляции состоит в том, чтобы изолировать токоведущие части от других элементов, принято считать главным показателем качества изоляции ее проводимость (активное сопротивление). Поэтому по изменению активного сопротивления изоляции можно судить о возникновении дефекта или о старении в целом, что позволит выявить возможные неисправности в цепях различных электрических машин и их причины на ранней стадии возникновения повреждения [7, 8, 9]. Тем не менее, несмотря на то, что контроль сопротивления изоляции является традиционным методом оценки ее состояния, поиск и построение новых, на основе известных, методов контроля земли представляет собой весьма актуальную научно-техническую задачу, решение которой имеет существенное значение для высоковольтного электрооборудования.

В противоаварийной автоматике среди таких способов можно выделить четыре группы, в зависимости от заложенного в них алгоритма контроля и защиты:

- контроль падения напряжения относительно корпуса;
- мостовые схемы без дополнительного источника;
- мостовые схемы с использованием дополнительного источника;
- использование дополнительного источника переменного напряжения;
- использование дополнительного источника постоянного напряжения;
- емкостной метод.

Наряду с перечисленными, также находят применение системы, постоянно контролирующие сопротивление изоляции цепей. Так, для защиты от замыкания силовых цепей на корпус тепловоза установлены два преобразователя напряжения

$U38$ и $U39$, которые являются датчиками напряжения, входные цепи которых соединены последовательно и подключены к «плюсу» и «минусу» силовой цепи и корпусу тепловоза (рис.1.2).

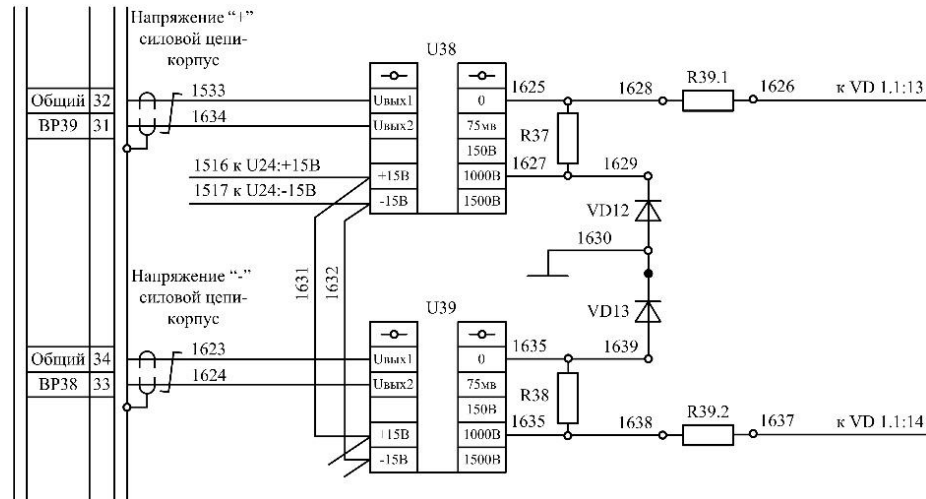


Рисунок 1.2 – Схема защиты от замыканий на корпус тепловоза 2ТЭ116У

Численное значение сопротивления изоляции определяется измерением напряжений между «плюсом» и «минусом», а также корпусом тепловоза в режиме «Тяга» при напряжении тягового генератора более 100 В. Численное значение сопротивления изоляции силовых цепей вычисляется устройством обработки информации (УОИ) микропроцессорной системы управления МСУ ТП при сборке тяговой схемы, а затем обновляется с периодом 4 мин. Значение выводится на дисплей машиниста. В случае снижения сопротивления изоляции одной из силовых цепей ниже уровня 500 кОм на дисплей будет выдано одно из предупредительных сообщений – «R [+] силовой < 500 кОм», «R [-] силовой < 500 кОм», «R [общ] силовой < 500 кОм». Повторно подобные сообщения система диагностики выдает после следующего запуска дизеля и включения режима тяги. Если в одной из силовых цепей на корпус тепловоза возникает замыкание, то УОИ осуществляет сброс нагрузки, разборку тяговой схемы и выдает на дисплей соответствующее сообщение – «Земля в [+] силовой цепи», «Земля в [-] силовой цепи» [10]. Недостатком системы контроля сопротивления изоляции является то, что она не позволяет точно определить, в каком из шести тяговых электродвигателей

тепловоза 2ТЭ116У появилась «земля», т.е. произошел пробой изоляции. Кроме того, период обновления, равный 4 мин снижает эффективность и быстродействие существующей системы защиты.

Аналогичный способ измерения сопротивления изоляции и защиты от замыканий на корпус силовых цепей тепловозов описан в работе [11]. Способ осуществляется следующим образом: напряжение U в силовой цепи тепловоза контролируется датчиком напряжения $ДН$, который подключен к положительным и отрицательным полюсам цепи (рис. 1.3).

Датчик напряжения $ДН1$ контролирует падение напряжения U^+ в первой измерительной цепи на резисторе $R_{д1}$, обусловленное протеканием через эту цепь тока утечки изоляции плюсового полюса. Датчик напряжения $ДН2$ во второй измерительной цепи контролирует падение напряжения U на резисторе $R_{д2}$, обусловленное протеканием через эту цепь тока утечки изоляции минусового полюса.

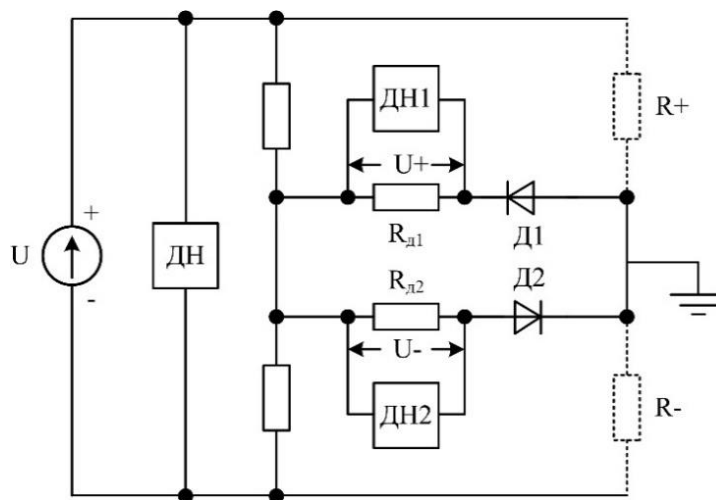


Рисунок 1.3 – Схема устройства для осуществления способа измерения сопротивления изоляции и защиты от замыканий на корпус силовых цепей тепловозов

Защитная функция осуществляется путем снятия возбуждения с тягового генератора, питающего силовую цепь в случае снижения любого из расчетных сопротивлений R^+ или R^- ниже заданных порогов.

Разработка систем контроля изоляции, описанных выше, имеет существенное значение для целей технической диагностики, позволяющей выявлять повреждения на ранней стадии их возникновения без отключения объекта при рабочем напряжении на нем и своевременно принимать ответные меры.

Также в настоящее время разработаны системы, которые основаны на искусственном создании переходных процессов в контролируемом объекте и получении благодаря этому разных режимов его работы, что позволяет составить системы линейно независимых уравнений, описывающих состояние объекта в этих режимах, и определить сопротивление изоляции цепей [12]. Варианты таких защит имеют определенные преимущества для турбогенераторов, заключающиеся в возможности контролировать непосредственно сопротивление изоляции цепей относительно земли и осуществлять диагностику состояния изоляции, что позволяет обнаруживать повреждения на ранней стадии их возникновения и своевременно принимать меры по устранению этих повреждений, не допуская аварийного останова генератора. Подробное описание систем, непосредственно контролирующих сопротивление изоляции, приводится во многих работах [13, 14].

Так, согласно одному из способов контроля и защиты сопротивление замыкания цепей возбуждения генератора на землю определяется путем вычисления отношения двух значений тока, протекающего в разные моменты времени в цепи постороннего источника прямоугольного напряжения, включаемого между землей и одним из полюсов защищаемых цепей [8, 14].

Все перечисленные способы имеют определенные недостатки, определяющие неполноту решения задачи контроля состояния изоляции и защиты от повреждений на землю в обмотках. С целью выявления наиболее существенных из них, обуславливающих необходимость и пути дальнейшего совершенствования, в работе рассматриваются алгоритмы, заложенные в основу применяемых в настоящее время методов.

1.1.1 Анализ систем защиты на основе контроля падения напряжения относительно корпуса

Самый традиционный метод определения аварийного состояния изоляции, получивший наибольшее распространение вследствие своей простоты, основан на измерении напряжения в любой точке плюсовых или минусовых цепей высокого напряжения относительно корпуса [12, 15]. Однако такой метод позволяет установить факт наличия аварии, но не обнаружить в каком из устройств схемы она произошла [16, 17, 18, 19]. Данный метод положен в основу работы систем защиты от пробоя на корпус в цепях высокого напряжения отечественных тепловозов большинства серий.

На тепловозах 3ТЭ10М, 2ТЭ10М, выпускавшихся до 1985 года, система защиты силовой цепи от заземлений была построена по простейшей принципиальной схеме. Такая схема представляла цепь последовательно соединенных рубильника (*ВРЗ*), резистора (*СРЗ*) и однокатушечного реле заземления типа *Р45 Г2-12 (РЗ)* с механической защелкой (рис. 1.4) [20, 21].

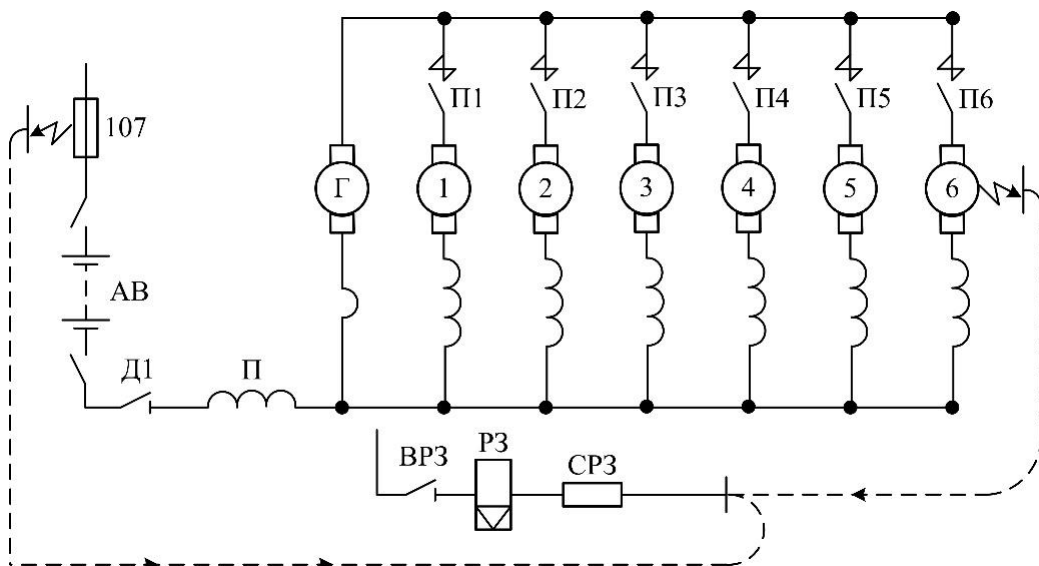


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема включения и действия реле заземления

Р-45Г2-12 на тепловозе

Один из выводов катушки реле включен в минусовую цепь цепи тепловоза вместе с рубильником *ВРЗ*, другой вывод катушки припаян к корпусу тепловоза. Наличие заземления проводов тяговой цепи определяют с помощью реле заземления, которое срабатывает при замыкании на корпус плюсов проводов. При появлении заземления в минусовых цепях реле *Р-45Г2-12* не срабатывает и такие замыкания на корпус обнаруживают только с помощью мегомметра. Если замыкание на корпус произошло в обмотках тягового электродвигателя (ТЭД), то неисправный двигатель находят путем поочередного отключения их и включения тяговой нагрузки. Реле заземления будет срабатывать при подаче напряжения на неисправный двигатель.

При срабатывании реле *РЗ* его якорь удерживается во включенном положении механической защелкой. После устранения повреждения защелку необходимо освободить. Если место корпусного замыкания не обнаружено, разрешается отключить реле рубильником *ВРЗ* и следовать до ближайшего сервисного локомотивного депо.

С 1985 г. от такой системы защиты от заземлений отказались ввиду наличия следующих недостатков: защита срабатывает при заземлении лишь в плюсовой части силовой цепи и не реагирует на заземление в минусовой ее части, ручной поиск неисправного ТЭД. Ввиду наличия механической защелки реле имеет малое быстродействие. В результате замыканий на корпус в тяговых цепях на сериях тепловозов с описанной системой выгорали обмотки якорей и дополнительных полюсов, а на тепловозах 2ТЭ10Л до №1412 в результате двойного замыкания имели место случаи выгорания блока буксования.

На тепловозах 3ТЭ10М и 2ТЭ10М, выпускавшихся с 1985 г., а также на тепловозах типа ТЭ10У система защиты от пробоя на корпус включает: реле заземления типа *РМ-1110* с искусственной нулевой точкой, ассиметричный делитель напряжения, выпрямительный мост *БВЗ* и рубильники *ВРЗ1* и *ВРЗ2* (рис. 1.5) [20, 22].

Очевидным преимуществом системы является особенность конструкции реле заземления, состоящая из двух катушек, рабочей $P3 (P)$ и удерживающей $P3 (Y)$. Удерживающая выполняет роль «электрической защелки», удерживая якорь во включенном положении (рис. 1.5).

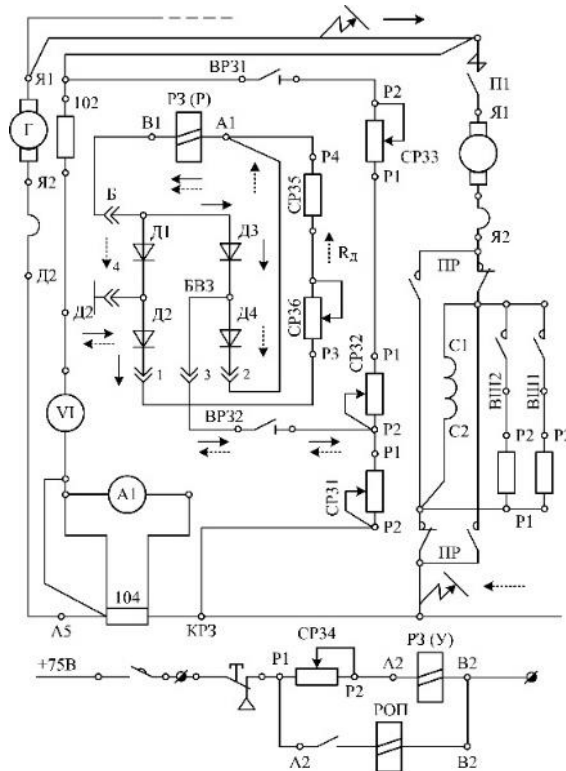


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема включения реле заземления $PM-1110$ на тепловозах типа ТЭ10М и ТЭ10У

Если возникает необходимость выключения реле после его срабатывания, нажимают кнопку $KP3$, тем самым снимая питание с удерживающей катушки.

Выводы рабочей катушки реле через диоды $Д1-Д4$ выпрямительного моста $БВ3$ подключены с одной стороны к корпусу тепловоза, а с другой – к делителю напряжения, соединенному как с плюсовой, так и с минусовой частями силовых цепей. Благодаря такому включению ток в катушке протекает в неизменном направлении независимо от того, в какой части силовой цепи имеется заземление (в плюсовой или минусовой).

Если при включенном рубильнике $ВР31$ реле заземления срабатывает, а при отключенном не срабатывает, значит происходит замыкание на корпус в

минусовой цепи. К недостаткам системы следует отнести: ручное определение цепи с заземлением, «плюсовой» или «минусовой», с помощью рубильников *BP31* или *BP32*, при заземлении в цепях тяговых электродвигателей поиск аварийного двигателя возможен только путем поочередного их отключения и включения тяговой нагрузки, что приведет к остановке поезда в пути следования и экономическим потерям по причине задержки.

На одном из самых распространённых грузовых тепловозов в России и странах постсоветского пространства магистральном двухсекционном грузовом тепловозе 2ТЭ116, который выпускался с 1971 г. по 2007 г., структура система защиты от пробоев в силовой цепи осталась прежней. Система защиты содержит: реле заземления *PM-1110*, выпрямительный мост *BC5*, рубильники *BP31* и *BP32*, делитель напряжения *CP34-CP33-CP31* (рис. 1.6) [20, 23].

В системе присутствуют те же недостатки: так участок цепи, на котором произошло замыкание на корпус, определяется при отключении разъединителя *BP32* (706, 704) и включении тяговой нагрузки. Повторное включение реле *P3* указывает на то, что замыкание произошло в плюсовой части силовой цепи.

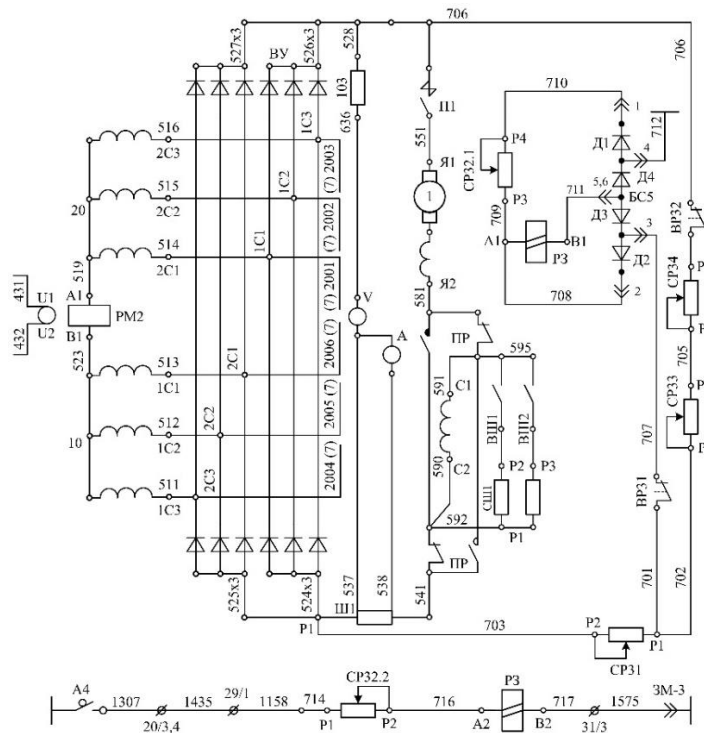


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема включения реле заземления *PM-1110* на тепловозе 2ТЭ116

Защита от пробоев на корпус высоковольтных цепей современного отечественного тепловоза 2ТЭ25КМ осуществляется устройством искусственного «заземления». В устройство входят двухкатушечное реле заземления *PЗ*, резисторы *CP31-CP34*, рубильники *BP31,2*, кнопка реле заземления *KPЗ*, блок выпрямителей *BBЗ* и блок диодов *UZ1*. Цепь заземления подключена к выводам «+» и «—» выпрямителей через блок диодов *UZ1* (от каждого тягового электродвигателя) (рис. 1.7) [20, 24, 25, 26, 27].

В случае пробоя в любой точке плюсовых или минусовых цепей высокого напряжения, потенциал которых относительно корпуса достаточен для срабатывания по рабочей катушке реле, замыкаются блок-контакты реле *PЗ* и удерживающая катушка фиксирует их в замкнутом положении. Сигнал с блок-контактов реле *PЗ* поступает в устройство обработки информации (УОИ). Если тепловоз находился в режиме тяги или электродинамического торможения, то УОИ разбирает тяговую либо тормозную схему и отключает подачу импульсов управления на тиристоры тягового выпрямителя. При этом на дисплее машиниста появляется соответствующее тревожное сообщение.

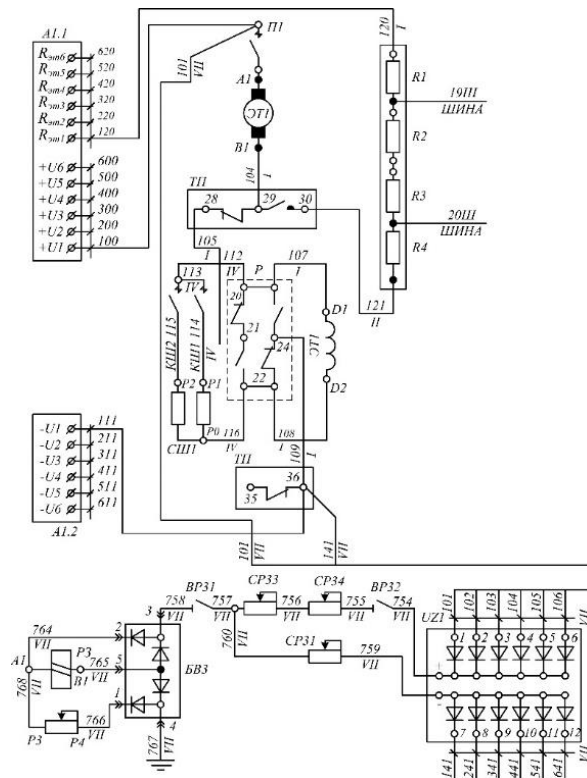


Рисунок 1.7 – Упрощенная принципиальная электрическая схема тепловоза 2ТЭ25КМ

Таким образом, схема включения реле заземления и тип реле на тепловозах нового поколения 2ТЭ25КМ, выпускающихся в настоящее время, остались прежними, как и на тепловозах 2ТЭ116. Следовательно, недостатки системы защиты от пробоев изоляции в цепях высокого напряжения не устранены.

В работе [28] О.И. Новиковым предлагается устройство для защиты от соединения с корпусом двухпроводных силовых цепей тепловоза. На электрической схеме тепловоза тяговый генератор постоянного напряжения 1, подключен к тяговым электродвигателям 2 тепловоза по плюсовой 3 и минусовой 4 двухпроводным цепям, изоляция которых показана резисторами 6 и 7 относительно его корпуса 5 (рис. 1.8).

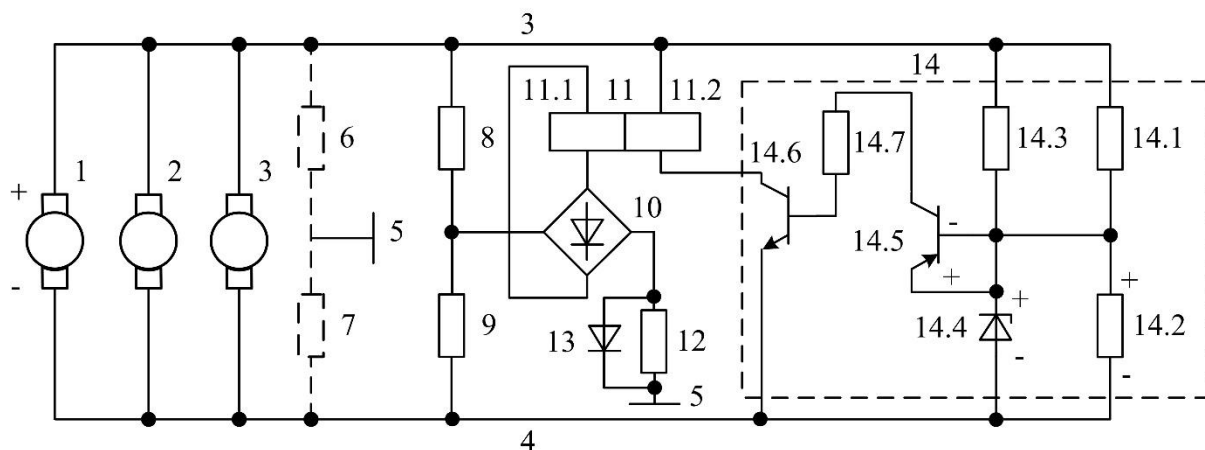


Рисунок 1.8 – Устройство для защиты от соединения с корпусом двухпроводных силовых цепей тепловоза

Устройство защиты содержит делитель напряжения из резисторов 8 и 9, однофазный диодный мост 10, реле 11 с обмотками 11.1 и 11.2, резистор 12, зашунтированный диодом 13 и регулятор тока 14. Регулятор 14 состоит из линейного делителя напряжения на резисторах 14.1 и 14.2, нелинейного делителя напряжения, выполненного из резисторов 14.3 и стабилитрона 14.4, транзисторов 14.5, 14.6 и резистора 14.7. Резисторы 8 и 9 имеют разное сопротивление. Реле 11 имеет непоказанный на схеме контакт, который включен в цепь управления контактором возбуждения тягового генератора. Обмотки 11.1 и 11.2 реле 11 включены согласно.

При недопустимом снижении изоляции цепи 3 (уменьшении сопротивления резистора 6) под действием напряжения обмотки 1 по цепи 1-3-6-5-12-10-11.1-10-9-4-1 протекает ток, который включает реле 11. Если ухудшилась изоляция цепи 4 (уменьшилось сопротивление резистора 7), то в цепи 1-3-8-10-11.1-10-13-5-7-4-1 ток достигает значения, при котором реле 11 включается. Сопротивление изоляции цепей 3 и 4, при котором включается реле 11, имеет одинаковые значения при сопротивлении резистора 12, равном разности сопротивлений резисторов 8 и 9. Когда имеет место одинаковое снижение изоляции цепей 3 и 4 (сопротивление резисторов 6, 7 уменьшается и имеет одинаковую величину), то благодаря разному сопротивлению резисторов 8 и 9 в обмотке 11.1 появляется ток, достаточный для включения реле 11, которое обеспечивает отключение контактора возбуждения тягового генератора, после прекращения возбуждения которого напряжение обмотки 1 снижается до нуля.

Основной недостаток предлагаемого устройства заключается в его сложности. Кроме этого, описанная система защиты обладает общим недостатком, характерным для всех существующих систем контроля и защиты от заземлений тепловозов – отсутствием функции диагностики для определения номера аварийного двигателя в двухпроводной цепи.

1.1.2 Анализ систем защиты на основе мостовых схем с использованием дополнительного источника и без него

В противоаварийной автоматике для контроля состояния изоляции и защиты цепей возбуждения генераторов используется метод на основе мостовой схемы, который заключается в том, что к полюсам защищаемых цепей через одинаковые добавочные сопротивления подключают реагирующий орган, образуемый измерительным прибором и токовым сигнальным реле, через который в случае

неравенства сопротивлений изоляции полюсов защищаемых цепей относительно земли будет протекать ток (рис. 1.9) [29, 30].

Если ток через реагирующий орган превышает допустимое значение, то формируется предупреждающий либо управляющий сигнал на отключение генератора или его перевод на резервное возбуждение. При использовании способа существует вероятность наличия мертвой зоны при симметричном снижении сопротивления изоляции полюсов и возникновении повреждения в средней части обмотки возбуждения, из-за чего не обеспечивается необходимая чувствительность и невозможна высокая точность контроля. Кроме этого, к перечисленным недостаткам следует добавить использование коммутаторов, что усложняет схему, понижает ее надежность.

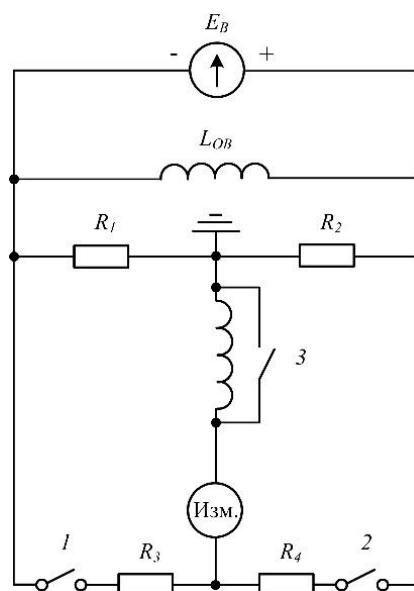


Рисунок 1.9 – Принципиальная схема метода с мостовой схемой без дополнительного источника для контроля состояния изоляции и защиты цепей возбуждения генераторов

При измерении сопротивления изоляции в цепях постоянного тока применяется классический метод «уравновешенного моста» [31]. На этом методе, как правило, основана работа отечественных щитовых мегомметров в сетях постоянного тока. В работе [32] предлагается способ измерения сопротивления изоляции по «методу уравновешенного моста», включающий подключение к полюсам цепи двух

резисторов 7 и 8, соединенных последовательно и включением в место соединения двух резисторов переключателя 6, источника измерительного напряжения 5 и измерителя тока 3 и подключением с другой стороны этой цепи к элементу заземления 10 (рис. 1.10).

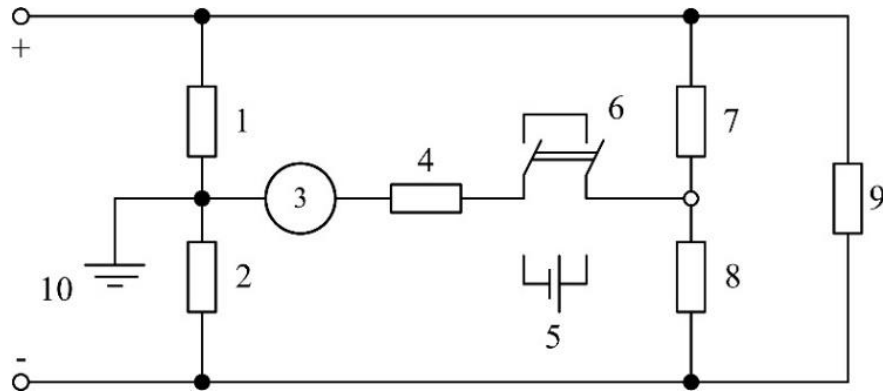


Рисунок 1.10 – Принципиальная схема классического «уравновешенного моста» метода

Обеспечивается измерение тока в цепи источника измерительного напряжения при отсутствии тока небаланса в цепи последовательно включенных резисторов и определение эквивалентного сопротивления изоляции.

Недостаток способа заключается в том, что для точного измерения изоляции необходимо отсутствие тока небаланса в цепи последовательно включенных резисторов. Ток небаланса возникает при несимметричном нарушении изоляции внутри какого-нибудь элемента цепи постоянного тока относительно полюсов. Так, при несимметричном нарушении изоляции внутри элемента цепи постоянного тока 9, имеющего сопротивление и включенного между полюсами, появляется ток небаланса в цепи последовательно включенных резисторов 7 и 8, который искажает величину измеряемого сопротивления изоляции.

В работе [33] авторы предлагают доработать данный способ измерения сопротивления изоляции. В отличие от способа, предлагаемого в работе [32], предлагается включать источник измерительного напряжения 5 то в одной полярности полюсов, то в противоположной полярности полюсов, измеряют два

значения тока соответственно этим положениям источника и определяют сопротивление изоляции.

Определяют, что смещение места несимметричного нарушения изоляции нагрузки относительно положения середины сопротивления нагрузки произошло в сторону положительного полюса, если ток небаланса отрицательный. Определяют, что смещение места несимметричного нарушения изоляции нагрузки относительно положения середины сопротивления нагрузки произошло в сторону отрицательного полюса, если ток небаланса положительный.

Предлагаемая схема включает также подключение к полюсам цепи двух резисторов 7 и 8, соединенных последовательно, включение в место соединения двух резисторов между собой источника измерительного напряжения 5 и измерителя тока 3, соединенных последовательно и подключенных с другой стороны этой цепи к элементу заземления 10 (рис. 1.11).

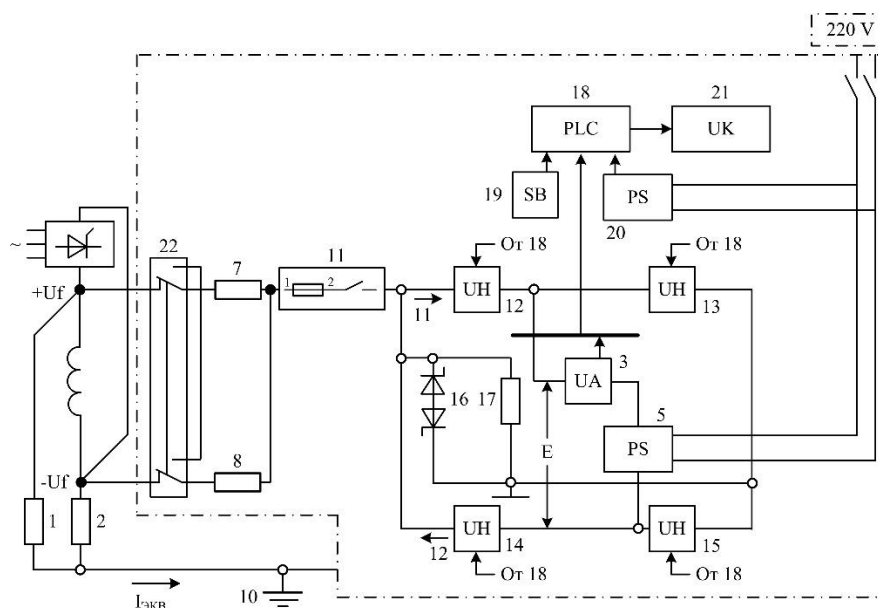


Рисунок 1.11 – Принципиальная схема метода измерения изоляции в цепях постоянного тока с мостовой схемой и дополнительным источником

Способ измерения изоляции в цепях постоянного тока реализуется в устройстве, содержащем: 1 – сопротивление изоляции между + полюсом и землей, 2 – сопротивление изоляции между - полюсом и землей, 3 – датчик тока в измерительной цепи, 5 – источник измерительного напряжения, 7, 8 –

последовательно включенные резисторы, 11 – предохранитель, 12...15 – оптопары для переключения полярности источника измерительного напряжения, 16 – стабилитроны, 17 – нагрузочный резистор (с сопротивлением r_3), 18 – контроллер (для вычисления сопротивления изоляции и управления переключением полюсов источника измерительного напряжения) с модулем аналогового ввода, 19 – кнопка сброса, 20 – блок питания, 21 – сигнальные реле, 22 – разъединительные клеммы, 23 – выключатель автоматический.

Предлагаемый способ позволяет исключить учет тока небаланса в цепи последовательно включенных между полюсами резисторов и этим обеспечивает:

- автоматизацию измерения изоляции исключением процедуры предварительной настройки тока небаланса до нуля;
- повышение точности измерений сопротивления изоляции во всех аварийных ситуациях;
- ускорение процесса измерения изоляции;
- расширение функциональных возможностей реализации данного способа.

1.1.3 Анализ систем защиты с использованием дополнительного источника переменного напряжения

Сопротивление изоляции можно измерять и при помощи наложения на исследуемую цепь переменного напряжения. Способы и устройства, основанные на этом принципе, описаны в работах [34, 35, 36, 32, 37]. Например, в [37] в качестве тестового сигнала используется переменный ток, а сигнал, получаемый с измеряемого сопротивления в виде переменного напряжения, пропорционального сопротивлению фильтруется, выпрямляется и преобразуется в цифровой эквивалент. В работе [34] на исследуемую цепь накладывается переменное напряжение с изменяющейся частотой.

В работах, выполненных в ЦНИИ Судовой Электротехники и Технологии в конце 1980-х годов, был предложен достаточно универсальный способ контроля сопротивления изоляции сетей, изолированных от земли, суть которого заключается в наложении на контролируемую сеть измерительного напряжения сверхнизкой, порядка $2-10 \text{ Гц}$, непромышленной частоты. В ходе экспериментов и на основании расчетов была доказана возможность решения проблемы контроля сопротивления изоляции сетей постоянного и переменного тока емкостью до $10-20 \text{ мкФ}$ при выборе частоты измерительного напряжения порядка 2 Гц . При емкостях сети порядка сотен мкФ этот способ не может быть использован, т. к. частоту измерительного напряжения в таких случаях следовало бы принимать равной $0,01 \text{ Гц}$, что в свою очередь должно потребовать применения чрезвычайно сложных схемных решений. В настоящий момент за рубежом эти способы внедрены в серийное производство. Так, норвежская фирма Autronica создала автоматизированную систему контроля сопротивления изоляции System AJ-1 с генератором оперативного напряжения частотой 5 Гц . Фирма Merlin Gerin (Франция) выпускает приборы Vigilohm System XM-200 с оперативным источником частотой $2,5 \text{ Гц}$.

Большое распространение различные системы с дополнительным источником переменного напряжения получили для контроля сопротивления изоляции относительно корпуса на гидрогенераторах. При емкости цепей возбуждения относительно земли не более $0,5 \text{ мкФ}$ применяется защита, схема которой приведена на рис. 1.12 [38].

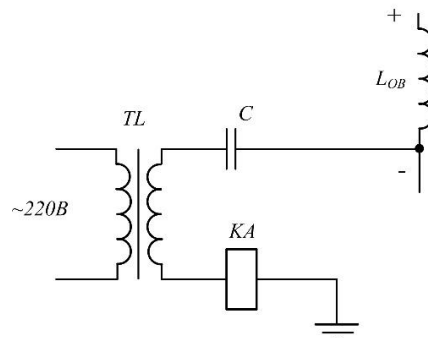


Рисунок 1.12 – Принципиальная схема метода с дополнительным источником переменного напряжения

К цепям возбуждения через конденсатор C , исключаяющий проникновение в комплект защиты постоянного тока от возбудителя, подключается вторичная обмотка промежуточного трансформатора TL , в цепь которого включается максимальное высокочувствительное токовое реле KA . Второй конец обмотки токового реле заземляется через специальную щетку, имеющую электрический контакт с валом ротора.

В нормальном режиме ток через реле не проходит. При замыкании на землю в цепях возбуждения создается контур для прохождения переменного тока через токовое реле, которое срабатывает при превышении током установленного допустимого значения. Принципиальным недостатком такой схемы является недостаточная чувствительность при большом значении емкости цепей возбуждения по отношению к земле. Это объясняется тем, что ток от дополнительного источника, проходя через активное и емкостное сопротивление изоляции на землю, состоит из активной и емкостной составляющих.

Чтобы защита реагировала на изменение активного сопротивления изоляции, на ее измерительный орган должна подаваться только активная составляющая тока. Поэтому в известных устройствах защиты для уменьшения погрешности их работы, обусловленной емкостью цепей, применяют схемы с компенсацией указанной емкости либо с выделением активной составляющей наложенного тока. Один из принципов повышения чувствительности защиты с вспомогательным источником переменного тока осуществлен в серийно выпускаемой защите КЗР-3, нашедшей широкое применение для генераторов с тиристорной и высокочастотной системами возбуждения [9, 38, 39]. Ее действие основано на подключении к полюсу цепей возбуждения дополнительного источника переменного напряжения частотой 25 Гц , выделении и измерении активной составляющей переменного тока, определяемой значением сопротивления изоляции цепей возбуждения относительно земли. При использовании защиты для генераторов с тиристорным и высокочастотным возбуждением необходимо применение сложного частотного фильтра, предотвращающего попадание в защиту напряжения частотой $50 - 150 -$

300 Гц и выше из таких систем возбуждения. Высокие потенциалы, прикладываемые к фильтру как от дополнительного источника, так и от источника возбуждения, являются причиной необходимости выполнения фильтра на пассивных элементах, что определяет плохие массо-габаритные показатели системы защиты.

Для построения систем контроля и защиты генераторов также используется дополнительный источник переменного напряжения [8, 40]. Принцип действия таких систем основан на согласованном по полярности наложении выпрямленного напряжения постороннего источника переменного тока на напряжение ротора (рис. 1.13).

Защита может быть установлена на генераторе с любым типом системы возбуждения, так как ее чувствительность не зависит от емкости цепей возбуждения по отношению к земле. При нормальном состоянии изоляции цепей возбуждения относительно земли ток через реле защиты *РТ* практически не протекает.

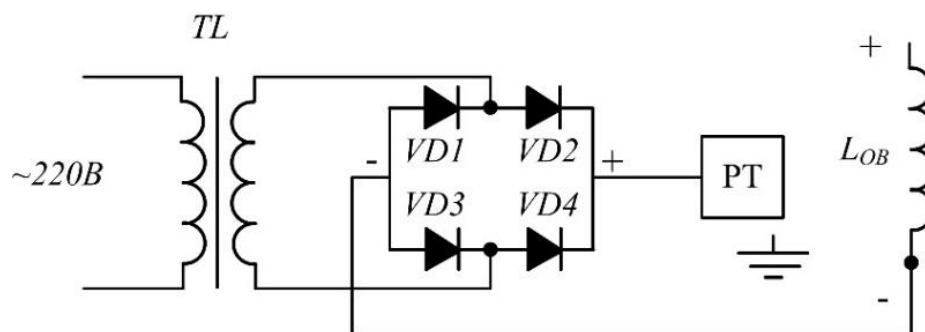


Рисунок 1.13 – Принципиальная схема метода с дополнительным источником переменного напряжения для построения систем контроля и защиты генераторов

При замыкании на землю в обмотке ротора или в любой другой точке цепей возбуждения образуется контур для прохождения постоянного тока через токовое реле. Значение тока через реле будет зависеть от напряжения дополнительного источника и напряжения возбудителя. Поэтому защита имеет минимальную чувствительность при повреждении изоляции на отрицательном полюсе возбуждения генератора. По мере удаления места повреждения от отрицательного

полюса растёт составляющая напряжения ротора, увеличивается ток в $P3$, а следовательно, увеличивается чувствительность защиты.

Метод с использованием дополнительного источника переменного напряжения применяется для защиты агрегатов электровоза переменного тока ВЛ80^С при замыканиях на землю [41–43]. Реле состоит из основания, на котором крепится магнитопровод с катушкой, якорем и блоком контактов (рис. 1.14).

Реализация метода построена на основе системы, состоящей из реле заземления, трансформатора, резисторов.

Двухобмоточное реле заземления РЗ-303 состоит из включающей и удерживающей катушки, на планке над якорем установлен красный сигнальный флажок со своей спиральной пружинкой, который выпадает при срабатывании реле, а восстанавливается вручную.

Включающая катушка реле включена в силовую цепь ТЭД через сопротивления через сопротивления $R37$ и $R38$.

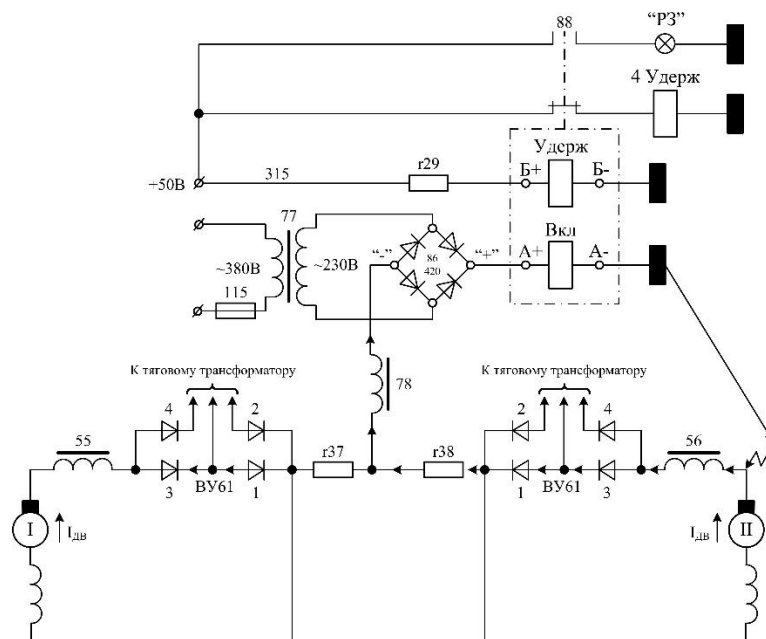


Рисунок 1.14 – Включение реле заземления в схему электровоза ВЛ80^С

Удерживающая обмотка через сопротивление $R29$ включена в низковольтную цепь управления на напряжение 50 В., в которой реле заземления связано с размыкающим контактом удерживающей катушки главного выключателя ГВ,

который разрывает силовую цепь и с замыкающим контактом в цепи красной сигнальной лампы «РЗ». Для питания включающей реле служит трансформатор 77 (380/230 В, $P = 70 \text{ Вт}$, вес 4,6 кг). Переменное напряжение 230 В со вторичной обмотки трансформатора выпрямляется в постоянное напряжение 230 В с помощью выпрямительных мостов 86, 420. Плюс «+» моста через включающую обмотку РЗ подключен к корпусу, а минус «-» моста через токоограничивающие сопротивления $R37$ и $R38$ (два резистора по 820 Ом, включенные между собой параллельно) подключен к силовым шинам тяговых двигателей.

В штатном режиме вся силовая схема питания ТЭД от корпуса изолирована (сопротивление изоляции не менее 1,2 мОм). Поэтому нет замкнутой цепи, ток по включающей обмотке не протекает, и реле заземления отключено.

Если произойдет пробой изоляции в схеме питания ТЭД, например, в сглаживающем реакторе 56, то тогда образуется замкнутая цепь для протекания тока по включающей обмотке реле 88: от «+» моста 86 по включающей обмотке 88, по корпусу, через поврежденную изоляцию, сглаживающий реактор 56, плечи ВУ61, сопротивление $R38$, сглаживающий дроссель 78 к «-» моста 86. Величина этого тока по включающей обмотке реле достигает $0,2 \div 0,4 \text{ А}$. Тогда под влиянием общего магнитного потока от включающей обмотки якорь РЗ 88 включается, кроме этого размыкающий контакт реле в цепи удерживающей катушки ГВ размыкается.

Таким образом, схема включения реле обладает большой сложностью, а судя то току срабатывания, равному $0,2 \div 0,4 \text{ А}$, еще и большим временем срабатывания.

Контроль замыкания на корпус цепей питания тяговых двигателей магистральных электровазов переменного тока 2ЭС5К (3ЭС5К) (2,3 - количество секций, Э – грузовой электроваз, С – секционный, К – коллекторный тяговый привод, предназначен для вождения грузовых поездов. Заменяемая серия - электровазы грузовые ВЛ80 всех типов) осуществляет реле заземления KV3 (первая тележка) и KV1 (вторая тележка). Реле имеют включающую и удерживающую катушки. К контролируемым цепям включающая катушка реле подключена через резисторы $R5$, $R6$ и разъединитель QS7 блоков A11 и A12 (рис. 1.15) [43-45].

Напряжение 50 В на удерживающие катушки реле $KV3$ и $KV1$ подается от контроллера машиниста $SM1$ от провода $H9$ через резисторы $R94$ и $R95$.

На включающие катушки реле напряжение подается (при замыкании на корпус) от обмотки собственных нужд тягового трансформатора $T5$ через понижающий трансформатор $T9$.

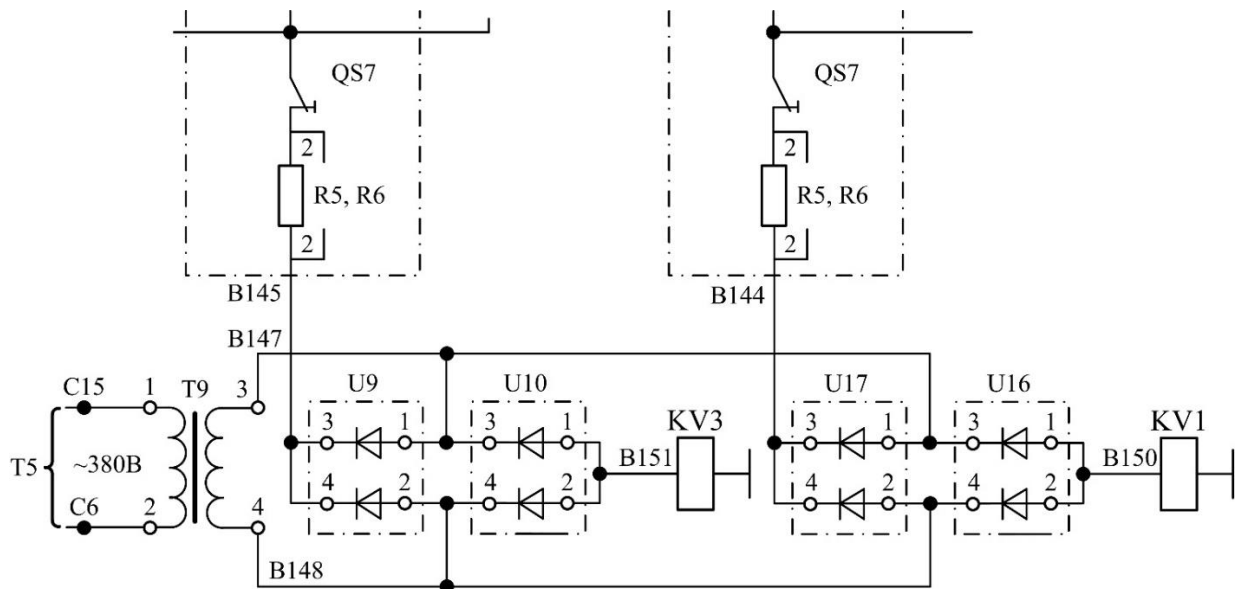


Рисунок 1.15 – Включение реле заземления в схему электровозов 2ЭС5К (3ЭС5К)

Разъединители $QS7$ блоков $A11$ и $A12$ предназначены для обеспечения возможности отключения реле от замкнутой на корпус цепи с целью сохранения работоспособности электровоза.

При замыканиях на корпус реле $KV3$ (первая тележка) и $KV1$ (вторая тележка) включается, размыкая цепь питания катушки удерживающего электромагнита главного выключателя $QF1$, при этом загораются индикаторы $P3$ и $ГВ$ на блоке сигнализации пульт машиниста головной (хвостовой) секции. Аналогичная система установлена на пассажирских электровозах переменного тока ЭП1М [46, 47].

1.1.4 Анализ систем защиты с использованием дополнительного источника постоянного напряжения

Метод наложенного постоянного напряжения широко применяется при снятом рабочем напряжении. Измерительный прибор в виде переносного или щитового мегомметра содержит источник постоянного напряжения и миллиамперметр. Один полюс прибора (обычно положительный) подключается к токоведущей части, а второй – корпусу. Для повышения достоверности измерений измерительное напряжение выбирают близким к рабочему напряжению контролируемой цепи.

В работах [48, 49] описаны методы, сущность которых заключается в том, что на объект контроля накладывают постоянный ток от источника постоянного тока, подключенного одним полюсом к одной из фаз контролируемой сети, а другим - на корпус, и определяют с помощью датчиков напряжения (тока) направления и величины токов в линиях контролируемой сети, при помощи анализирующего устройства определяют алгебраическую сумму токов в линиях отдельных элементов сети и по алгебраической сумме судят о величине сопротивления изоляции элемента сети.

Эти методы можно также использовать в цепях переменного тока под рабочим напряжением, как описано в работах [50, 51], авторы которых предлагают метод измерения сопротивления изоляции элементов, многофазных электрических сетей переменного тока под рабочим напряжением, где на объект контроля накладывают постоянный ток от источника постоянного тока, подключенного одним полюсом к одной из фаз контролируемой сети, а другим – на корпус, и определяют с помощью датчиков напряжения (тока) разность длительностей положительной и отрицательной полуволн напряжения помехи в линии элемента, умножают ее на величину переменного тока в данной линии и по полученному произведению судят

о величине тока в контролируемой линии, которая обратно пропорциональна величине сопротивления изоляции.

В работе [52] предлагается изобретение, которое относится к электрооборудованию транспортных средств различного назначения (тепловозы, дизель-поезда, пассажирские вагоны, автомобильный и водный транспорт) и предназначено для защиты от соединения с корпусом двухпроводных электрических цепей (рис. 1.16).

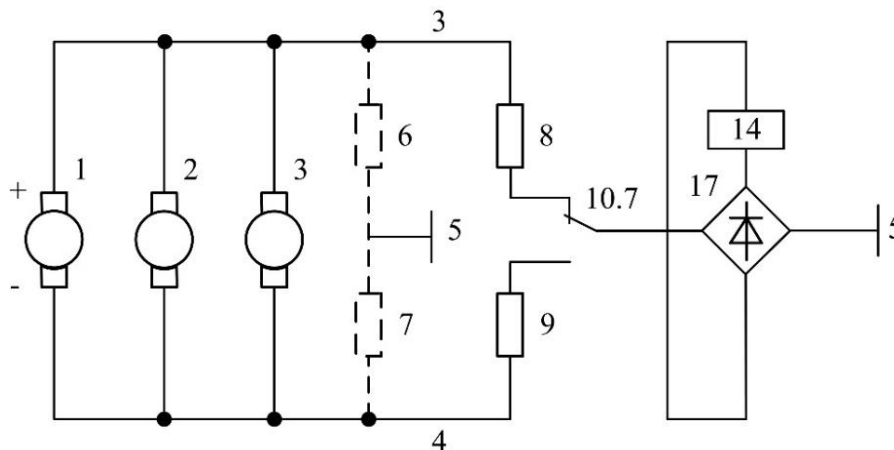


Рисунок 1.16 – Принципиальная схема устройства для защиты от соединения с корпусом двухпроводных электрических цепей

Устройство, состоящее из блока фиксации снижения сопротивления изоляции электрических цепей, сигнализатора, коммутатора, выпрямителя и резисторов, дополняют источником постоянного напряжения. При этом в блоке фиксации используют три реле и кнопку с размыкающим контактом, коммутатор выполняют с дополнительными размыкающим и замыкающим контактами, сигнализатор выполняют в виде двух световых индикаторов, а в качестве выпрямителя используют однофазный диодный мост. В качестве источника постоянного напряжения используется аккумуляторная батарея транспортного средства.

К недостаткам устройства следует отнести сложное исполнение и недостаточную функциональную эффективность; данный недостаток является следствием того, что функциональные блоки устройства содержат большое количество элементов.

Среди методов, связанных с наложением на исследуемые сети постоянного напряжения, наиболее перспективными на данный момент считаются методы, основанные на использовании в качестве оперативного напряжения двухполярного напряжения постоянного тока и подачи на исследуемую цепь двухступенчатого однополярного напряжения [32].

За рубежом широко используется метод наложения на контролируемую сеть двухполярного напряжения постоянного тока. Метод заключается в том, что в измерительную цепь включают измерительный источник стабилизированного напряжения (например, 30 В) и после завершения переходного процесса измеряют силу тока, протекающего по измерительной цепи. Замеренная величина и зафиксированное направление тока запоминаются. После этого меняют полярность измерительного напряжения и снова производят фиксацию установившихся величины и направления тока в измерительной цепи. Алгебраическая сумма измеренных токов позволяет однозначно определить величину сопротивления изоляции.

Величину измерительного напряжения (30 В) выбирают на порядок меньше напряжения контролируемой сети (300 В) с тем, чтобы не нарушать условий электробезопасности сети. Силу тока в измерительной сети, обусловленного подключением измерительного напряжения, при любых значениях сопротивления изоляции выбирают меньше 30 мА. Фирма Bender (Германия), выпускает прибор IRDH 265-4 основанный на методе подобном описанному выше.

1.1.5 Анализ систем защиты на основе емкостного метода

Как уже отмечалось в разделе 1.1.3, использование емкости изоляции при контроле ее состояния нашло применение в методе с дополнительным источником переменного напряжения для цепей возбуждения гидрогенераторов.

Методы, основанные на наложении на контролируемую цепь переменного напряжения, описанные в работах [34, 35, 36, 37] также используют емкость.

В работах [53, 54, 55, 56] описан емкостной метод измерения сопротивления изоляции на корпус. Автор предлагает такой способ измерения электрического сопротивления изоляции в электрических жгутах и кабелях сетей, находящихся под напряжением постоянного тока, который применяется при контроле сопротивления изоляции электрических цепей электро- и радиотехнических изделий (рис. 1.17).

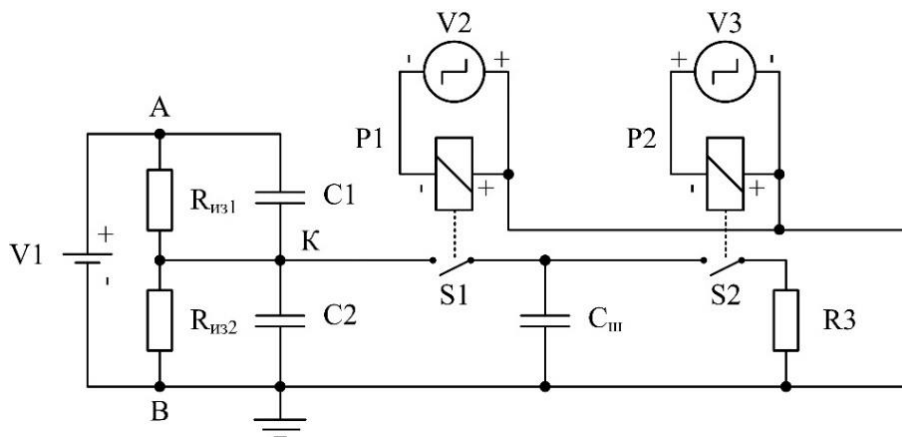


Рисунок 1.17 – Схема емкостного метода измерения сопротивления изоляции на корпус

Способ измерения электрического сопротивления изоляции цепей, находящихся под напряжением постоянного тока, заключается в том, в самом начале измеряют потенциалы точек А и В по отношению к точке К (корпуса). После этого шунтируют точку А или В (в зависимости от того, какой потенциал выше) конденсатором $C_{ш}$ известной емкости, через контакт S_1 , предварительно разомкнув контакт S_2 . Измеряют параметры переходного процесса в точках шунтирования, и по этим параметрам вычисляют значения паразитных емкостей C_1 и C_2 и сопротивлений изоляций цепей по отношению к корпусу $R_{из1}$ и $R_{из2}$.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет упростить реализацию устройств для измерения электрического сопротивления изоляции и обеспечить гальваническую развязку измерительных цепей.

В данной диссертации предлагается метод контроля и защиты от замыканий на корпус в силовых цепях тепловозов, который построен на основе рассмотренных выше методов: с использованием мостовой схемы, источника переменного напряжения и с использованием емкостного метода. На принципиальной схеме устройства, реализующего предлагаемый метод, предлагается использовать параметры схемы замещения изоляции обмоток тяговых электродвигателей, такие как емкость и сопротивление [57].

1.2 Постановка цели и задач диссертационной работы

Последствиями повреждения изоляции на современных магистральных тепловозах являются ежегодно происходящие случаи пожаров, что свидетельствуют о неэффективности существующих систем защиты силовых цепей от пробоя на корпус и необходимости поиска иных методов их построения.

Традиционный метод определения пробоя изоляции в цепях тепловозов основных серий, который основан на измерении напряжения в любой точке плюсовых или минусовых цепей высокого напряжения относительно корпуса, позволяет установить факт наличия аварии, но не обнаружить номер тягового электродвигателя, в каком она произошла, поиск аварийного двигателя возможен только путем поочередного их отключения и включения тяговой нагрузки, что приведет к остановке поезда в пути следования и экономическим потерям по причине задержки. Следует также отметить, что в качестве реле заземления, которое является основным элементом системы защиты, устанавливается двухкатушечное реле РМ-1110, которое обладает большой инерционностью и как следствие, большим временем срабатывания.

Установлено, что методы, использующие наложение на объект контроля постоянного тока, либо переменного напряжения, эффективны, однако они могут

применяться только в цепях со снятым рабочим напряжением, либо в цепях с переменным напряжением и не применимы в цепях с постоянным рабочим напряжением.

Определено, что методы классического уравновешенного моста, а также методы, использующие наложение на объект контроля измерительного напряжения сверхнизкой, порядка 2-10 Гц, не промышленной частоты, а также мостовой метод, неприменимы в системах с быстро изменяющимся напряжением в сети, например силовой цепи тепловозов.

Подводя итог проведённому анализу, можно констатировать, что на современном этапе развития отечественного тепловозостроения разработка метода и системы защиты от пробоя изоляции на корпус с целью повышения быстродействия и расширения возможностей диагностирования является актуальной задачей. Предпочтительным вариантом построения системы защиты является использование параметров изоляции силовой цепи тепловоза.

Целью исследования является разработка системы защиты от пробоя на корпус в силовых цепях тепловозов на основе использования изменения электрической емкости и сопротивления изоляции.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Исследовать процессы в неоднородной изоляции в штатном и аварийном режимах силовой цепи тепловоза на основе созданных математических и компьютерных моделей. Определить диагностические параметры для оценки наступления пробоя в изоляции силовой цепи тепловоза.
2. Разработать новое схемотехническое решение для системы контроля и защиты электрических цепей тепловозов от пробоя на корпус.
3. Провести экспериментальное исследование для проверки и подтверждения достоверности полученных результатов и адекватности созданных математических и компьютерных моделей.
4. Провести технико-экономическое исследование, позволяющее экономически обосновать предложенное техническое решение.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОЙ ЦЕПИ ТЕПЛОВОЗА С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

2.1 Выбор методики исследования

Современный уровень развития вычислительной техники и программного обеспечения предоставляет для создания математических моделей достаточно широкий спектр инструментов. Среди возможных путей моделирования электромагнитных процессов в системе следует выделить два основных направления: программирование модели на алгоритмическом языке высокого уровня и использование пакетов прикладных программ, ориентированных на решение специализированных задач.

При программировании математической модели на алгоритмическом языке, например, Фортран или Паскаль [58], необходимо вначале описать расчетную схему моделируемого устройства системой уравнений (для устройств тягового электропривода это, как правило, будут дифференциальные уравнения первого или второго порядка в обыкновенных производных). Затем выполняют численное интегрирование полученной системы, результатом которого будут искомые кривые переходных процессов.

Одними из самых существенных недостатков программирования следует считать большую трудоемкость подготовки модели к расчету, т. е. составление расчетных схем и написание систем дифференциальных уравнений. Кроме того, серьезную сложность представляют даже незначительные изменения математической модели, поскольку при этом возникает необходимость заново составлять расчетные схемы, дифференциальные уравнения и саму программу решения.

Исходя из этого, в данной работе, учитывая достаточную сложность математической модели, использование языков программирования было признано нецелесообразным.

Другим способом моделирования электромагнитных процессов является использование пакетов прикладных программ для электротехнических расчетов. К числу таких пакетов относятся, в частности, пакет «Элтран», разработанный специалистами Саранского завода, и такие современные программные продукты, как пакет DesignLab фирмы Microsim [59], пакет OrCAD фирмы Cadance [60] и пакет MatLab фирмы Mathworks [61].

Основным недостатком отечественного пакета «Элтран» является ограничение на сложность модели. Пакеты DesignLab и OrCAD очень удобны для расчетов электрических схем. Они не требуют написания дифференциальных уравнений, а исходной информацией о модели для них является графическое изображение электрической схемы, создаваемое в их встроенном редакторе. Помимо этого, указанные пакеты содержат большой набор библиотек готовых моделей электрических устройств (тириستоров, транзисторов, трансформаторов и др.). Все это делает данные пакеты практически незаменимыми при решении ряда электротехнических задач и при проектировании печатных плат.

Однако и эти пакеты имеют ряд недостатков, не позволяющих использовать их в данной работе. В первую очередь, такими недостатками являются:

1) «внутренняя закрытость», т. е. невозможность передачи данных в модель из других программ и значительная сложность передачи результатов расчетов в другие программы для обработки. Для обработки результатов расчетов и перенастройки параметров модели при этом приходится пользоваться только инструментарием, входящим в состав пакета, а в ряде случаев этого оказывается недостаточно;

2) скрытость от пользователя методики расчетов (метода интегрирования);

3) невозможность выбирать метод интегрирования для разных моделей. В ряде случаев от выбранного метода может существенно зависеть получаемый результат,

а некоторые модели предлагаемым в данных пакетах методом не могут быть рассчитаны вовсе (система при интегрировании «расходится»).

Указанных недостатков лишен пакет MatLab, который в то же время сочетает в себе многие из рассмотренных выше достоинств пакетов DesignLab и OrCAD.

Пакет MatLab был создан компанией Mathworks более двадцати лет назад. В настоящее время MatLab является мощным универсальным средством решения задач, возникающих в различных областях человеческой деятельности. Спектр проблем, исследование которых может быть осуществлено при помощи MatLab, охватывает: матричный анализ, обработку сигналов и изображений, задачи математической физики, оптимизационные задачи, обработку и визуализацию данных, работу с картографическими изображениями, нейронные сети, нечеткую логику и многие другие. Специализированные средства собраны в пакеты, называемые ToolBox. В состав многих ToolBox входят приложения с графическим интерфейсом пользователя, которые обеспечивают быстрый и наглядный доступ к основным функциям. Пакет Simulink, поставляемый вместе с MatLab, предназначен для интерактивного моделирования нелинейных динамических систем, состоящих из стандартных блоков.

Огромным преимуществом MatLab является открытость кода, что дает возможность опытным пользователям разбираться в запрограммированных алгоритмах и, при необходимости, изменять их. Впрочем, разнообразие набора функций MatLab и ToolBox допускает решение большинства задач без каких-либо предварительных модификаций.

MatLab прекрасно интегрируется с Microsoft Word и Excel. Связь MatLab и Word обеспечивает возможность написания в редакторе Word интерактивных документов, так называемых М-книг, основанных на специальном шаблоне. Пользователь, работающий с М-книгой, может запускать блоки команд MatLab непосредственно из документа Word, причем результат выполнения команд отображается в М-книге. Данное средство прекрасно подходит для создания

отчетов и учебных пособий, поскольку позволяет дополнить документ примерами и результатами расчетов.

Надстройка Excel Link, поставляемая вместе с MatLab, существенно расширяет возможности Excel, обеспечивая доступ пользователя к функциям MatLab и ToolBox. Подготовка данных осуществляется непосредственно в электронных таблицах, а обращение к функциям производится либо из ячеек рабочего листа, либо в модуле, написанном на Visual Basic.

Символические вычисления в MatLab основаны на библиотеке, являющейся ядром пакета Maple. Решение уравнений и систем, интегрирование и дифференцирование, вычисление пределов, разложение в ряд и суммирование рядов, поиск решения дифференциальных уравнений и систем, упрощение выражений - вот далеко не полный перечень возможностей MatLab для проведения аналитических выкладок и расчетов. Поддерживаются вычисления с произвольной точностью. Пользователи, имеющие опыт работы в Maple, могут напрямую обращаться ко всем функциям данного пакета (кроме графических) и вызывать процедуры, написанные на встроенном языке Maple.

MatLab обладает хорошо развитыми возможностями визуализации двумерных и трехмерных данных. В MatLab реализованы классические численные алгоритмы решения уравнений, задач линейной алгебры, нахождения значений определенных интегралов, интерполяции, решения дифференциальных уравнений и систем.

Простой встроенный язык программирования позволяет легко создавать собственные алгоритмы. Простота языка программирования компенсируется огромным множеством функций MatLab и ToolBox.

Данное сочетание позволяет достаточно быстро разрабатывать эффективные программы, направленные на решение практически важных задач.

Объектно-ориентированный подход, заложенный в основу MatLab, обеспечивает современную эффективную технологию программирования. Программный интерфейс приложения (API) реализует связь среды MatLab с программами, написанными на языке Си или Фортран. Библиотека программного

интерфейса позволяет вызывать имеющиеся модули Си или Фортрана из среды или программ MatLab, обращаться к функциям MatLab из программ на Си или Фортране, осуществлять обмен данными между приложениями MatLab и другими программами, создавать приложения типа клиент-сервер.

В данной работе использовался, главным образом, пакет Simulink [62], являющийся составной частью пакета MatLab. Этот пакет позволяет моделировать электрические системы путем составления принципиальных и (или) структурных схем (в том числе, содержащих передаточные функции элементов), подобно тому, как это сделано в DesignLab и OrCAD. И, хотя исходный набор элементов в библиотеках Simulink значительно меньше, чем в заказанных пакетах, этот недостаток не вызывает существенных трудностей, поскольку у пользователя имеется возможность самостоятельно разрабатывать и добавлять в библиотеки необходимые элементы. Кроме того, Simulink связан с основным ядром MatLab, что позволяет для обработки результатов, настройки и оптимизации модели использовать мощнейшие математические возможности MatLab, описанные выше. Имеется также возможность передачи данных внешним программам (не входящим в состав MatLab) и получения из них данных. Наконец, пользователь имеет возможность изменять метод интегрирования системы, выбирая тот из них, который отвечает для решения задачи наилучшим образом.

В качестве еще одного преимущества пакета Simulink следует указать то, что в нем допускается моделирование систем как при помощи составления принципиальных электрических схем, так и при помощи структурных схем, принятых в системах автоматики. Структурная схема при этом составляется из динамических звеньев, каждое из которых задается передаточной функцией $W(p)$ в комплексной форме (где $p = \sigma + j\omega$). Таким образом, при моделировании становятся применимы все методы, разработанные ранее для аналоговых вычислительных машин (АВМ), и все имеющиеся для таких машин программные наработки могут быть использованы в полном объеме и без их модификации для современных ПЭВМ.

Все отмеченные возможности позволили сделать вывод о целесообразности применения пакета MatLab в данной работе для расчетов электромагнитных процессов и моделирования систем защиты от замыканий на корпус. Именно этот пакет был выбран в качестве основного рабочего инструмента.

2.2 Анализ схем замещения силовых цепей локомотивов

Наиболее просто и наглядно процессы изменения токов и напряжений в силовой цепи можно показать на схеме ее замещения. Схемы замещения силовой цепи не только тепловозов, но электровозов строились и рассматривались многими авторами.

В работе [63] при разработке математической модели силовой цепи электровоза ЧС-2 для анализа электромагнитных процессов, протекающих в тяговом электродвигателе последовательного возбуждения *AL4846eT*, автором была разработана схема замещения двигателя, которая показана на рис. 2.1 и содержащая только сосредоточенные элементы: активные сопротивления, индуктивности и источник ЭДС.

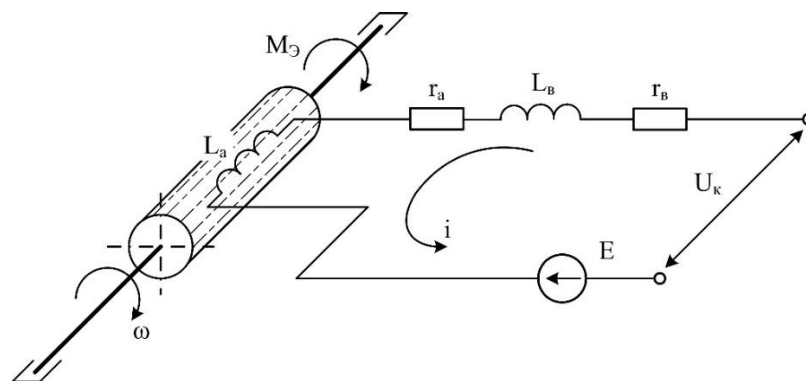


Рисунок 2.1 – Схема замещения тягового двигателя последовательного возбуждения *AL4846eT* электровоза ЧС-2

При разработке математической модели были приняты следующие допущения:

- при моделировании переходных процессов в обмотках возбуждения ТЭД не учитываются вихревые токи;
- разброс магнитных характеристик ТЭД и разброс диаметров бандажей колесных пар не учитываются.

Такое упрощение позволило автору решить задачи, связанные с разработкой системы автоматического регулирования скорости электровоза.

Однако для получения процессов, наиболее близких к процессам на реальном электровозе, модель тяговых двигателей должна учитывать ряд особенностей, свойственных тяговым машинам. В частности, к таким особенностям следует отнести нелинейную магнитную характеристику, нелинейную зависимость индуктивностей обмоток от протекающего по ним тока и влияние на переходные процессы вихревых токов, возникающих в стали магнитных полюсов [64, 65, 66]. На рис. 2.2 представлена расчетная схема замещения тягового электродвигателя НБ520.

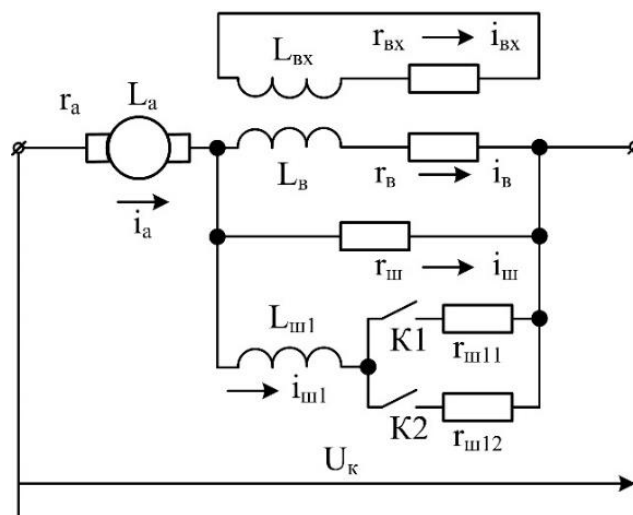


Рисунок 2.2 – Схема замещения тягового двигателя последовательного возбуждения НБ520 электровоза ЭП1

В приведенной схеме присутствуют также активные сопротивления, индуктивности, источник напряжения на зажимах. Контур, содержащий элементы

$L_{\text{вх}}$ и $r_{\text{вх}}$ служит для учета вихревых токов, вследствие этого математическая модель была дополнена уравнениями, учитывающими их действие. При этом использовалась методика, предложенная М.З. Жицем [67]. Кроме этого, при моделировании учтена динамическая индуктивность, которая определена в соответствии с [68].

Для оценки условий работы двигателей электровоза при разных способах возбуждения в переходных режимах и влияния на их протекание параметров силовой цепи в работе [69] автором выполнено математическое моделирование данных процессов на примере электровоза ВЛ10 (рис. 2.3).

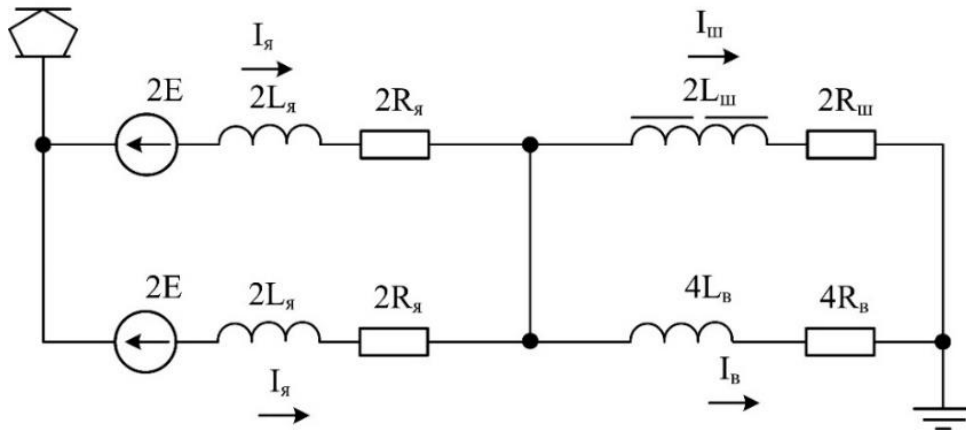


Рисунок 2.3 – Схема замещения силовой цепи электровоза ВЛ10

В схеме замещения также присутствуют только индуктивности и резисторы. Постоянные времени инерционных звеньев, введенные в систему дифференциальных уравнений, которая положена в основу математической модели силовой цепи, позволили учитывать влияние вихревых токов на изменение магнитного потока машины.

В работе [70] автор предлагает на основании численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в силовой цепи электровоза, методику получения информации, необходимой для формирования требований к силовому оборудованию испытательной станции тяговых электродвигателей. Структура расчетной схемы замещения, показанная на рис. 2.4, включает: индуктивности дросселя, компенсационной обмотки,

дополнительных полюсов, обмоток якоря и возбуждения, а также индуктивность шунта, активные сопротивления, ЭДС.

В результате решения системы уравнений получены графики изменения тока якоря ТЭД в переходных режимах, влияние вихревых токов при этом не учитывалось.

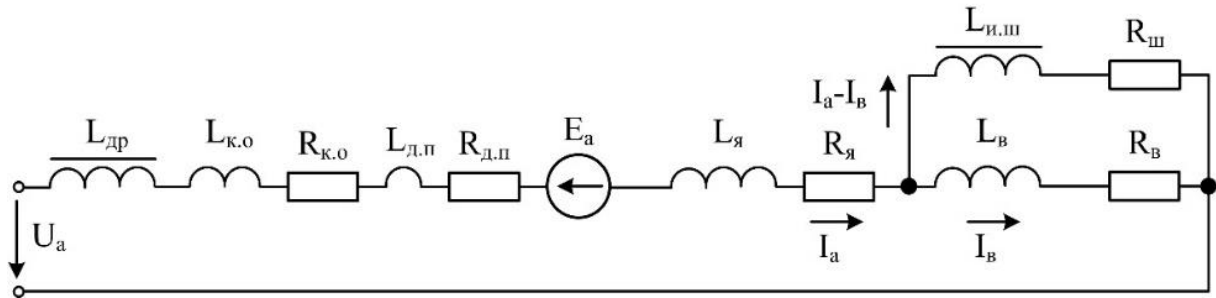


Рисунок 2.4 – Схема замещения силовой цепи электровоза ВЛ-10 с тяговыми двигателями ТЛ-2К1

Для анализа переходных процессов изменения токов и напряжений, вызванных скачком напряжения в обмотках тяговых двигателей электровозов серии 2ЭС6 в режиме тяги, автором разработана схема замещения силовой цепи электровоза, для параллельной ветви из двух последовательно включенных тяговых двигателей, которая показана на рис. 2.5 [71].

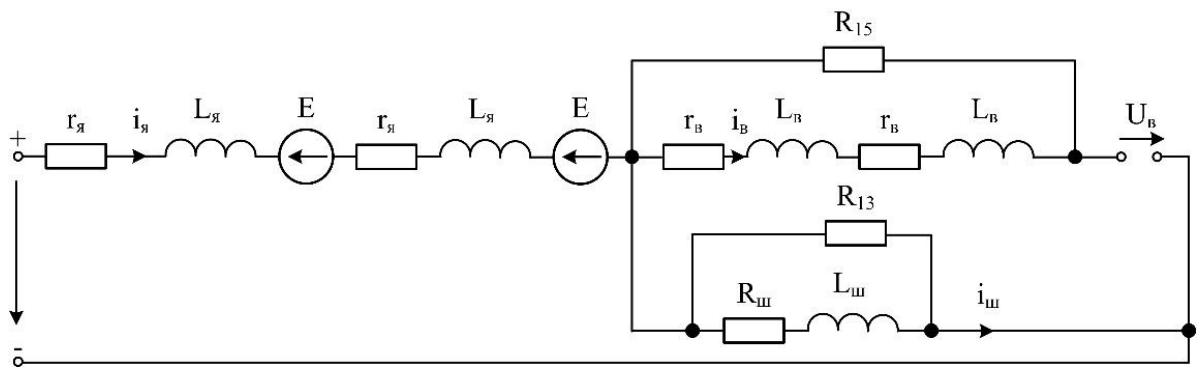


Рисунок 2.5 – Схема подключения тяговых двигателей электровоза 2ЭС6

При анализе переходных режимов необходимо учитывать влияние на них вихревых токов, которые затягивают изменение основного магнитного потока в магнитопроводе ТЭД и способствуют возникновению затяжных бросков тока

якоря. Так же, как и в работе [69], вихревые токи учтены путем введения постоянной времени электрических переходных процессов в контуре вихревых токов.

В работе [72] автором выработаны рекомендации по улучшению тяговых свойств магистрального тепловоза 2ТЭ25К с индивидуальным регулированием тяговых двигателей ЭДУ133 постоянного тока последовательного возбуждения. Для моделирования тягового двигателя с учетом вихревых токов автором применен упрощенный подход, при котором реальный контур вихревых токов заменяют фиктивным (с числом витков W_0 и сопротивлением R_0), расположенным по продольной оси β обобщенной машины (рис. 2.6) и связанным с потоком Φ по данной оси коэффициентом связи, равным единице.

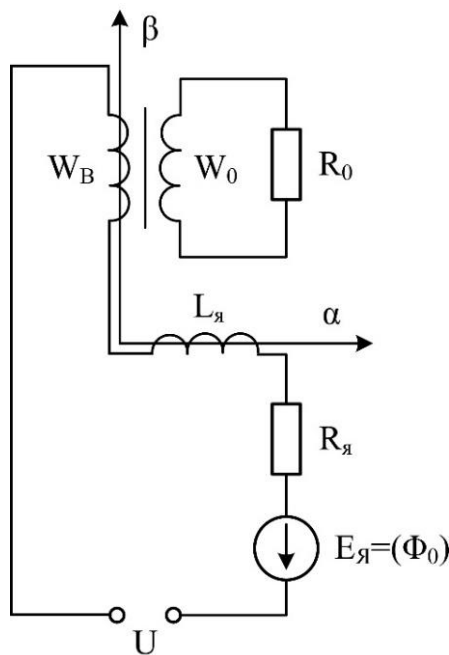


Рисунок 2.6 – Схема замещения тягового электродвигателя ЭДУ133 последовательного возбуждения

При этом в фиктивном контуре течет ток I_0 , обмотки якоря и возбуждения двигателя обтекаются одним и тем же током $I_{\text{я}}$ (ослабление поля в данном случае не учитывается). В цепь якоря входят суммарная индуктивность $L_{\text{я}}$ и суммарное сопротивление $R_{\text{я}}$, включающие соответственно индуктивности и сопротивления обмоток якоря и дополнительных полюсов, а также собственная индуктивность

обмотки возбуждения $L_{\text{в}}$, сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}}$ и ЭДС двигателя $E_{\text{я}}$.

Таким образом, во всех упомянутых научных работах при построении схемы замещения силовой цепи локомотивов емкостная составляющая изоляции обмоток ТЭД не учитывается, хотя она достаточно велика даже в холодном состоянии изоляции.

Основными элементами представленных схем замещения являются источники напряжения, резисторы, индуктивности, параметры изоляции при этом не учитывались. Однако указанных параметров недостаточно для описания физических процессов, сопровождающих ослабление диэлектрической прочности изоляции и возможностей построения простых и эффективных систем обнаружения и защиты от ее нарушения.

Параметры схемы замещения корпусной изоляции тяговых электродвигателей (ТЭД), в отдельности не включённые в схему замещения силовой цепи локомотива, исследовались авторами и представляют собой трехзвенную RC цепочку, представляющую три основных компонента: слюду, подложку и пропитывающий компаунд [73, 74, 75, 76]. Следует отметить, что такая схема замещения системы изоляции была разработана для описания математической модели с целью исследования абсорбционных процессов и проведения диагностики. Для оценки диэлектрической прочности, емкостные и обмоточные свойства изоляции могут быть представлены схемой, состоящей из однозвенной RC цепочки.

Первоначально, в рамках работы над диссертацией с целью решения поставленных задач, объектом исследования была выбрана силовая цепь электровоза ВЛ10У, для которой разработана схема замещения (рис. 2.7), учитывающая емкость и сопротивление изоляции обмоток якоря и компенсационных обмоток C_2 и R_5 , и цепи главных полюсов C_1 и R_2 .

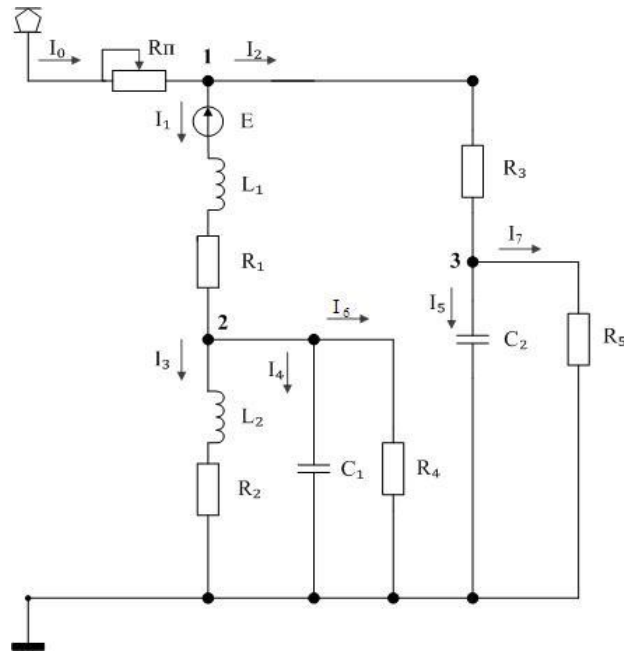


Рисунок 2.7 – Схема замещения силовой цепи электровоза ВЛ10У

В результате решения системы уравнений на ПЭВМ с применением пакета программ *MatLab* для различных схем соединений ТЭД и состояний изоляции тяговых силовых цепей и режимов, получены графики переходных процессов в силовой цепи, а также классические графики заряда - разряда конденсаторов, представляющих изоляцию обмоток в разработанной схеме замещения [77-81]. Так как наибольший интерес при моделировании представляли процессы в изоляции обмоток тяговых электродвигателей, влияние вихревых токов не учитывалось.

2.3 Разработка схемы замещения и математической модели силовой цепи тепловоза с учетом параметров изоляции

В 2015 году на Брянском машиностроительном заводе начат серийный выпуск магистральных тепловозов нового поколения под именем 2ТЭ25КМ. На магистральном тепловозе используется силовая электрическая схема с

индивидуальным регулированием осей (рис. 2.8, цепи ослабления поля на схеме не показаны).

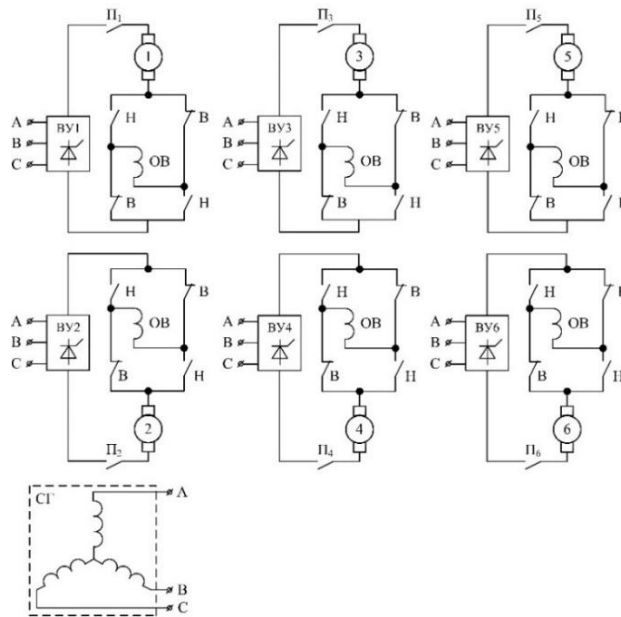


Рисунок 2.8 – Расчетная силовая схема тепловоза 2ТЭ25К с индивидуальным регулированием осей

Питание каждого двигателя ЭДУ133 последовательного возбуждения производится от собственного управляемого выпрямителя (ВУ1 - ВУ6).

Модель электрической части должна быть универсальной с точки зрения рассчитываемых схем. На рис. 2.9 представлена схема силовой электрической части привода оси для тягового электропривода (ТЭП) с двигателем постоянного тока (ДПТ) последовательного возбуждения.

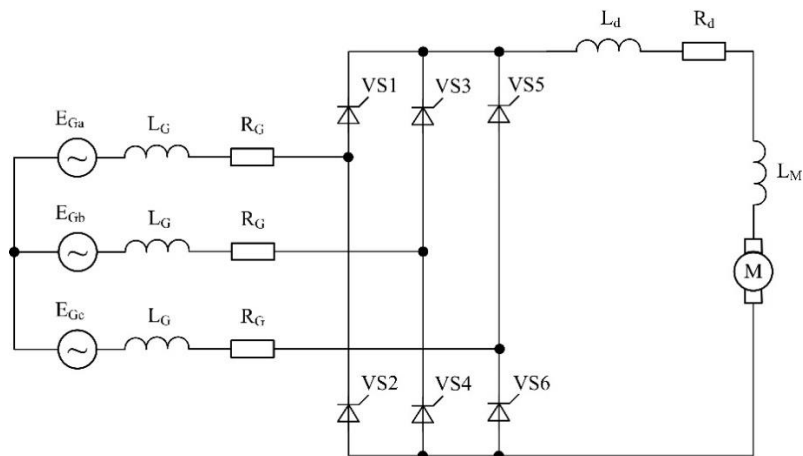


Рисунок 2.9 – Схема силовой электрической части ТЭП

В схему входят: синхронный генератор, представленный источником трехфазного напряжения с фазными э.д.с. E_{Ga} , E_{Gb} , E_{Gc} и заданными внутренними активными сопротивлениями (R_G), а также индуктивностями (L_G), трехфазный мостовой выпрямитель представлен диодами $VD1...VD6$, индуктивный фильтр представлен индуктивностью L_d и сопротивление R_d , далее, в схему входит двигатель последовательного возбуждения M с обмоткой возбуждения L_m .

В данной работе для исследования электрических процессов в силовой цепи тепловозов разработана схема замещения (рис. 2.10). Особенностью схемы и отличием от аналогичных является учет электрической емкости (C_1 и C_2) и сопротивления изоляции (R_4 и R_5) обмоток якоря и полюсов тяговых электродвигателей (ТЭД), а также сопротивления силовых кабелей (R_1), емкостью которых решено пренебречь. Так как современный магистральный тепловоз 2ТЭ25КМ приводится в движение шестью тяговыми двигателями, включенными на электрической схеме параллельно, схема замещения для упрощения построена для одного двигателя [82].

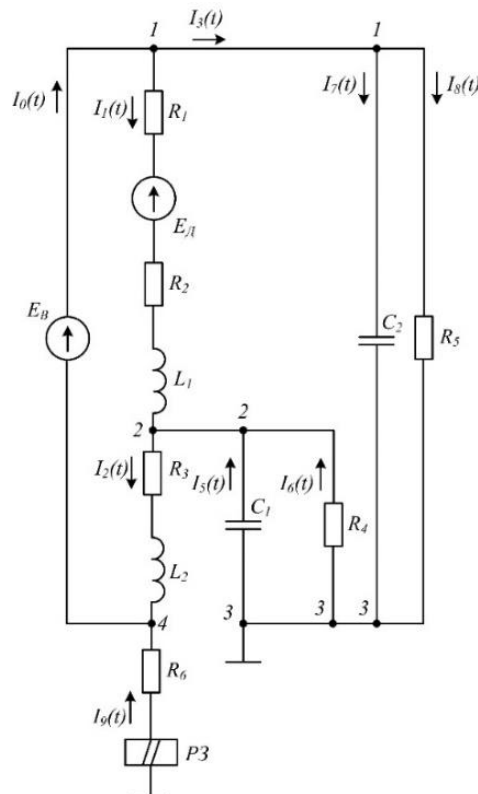


Рисунок 2.10 – Схема замещения силовой цепи тепловоза с учетом электрической емкости и сопротивления изоляции

На схеме приняты следующие обозначения: E_B – ЭДС тягового выпрямителя тепловоза; R_1 – сопротивление монтажа; E – ЭДС двигателя; R_2 – активное сопротивление якорной цепи ТЭД; L_1 – индуктивность якорной цепи ТЭД; R_3 – активное сопротивление обмоток главных полюсов ТЭД; L_2 – индуктивность обмоток главных полюсов ТЭД; C_1 – электрическая ёмкость главных полюсов ТЭД; R_4 – сопротивление изоляции обмоток главных полюсов ТЭД; C_2 – электрическая ёмкость якорной цепи; ТЭД; R_5 – сопротивление изоляции якорной цепи ТЭД.

В режиме «тяга» программное обеспечение микропроцессорной системы управления тепловоза (МСУ-ТП) задает внешние характеристики тягового выпрямителя, напряжение, в зависимости от позиции контроллера машиниста, изменяется в интервале от 110 до 750 В [26]. Таблица замыканий контроллера машиниста тепловоза 2ТЭ25КМ представлена в приложении 1.

С использованием расчётной схемы замещения, на основании известных законов Кирхгофа, составлена математическая модель для расчёта переходных процессов в силовой цепи тепловоза:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_0 - I_1 - I_8 - I_7 = 0 \\ I_1 - I_2 + I_5 + I_6 = 0 \\ I_0 - I_2 - I_9 = 0 \\ I_1 R_1 + I_1 R_2 + \frac{d\psi_{\epsilon}}{dt} + I_2 R_3 + L_2 \frac{dI_2}{dt} = E_r - E_d \\ -I_8 R_5 + I_1 R_1 + I_1 R_2 + \frac{d\psi_{\epsilon}}{dt} - I_6 R_4 = -E_d \\ I_6 R_4 + I_2 R_3 + L_2 \frac{dI_2}{dt} - I_9 R_6 = 0 \\ U_{C1} - I_6 R_4 = 0 \\ U_{C2} - I_8 R_5 = 0 \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Токи I_5 и I_7 можно записать в следующем виде:

$$I_5 = C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} \quad (2.2)$$

$$I_7 = C_2 \frac{dU_{C2}}{dt} \quad (2.3)$$

Производная потокосцепления ψ_{ϵ} равна:

$$\frac{d\psi_{\epsilon}}{dt} = w_{\epsilon} \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

где w_{ϵ} - число витков обмотки возбуждения.

Полный магнитный поток равен сумме первой и высших гармоник:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_{B\Gamma} \quad (2.5)$$

где Φ_1 – магнитный поток первой гармоники; $\Phi_{B\Gamma}$ – магнитный поток высших гармоник.

Действие вихревых токов учитывается согласно методике, предложенной М.З. Жицем [67], по которой намагничивающую силу $F = I_1 w_{\epsilon}$ связывают с полным магнитным потоком Φ и магнитным потоком первой гармоники Φ_1 :

$$L_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} + f(\Phi) = F \quad (2.6)$$

$$0,475 L_{\mu} \frac{d\Phi_{B\Gamma}}{dt} + f(\Phi) = F \quad (2.7)$$

где $f(\Phi) = I_{\mu} w_{\epsilon}$ – обратная характеристика намагничивания;

$0,475 \cdot L_{\mu}$ - магнитная индуктивность высших гармоник;

L_{μ} - магнитная индуктивность основного потока.

Магнитная индуктивность L_{μ} определяется геометрическими размерами двигателя, а также электропроводностью остова и сердечника главных полюсов. Параметры тягового двигателя постоянного тока последовательного возбуждения ЭДУ133 тепловоза 2ТЭ25КМ и нагрузочные характеристики двигателя представлены в приложении 1.

Как показано в [68], динамическая индуктивность обмоток якоря и добавочных полюсов определяется выражением:

$$L_2 = L_{\text{я}}^{\text{дин}} = L_{CT}(i) + \frac{dL_{CT}}{di} i, \quad (2.8)$$

где

$$L_{CT}(i) = w_{\epsilon} \frac{\Phi(i)}{i}, \quad (2.9)$$

где w_{ϵ} – число витков обмотки возбуждения, для тягового двигателя ЭДУ133 $w_{\epsilon} = 76$;

$\Phi(i)$ – магнитная характеристика, т.е. зависимость магнитного потока от тока возбуждения.

ЭДС двигателя определяется по формуле:

$$E_d = c_v \Phi(i) \omega, \quad (2.10)$$

c_v – конструктивная постоянная двигателя;

$\Phi(i)$ – магнитный поток;

ω – угловая скорость вращения якоря двигателя. Принимается постоянной, так как исследуется переходный процесс за малый промежуток времени.

Уравнения решены численным методом (методом Адамса) при начальных условиях:

$$I_2(0) = 0, I_1(0) = 0, U_{c1}(0) = 0, U_{c2}(0) = 0$$

В результате расчета получены диаграммы токов и напряжений на элементах схемы замещения в штатном режиме изоляции силовой цепи при выходном напряжении тягового выпрямителя 750 В, что соответствует 15-й позиции контроллера машиниста. На 15-ой позиции контроллера мощность является номинальной.

2.4 Определение значений емкости изоляции для моделирования путем проведения эксперимента

Следует отметить, что в работах [83, 84] представлены результаты исследования зависимости диэлектрических характеристик корпусной изоляции якорей ТЭД типа ЭД-107А от температуры и напряжения, проведенные в условиях электромашинного цеха Ташкентского тепловозоремонтного завода. Кроме этого, зависимости ёмкости якорей ТЭД от температуры и напряжения, уже изучались применительно к тепловозам типа ТЭ-10 в работах [83, 85]. На основе использования свойства изменения емкости изоляции обмоток при росте

температуры, разработаны технические решения: «Способ измерения температуры изоляции обмоток электрических машин», (патент на изобретение № 2273832), № 45057 «Устройство непрерывного контроля температуры изоляции обмоток электрических машин» (патент на полезную модель № 45057) и «Устройство для регулирования охлаждения тяговых двигателей локомотивов» (патент на полезную модель № 45574) [86, 87, 88].

В рамках выполнения данной диссертационной работы диэлектрические характеристики корпусной изоляции исследовались у двигателей типа ЭДУ133 и ТЛ2К1. Работы по эксперименту были проведены автором в условиях электромашинного цеха Оренбургского тепловозремонтного завода и сервисного локомотивного депо Дема – филиала «Южный» ООО «ТМХ-сервис».

Исследования изоляции тяговых двигателей с целью получения значений емкости обмоток при одновременном действии температуры и напряжения проводились в порядке, аналогично описанному в работах [83, 84, 85]. Обмотка якоря и возбуждения оборудовались встроенными датчиками температуры - термопарами группы хромель-капель (ХК). Схема размещения датчиков на обмотке якоря показана на рис. 2.11, где позициями 2, 3, 4 показаны точки размещения спаев термопар между слоями обмотки, позицией 1 - выводы термопар на переднем бандаже якоря.

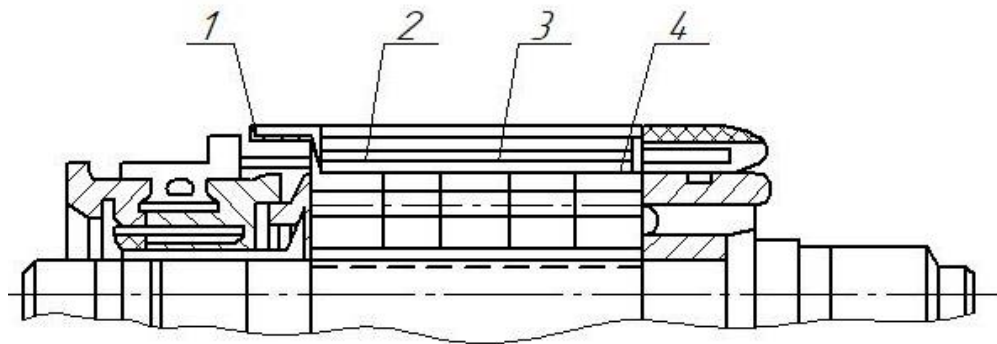


Рисунок 2.11 – Схема размещения датчиков температуры в обмотке якоря
 1 – выводы термопар; 2 – термопара между слоями передней части обмотки (40 мм от края железа); 3 – термопара между слоями обмотки в центре паза; 4 – термопара между слоями задней части обмотки (20 мм от края железа)

Ниже, на рис. 2.12, показана схема измерения температуры в соответствии с рекомендациями [89].

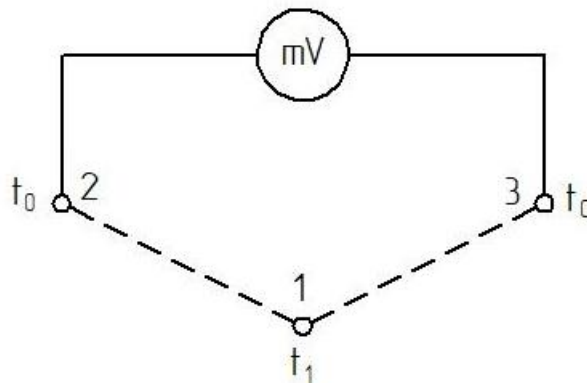


Рисунок 2.12 – Схема размещения датчиков температуры на якоре

В качестве измерительного прибора был применён милливольтметр МПЩПр – 54 (ХК), в качестве соединительных проводов – хромель – копелевый компенсационный провод.

Якорь и остов с вмонтированными датчиками температуры (термопарами) помещались в сушильную печь, установленную в электромашинном цехе. После доведения температуры изоляции до температуры печи (165-170 °С) якорь выгружался и подавался на высоковольтную установку для замера емкости изоляции по мере ее остывания.

Исследования проводились при помощи установки, принципиальная схема которой приведена на рис. 2.13. Установка позволяет измерять емкость изоляции в широком интервале испытательных напряжений.

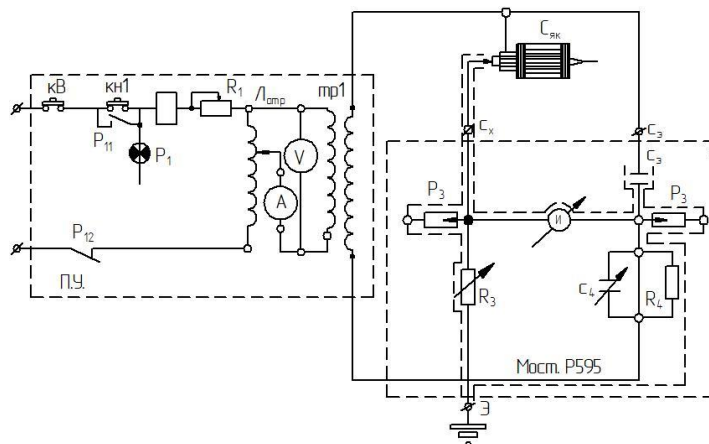


Рисунок 2.13 – Схема установки для проведения эксперимента

Блоком ПУ на рисунке обозначена схема для проверки диэлектрической прочности корпусной изоляции электроизоляционных конструкций ТЭД [90].

Блоком «Мост Р595» обозначен типовой переносной мост Шеринга Р595, включенный в положение для замера диэлектрических характеристик изоляции на высоком напряжении.

На блочно-принципиальной схеме установки испытываемый якорь, представляющий собой батарею параллельно соединенных конденсаторов: медь обмотки крайних витков катушки – витковая и корпусная изоляция – стенка паза якоря, включен в измерительное плечо моста. $C_{эт}$ на этой схеме – эталонный конденсатор с очень малыми диэлектрическими потерями (газовая изоляция); I – индикатор равновесия моста; P_3 – защитные разрядники, предохраняющие измерительные плечи моста в случае пробоя испытываемой изоляции.

На рис. 2.14 и 2.15 представлены полученные графики зависимости емкости корпусной изоляции якорей ТЭД ЭДУ133 и ТЛ2К соответственно от температуры и напряжения.

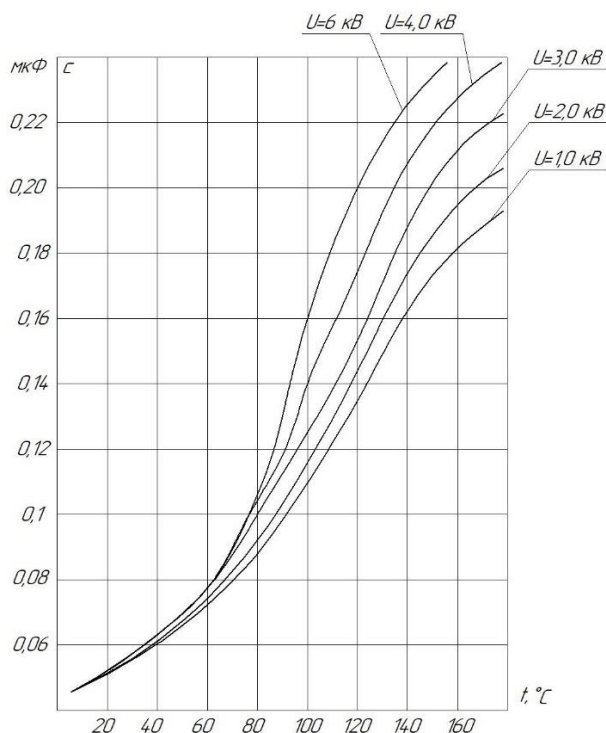


Рисунок 2.14 – Зависимость емкости изоляции якоря ТЭД ЭДУ-133 от температуры и напряжения

Из графика 2.14, видно, что электрическая ёмкость тягового электродвигателя тепловоза в значительной мере зависит от температуры и в меньшей степени от напряжения. В частности, в диапазоне температур 40 – 140 °С зависимость практически линейна.

Аналогичные зависимости имеют место и на электровозах (рис. 2.15) с двигателями ТЛ2К1. Несмотря на то, что габариты ТЭД на электровозах больше, значения электрической ёмкости корпусной изоляции оказались на порядок меньше, чем на двигателях ЭДУ133, устанавливаемых на тепловозах.

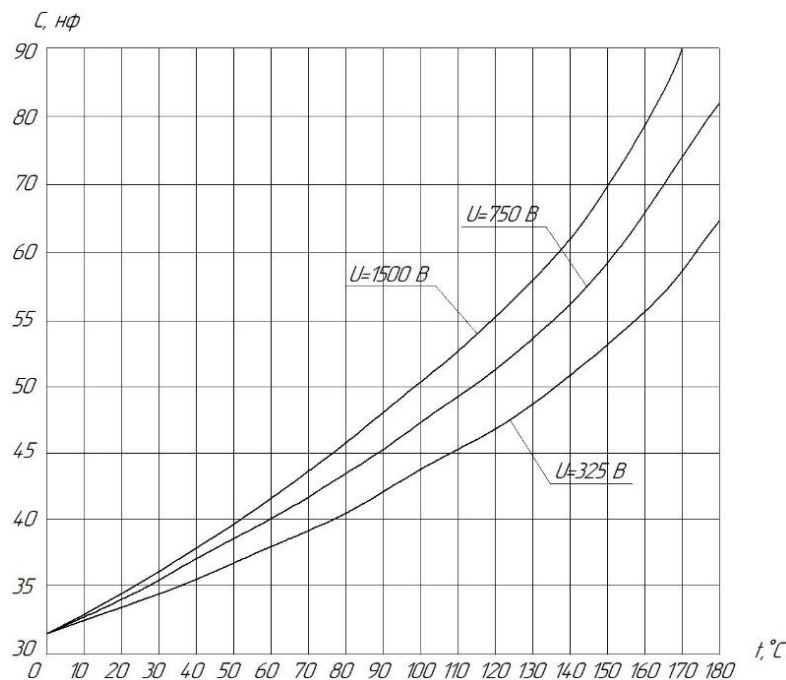


Рисунок 2.15 – Зависимость емкости изоляции якоря ТЭД ТЛ-2К от температуры и напряжения

Таким образом, чем больше температура и напряжение, действующие на изоляцию обмоток тягового электродвигателя, тем большее значение приобретает емкость изоляции C . Из проведенного исследования видно, что наиболее тяжелыми условиями работы корпусной изоляции необходимо считать одновременное действие температуры и высокого напряжения. Такие условия работы изоляции соответствуют режимам испытаний ТЭД на электрическую прочность изоляции согласно требованиям, ГОСТ 2582 – 72 [91] когда при эксплуатационных

переходных режимах на разогретую изоляцию воздействуют импульсы высокого напряжения.

Как бы ни был хорошо поставлен эксперимент для замера диэлектрических характеристик изоляции, в частности ее емкости, возникновение погрешностей неизбежно.

Для оценки точности измерения, как известно, сопоставляют величину ошибок и саму измеряемую величину. С этой целью вводится понятие относительной ошибки (отношение величины абсолютной ошибки к измеряемой величине). Обычно она выражается в процентах.

Как известно, в зависимости от причин, вызывающих ошибки в процессе измерения, погрешности подразделяются на промахи, систематические и случайные ошибки. Промахи возникают вследствие невнимательности экспериментатора. Например, когда производится запись показаний прибора при не полностью сбалансированном мосте или попросту происходит описка. Теория ошибок [92] дает правила для их выявления и при окончательной обработке результатов измерений промахи не учитываются.

Для систематических ошибок характерны следующие свойства:

- величина систематической ошибки одинакова во всех измерениях, производящихся одним и тем же методом с помощью одних и тех же приборов;
- величину систематической ошибки нельзя уменьшать путем многократных повторений измерений.

К систематическим ошибкам, в первую очередь, в нашем случае необходимо отнести погрешности, вносимые самим мостом Р 595. Для моста Р595 основная погрешность измерения, согласно паспортным данным, составляет при измерениях емкости:

$$E_{\max}^C = \pm(2,5 + \frac{5 \cdot 10^{-5}}{C_x}) \quad (2.11)$$

где C_x – емкость якоря, mF .

Случайные ошибки измерений диэлектрических характеристик изоляции обмоток ТЭД обусловлены случайным характером распределения неоднородностей в изоляции, а также случайным характером распределения пробивных напряжений. Кроме этого, случайным элементом при измерениях диэлектрических характеристик изоляции в цеховых условиях являются пульсации напряжения питающей сети. Величины случайных ошибок различны по значению и по знаку. Величину случайных ошибок с помощью теории вероятности можно оценить независимо от причин, их вызывающих.

Случайные ошибки в большинстве случаев подчиняются статическому закону нормального распределения Гаусса.

Пусть произведено n измерений некоторой величины a , из них dn измерений дают значения измеряемой величины, лежащей в пределах от x до $x+dx$. Тогда отношение $\frac{dn}{n} = P(x)$ дает вероятность появления значения измеряемой величины в пределах от x до $x+dx$ и, следовательно, появления соответствующей ошибки $dx = x-a$.

Функция, описываемая формулой, показанной ниже:

$$\varphi(x) = \frac{dn}{ndx} = \frac{P(x)}{dx} \quad (2.12)$$

называется функцией распределения ошибок или плотностью вероятности измеряемой величины. Выражение для этой функции найдено Гауссом, и можно записать по иному:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma_0^2}} \quad (2.13)$$

Величина σ_0 — называется стандартным отклонением, или стандартной ошибкой, она характеризует точность методики измерений [93]. Теория ошибок утверждает, что если величина случайной ошибки больше, чем систематическая ошибка (а в нашем случае так и получается) то при большом количестве измерений мерой точности измерений может служить вышеуказанная величина стандартной ошибки.

Остановимся подробно на определении этой величины и на том, какое количество измерений является необходимым и достаточным для получения необходимой достоверности определяющих величин. Теория ошибок утверждает, что истинное значение измеряемой величины, в нашем случае значения емкости изоляции тяговых электродвигателей, экспериментально определить невозможно и что наилучшим приближенным к истине является среднее арифметическое, вычисленное на основаниях проведенных измерений, т.е.:

$$C_{cp.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (2.14)$$

Для оценки величины случайной ошибки отдельного измерения в этом случае удобно применить среднюю квадратичную ошибку:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{cp} - C_i)^2}{(n-1)}} \quad (2.15)$$

В той же теории показано, что при росте числа измерений n величина S_n стремится к σ_0 . Так как величина погрешности среднего арифметического точнее определится из n измерений, то оценку ее величины рассчитают из выражения:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{cp} - C_i)^2}{n(n-1)}} \quad (2.16)$$

а соответственно σ рассчитывается по формуле:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{n} \quad (2.17)$$

Исследование выражения (2.6) показывает, что для того, чтобы уменьшить среднюю арифметическую из результатов измерений, необходимо увеличить их число. Однако оказывается, что начиная с n , равного примерно $10 \div 15$, эта ошибка уменьшается достаточно медленно [94]. Таким образом, выбор количества исследуемых якорей в пределах 15 единиц является обоснованным.

Достоверность полученного результата измерения характеризуется вероятностью или коэффициентом надежности (коэффициент Стьюдента) α того,

что результат измерений, в данном случае емкость C – отличается от истинного на величину измеренного значения и будет лежать в пределах:

$$C_{cp.} - \Delta S \leq C \leq C_{cp.} + \Delta S \quad (2.18)$$

Где ΔS - величина доверительного интервала.

Из теории случайных ошибок следует, что если $\Delta S = G$, то вероятность $\alpha = 0,95$ измеренная величина будет иметь значения, находящиеся в пределах от $C - \sigma$ до $C + \sigma$. Но величина стандартной ошибки σ нам неизвестна и при достаточно большом числе измерений ($n = 15 \div 30$) она может характеризоваться величиной квадратичной ошибки, определяемой из выражения:

$$S \approx G \quad (2.19)$$

Величины отклонений ΔC_i от средних значений определяется по формуле:

$$\Delta C_i = C_{cp.} - C_i \quad (2.20)$$

Квадратичная ошибка отдельного измерения определяется по формуле 2.20. Квадратичная ошибка результата измерений определяется по формуле

$$S = \frac{S_n}{n} \quad (2.21)$$

Величина доверительного интервала по формуле

$$\Delta S = 2S \quad (2.22)$$

Величины отклонений ΔC_i от средних значений определяется по формуле:

$$\Delta C_i = C_{cp.} - C_i \quad (2.23)$$

Величина квадратов отклонений $(\Delta C_i)^2$ и суммарную величину $\sum_{i=1}^n (\Delta C_i)^2$ заносим в табл. 2.1 результатов измерений.

Полученные результаты после обработки экспериментальных данных заносим в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты обработки экспериментальных данных

$t, ^\circ\text{C}$	C_{cp}	$\sum_{i=1}^n (\Delta C_i)^2$	S_n	S	ΔS	$C_{cp} - \Delta S$	$C_{cp} + \Delta S$
140	85,6512	15,6778	1,2367	0,2456	0,5879	85,0633	86,2391
130	78,8112	44,5552	1,7811	0,2790	0,6711	78,1401	79,4823
120	70,6612	36,8777	1,2345	0,4312	0,5323	70,1289	71,1935
110	65,4311	40,1112	1,4512	0,2311	0,5811	64,8500	66,0122
100	60,1231	30,2511	1,6790	0,3422	0,6413	59,4818	60,7614
90	55,4311	25,4383	1,1245	0,6711	0,6211	54,8100	56,0522
80	49,1012	26,7786	1,1872	0,2655	0,5309	48,5703	49,6321
76	46,2358	26,9964	1,1920	0,2665	0,5331	45,7027	46,7689
72	42,6374	19,7025	1,0183	0,2277	0,4554	42,1820	43,0928
68	40,1981	13,8600	0,8541	0,1910	0,3820	39,8161	40,5801
64	36,9258	33,7582	1,3329	0,2981	0,5961	36,3297	37,5219
60	34,1678	43,2912	1,5095	0,3375	0,6751	33,4927	34,8429
56	31,1501	30,9517	1,2763	0,2854	0,5708	30,5793	31,7209
52	28,5821	25,8025	1,1653	0,2606	0,5212	28,0609	29,1033
48	25,9278	44,6359	1,5327	0,3427	0,6855	25,2423	26,6133
44	22,5428	43,6184	1,5152	0,3388	0,6776	21,8652	23,2204
40	19,2705	18,6869	0,9917	0,2218	0,4435	18,8270	19,7140
36	15,0654	44,3214	1,5273	0,3415	0,6830	14,3824	15,7484
32	12,4242	42,0841	1,4883	0,3328	0,6656	11,7586	13,0898

2.5 Моделирование токов и напряжение в изоляции в штатном режиме силовой цепи

Ниже показаны полученные результаты. На рис. 2.16 показан график нарастания тока якоря $I_1(t) = I_2(t)$, который изменяется в зависимости от разных условий в интервале $0 \dots 1300 \text{ A}$.

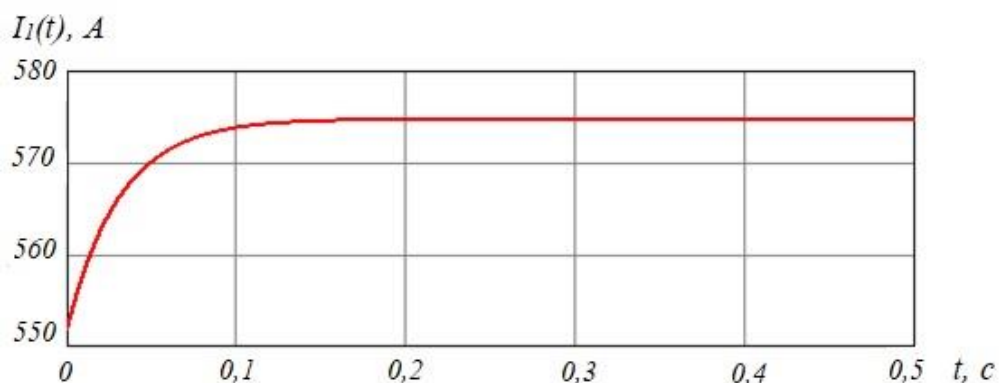


Рисунок 2.16 – Зависимость $I_1(t)$ на 15-й позиции контроллера машиниста

Электроизоляционные материалы, как и любой конденсатор, не являются идеальными диэлектриками в связи с присущей им небольшой электропроводностью. В диэлектриках всегда в небольшом объеме содержатся свободные заряды, которые под действием электрического поля создают слабые по значению сквозные токи проводимости или токи утечки. Известно, что в высоковольтной изоляции в начальный период после включения постоянного напряжения появление сквозного тока утечки сопровождается поляризационными токами [73]. Поляризационные токи создают так называемый ток абсорбции. Таким образом, полный ток в изоляции равен сумме токов утечки и абсорбции. Поскольку ток абсорбции со временем уменьшается, сопротивление изоляции при этом возрастает. По завершении переходного процесса в установившемся режиме в изоляции протекает только ток сквозной проводимости. Обычно считают, что переходные процессы при заряде изоляции заканчиваются через 60 с (или через 1

мин) после приложения напряжения. Графики изменения токов $I_6(t)$ и $I_8(t)$ в конденсаторах C_1 и C_2 соответственно, которые являются токами в изоляции, показаны на рис. 2.17 и рис. 2.18. Графики представляют собой колебательный переходной процесс с установившимися значениями, равными $I_6 = 0,005 \text{ мА}$ и $I_8 = 0,375 \text{ мА}$.

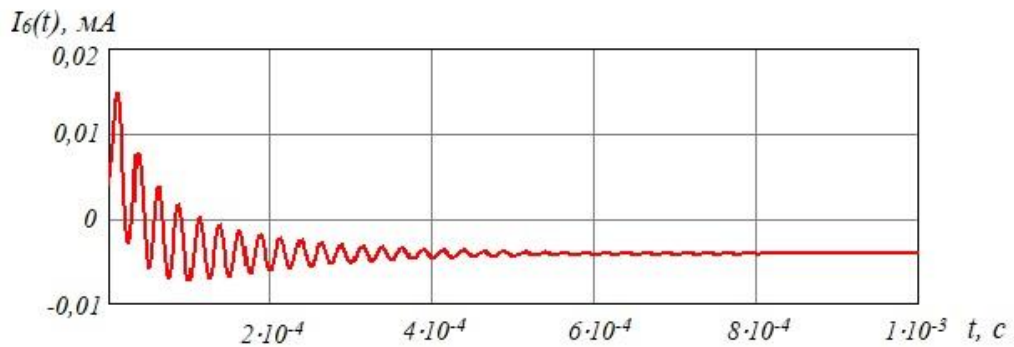


Рисунок 2.17 – График изменения тока в конденсаторе C_1

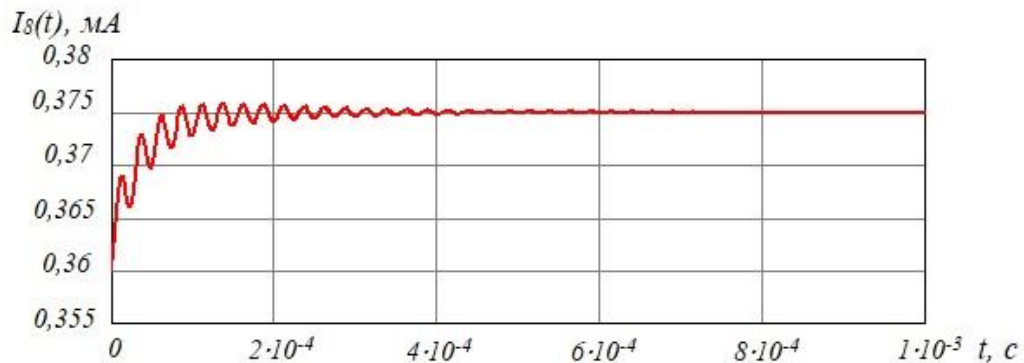


Рисунок 2.18 – График изменения тока в конденсаторе C_2

График нарастания тока $I_7(t)$ показан на рис. 2.19 и представляет собой убывающий до нуля колебательный переходной процесс заряда и разряда конденсатора C_2 длительностью $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Максимальное значение тока заряда составляет 200 А .

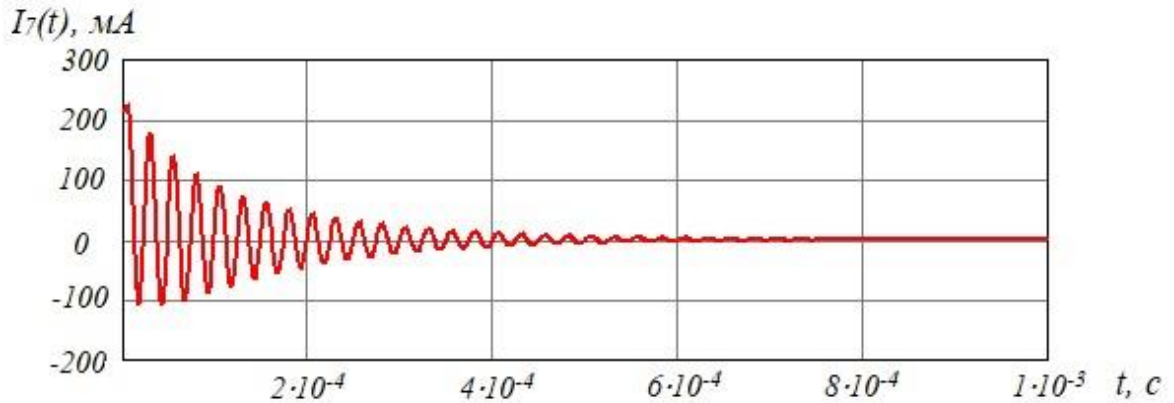


Рисунок 2.19 - Графики нарастания тока $I_7(t)$ в конденсаторе C_2

График накопления напряжения $U_{C2}(t)$ на выводах конденсатора C_2 показан на рис. 2.20 и представляет собой колебательный переходной процесс, достигающий установившегося значения, равного 750 В. Полученное значение совпадает с выходным значением тягового выпрямителя на 15-й позиции контроллера тепловоза, подаваемое при моделировании.

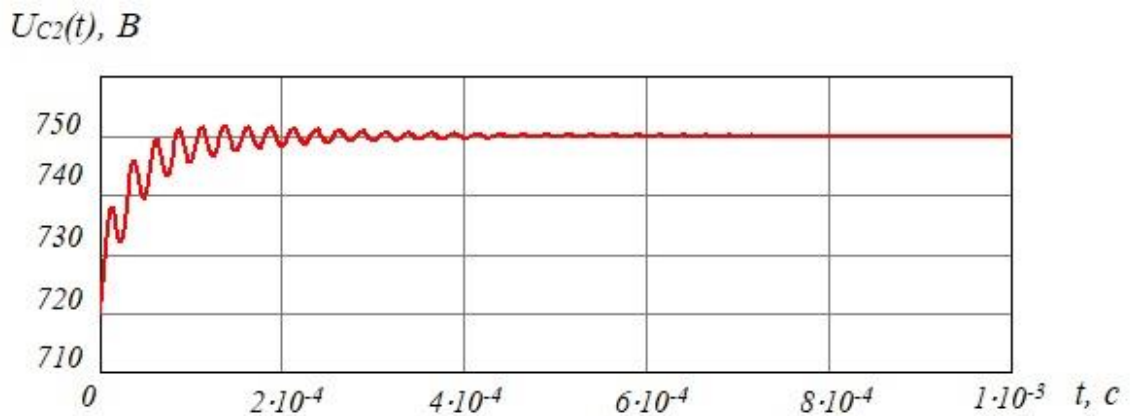


Рисунок 2.20 – Графики нарастания напряжения в конденсаторе C_2 в силовой цепи тепловоза

Графики зависимостей $I_5(t)$ и $U_{C1}(t)$ в конденсаторе C_1 показаны на рис. 2.21 и рис. 2.22. В самом начале переходного процесса $I_5(t)$ ток заряда достигает максимального значения, равного 130 А, далее колебательный переходной процесс заряда и разряда убывает до нуля. Колебательный переходной процесс нарастания

напряжения на обкладках конденсатора C_1 достигает установившегося значения, равного 7 В через $1 \cdot 10^{-3}\text{ с}$.

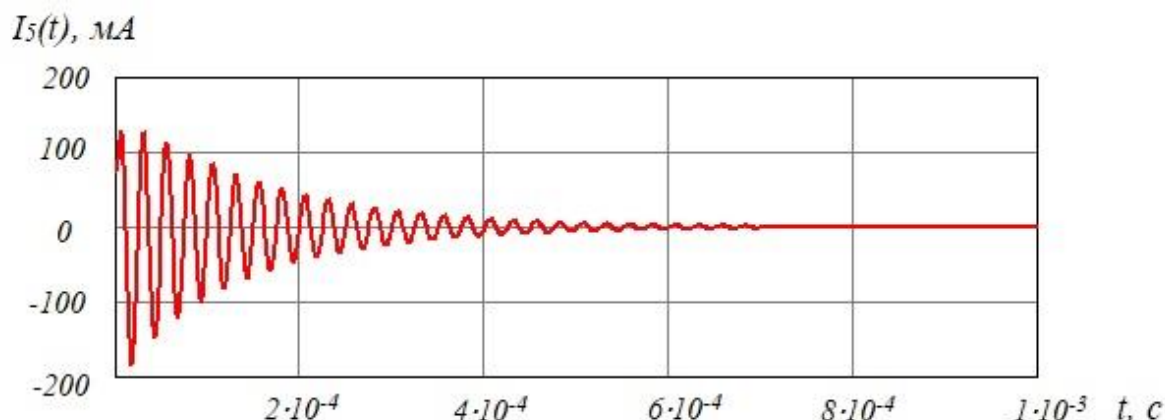


Рисунок 2.21 – Графики нарастания $I_5(t)$ в конденсаторе C_1

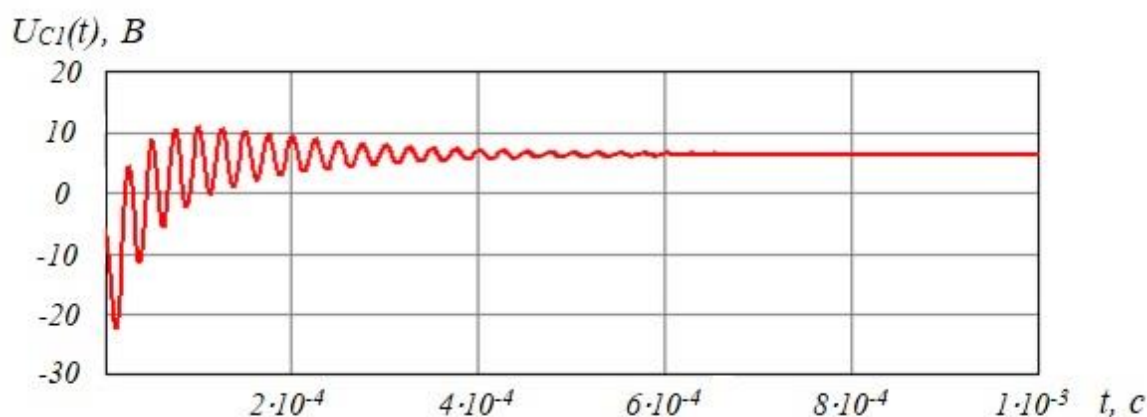


Рисунок 2.22 – Графики нарастания $U_{C1}(t)$ в конденсаторе C_1

Графики токов и напряжений в силовой цепи тепловоза, а также зарядно – разрядные процессы в изоляции при переключении позиций контроллера машиниста (1-15) представлены в приложении 2.

В результате решения уравнений математической модели можно получить значения токов и напряжений на элементах схемы замещения. График значений напряжения U_{C2} в изоляции якорной обмотки в зависимости от позиции контроллера машиниста (КМ) представлен на рис. 2.23. Анализируя полученный график, можно сделать вывод о том, что основная часть напряжения тягового выпрямителя относительно корпуса приходится на изоляцию обмотки якоря.

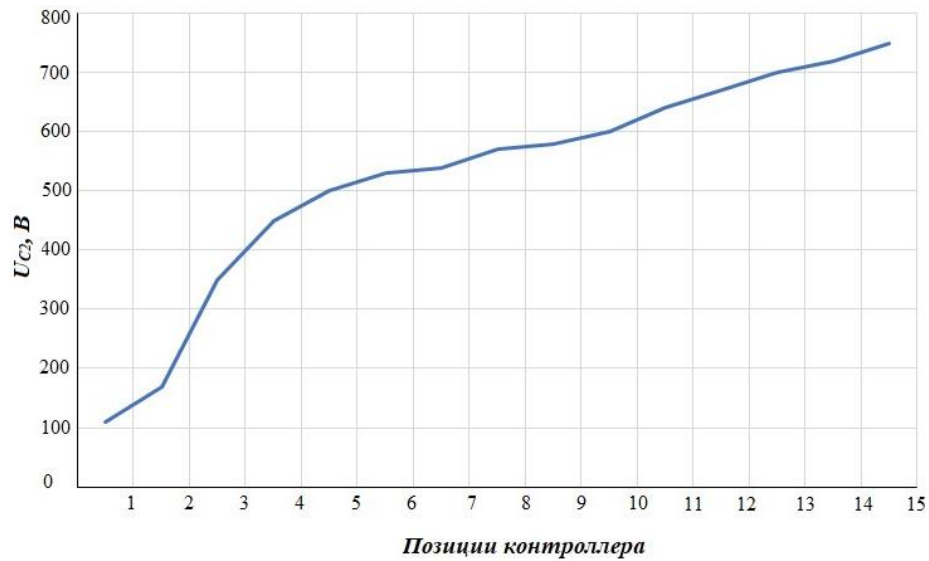


Рисунок 2.23 – Напряжение в изоляции якорной обмотки тягового двигателя в зависимости от позиции контроллера машиниста

График значений напряжения U_{CI} в изоляции обмотки главных полюсов в зависимости от позиции контроллера машиниста представлен на рис. 2.24.

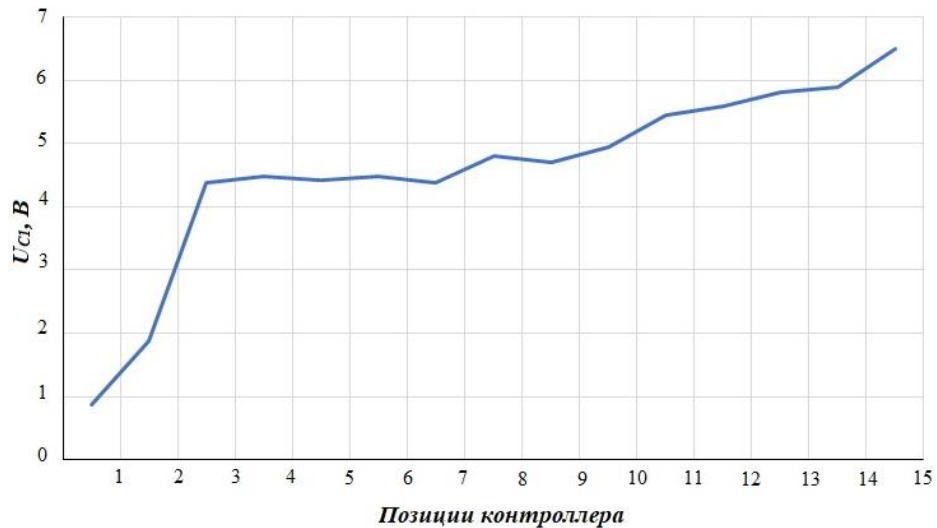


Рисунок 2.24 – Напряжение в изоляции обмотки главных полюсов тягового двигателя в зависимости от позиции контроллера машиниста

Значения напряжения в изоляции, как видно из графика, находятся в интервале от 0,87 В. до 6,5 В. Таким образом, можно судить о значительной неравномерности

распределения напряжения выпрямителя относительно корпуса между обмотками тяговых электродвигателей.

2.6 Моделирование токов и напряжения в изоляции в аварийном режиме силовой цепи

Далее предлагается рассмотреть аварийный режим в изоляции. Более половины отказов тяговых электродвигателей тепловозов приходится на пробой изоляции якоря, главных и добавочных полюсов. Около 20 % пробоев на корпус происходит вследствие воздействия повышенного уровня и пиков напряжения, а значительная часть отказов, около 80 % является следствием внезапных кратковременных понижений уровня электрической прочности изоляции вследствие ее увлажнения по различным причинам, особенно в зимнее время [95].

При повышении напряженности электрического поля в твердом диэлектрике возникают процессы, ведущие к возрастанию тока. При достижении некоторой разности потенциалов между электродами происходит так называемый пробой диэлектрика. Материал переходит из состояния изолятора в состояние проводника. При этом в твердом диэлектрике в отличие от газообразных и жидких диэлектриков, а также от некоторых полупроводников, пробой всегда приводит к резкому остаточному изменению свойств этого диэлектрика. Кроме того, следует отметить то, что при пробое твердого диэлектрика ток возрастает всегда скачкообразно, и не известны случаи пробоя, при которых кривую зависимости тока от напряжения до пробоя можно было даже в самом грубом приближении экстраполировать на область пробоя.

Пробивное напряжение и процесс развития пробоя диэлектрика зависят от многих факторов: таких, как температура окружающей среды, частота изменения напряжения, скорость нарастания амплитуды напряжения, длительность

приложенного напряжения и др. Мощность источника напряжения обычно оказывает влияние не на величину пробивного напряжения, а на развитие процессов, возникающих после достижения пробивного напряжения.

Явление пробоя твердого диэлектрика можно разделить на две стадии. Первая стадия – нарушение электрической прочности, заключающееся в нарушении стационарного режима электропроводности при достижении определенного напряжения (в скачкообразном возрастании тока при некотором напряжении). Вторая стадия – разрушение диэлектрика (тепловое или механическое), которое обычно сопровождается нарушением однородности материала, в частности, образованием более или менее узкого канала, простирающегося сквозь диэлектрик от одного электрода к другому.

С этой точки зрения под электрической прочностью твердого диэлектрика следует понимать такую совокупность его свойств, которая обуславливает малое и стационарное значение тока в сильных электрических полях.

Разделение пробоя на две указанные стадии подразумевает, что нарушение электрической прочности, т.е. скачкообразное возрастание тока, не может почти мгновенно привести к разрушению диэлектрика. Процесс пробоя твердого диэлектрика может длиться малое время (10^{-7} - 10^{-8} сек). Совокупность экспериментальных данных по пробоям твердых диэлектриков дает возможность выделить по крайней мере две основные формы пробоя однородных диэлектриков: тепловую форму пробоя (тепловой пробой) и электрическую форму пробоя (электрический пробой). Возникновение того или иного вида пробоя обусловлено сочетанием свойств диэлектрика.

Природа процессов, приводящих к тепловому пробоям и к электрическому пробоям твердого диэлектрика, весьма сложна.

Пробой конденсаторов C_1 и C_2 сопровождается изменением их сопротивления, в связи с этим при моделировании аварийного режима изоляции в якорной цепи тяговых электродвигателей принимается условие $R_5 = 0$, при пробое изоляции обмоток полюсов $R_4 = 0$.

Значения искомых токов и напряжений в конце интервала интегрирования, в результате решения системы уравнений (2.3) при пробое изоляции в якорной цепи ТЭД, получились следующими: $I_1(t) = 574,713$; $I_0(t) = 574,713$; $I_5(t) = 0$; $I_6(t) = 4,96 \cdot 10^{-4}$; $I_7(t) = 0$; $I_8(t) = 0,019$; $U_{C1}(t) = 743,947$ $U_{C2}(t) = 0,019$. Значения токов и напряжений при пробое изоляции в обмотке полюсов: $I_1(t) = 574,713$; $I_0(t) = 574,713$; $I_5(t) = 0$; $I_6(t) = 0,015$; $I_7(t) = 0$; $I_8(t) = 3,72 \cdot 10^{-4}$; $U_{C1}(t) = 0,015$; $U_{C2}(t) = 743,949$.

Напряжение $U_{C2}(t)$ на обкладках конденсатора в момент пробоя в якорной цепи, который наступает через 0,6 секунды после начала переходного процесса убывают до нуля (рис. 2.25). Установившееся значение напряжения на конденсаторе C_1 при этом достигает максимального значения $U_{C1}(t) = 743,947$ В (рис. 2.26).

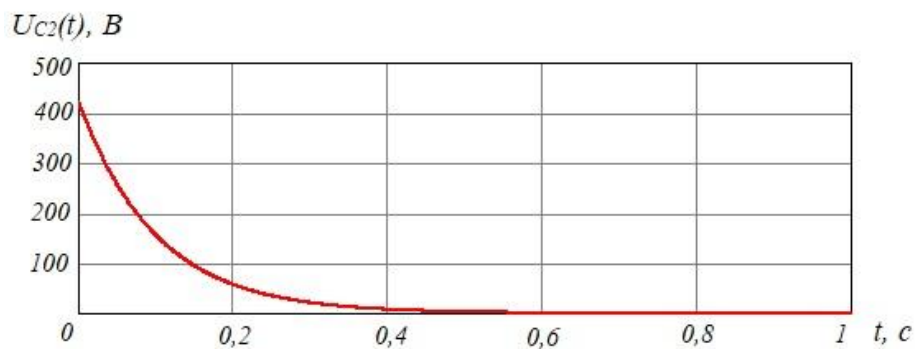


Рисунок 2.25 – График $U_{C2}(t)$ на обкладках конденсатора C_2 при пробое изоляции в якорной цепи

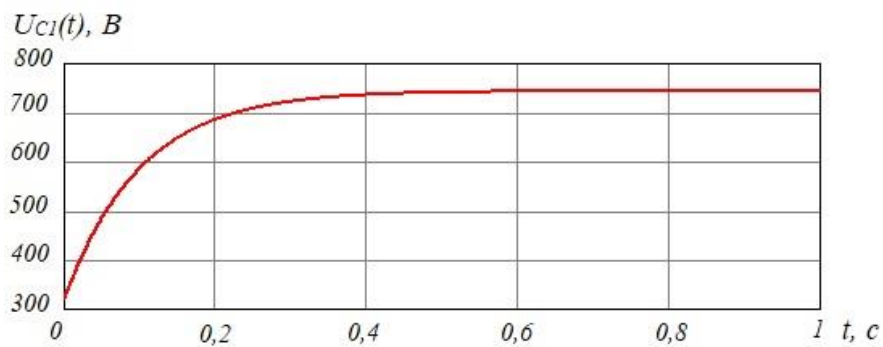


Рисунок 2.26 – График $U_{C1}(t)$ на обкладках конденсатора C_1 при пробое изоляции в якорной цепи

Аналогичные графики $U_{C1}(t)$ и $U_{C2}(t)$ наблюдаются при пробое изоляции в обмотке полюсов (рис. 2.27 и рис. 2.28).

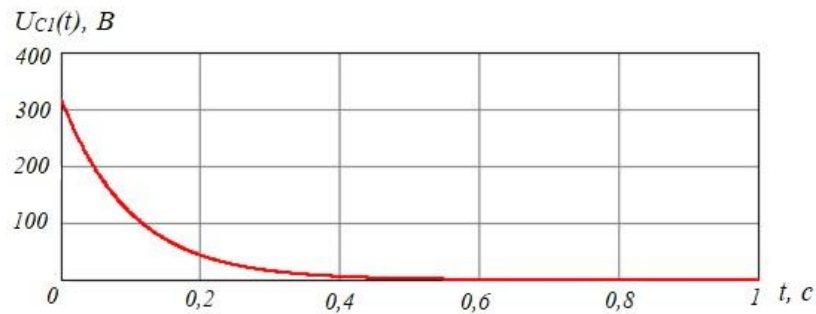


Рисунок 2.27 – График $U_{C1}(t)$ на обкладках конденсатора C_1 при пробое изоляции в обмотке полюсов

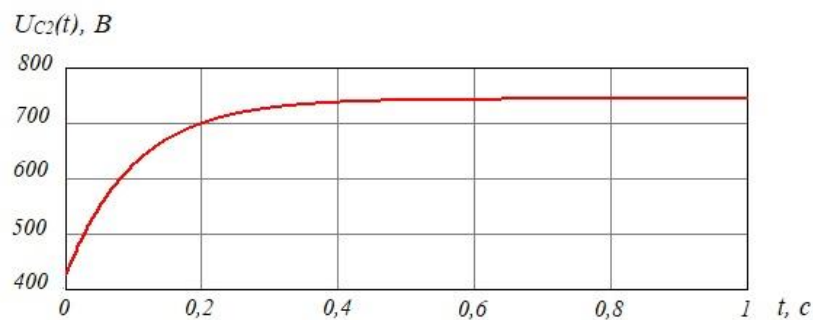


Рисунок 2.28 – График $U_{C2}(t)$ на обкладках конденсатора C_2 при пробое изоляции в обмотке полюсов

Таким образом, при замыкании на корпус изоляции якоря, изоляция полюсов испытывает максимальное напряжение, равное выходному напряжению выпрямителя. То же самое происходит при потере диэлектрической прочности изоляции полюсных катушек тяговых электродвигателей.

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод: так как при пробое напряжение на обкладках конденсатора, представляющего собой изоляцию обмоток тяговых электродвигателей, убывает до нуля $U \rightarrow 0$ и ток утечки скачком увеличивается, подтверждается тот факт, что конденсатор теряет емкость и тогда $C \rightarrow 0$. Данную закономерность также можно объяснить, в том числе, известным методом «емкость-температура», который основан на изменении емкости увлажненной изоляции. С ростом температуры объемная проводимость

изоляционных конструкций увеличивается. При нагреве проводимость растет тем сильнее, чем больше увлажнена изоляция (так как при этом увеличивается растворимость и степень диссоциации различных примесей во влаге). Поэтому если изоляция имеет увлажненный слой, то с ростом температуры различие в проводимостях слоев увеличивается, и изоляция становится еще более неоднородной. С ростом температуры проводимость увлажненного слоя увеличивается сильнее, чем неувлажненного. Большая часть приложенного напряжения приходится на неувлажненный слой и емкость изоляции возрастает. Однако при пробое изоляции емкость резко убывает до нуля.

Таким образом, на основе оценки изменения емкости можно получить информацию не только о снижении диэлектрической прочности изоляции, но и об ее потере. Разработка и внедрение устройства, которое позволит контролировать изменение емкости изоляции обмоток тяговых электродвигателей в эксплуатации позволит повысить эффективность работы существующих систем обнаружения замыканий на корпус в цепях высокого напряжения отечественных тепловозов.

Выводы по главе 2

1. На основе проведенного анализа научных работ по моделированию процессов в силовой цепи локомотивов предложена схема замещения и математическая модель, впервые учитывающая электрическую емкость и сопротивление изоляции обмоток тяговых электродвигателей, что позволит задавать условие наступления пробоя на корпус при моделировании.

2. Результаты моделирования переходных процессов в разработанной схеме замещения силовой цепи тепловоза имеют вид классических графиков нарастания напряжения и токов заряда, что обосновывает правомерность представления изоляционных конструкций в виде сосредоточенных емкостей (конденсаторов) на схеме замещения. При замыканиях на корпус, напряжение на

обкладках конденсатора убывает до нуля $U \rightarrow 0$, ток утечки скачком увеличивается, емкость убывает $C \rightarrow 0$. Таким образом, фактор изменения емкости изоляции тяговых электродвигателей может быть принят в качестве критерия, позволяющего обнаружить замыкание на корпус. Разработка и внедрение устройства, позволяющего контролировать изменение емкости изоляции обмоток в эксплуатации, позволит повысить эффективность работы существующих систем обнаружения замыканий на корпус в цепях высокого напряжения отечественных тепловозов.

3. Результаты моделирования показали, что график накопления напряжения на выводах конденсатора, представляющего изоляцию обмотки якоря ТЭД в штатном режиме силовой цепи тепловоза, описывает колебательный переходной процесс, достигающий установившегося значения, равного 738 В. Колебательный переходной процесс изменения напряжения на обкладках конденсатора, представляющего обмотку главных полюсов ТЭД, достигает установившегося значения, равного 12 В. Таким образом, основная часть выходного напряжения тягового выпрямителя относительно корпуса приходится на изоляцию обмотки якоря, что объясняет большую повреждаемость обмотки в эксплуатации.

4. На основе экспериментального исследования, проведенного с помощью моста Шеренга (P595), датчиков температуры и сушильной печи, установленной в электромашинном цехе завода и сервисного локомотивного депо, получены значения емкости изоляции якоря и катушек полюсов тяговых электродвигателей локомотивов, при различных значениях температуры и напряжения. Выявлено, что электрическая ёмкость обмоток в значительной мере зависит от температуры и в меньшей степени от напряжения. В частности, в диапазоне температур 40 – 140 °С и напряжений 0 – 1000 В зависимость практически линейна, что существенно упрощает анализ и выбор исходных данных при моделировании, а также снижает разброс выходных результатов.

3. РАЗРАБОТКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ОТ ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИИ НА КОРПУС В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ТЕПЛОВЗОВ

3.1 Предлагаемые метод и устройство для обнаружения и защиты от пробоя изоляции на корпус в силовых цепях тепловозов

Как было отмечено в разделе 1 диссертации, предлагается метод обнаружения и защиты от замыканий на корпус в силовых цепях тепловозов, который построен на основе следующих методов: с использованием мостовой схемы, источника переменного напряжения и с использованием емкостного метода.

Недостатком существующего метода защиты является то, что устройство «искусственного заземления», установленное в силовой цепи и реализующее метод, предоставляет информацию о потере целостности изоляции в плюсовой или минусовой цепи тепловоза. Для того чтобы продолжить движения после обнаружения аварийного режима, необходимо выявить неисправный ТЭД и отключить его путем последовательного перебора, который заключается в том, что все двигатели отключаются от источника постоянного тока, а затем по очереди подключаются обратно. При этом тратится значительное время. Если тепловоз движется в режиме выбега, за счет сил инерции поезда на уклонах, перебор можно выполнить на ходу, но во всех остальных случаях необходима остановка поезда, что в конечном итоге приведет к большим экономическим потерям, связанным с задержкой грузовых и пассажирских поездов. Кроме этого, следует отметить тот факт, что скорость обнаружения имеет важное значение для пожаробезопасности силовых цепей и тепловозов в целом.

С помощью устройства обнаружения пробоев (УОП) и защиты, построенного на основе предлагаемого метода, можно оперативно и за малое время определить

номер аварийного двигателя в силовой цепи тепловоза. Преимущество метода позволяет сделать это в автоматическом режиме, без остановки подвижного состава и последующего перебора. Для описания устройства предлагается вернуться к описанию электрической схемы и ее защиты от пробоев изоляции на корпус отечественного магистрального тепловоза 2ТЭ25КМ, но не с одним ТЭД, как показано на рис. 1.4 главы 1, а для трех, что соответствует одной тележке тепловоза.

В электрической схеме тепловоза 2ТЭ25КМ переменное трехфазное напряжение со статорных обмоток тягового генератора поступает на вход тягового выпрямителя $A1$ в котором установлены шесть управляемых выпрямителей (рис. 3.1).

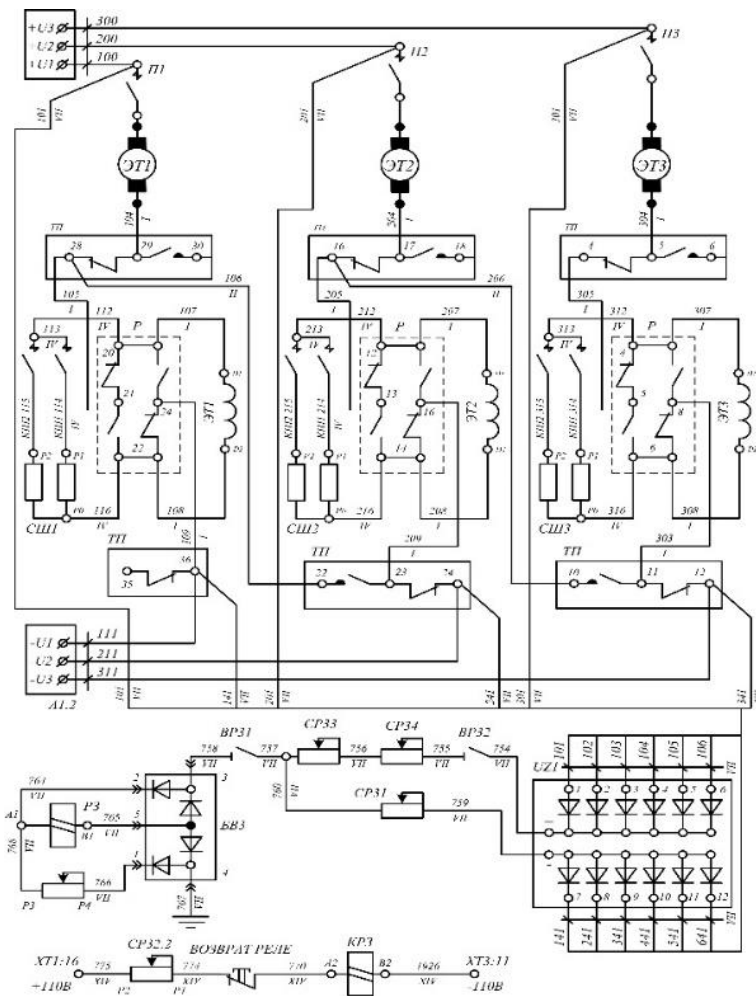


Рисунок 3.1 – Упрощенная принципиальная схема силовой цепи тепловоза 2ТЭ25КМ (для одной тележки)

Постоянное напряжение с каждого выпрямителя поступает на тяговые двигатели по следующей цепи: положительные выводы выпрямителя $+U_1, +U_2, +U_3 \rightarrow$ силовые контакты (с дугогашением) поездных контакторов $П1, П2, П3 \rightarrow$ якорные обмотки тяговых электродвигателей $\rightarrow$ коммутирующие контакты тормозных переключателей $ТП \rightarrow$ коммутирующие контакты реверсора $Р \rightarrow$ коммутирующие контакты тормозного переключателя $ТП \rightarrow$ отрицательные выводы выпрямителя $-U_1, U_2, U_3$ [22, 23, 24].

Защита и сигнализация при пробое изоляции на корпус высоковольтных цепей осуществляется устройством искусственного «заземления» [18, 25]. В устройство входят двухкатушечное реле заземления $РЗ$, резисторы $СРЗ1-СРЗ4$, рубильники $ВРЗ1,2$, кнопка реле заземления $КРЗ$, блок выпрямителей $ВВЗ$ и блок диодов $UZ1$. Цепь заземления подключена к выводам «+» и «-» выпрямителей через блок диодов $UZ1$ (от каждого ТЭД).

Для обнаружения пробоев изоляции на корпус и защиты предлагается мостовая схема с дополнительным источником переменного напряжения. Особенностью измерительного моста является то, что его разбалансировка происходит при изменении емкости изоляции обмоток тяговых электродвигателей. Схема замещения электродвигателя постоянного тока представляет собой RLC контур, где C – емкость изоляции обмоток якоря и полюсов. Изоляцию электродвигателя можно представить в виде модели плоского конденсатора, следовательно, при пробое которого емкость конденсатора становится равной нулю.

Устройство работает следующим образом. Емкость изоляции тяговых электродвигателей, входящая в комплексное сопротивление цепи двигателя $Z_{ц}$ включена на электрической схеме устройства обнаружения пробоя (УОП) последовательно с первой эквивалентной емкостью C_1 , образуя одно плечо измерительного моста. Второе плечо измерительного моста образовано последовательно включенными второй эквивалентной емкостью C_2 и комплексным сопротивлением $Z_{э\kappa\theta}$. Плечи измерительного моста питаются переменным током от

источника через разделительный конденсатор C_3 . В диагональ полученного измерительного моста включен транзистор – пороговый элемент.

Принципиальная электрическая схема устройства показана на рис. 3.2 а)

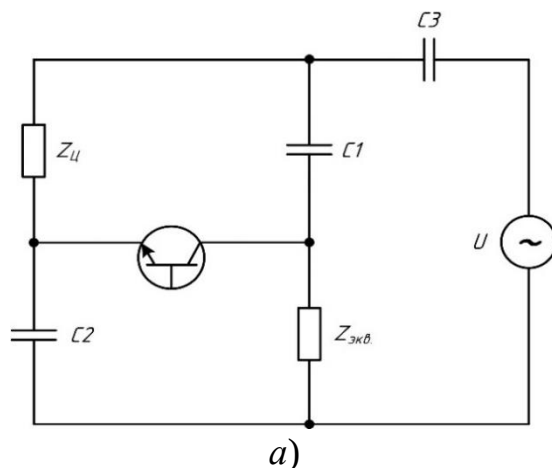


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема – а) и общий вид – б) устройства обнаружения пробоя (УОП)

В штатном режиме силовой цепи, при отсутствии в ней корпусных замыканий плечи измерительного моста уравновешены, транзистор обесточен. При возникновении пробоя на корпус в любом режиме силовой цепи и в любой ее части емкость изоляции становится равной нулю, ток проводимости возрастает скачкообразно, что приводит к неравенству напряжений в точках подключения транзистора и через него будет протекать ток; сигнал об этом поступит в устройство обработки информации (УОИ), что приведет к отключению подачи импульсов управления на тиристоры тягового выпрямителя тепловоза [96 – 104].

Внешний вид опытного образца устройства показан на рис. 3.2 б). В качестве блока питания устройства используется аккумуляторная батарея тепловоза, подключённая к автономному инвертору, который является преобразователем напряжения. С выхода преобразователя напряжение (220 В, 50 Гц) поступает на типовой многообмоточный трансформатор типа ТПП 259-127/220-50. С обмоток этого трансформатора напряжение (98 В, 50 Гц) поступает на электрическую схему устройства. В опытном образце устройства приняты следующие упрощения: так, транзистор на электрической схеме заменен на однообмоточное реле фирмы

ТІАНВО HJQ-22F-4Z с напряжением срабатывания 48 В, а комплексное сопротивление $Z_{\text{экв}}$ заменено активным.

Устройство устанавливается в кабине машиниста и осуществляет шестиканальный контроль состояния изоляции силовых цепей тяговых электродвигателей. При возникновении пробоя на корпус устройство мгновенно определяет номер неисправного двигателя и сигнализирует посредством световой индикации, после чего машинист принимает меры по выводу ТЭД из силовой цепи для дальнейшей эксплуатации. Документ, подтверждающий новизну технической разработки, представлен в приложении 3.

Для защиты от пробоев в силовой цепи тепловоза 2ТЭ25КМ необходимо шесть устройств УОП1...УОП6 объединить в систему защиты от пробоя изоляции на корпус. Расположение трех из них показано на упрощенной принципиальной электрической схеме (для одной тележки тепловоза) на рис. 3.3.

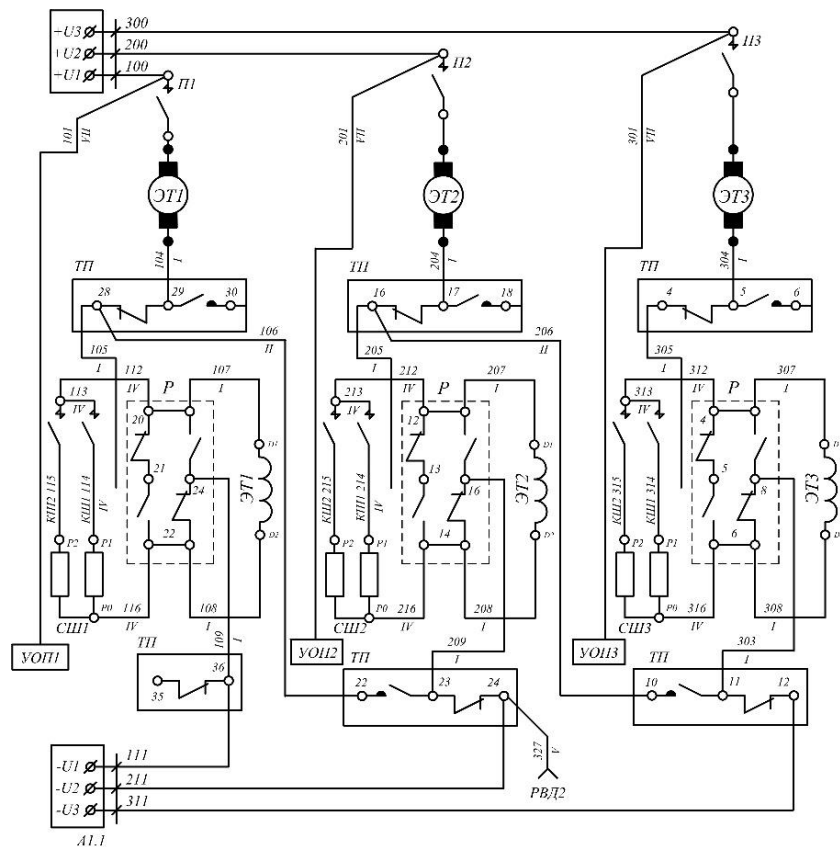


Рисунок 3.3 – Упрощенная принципиальная схема силовой цепи тепловоза 2ТЭ25КМ после внесения изменений (для одной тележки)

В ходе дальнейшего тестирования устройства на тепловозе возможно обеспечить взаимодействие его с МСУ-ТП с целью передачи сигнала о наступлении аварийного режима.

3.2 Моделирование процессов в устройстве и проверка адекватности математической модели

Для определения токов срабатывания порогового элемента разработана схема замещения силовой цепи тепловоза с включением в нее устройства обнаружения пробоя и защиты. Так как регулирование тяговых электродвигателей на тепловозе 2ТЭ25КМ индивидуальное, для упрощения расчетов на схеме выбран один двигатель, а в качестве порогового элемента выбрано реле $PЗ$. Выделим на схеме устройства три контура (рис. 3.4).

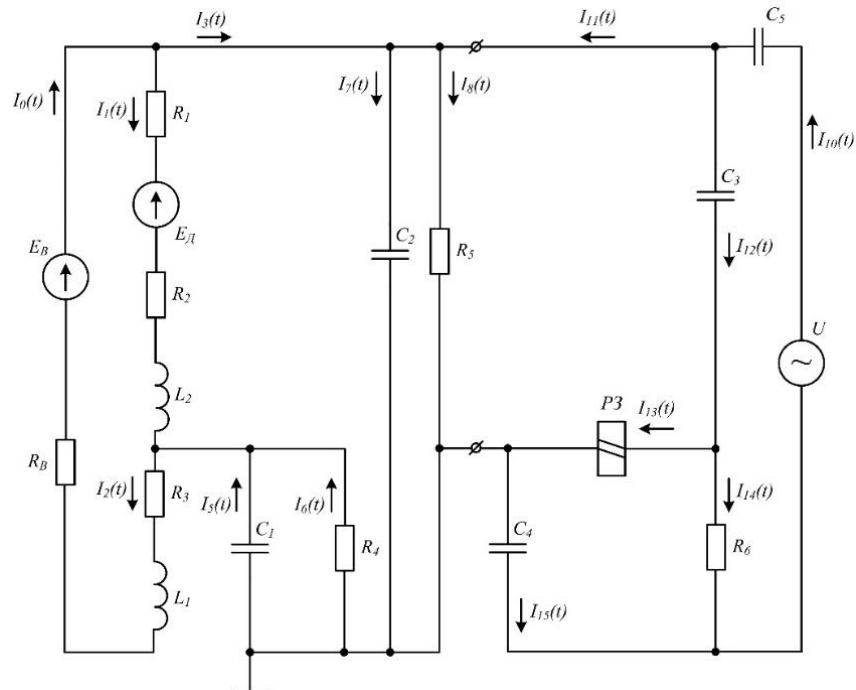


Рисунок 3.4 – Схема замещения предложенной силовой цепи тепловоза 2ТЭ25КМ (схема включения 1-го ТЭД)

Первый контур содержит резистор R_5 – сопротивление изоляции якорной цепи ТЭД, регистрирующее реле устройства и эквивалентную ёмкость C_3 . Второй контур включает в себя разделительную ёмкость C_5 , эквивалентную ёмкость C_3 , активное сопротивление R_6 и источник переменного тока U . Третий контур, в свою очередь, состоит из эквивалентной ёмкости C_4 , активного сопротивления R_6 и регистрирующего реле устройства.

Уравнения для узлов и контуров, обозначенных на схеме, представлены системой уравнений:

$$\begin{cases} I_{10}(t) - I_{11}(t) - I_{12}(t) = 0 \\ I_{12}(t) - I_{13}(t) - I_{14}(t) = 0 \\ I_{11}(t) + I_{13}(t) - I_{15}(t) = 0 \\ I_{10}(t) \frac{1}{i\omega C_5} + I_{12}(t) \frac{1}{i\omega C_3} + I_{14}(t) R_6 = U \\ I_{11}(t) Z_6 - I_{12}(t) \frac{1}{i\omega C_3} - I_{13}(t) R_{P3} = 0 \\ I_{13}(t) R_{P3} - I_{14}(t) R_6 + I_{15}(t) \frac{1}{i\omega C_4} = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Моделирование токов и напряжений в элементах схемы замещения в штатном режиме тепловоза и в момент пробоя изоляции обмотки якоря производилось в программном пакете *Matlab R2017b*

В момент пробоя изоляции на корпус ток в реле устройства скачком увеличивается до 60,487 мА.

Проверка адекватности математической модели проведена в сервисном локомотивном депо Ершовское филиала «Южный» ООО «ТМХ-сервис» (тепловоз 2ТЭ116У №0058) и в эксплуатационном локомотивном депо Ульяновск – структурном подразделении Куйбышевской дирекции тяги – структурном подразделении Дирекции тяги – филиале ОАО «РЖД» (тепловоз 2ТЭ25КМ №0403). Фотографии, иллюстрирующие проведение эксперимента показаны на рис. 3.4. Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы, представлены в приложении 4.

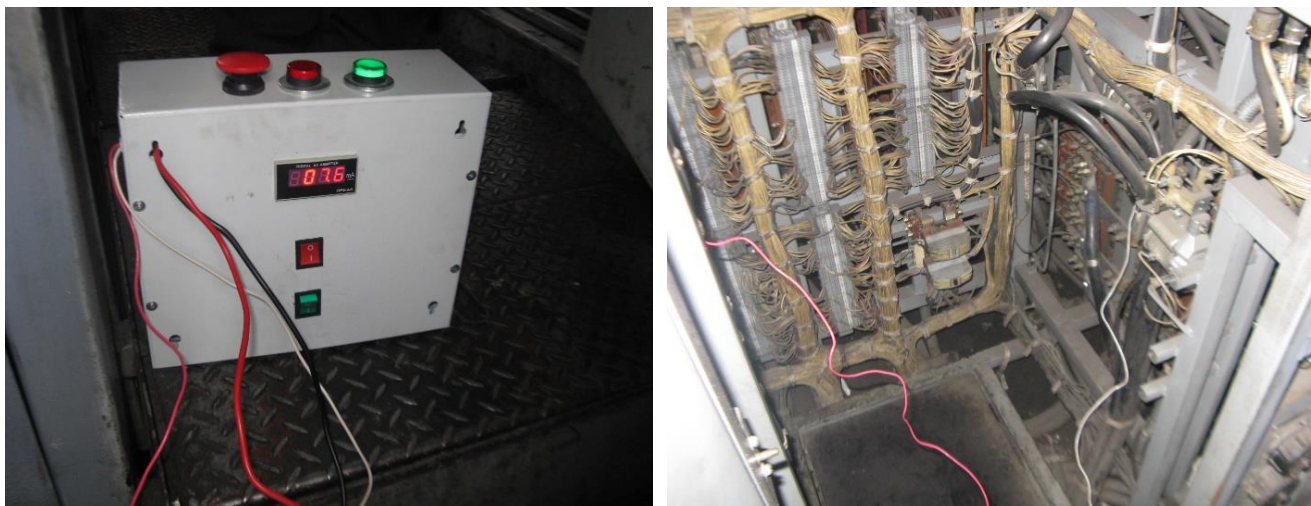


Рисунок 3.4 – Фотографии, иллюстрирующие проведение эксперимента

Ток при срабатывании регистрирующего реле в устройстве обнаружения и защиты при возникновении пробоя на корпус (устанавливалась перемычка на контактах поездного контактор) составил 65 А. Сходимость теоретического и экспериментального исследований составила 7 %.

Кроме этого, была проведена оценка быстродействия существующей и предлагаемой системы защиты тепловоза от пробоя изоляции на корпус, при проведении опыта был использован обычный осциллограф. Как показали замеры (рис. 3.5) предлагаемая система срабатывает при $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; существующая – при $10 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

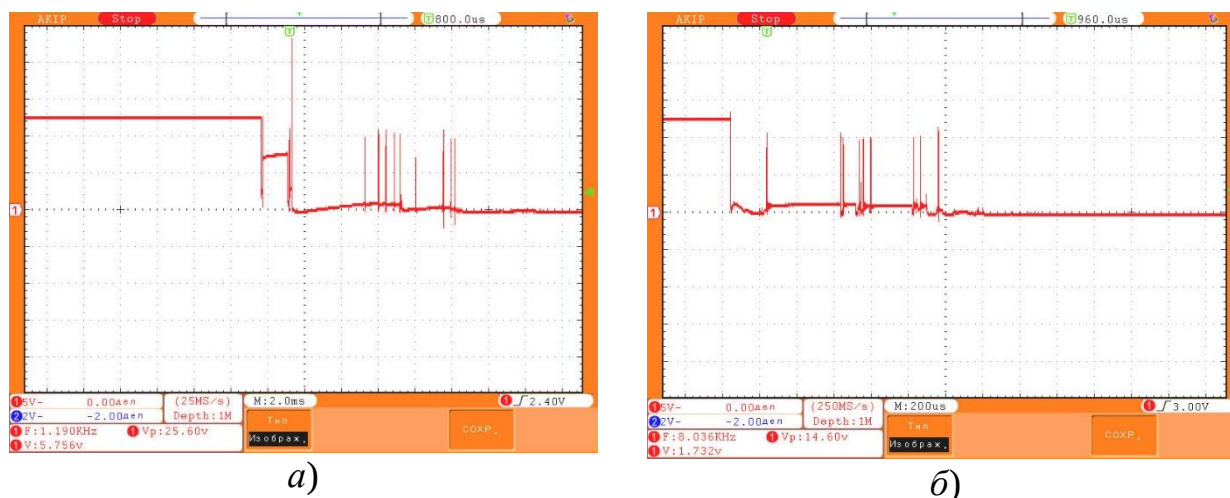


Рисунок 3.5 – Время срабатывания существующего устройства защиты – а) и предлагаемого – б)

При внедрении предлагаемого устройства защиты будут решены задачи: точности срабатывания, быстродействия, простоты алгоритма работы реле заземления. Дополнительно решается задача контроля контактных соединений и повышения их надежности.

В ходе экспериментов были успешно локализованы пробой изоляции в силовой цепи и обнаружены аварийные устройства, подлежащие замене. Результаты опытов позволяют утверждать, что на основе метода создана система оперативной диагностики и защиты, которая будет успешно использоваться при эксплуатации отечественных тепловозов.

3.3 Повышение ресурса тяговых электродвигателей после выравнивания напряжений в обмотках при внедрении устройства на тепловозе

Исследования, направленные на повышение надежности тяговых двигателей маневровых тепловозов старых серий, которые проводились еще в 70-х годах прошлого века, выявили неравномерность распределения напряжения в изоляции у групп двигателей, включенных в цепь. Установлено, что наибольшее напряжение 800 В имеет место в изоляции якорных обмоток двигателей 1,2,5; в то же время на изоляцию якорных обмоток двигателей 6,3,4 приходится напряжение, составляющее около 50 % напряжения генератора. В результате этого напряженность электрического поля в изоляции первой из названных групп двигателей в два раза, а мощность потерь в изоляции в четыре раза больше, чем у второй группы. Естественно, это приводит к большой повреждаемости изоляции первой группы двигателей. Если реле заземления присоединить к точке цепи, расположенной между двумя последовательно включенными якорями двигателей, то на изоляцию якорных обмоток всех двигателей будет действовать напряжение, равное примерно половине рабочего напряжения главного генератора. Полученные данные позволяют сделать вывод, что для повышения надежности изоляции

необходимо снизить рабочие напряжения на тяговых двигателях, подключенных со стороны положительного вывода главного генератора [105, 106]. Предлагается применить данную методику для электрической схемы современного магистрального тепловоза [107].

В главе 2 при моделировании процессов в изоляции был сделан вывод о значительной неравномерности распределения напряжения выпрямителя относительно корпуса между в обмотках тяговых электродвигателей. Установившееся значение напряжения в изоляции на 15-й позиции контроллера машиниста составило 738 В – для обмотки якоря и 12 В для обмотки полюсов.

Как показывают результаты моделирования системы уравнений (3.1), после установки разработанного устройства в силовую цепь тепловоза 2ТЭ25КМ, время выхода напряжений на конденсаторах C_1 и C_2 на установившиеся значения, на 15-й позиции контроллера машиниста, резко возрастает и составляет 50 с. (рис. 3.6).

Графики нарастания напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 при переключении позиций контроллера машиниста (1-15) в предложенной силовой цепи тепловоза представлены в приложении 5.

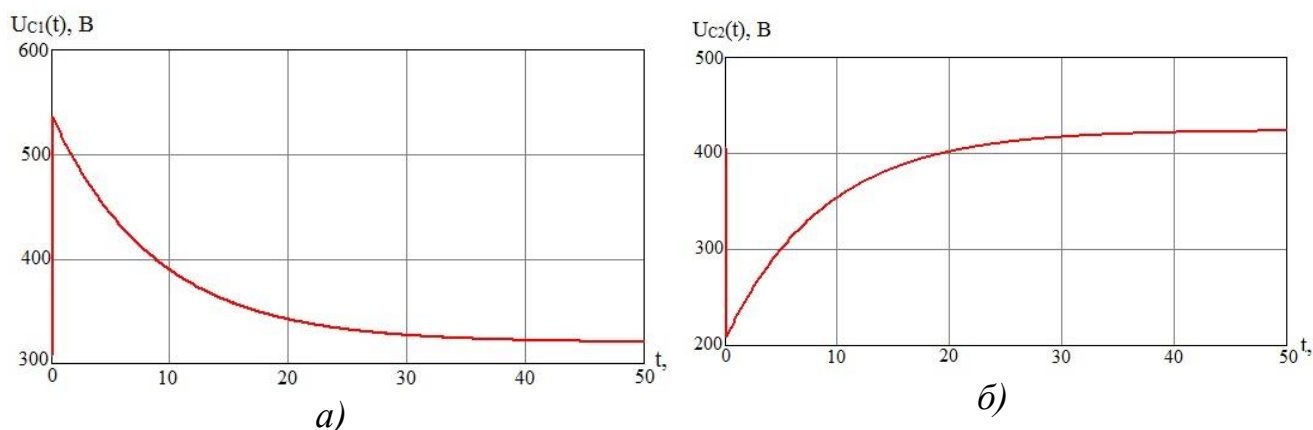


Рисунок 3.6 – Графики нарастания напряжения на конденсаторе C_1 – а), на конденсаторе C_2 – б) в предложенной силовой цепи тепловоза

График нарастания напряжения $U_{C1}(t)$ на обкладках конденсатора C_1 в процессе его заряда (рис. 3.6 а) показывает, что напряжение в начальный момент времени достигает максимального значения, равного 750 В и соответствует напряжению тягового выпрямителя, затем плавно уменьшается и через $t = 50\text{ с.}$

выходит на установившееся значение 328 В. Напряжение U_{c2} на обкладках конденсатора C_2 в процессе его заряда (рис. 3.6 б) показывает, что напряжение в начальный момент времени равно нулю, затем плавно увеличивается до установившегося значения, равного 422 В.

На рис. 3.7 представлены графики зависимости значения напряжения на обмотках тягового электродвигателя от номера позиции контроллера машиниста. По полученным значениям можно сделать вывод о выравнивании напряжения в обмотках и значительном снижении напряжения в изоляции якорной обмотки относительно корпуса. Снижение составило 43,5 %, напряжение в изоляции полюсов наоборот выросло в 50 раз.

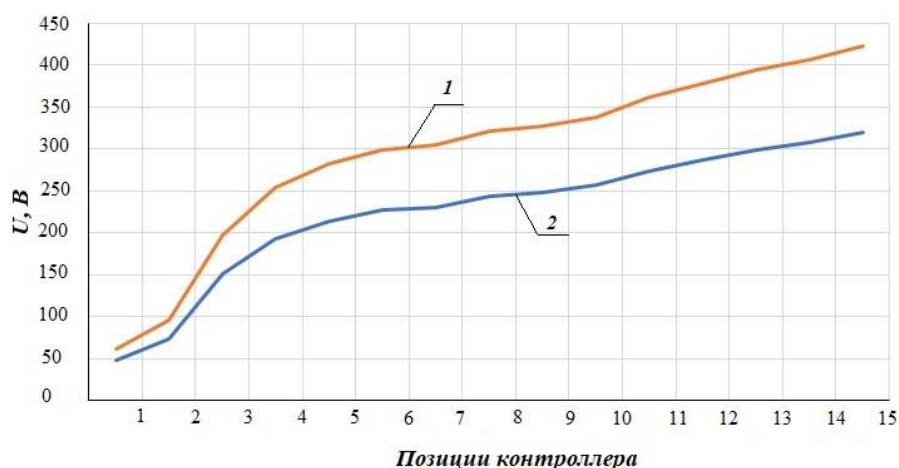


Рисунок 3.7 – Напряжение в изоляции тягового двигателя в зависимости от позиции контроллера машиниста

- 1 – Напряжение в изоляции якорной обмотки;
- 2 – Напряжение в обмотке главных полюсов

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработка системы защиты от пробоев изоляции на корпус и ее внедрение в силовую цепь тепловоза позволит получить безаварийные условия работы изоляции якорей ТЭД в эксплуатации. Такие условия можно обеспечить двумя способами. Первый заключается в уменьшении температуры изоляции, что снижает вероятность образования активных частиц проводимости и повышает энергетический барьер,

препятствующий пробоем изоляции путем увеличения пробивного напряжения. Второй заключается в понижении напряжения в изоляции относительно корпуса, действующего в эксплуатации [108]. Однако уменьшение температуры изоляции связано с большими техническими трудностями и достигается либо изменением конструкции применяемых тяговых электродвигателей, либо увеличением мощности охлаждающих устройств этих двигателей. При стесненных габаритах локомотивов это может стать неразрешимой задачей. Кроме этого, конструкция как самого ТЭД, так и его охлаждающего устройства обеспечивает необходимую температуру изоляции, исключая наступление теплового пробоя при всех токовых нагрузках. Поэтому наиболее приемлемым необходимо считать второй, что и было доказано в данном разделе.

Далее предлагается показать, каким образом выравнивание напряжения в изоляции обмоток тяговых электродвигателей тепловоза позволит увеличить ресурс.

Исследованиями установлено, что ухудшение электрических характеристик изоляции в эксплуатации происходит не сразу, а в первых циклах старения изоляции, её сопротивление не только не падает, а наоборот возрастает, что объясняется упрочнением структуры изоляции за счёт увеличения цементирующей способности пропиточного лака. Это говорит о том, что момент начала старения изоляции от начала эксплуатации ТЭД отстаёт, как минимум (на основании данных), на время, эквивалентное сроку старения пропиточного лака в течение 50 суток при температуре 150°C [109]. Таким образом, отказы, наблюдающиеся в начальный период эксплуатации, происходят не по причинам старения изоляции, а из-за причин, вызванных развитием в ней дефектов технологического характера.

Характер процессов выхода из строя электрических машин на примере ТЭД ЭД-107, представленный в работе [110], имеет три периода эксплуатации ТЭД. Первый период охватывает интервал от 0 до 100 *тыс. км*. В этот период наблюдается значительное количество отказов изоляции по причине вышеуказанных дефектов. Такой период называют периодом приработки. Второй

период в интервале пробега от 100 *тыс. км* характерен тем, что количество отказов в нём стабилизируется и остаётся постоянным до пробега 450 *тыс. км*. Это означает, что ТЭД в этом интервале работает в зоне нормального износа. Третий период эксплуатации ТЭД, охватывающий пробег от 450 до 650 *тыс. км*, характеризуется значительным ростом количества отказов по интервалам наработок за счёт выхода из строя ТЭД из-за снижения сопротивления изоляции. В этот период катастрофического износа наступают отказы, вызванные старением изоляции. В работе [111] проведен анализ работы 1020 тяговых двигателей ДПЭ400 в интервале пробега от 0 до 1300000 *км*. На основании обработки полученных данных была получена зависимость опасности отказа λ указанных ТЭД вследствие пробоя изоляции якорных катушек. Вид полученной гистограммы и огибающей кривой также чётко указывает на три характерных периода эксплуатации ТЭД. Отличие этих периодов только в абсолютных значениях пробегов. Так период приработки ТЭД ДПЭ-400 характерен от начала эксплуатации до пробега ≈ 350 *тыс. км*. При этом опасность отказа λ , возрастает от 0 до $0,015 \text{ км}^{-1}$. Далее наступает период нормального износа изоляции, который длится до пробега ≈ 900 *тыс. км*. Этот период характеризуется тем, что опасность отказа остаётся постоянной, равной $\lambda = 0,015 \text{ км}^{-1}$. Дальнейший период эксплуатации – период катастрофического износа изоляции – длится от 900 *тыс. км* до 1 300 000 *км*. Опасность отказа в этот период возрастает от значения $\lambda = 0,015 \text{ км}^{-1}$ до значения $\lambda = 0,075 \text{ км}^{-1}$.

Таким образом, изменение прочностных свойств изоляции находит своё отражение в изменениях основных характеристик распределения её вероятностей пробоя в зависимости от времени, прошедшего от начала эксплуатации.

Изнашивание изоляции наступает в результате воздействия на неё знакопеременных температурных напряжений и импульсов высокого напряжения. Так как срок службы изоляции ТЭД, не имеющей грубых технологических дефектов, сравнительно велик (8 - 10 лет), можно предположить, что изменение физико-технических свойств изоляции протекает достаточно медленно и её износ

(убывание прогнозирующего параметра) происходит по мере накопления малых по величине повреждений. Необходимо также отметить, что в процессе производства ТЭД их изоляция, в соответствии с установленной технологией, многократно подвергается испытаниям высоким напряжением, в результате чего дефекты, которые могут привести к приработочным отказам, частично выявляются в процессе изготовления, контрольных и обкаточных испытаниях.

Как показано в работе [112], для оценки надёжности изделий, имеющих однородность начального качества, частичную приработку в заводских условиях и работающих в широком диапазоне нагрузок, может быть применена схема накапливающихся повреждений. Такая схема предполагает, что средняя скорость изменения прогнозирующего параметра при её случайных вариациях в среднем постоянна.

Применительно к изоляции обмоток ТЭД это означает, что зависимость их пробивного напряжения от времени может быть принятой линейной, т. е.

$$U_{np} = U_n - kt \quad (3.2)$$

где U_{np} – текущее значение пробивного напряжения изоляции обмоток, кВ; U_n – начальное значение электрической прочности обмоток ТЭД, при выпуске его заводом-изготовителем; k – коэффициент, учитывающий ухудшение качества изоляции в эксплуатации, $кВ/тыс. км$; t – пробег ТЭД от начала эксплуатации, $тыс. км$.

Это предположение достаточно приемлемо в связи с тем, что, как правило, при другой зависимости U_{np} от времени можно найти преобразование, приводящее такую зависимость к виду (3.2) [113]. Кроме этого, уже проведенные исследования достаточно полно подтверждают, что зависимость (3.2) действительно имеет место при эксплуатации реальных систем изоляции.

При исследовании общих закономерностей электрического старения внутренней изоляции зависимости вида $U_{np} = f(t)$ называют «кривыми жизни» [114]. Показано, что определение этих кривых связано с большими трудностями. При этом для сроков эксплуатации 10^3 ч к времени исследования было накоплено

уже сравнительно много данных. Значительно меньше данных было при эксплуатации изоляционных систем в течение $(2 - 5) \cdot 10^3$ ч, а результаты измерений для времени эксплуатации более одного года являлись уникальными.

Несмотря на ограниченность имеющихся экспериментальных данных, установлено, что зависимости средних значений времени жизни изоляции от напряжения для изоляционных конструкций разного типа имеют практически одинаковый характер и что, следовательно, во всех случаях имеет место примерно один и тот же механизм электрического старения. Далее показано, что в области средних значений времени жизни изоляции опытные данные, характеризующиеся графиками функций $\lg \tau_i = f(\lg U_i)$, где τ – время жизни изоляции, располагаются близко к прямым линиям.

В работе [115] показано, что интенсивность старения любого инженерного объекта в общем случае является функцией размеров наибольшего дефекта. Авторы [116, 117], принимая за прогнозирующий параметр электрической изоляции электротехнического изделия её электрическую прочность, выдвинули постулат, согласно которому скорость износа изоляции под действием напряжения и механических усилий зависит от абсолютной температуры. На основании этого постулата предлагается процесс старения изоляции описывать следующей формулой:

$$\lg U_{np} = \lg U_n - k t e^{Q/E} \quad (3.3)$$

где k – коэффициент, зависящий от температуры и величины дефекта изоляции $\kappa B/c$; t – время, с; Q — энергия активации, Bm E – энергия реакции, Bm .

Как видно из приведенной формулы, её структура и вид весьма близки к выражению (3.2). К аналогичной формуле приходит и автор работы [118]. Он предлагает аппроксимировать снижение электрической прочности изоляции обмоток якорей ТЭД ЭДТ-200 от пробега формулой:

$$U_{np} = U_n - 0,28 \cdot 10^{-2} \cdot L \quad (3.4)$$

где L – пробег, тыс. км.

Ранее к похожему выводу приходят авторы [119], предлагая оценивать срок службы изоляции ТЭД ДПЭ-400 по формуле:

$$C = \frac{U_n - U_{npn}}{\Delta U_{np}} \quad (3.5)$$

где C – срок службы, лет; U_{npn} – возможные перенапряжения, воздействующие на изоляцию в эксплуатации, κB ; ΔU_{np} – средняя скорость снижения пробивного напряжения, $\kappa B \text{ эфф/год}$.

В более поздней работе [109] аналогичной по структуре формулой описывается зависимость ресурса изоляции от температуры. Так для стеклослюдинитовой изоляции на основе ленты ЛС-ПЭ-934-ТП эта зависимость выглядит следующим образом:

$$\lg L = -7,65 + 0,488 \frac{1 \cdot 10^4}{273 + T}, \quad (3.6)$$

где L – ресурс изоляции, ч; T – температура теплового воздействия, $^{\circ}C$.

Кроме приведенных аналогий, необходимо отметить тот факт, что распределение вероятностей отказов ТЭД подчиняется нормальному закону [109, 119]. Такое распределение вероятностей отказов подтверждает правильность гипотезы о том, что прогнозирование надёжности работы изоляции обмоток ТЭД может производиться на основе применения схемы накапливающихся повреждений. Как показано в работе [120], в общем случае эта схема описывается законом гамма распределения, но при числе повреждений до отказа $\tau-12$ гамма распределение переходит в нормальный закон распределения вероятностей отказов. При такой схеме отказа скорость износа изоляции обмоток различных ТЭД в силу случайности получения ими повреждений будет различной по величине, но для одного и того же ТЭД она будет постоянной. Это и приводит к линейной зависимости прогнозирующего параметра U_{np} от времени.

Можно сказать, что для каждого элемента обмотки и в целом ее изменение прогнозирующего параметра носит вполне определённый детерминированный характер. Случайность в изменении пробивного напряжения изоляции обмоток

ТЭД U_{np} состоит в том, что коэффициент, учитывающий ухудшение качества изоляции в эксплуатации k в уравнении (3.2) является случайной величиной, численное значение которого определяется многими факторами. Главными из них необходимо считать начальное состояние изоляции обмоток, которое определяется уровнем технологии их изготовления на заводе-изготовителе, и условиями эксплуатации (профилем и состоянием пути, весом поездов, квалификацией машинистов, метеоусловий на полигоне их использования и пр.). Очевидно, что коэффициент, учитывающий ухудшение качества изоляции в эксплуатации k , есть скорость изменения пробивного напряжения изоляции обмоток ТЭД во времени в сторону его уменьшения. Т. е.

$$k(\tau) = \frac{dU_{np}(\tau)}{d\tau}, \quad (3.6)$$

где τ - текущая координата времени эксплуатации ТЭД.

Используя предложенную модель износа изоляционных конструкций, основанную на убывании их прогнозирующего параметра, можно получить аналитические зависимости для расчёта пробегов ТЭД в различных регионах и провести сравнительный анализ увеличения их сроков службы при замене класса изоляции. Для этого, в первую очередь, необходимо определить коэффициент k в формуле (3.2) и математические ожидания величин начальной электрической прочности корпусной изоляции изоляционных конструкций якорей ТЭД различной модификации. Кроме этого, необходимо определить математическое ожидание пробега ТЭД определённой модификации в данном регионе.

Согласно данным, приведенным в [119] среднее значение уровня электрической прочности для изоляции якорей ТЭД типа ЭД107А, выполненной на основе стеклослюдинитовой ленты ЛСПЭ-934-ТП (класс изоляции Н) при выпуске их с завода изготовителя, равно 5,64 кВ. Средний пробег таких двигателей на основании тех же данных в условиях Среднеазиатского региона равен 670 тыс. км. Принимая на основании данных [120] максимальное эксплуатационное

напряжение для силовой цепи тепловозов на уровне 1,2 кВ, коэффициент k для изоляции ТЭД, эксплуатирующихся в этом регионе, равен:

$$k = \frac{5,64 - 1,2}{670 \cdot 10^{-2}} = 0,663 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кВ}}{\text{тыс. км}} \quad (3.7)$$

Таким образом, расчётная формула пробега ТЭД типа ЭД107А в зависимости от уровня электрической прочности корпусной изоляции его якоря для условий эксплуатации его в Среднеазиатском регионе будет иметь вид:

$$L = 150,83 \cdot U_{np} - 180,99 \quad (3.8)$$

где L – пробег до отказа ТЭД, тыс. км; U_{np} – текущее значение электрической прочности корпусной изоляции ТЭД в эксплуатации.

Формулы типа (3.8) могут быть получены для любого региона эксплуатации ТЭД и для любых типов их изоляции при наличии экспериментальных данных по распределению вероятностей их пробегов в эксплуатации и величин электрической прочности при выпуске их с завода изготовителя или ремонтных предприятий.

В данной работе предлагается построить кривую ресурса (рис. 3.8) изоляции якоря тягового электродвигателя при его работе в модернизированной силовой цепи. Для построения кривой ресурса приняли $U_{np} = 8 \text{ кВ}$, максимальное рабочее напряжение на якоре ТЭД 1,2 кВ, пробег до заводского ремонта 650 тыс. км.

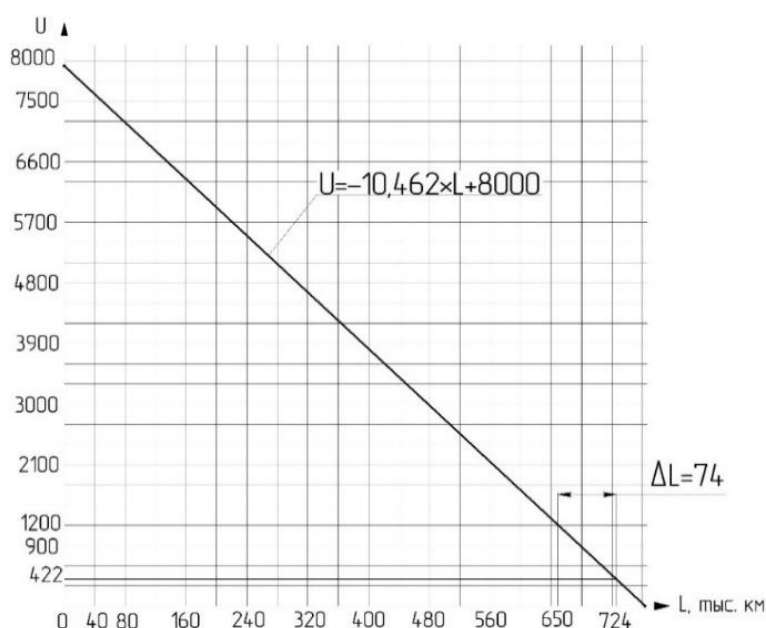


Рисунок 3.8 – Кривая ресурса изоляции якоря тягового электродвигателя

Таким образом, электрическое воздействие на изоляцию, которое связано с наличием перенапряжений в процессе эксплуатации ТЭД и приводит к разрушению и отслаиванию изоляции может быть снижено путем исключения точки соединения плюсовой и минусовой цепи тепловоза с корпусом. Снижение рабочего напряжения на изоляции якоря относительно корпуса в цепи тепловоза на 43,5 % позволит увеличить ресурс ТЭД на 74 км.

Выводы по главе 3

1. На основании обоснованного в главе 2 диагностического параметра предложена схема устройства для обнаружения и защиты от пробоев изоляции на корпус в силовой цепи тепловозов, защищенная патентом на полезную модель, позволяющая повысить быстродействие защиты в $7,142 \cdot 10^3$ раза по сравнению с существующей, а также установить, какой именно двигатель является аварийным для оперативного его отключения. Указанные преимущества позволяют снизить пожароопасность силовых цепей тепловоза, а также исключить остановку тепловоза в пути следования по причине пробоя изоляции в тяговых двигателях.

2. Анализ результатов моделирования позволил определить, что после установки предлагаемого устройства в силовую цепь тепловоза снижение рабочего напряжения относительно корпуса в изоляции якорной цепи составило 42,82 %, что позволит снизить повреждаемость обмоток и увеличить ресурс тяговых электродвигателей на 74 км.

3. В результате проведенного эксперимента с целью проверки и подтверждения достоверности полученных результатов отклонение параметров составило 7%, что доказывает адекватность созданной математической и компьютерной модели измененной силовой цепи, образованной с использованием схемы устройства, разработанной в данной диссертационной работе.

4. Впервые предложено проводить проверку состояния изоляции силовой цепи после подачи питания в низковольтную цепь тепловоза, что существенно упрощает диагностирование, делает процесс безопасным при проверке работоспособности тепловоза.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИИ НА КОРПУС

Аварийная ситуация на железной дороге ведет к финансовым потерям (табл. 4.1). В их числе такие, как: убытки от пожара локомотивов по вине ТЭД, которые составляют 1,255 млн.руб. на один локомотив; дополнительные расходы на восстановление локомотива, пострадавшего от пожара, на которые уходит более 2,51 млн.руб.; страховые выплаты (до 2,952 млн.руб. на один случай пожара) и штрафы за экологический ущерб (до 0,65 млн.руб.). Кроме того, по причине возгорания локомотива происходит задержка поездов на этом участке пути из-за остановки поезда на перегоне. При плотном графике движения задерживаются до 5-7 составов на один аварийный случай. Всего подобных ситуаций происходит до 15 шт. в год. Убытки от сбоя графика движения поездов составляют до 315000 руб. При этом возникают штрафные санкции за срыв срока доставки груза, расходы на замену локомотива.

Таблица 4.1 – Финансовые потери от возгорания одного локомотива

Причина	Ед. измер.	Финансовые потери
Возгорание ТЭД	Руб.	1255000
Страховые выплаты	Руб.	2952000
Экологические штрафы	Руб.	670000
Восстановление локомотива	Руб.	20510000
Сбой графика движения поездов	Руб.	315000
Штраф за срыв срока доставки груза	Руб.	2370000

Расходы на замену локомотива в движении	Руб.	258750
ИТОГО	Руб.	28330750

По самым скромным подсчетам, финансовые потери от возгорания локомотива по причине замыкания обмотки ТЭД могут составить 20,330 *млн.руб.* на один локомотив.

Распоряжением ОАО «РЖД» от 25.06.2014 № 1500р утверждены организационно-технические мероприятия, направленные на улучшение противопожарного состояния локомотивов, а также на устранение факторов, являющихся основными причинами их возникновения как конструкционных, так и возникающих в процессе эксплуатации и ремонта.

4.1 Составляющие экономического эффекта

При оценке эффективности инвестиционного проекта по оснащению локомотивов системой для защиты от пробоев изоляции на корпус необходимо определить систему натуральных и стоимостных показателей, которые позволят оценить целесообразность внедрения данной системы. В расчете экономического эффекта использован усредненный показатель финансовых потерь от сбоев в графике движения поездов.

К стоимостным показателям инвестиционного проекта относятся:

- капитальные вложения на создание системы защиты;
- ежегодные затраты на обслуживание системы защиты;
- амортизационные отчисления.

Капитальные вложения в разработку и изготовление системы защиты составят (см. табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Капитальные вложения в устройство

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Капитальные вложения
1	Изготовление устройства	Руб.	12000
2	Расход на парк локомотивов 150 шт.	Руб.	1800000

Целесообразность внедрения системы основывается на снижении расходов и убытков при ремонте и эксплуатации ТЭД. Так как предлагаемое устройство повысит надежность электрических цепей ТЭД, ускорит диагностику их в ремонте, то можно предложить следующий состав параметров экономического эффекта:

- снижение расходов от количеств unplanned ремонтов;
- снижение расходов от времени простоев локомотивов на плановых и unplanned ремонтах;
- снижение расходов на ремонт ТЭД из-за увеличения ресурса ТЭД в эксплуатации.

Финансовый результат от снижения расходов на вышеперечисленные нужды составит экономический эффект от внедрения системы для защиты от пробоев изоляции на корпус в силовых цепях тепловозов. Рассчитаем эти составляющие с использованием усредненных статистических данных.

4.2 Расчет экономического эффекта от уменьшения количества unplanned ремонтов

Внедрение предлагаемой системы приведет к увеличению ресурса изоляции тяговых электродвигателей, к уменьшению unplanned ремонтов и к меньшим объемам плановых ремонтов. Надежное диагностирование и определение ТЭД,

вышедшего из строя по причине пробоя изоляции еще в процессе эксплуатации, позволяет уменьшить сроки простоя их на плановых и неплановых ремонтах и ускорить время выдачи отремонтированных локомотивов под поезд.

Среднее количество неплановых ремонтов за год в депо составляет $N_{BP}=25$; средняя стоимость одного ремонта с заменой ТЭД равна 5000 руб.

Внедрение предлагаемого устройства позволит сократить число неплановых ремонтов с заменой ТЭД не менее, чем в два раза, откуда экономический эффект составит:

$$\mathcal{E}_1 = 25/2 \cdot 5000 = 62500 \text{ руб/год}.$$

4.3 Расчет экономического эффекта от уменьшения времени простоев локомотивов на плановых ремонтах

а) В среднем в грузовом движении за месяц простой локомотивов составляет 1,5 часа;

б) Убытки от простоя грузового локомотива для депо составляют 577,5 руб/час;

в) Убытки от простоя локомотивных бригад для депо составляют 20,125 руб/час.

Таким образом, за год общий простой локомотивов и локомотивных бригад составит: $12,0 \cdot 1,5 = 18,0 \text{ часов/год}$.

Рассчитаем убытки, исходя из того, что при локомотивном парке в 150 локомотивов 37 из них простаивали.

1. Убытки от простоя 25 локомотивов за год составят:

$$577,5 \cdot 18 \cdot 37 = 384615 \text{ руб/год}$$

2. Убытки от простоя локомотивных бригад за год составят:

$$20,125 \cdot 18 \cdot 37 = 13403,25 \text{ руб/год}$$

3. Суммарные убытки составят:

$$384615 + 13403,25 = 398018,25 \text{ руб/год}$$

Внедрение системы позволит сократить время простоев локомотивов и соответственно локомотивных бригад на 0,5 часа. Тогда:

1. Убытки от простоя 37 локомотивов за год составят:

$$577,5 \cdot 12 \cdot 37 = 256410 \text{ руб/год}$$

2. Убытки от простоя локомотивных бригад за год составят:

$$20,125 \cdot 12 \cdot 37 = 8935,5 \text{ руб/год}$$

3. Суммарные убытки составят:

$$256410 + 8935,5 = 265345,5 \text{ руб/год}$$

Таким образом, экономический эффект от уменьшения времени простоев локомотивов на плановых ремонтах $\mathcal{E}_2$ равен:

$$\mathcal{E}_2 = 398018,25 - 265345,5 = 132672,75 \text{ руб/год}$$

4.4 Расчет экономического эффекта от увеличения ресурса ТЭД в эксплуатации

Система, разработанная в главе 3, позволит увеличить ресурс изоляции тяговых электродвигателей за счет снижения напряжений на якорных обмотках и обмотках полюсов, что приведет к снижению расходов на ремонт ТЭД.

Стоимость заводского ремонта ТЭД ЭД133 составляет 74951 руб./шт. при пробеге локомотива 649316 км.

В результате внедрения системы средний пробег локомотива до капитального ремонта КР должен вырасти до 742060 км.

Количество запасных двигателей в депо для замены их на локомотивах, взамен вышедших из строя при парке 150 локомотивов в настоящее время должно составлять 276 ТЭД при условии, что локомотивы эксплуатируется от КР до КР.

В результате увеличения среднего пробега количество запасных двигателей в депо для замены их на локомотивах взамен вышедших из строя при парке 150 локомотивов составит 246 ТЭД.

Цикл замены всех ТЭД на локомотиве примерно составляет 10 лет.

Таким образом, поскольку надобность в отправке на ремонт 30 ТЭД отпадает, экономический эффект от увеличения ресурса ТЭД в эксплуатации $\mathcal{E}_3$ составит:

$$\mathcal{E}_3 = 30/10 \cdot 74951 = 224853 \text{ руб/год}$$

Полученные значения сведены в табл. 4.3

Таблица 4.3 – Суммарный экономический эффект от внедрения системы защиты от пробоя изоляции на корпус в силовых цепях тепловозов

№ п/п	Наименование экономического эффекта	Ед изм.	Значение
1	Экономический эффект от уменьшения количества неплановых ремонтов	Руб.	62500
2	Экономический эффект от уменьшения времени простоя локомотивов на плановых ремонтах	Руб.	132672,75
3	Экономический эффект от увеличения ресурса ТЭД в эксплуатации	Руб.	224853
	ИТОГО:	Руб.	420025,75

4.5 Расчет чисто дисконтированного дохода (ЧДД) от внедрения системы защиты

Чистый дисконтированный доход (ЧДД), или интегральный эффект определяется как сумма текущих эффектов за весь расчетный период, приведенная к начальному шагу, или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами. Минимальное значение нормы дисконта соответствует банковскому депозитному проценту. Если инвестиции представляют собой заемные средства, величина дисконта должна быть не ниже процентной ставки, определяемой условиями погашения долгов по займам. При смешанном капитале, когда инвестируются собственные, заемные и привлеченные средства, нижняя норма дохода на капитал определяется как средневзвешенная величина плат за пользование капиталом. Приведение затрат и результатов к базисному (начальному) моменту времени осуществляется умножением их на коэффициент приведения α_τ , определяемый для постоянной нормы дисконта по формуле:

$$\alpha_\tau = \frac{1}{(1 + E)^\tau}, \quad (4.1)$$

где τ – номер шага расчета ($\tau = 0, 1, 2, T$), а T – горизонт расчета.

Величина ЧДД при постоянной норме дисконта определяется по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{\tau=0}^T (P_\tau - Z_\tau) \cdot \frac{1}{(1 + E)^\tau} = \sum_{\tau=0}^T \frac{\mathcal{E}_\tau}{(1 + E)^\tau}, \quad (4.2)$$

где P_τ – результаты, достигаемые на τ -ом шаге расчета (доходы);

Z_τ – затраты (текущие издержки и инвестиции), осуществляемые на том же шаге;

T – горизонт расчета;

$\mathcal{E}_\tau$ – эффект, достигаемый на τ -ом шаге.

При небольших величинах горизонта расчета или небольших нормах дисконта дисконтирование результатов и затрат можно не осуществлять. В этом случае

вместо показателя «чистый дисконтированный доход» (ЧДД) используется показатель «чистый доход» (ЧД).

Срок окупаемости инвестиций или срок возврата вложений (T_o) - это период времени от начала реализации проекта, за пределами которого интегральный эффект становится неотрицательным. Для определения срока окупаемости используется равенство:

$$\sum_{\tau=0}^T \frac{P_{\tau} - Z_{\tau}}{(1+E)^{\tau}} = \sum_{\tau=0}^T \frac{K_{\tau}}{(1+E)^{\tau}}, \quad (4.3)$$

где K_{τ} – капиталовложения на τ -ом шаге.

Срок окупаемости системы зависит от величины капитальных вложений и экономии финансовых затрат за период внедрения.

Для расчетов приняли значения экономии затрат на плановые и неплановые ремонты ТЭД, снижение затрат от увеличения ресурса ТЭД, снижение затрат от уменьшения простоев локомотива на плановом ремонте и экономию затрат от снижения простоев поезда на перегоне при пробое изоляции ТЭД.

Из вышеприведенных расчетов видно, что величина финансовых затрат для определения экономического эффекта равна:

$$\mathcal{E}_z = 420025,75 + 315000 = 735025,75 \text{ руб.}$$

Принимаем за основной расчет снижение затрат при ремонте ТЭД и простое на перегоне как наиболее вероятное событие, результаты расчета представлены в табл. 4.5 и на рис. 4.1.

Таблица 4.5 – Расчет ЧДД и срока окупаемости проекта при $K = 1800000$ руб.

Т, год	а	Р, руб	ЧДД, руб
0		735025,75	- 1800000
1	0,9091	735025,75	-1064974,25
2	0,8264	735025,75	- 329948,50
3	0,7513	735025,75	+ 462356,30

На 3 году внедрения достигается положительный эффект при условии, что вложения осуществляются за счет экономии средств от сокращения неплановых ремонтов, от уменьшения времени простоя локомотивов на неплановых ремонтах, увеличения ресурса ТЭД и сокращения простоя на перегонах.

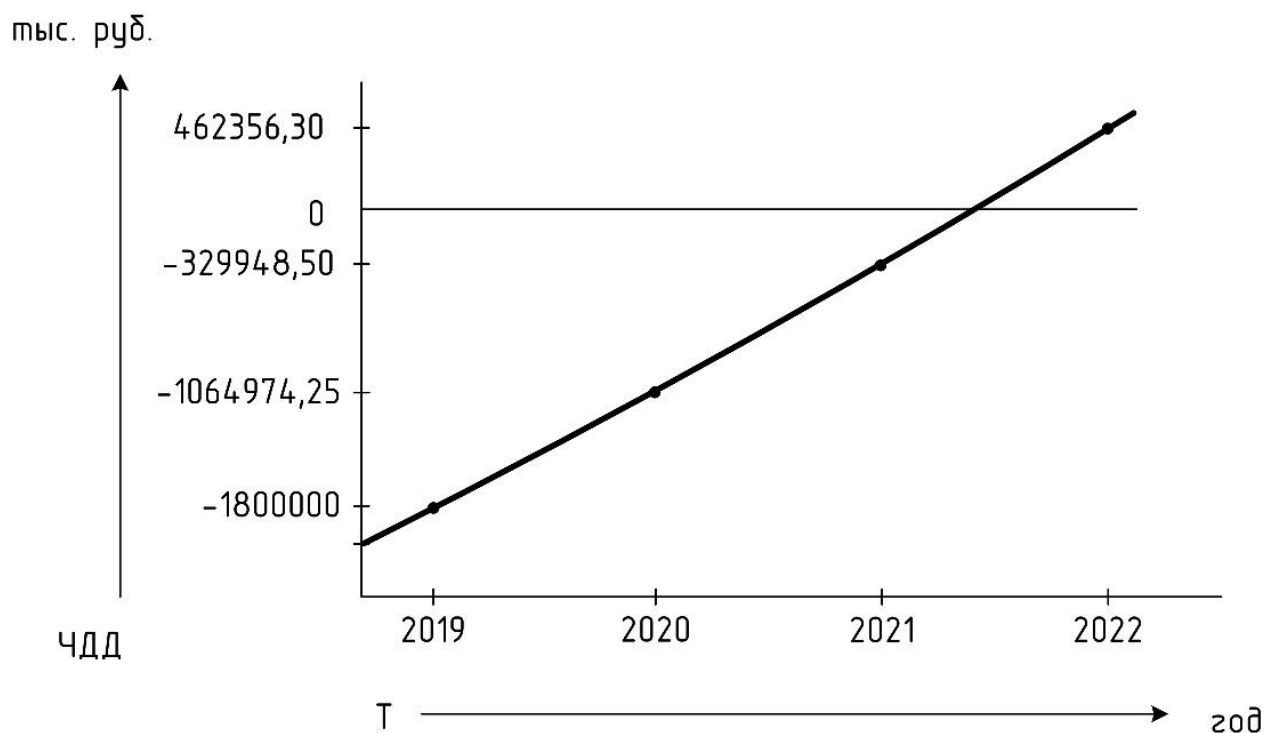


Рисунок 4.1 – Зависимость значения ЧДД от срока внедрения проекта

Срок окупаемости проекта на парк 150 локомотивов составит для разных случаев разные значения (табл. 4.6).

Таблица 4.6 – Расчет срока окупаемости в зависимости от выбранного случая

Наименование случая	Предполагаемый экономический эффект (руб.)	Срок окупаемости (год)
Снижение затрат при ремонте ТЭД	420025,75	4,28
Снижение затрат от простоя на перегоне	315000	5,71

Снижение затрат при ремонте и простое на перегоне	735025,75	2,45
Возгорание одного локомотива	28330750	0,063

4.6 Определение коэффициента экономической эффективности

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

$$E_o = 1/T \quad (4.4)$$

$$E_o = 0,408$$

Коэффициент экономической эффективности сравнивается с нормативным $E_n = 0,15$ и если расчетные показания выше, чем нормативные, то проект признается эффективным.

4.7 Рентабельность инвестиционного проекта

Рентабельность инвестиционного проекта определяется для единичного случая пробоя изоляции ТЭД, для вторых случаев и для третьих случаев.

Рентабельность проекта определяется по формуле:

$$R = (1/T) \cdot 100\% \quad (4.5)$$

$$R = 0,408 \cdot 100\% = 40,8\%$$

Это рентабельность проекта с учетом снижения затрат от ремонтов ТЭД и снижения простоя состава на перегоне. Если учесть случаи возгорания, то результат будет другим. Результаты расчета всех возможных случаев представлены в табл. 4.7

Таблица 4.7 – Зависимость рентабельности от ситуации

Наименование случая	Предпола- гаемый экономический эффект (руб.)	Срок окупае- мости (год)	Кэффициент эффектив- ности при нормативе >0,15	Коэф. рентабель- ности (%)
Снижение затрат при ремонте ТЭД	420025,75	4,28	0,233	23,3
Снижение затрат от простоя на перегоне	315000	5,71	0,175	17,5
Снижение затрат при ремонте и простое на перегоне	735025,75	2,45	0,408	40,8
Возгорание одного локомотива	28330750	0,063	15,87	1587

В случае возгорания локомотива рентабельность проекта превышает 1587 %, что говорит о целесообразности внедрения системы защиты от пробоев изоляции на корпус, предлагаемой в данной диссертационной работе.

Выводы по главе 4

На основе оценки экономической эффективности установлено, что целесообразность внедрения системы защиты от пробоя изоляции на корпус в силовых

цепях локомотивов определяется следующими экономическими параметрами: снижение расходов от количеств неплановых ремонтов; снижение расходов от времени простоев локомотивов на плановых и неплановых ремонтах; снижение расходов на ремонт ТЭД из-за увеличения ресурса ТЭД в эксплуатации, снижение затрат от простоя на перегоне, снижение расходов от возгорания локомотивов. Наиболее значимым является снижение затрат при ремонте, при простое на перегоне и от возгораний локомотивов.

Экономический эффект (чистый дисконтированный доход) от внедрения системы защиты за расчетный период составит 735025,75 руб. при программе модернизации в 150 локомотивов. Расчетный дисконтированный срок окупаемости равен 2,45 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено, что последствиями повреждений изоляции на тепловозах в эксплуатации являются ежегодно происходящие пожары и остановки в пути следования, что свидетельствует о неэффективности существующих систем защиты силовых цепей от пробоя изоляции на корпус и поиска иных подходов для их построения.

2. Обнаружено, что традиционный метод определения пробоя изоляции в цепях тепловозов основных серий, который основан на измерении напряжения в любой точке плюсовых или минусовых цепей высокого напряжения относительно корпуса, позволяет установить факт наличия аварии, но не обнаружить номер тягового электродвигателя, в каком она произошла. Поиск аварийного двигателя возможен только путем поочередного их отключения и включения тяговой нагрузки, что приводит к остановке поезда в пути следования и экономическим потерям по причине задержки. Следовательно, необходимо разработать новый метод обнаружения пробоев изоляции и защиты.

3. На основе проведенного анализа установлено, что методы, использующие наложение на объект контроля постоянного тока, либо переменного напряжения, эффективны, однако они могут применяться только в цепях со снятым рабочим напряжением, либо в цепях с переменным напряжением и не применимы в цепях с постоянным рабочим напряжением. Определено, что методы классического уравновешенного моста, а также методы, использующие наложение на объект контроля измерительного напряжения сверхнизкой, порядка 2-10 Гц, не промышленной частоты, неприменимы в системах с быстро изменяющимся напряжением в сети, например силовой цепи тепловозов. Подводя итог проведенному анализу, можно констатировать, что существующие методы обладают рядом недостатков. Для построения системы защиты предлагается

использовать параметры изоляции силовой цепи тепловоза с помощью мостовой схемы, источника переменного напряжения и элементов емкостного метода.

4. На основе проведенного анализа научных работ по моделированию процессов в силовой цепи локомотивов предложена схема замещения и математическая модель, впервые учитывающая электрическую емкость и сопротивление изоляции обмоток тяговых электродвигателей, что позволит задавать условие наступления пробоя на корпус при моделировании.

5. Результаты моделирования переходных процессов в разработанной схеме замещения силовой цепи тепловоза имеют вид классических графиков нарастания напряжения и токов заряда, что обосновывает правомерность представления изоляционных конструкций в виде сосредоточенных емкостей (конденсаторов) на схеме замещения. При замыканиях на корпус, напряжение на обкладках конденсатора убывает до нуля $U \rightarrow 0$, ток утечки скачком увеличивается, емкость убывает $C \rightarrow 0$. Таким образом, фактор изменения емкости изоляции тяговых электродвигателей может быть принят в качестве критерия, позволяющего обнаружить замыкание на корпус. Разработка и внедрение устройства, позволяющего контролировать изменение емкости изоляции обмоток в эксплуатации, позволит повысить эффективность работы существующих систем обнаружения замыканий на корпус в цепях высокого напряжения отечественных тепловозов.

6. Результаты моделирования показали, что график накопления напряжения на выводах конденсатора, представляющего изоляцию обмотки якоря ТЭД в штатном режиме силовой цепи тепловоза, описывает колебательный переходной процесс, достигающий установившегося значения, равного 738 В. Колебательный переходной процесс изменения напряжения на обкладках конденсатора, представляющего обмотку главных полюсов ТЭД, достигает установившегося значения, равного 12 В. Таким образом, основная часть выходного напряжения тягового выпрямителя относительно корпуса приходится

на изоляцию обмотки якоря, что объясняет большую повреждаемость обмотки в эксплуатации.

7. На основе экспериментального исследования, проведенного с помощью моста Шеренга (P595), датчиков температуры и сушильной печи, установленной в электромашинном цехе завода и сервисного локомотивного депо, получены значения емкости изоляции якоря и катушек полюсов тяговых электродвигателей локомотивов при различных значениях температуры и напряжения. Выявлено, что электрическая ёмкость обмоток в значительной мере зависит от температуры и в меньшей степени от напряжения. В частности, в диапазоне температур 40-140°C и напряжений 0-1000 В зависимость практически линейна, что существенно упрощает анализ и выбор исходных данных при моделировании, а также снижает разброс выходных результатов.

8. На основании обоснованного в главе 2 диагностического параметра предложена схема устройства для обнаружения и защиты от пробоев изоляции на корпус в силовой цепи тепловозов, защищенная патентом на полезную модель, позволяющая повысить быстродействие защиты в $7,142 \cdot 10^3$ раза по сравнению с существующей, а также установить, какой именно двигатель является аварийным для оперативного его отключения. Указанные преимущества позволяют снизить пожароопасность силовых цепей тепловоза, а также исключить остановку тепловоза в пути следования по причине пробоя изоляции в тяговых двигателях.

9. Анализ результатов моделирования позволил определить, что после установки предлагаемого устройства в силовую цепь тепловоза снижение рабочего напряжения относительно корпуса в изоляции якорной цепи составило 42,82 %, что позволит снизить повреждаемость обмоток и увеличить ресурс тяговых электродвигателей на 74 км.

10. В результате проведенного эксперимента для проверки и подтверждения достоверности полученных результатов отклонение параметров составило 7%, что доказывает адекватность созданной математической и

компьютерной модели измененной силовой цепи, образованной с использованием схемы устройства, разработанной в данной диссертационной работе.

11. Впервые предложено проводить проверку состояния изоляции силовой цепи после подачи питания в низковольтную цепь тепловоза, что существенно упрощает диагностирование, делает процесс безопасным при проверке работоспособности тепловоза.

12. На основе оценки экономической эффективности установлено, что целесообразность внедрения системы защиты от пробоя изоляции на корпус в силовых цепях локомотивов определяется следующими экономическими параметрами: снижение расходов от количеств unplanned ремонтов; снижение расходов от времени простоев локомотивов на плановых и unplanned ремонтах; снижение расходов на ремонт ТЭД из-за увеличения ресурса ТЭД в эксплуатации, снижение затрат от простоя на перегоне, снижение расходов от возгорания локомотивов. Наиболее значимым является снижение затрат при ремонте, при простое на перегоне и от возгораний локомотивов.

13. Экономический эффект (чистый дисконтированный доход) от внедрения системы защиты за расчетный период составит 735025,75 руб. при программе модернизации в 150 локомотивов. Расчетный дисконтированный срок окупаемости равен 2,45 года.

14. Для продолжения исследования необходимо рассмотреть вопросы, связанные с совместным взаимодействием предлагаемой в настоящей диссертации системы защиты от пробоя изоляции на корпус с микропроцессорной системой управления (МСУ-ТП) с целью передачи сигнала о наступлении отказа в цепи.

15. На основании полученных в диссертации результатов предложены следующие рекомендации для реализации их на этапах проектирования и эксплуатации тепловоза 2ТЭ25КМ.

15.1 Устройство «искусственного заземления», установленное в силовой цепи тепловоза, состоящее из двухкатушечного реле заземления *P3*, резисторов *CP31-CP34*, рубильников *BP31,2*, кнопки реле заземления

KP3, блока выпрямителей *BB3* и блока диодов *UZ1*, исключить из цепи. Взамен установить 6 устройств обнаружения пробоев, один из выводов которых соединяется с выводом каждого тягового электродвигателя, второй с корпусом тепловоза. Пороговый элемент устройств обнаружения пробоев соединяется с устройством обработки информации (УОИ) и устройством сигнализации.

15.2 На первых этапах эксплуатации, сигнал о наличии замыканий будет выводиться на блок сигнализации, впоследствии после доработок, на экран микропроцессорной системы управления тепловозом (МСУТ – ТП)

15.3 При выполнении плановых технических обслуживаний и текущих ремонтов необходимо проверять состояния конденсаторов, входящих в устройства системы, при необходимости их необходимо заменить.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- РЗ – реле заземления
- ВРЗ – рубильник (разъединитель) реле заземления;
- СРЗ – резистор реле заземления
- СР - сглаживающий реактор
- ТЭД – тяговый электродвигатель
- АВМ – асинхронная вспомогательная машина
- РЗ (Р) – рабочая катушка реле заземления
- РЗ (У) – удерживающая катушка реле заземления
- КРЗ – кнопка реле заземления
- БВЗ – выпрямительный мост
- БС5 – выпрямительный мост
- УОИ – устройство обработки информации
- МСУ-ТП – микропроцессорная система управления тепловозов
- ДН – датчик напряжения
- БВЗ – блок выпрямителей
- ГВ – главный выключатель
- ОАО «РЖД» – открытое акционерное общество «Российские железные дороги»
- ТПС – тяговый подвижной состав
- ТЭП – тяговый электропривод
- ВУ – управляемый выпрямитель
- ДПТ – двигатель постоянного тока

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сви, П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения [Текст]. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 128 с.
2. Попов, Ю.И. Расчет теплового старения изоляции тяговых электродвигателей электровозов [Текст] / Ю.И. Попов, А.С. Куренков, О.О. Соколов, В.П. Смирнов, А.С. Космодамианский, С.И. Баташов // Вопросы электротехнологии. – 2014. - №1. – С. 82-85.
3. Дектярев А.П. Тяговому подвижному составу – надёжную противопожарную защиту [Текст] // Локомотив. – 2007. – № 7. – С. 33.
4. Чикиркин, О.В. Приоритеты пожарной безопасности локомотивов [Текст] // Локомотив. – 2015. – №5. – С. 15-17.
5. Игин, В.Н. Тяговые расчеты – основа безопасности движения [Текст] / В.А. Минаков, А.А. Ракова // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век Т.1: материалы VI-международной научно-технической конференции, – СПб: ПГУПС. – 2018. – С. 13-22.
6. Мукоедов, К.И. Современные технические требования к установкам пожарной сигнализации и установкам пожаротушения для локомотивов [Текст] // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век Т.1: материалы VI-международной научно-технической конференции, – СПб: ПГУПС. – 2018. – С. 93-97.
7. Глебов, И.А. Диагностика турбогенераторов [Текст] / И.А. Глебов, Я.Б. Данилевич. – Л.: Наука, 1989. – 119 с.
8. Сарычев, С.С. Разработка и исследование измерительных органов комплексной защиты генераторов [Текст]: дис... канд. техн. наук. – Л.: ЛПИ, 1983. – 207 с.
9. Вавин, В.Н. Релейная защита блоков турбогенератор-трансформатор [Текст]. – М.: Энергоиздат. 1982. – 256 с.

10. Сергеев, С.В. и др. Электрическая схема тепловоза 2ТЭ116У [Текст] // Локомотив. – 2009. – №7. С.9-12.
11. Способ измерения сопротивления изоляции и защиты от замыканий на корпус силовых цепей тепловозов: Пат. 2488129 Российская федерация, МПК7 G01R 27/18/ Федотов М.В., Ким С.И., Набатчиков Ю.Н.; Заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (ОАО «ВНИКТИ») №2012101702/28; заявл. 19.01.2012; опубл. 20.07.2013, Бюл. №20. – с.
12. Марковская, О. А. Разработка системы контроля состояния изоляции и защиты генераторов от повреждений в цепях ротора [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2000. – 164 с.
13. Potdevin, H. Insulation Monitoring in High Voltage Systems for Hybrid and Electric Vehicles // ATZelektronik worldwide. 2009. V. 4. Iss. 6. Pp. 28—31.
14. Анучин, А.С., Метод определения и локализации пробоя изоляции для гибридного и электрического транспорта [Текст] / А.С. Анучин, Ю.О. Беляков, Ю.И. Прудникова, К.Г. Федорова // Вестник МЭИ. – 2017. – № 5. – С. 57-62.
15. Liu Y.-C., Lin C.-Y. Insulation Fault Detection Circuit for Ungrounded DC Power Supply Systems [Текст] // Proc. IEEE Sensors. – Taipei, 2012. – Pp. 1-4.
16. Yan, G. Research of Measurement Method about Electric Vehicle High Voltage System Isolation Resistance [Текст] / G.Yan, Z. Rong, L. Guibin, N. Kinoshita // Proc. IEEE Conf. and Expo on Transportation Electrification Asia-Pacific. – Beijing, 2014. – Pp. 1-5
17. Zhao, C. The New Method of Monitoring DC System Insulation On-line [Текст] / C. Zhao, X. Jia, Z. Hao // Proc. 27th IEEE Annual Conf. Industrial Electronics Society. – Denver, 2001. – V. 1. – Pp. 688-691.
18. Калякулин, А.Н. Анализ схем включения реле защиты от заземления в силовых цепях тепловозов [Текст] / А.Н. Калякулин, А.С. Тычков, М.В. Анахова // Вестник Транспорта Поволжья. – 2018. – Т.№1. – С.11-16.

19. Вилькевич, Б.И. Электрические схемы тепловозов типа ТЭ10М и ТЭ10У [Текст]. – М.: Транспорт, 1993. – 144с.
20. Аникиев, И.П. Электрические аппараты тепловозов 2ТЭ10М [Текст]: Учебное пособие / И.П. Аникиев; – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. трансп.» – 2009. – 82 с.
21. Анисимов, В.П. Электрическая схема тепловоза 2ТЭ116 (восьмой вариант) [Текст] // Локомотив. – 2014. – №3. – С.26-30.
22. Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Руководство по эксплуатации. Часть 1. Техническое описание 2ТЭ25КМ РЭ. ЗАО УК БМЗ. [Текст]. Брянск. 2015. – 153 с.
23. Васюков, Е.С. и др. Магистральный грузовой тепловоз 2ТЭ25КМ [Текст] // Железные дороги мира. – 2015. – №9. – С. 47-51.
24. Шаркин, И.А. и др. Магистральный грузовой тепловоз 2ТЭ25КМ: Структура системы управления и электрооборудования [Текст] // Локомотив. – 2016. – №1. – С.42-43.
25. Тимофеев, С.В. Тепловоз 2ТЭ25КМ: Цепи сигнализации и защиты [Текст] // Локомотив. – 2018. – №2. – С. 14-18.
26. Устройство для защиты от соединения с корпусом двухпроводных силовых цепей тепловоза с тяговым генератором постоянного напряжения: Пат. 925047335 Российская федерация, МПК В60L3/04, Новиков О.И.; Заявитель и патентообладатель Уральское отделение Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта №925047335; заявл. 13.05.1992; опубл. 27.10.1996. – 4 с.
27. Электрическая часть электростанций [Текст] / под ред. Усова С.В. – Л.: Энергия, 1977. – 556 с.
28. Кобылянский, А.В. Контроль изоляции сетей постоянного тока [Текст] / А.В. Кобылянский, А.Е. Рубаненко // Электрические станции. – 1989. – № 6. – С. 90-92.

29. Новости электротехники. №4(52), 2008. «Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок». (пп. «Метод уравнированного моста») // Е. Иванов, А. Дьячков.
30. Калашников, Н.С. Перспективные методы контроля сопротивления изоляции разветвленных электрических цепей, Электрофорум. [Текст] / Н.С. Калашников, А.Г. Кустов, С.К. Панайотис. - Санкт-Петербург, пилотный номер, 2000 г.
31. Способ измерения сопротивления изоляции в цепях постоянного тока [Текст]: Пат. 2384855 Российская Федерация, МПК G01R27/18, Романов С.В.; Заявитель и патентообладатель: Романов С.В. №2008150009/28; заявл. 17.12.2008; опубл. 20.03.2010. Бюл. №8. – 8 с.
32. Дунаев, Б.Д. Способ контроля сопротивления изоляции разветвленных сетей постоянного и переменного тока [Текст]. Патент Российской Федерации. № 2028638, дата публикации 1995.02.09.
33. Тарасов, Е.М. и др. Способ измерения сопротивления изоляции рельсовой линии [Текст]. Патент Российской Федерации. № 2176800, дата публикации 2001.12.10. Бюл. №34.
34. Белов, В.А. Устройство для измерения сопротивления изоляции в высоковольтных цепях Патент Российской Федерации. №, 2149414, дата публикации 2000.05.20. Бюл. №14.
35. Бородянский, И.М., Бородянский, М.Е., Галалу, В.Г., Наумкин В.П., Сурженко И.Ф., Шляхтин С.А. Измеритель малых сопротивлений Патент Российской Федерации. № 2279685 опубликован бюллетень № 19 от 10.07.2006 г. Приоритет от 03 декабря 2003 г. Бюл. №19. – 6 с.
36. Беркович, М.А. Основы техники релейной защиты [Текст] / М.А. Беркович, В.В. Молчанов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 375 с.
37. Справочник по наладке вторичных цепей электростанций и подстанций [Текст] / под редакцией Э.С. Мусаэляна. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 383 с.

38. Федосеев, А. М. Основы релейной защиты [Текст]. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 440 с.
39. Электровоз ВЛ80С. Руководство по эксплуатации [Текст]. – М.: Транспорт, 1982. – 568 с.
40. Электровоз ВЛ80Р. Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1985. – 541 с.
41. Мельниченко О.В. Силовые схемы современных отечественных электровозов переменного тока: учеб. пособие [Текст] / О.В. Мельниченко, А.И. Орленко. – Иркутск: ИРГУПС, 2007. – 97 с.
42. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Описание и работа. Электрические схемы. [Текст]. ОАО «ВЭЛНИИ», 2006 – 267 с.
43. Электровоз 2ЭС5К. Руководство по эксплуатации. Справочник в 8 т. Т.1: Описание и работа. Электрические схемы [Текст]. – Новочеркасск: Изд-во ВЭЛНИИ, 2004. – 249 с., ил.
44. Электровоз ЭП1. Руководство по эксплуатации. Книга 1 -Техническое описание. Электрические схемы. [Текст]. Текст.: ИДМБ.661142. 004.РЭ1 Новочеркасск.: ВЭЛНИИ - 220 с.
45. Электровоз ЭП1. Руководство по эксплуатации. Книга 4 -Техническое описание. Электрические аппараты: ИДМБ.661142. 004.РЭ4 Новочеркасск.: ВЭЛНИИ – 327 с.
46. Кулешов, В.И. и др. Способ избирательного контроля сопротивления изоляции Заявка на изобретение. № 94018153, дата публикации 1996.02.27.
47. Кулешов, В.И. Устройство избирательного контроля сопротивления изоляции Заявка на изобретение. № 93045829, дата публикации, 1997.03.27.
48. Калинин, И.М. Способ избирательного контроля сопротивления изоляции Заявка на изобретение. № 95100200, дата публикации 1996.11.27.

49. Патент РФ №1737364. Способ определения места снижения сопротивления изоляции в электрической цепи постоянного тока. / А.В. Седов, В.И. Лачин, А.К. Малина, Иванов Е.А.// – Бюл. изобрет. – 1992.

50. Способ измерения сопротивления изоляции в цепях постоянного тока: Пат. 2384855 Российская Федерация, МПК G01R27/18, Романов С.В.; Заявитель и патентообладатель: Романов С.В. №2008150009/28; заявл. 17.12.2008; опубл. 20.03.2010, Бюл. №8. – 8 с.

51. Бородянский, И.М., Бородянский, М.Е Способ измерения электрического сопротивления изоляции Патент Российской Федерации. № 2200329, опубликован бюллетень № 7 от 10.03.2003 г. Приоритет от 20 декабря 2000 г.

52. Бородянский, И.М. К вопросу измерения электрического сопротивления изоляции в жгутах и кабелях сетей, находящихся под напряжением [Текст] / И.М. Бородянский, Ю.М. Бородянский // Известия ТРТУ. Спец. выпуск. Материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности» – Таганрог. – №2(21). – 2003. – С. 66-67.

53. Бородянский, И.М., Бородянский М.Е. Способ измерения электрического сопротивления изоляции Патент Российской Федерации. № 2200329, опубликован бюллетень № 7 от 10.03.2003 г. Приоритет от 20 декабря 2000 г.

54. Бородянский, И.М. К вопросу измерения электрического сопротивления изоляции в жгутах и кабелях сетей, находящихся под напряжением [Текст] / И.М. Бородянский, Ю.М. Бородянский // Известия ТРТУ. Спец. выпуск. Материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности» – №2(21), Таганрог, 2003. – С. 66-67.

55. Бородянский, И.М. К вопросу улучшения метрологических характеристик измерителя сопротивления изоляции шин питания от корпуса [Текст]: Тезисы докладов Материалы Всероссийской научной конференции аспирантов и студентов

«Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления». – Таганрог: ТРТУ, 2004. – С. 286-287.

56. Лачин, В.И. Теория и методы построения устройств контроля и прогнозирования состояния объектов с дискретно-распределенными параметрами [Текст]: дис... докт. техн. наук: 05.13.05 / Ю-РГТУ. – Новочеркасск, 2002. – 304 с. - Библиогр.: с.254 - 279.

57. Калякулин, А. Н. Метод и устройство для обнаружения пробоя изоляции на корпус в силовых цепях тепловозов [Текст] // Омский научный вестник. – 2019. – № 1 (163). С. 38-42.

58. Фаронов, В. В. Турбо-Паскаль 7.0. Начальный курс [Текст]: учебное пособие. – М.: Нолидж, 1997. — 616 с.

59. Разевиг, В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. [Текст]. – М.: Солон, 1999. – 704 с.

60. Разевиг, В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2. [Текст]. – М.: Солон, 2001. – 528 с.

61. Ануфриев, И. Е. MatLab 5.3/б.х: самоучитель. СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.

62. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: учебное пособие. СПб.: Корона принт, 2001. — 320 с.

63. Антонюк Максим Сергеевич. Регулятор скорости для электровоза ЧС2К с индивидуальными электропневматическими контакторами реостатного пуска [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.22.07. – Москва, 2007. – 188 с.

64. Алексеев, Алексей Сергеевич. Система автоматического регулирования тока коллекторных тяговых двигателей электровоза [Текст]: дис ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Москва, 2009 -: 302 с. – 302 с.

65. Чучин, Антон Александрович. Индивидуальное потележечное и поосное управление силой тяги электровоза однофазно-постоянного тока с

адаптацией по сцеплению [Текст]: дис ... канд. техн. наук: 05.22.07. –Москва, 2005. –239 с.

66. Кулинич, Ю.М. Повышение качества электроэнергии, потребляемой электровозом однофазно-постоянного тока, на основе применения гибридного компенсатора реактивной мощности [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03 Москва, 2002. - 270 с.

67. Жиц, М.З. Переходные процессы в машинах постоянного тока [Текст]. – М.: Энергия, 1974. – 112 с.

68. Алексеев, А.С. Исследование влияния нелинейности кривой намагничивания тягового электродвигателя на переходные процессы в силовой цепи электровоза [Текст] // Труды МИИТа. – Вып. 912. – М.: МИИТ, 1997. – 104 с.

69. Баранов, В.А. Математическое моделирование электромагнитных процессов в силовой цепи электровоза постоянного тока при последовательно-независимом возбуждении тяговых двигателей [Текст] / В.А. Баранов // Вестник ВНИИЖТ. – 2009. – №2. – С.43-47.

70. Харламов, В.В. Анализ переходных процессов тяговых электрических двигателей с учетом условий эксплуатации [Текст] / В.В. Харламов, П.К. Шкодун, Д.И. Попов, А.В. Проненко // Известия Томского политехнического университета. –2012. –Т. 321. – № 4. –С.72-74

71. Берсенева, Д.В Анализ переходных процессов в обмотках тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 [Текст] / Д.В. Берсенева, М.В. Поляков, В.А. Кураев, Е.А. Третьяков // Современные материалы, техника и технология. – 2017. –С. 46-52.

72. Федяев, В.Н. Влияние электрической и механической подсистем магистрального тепловоза на реализацию предельных тяговых усилий [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. – Брянск, 2006. – 140 с.

73. Серебряков, А.С. Определение параметров схемы замещения корпусной изоляции тяговых электродвигателей [Текст] / А.С. Серебряков // Электротехника. – 2009. – №5. – С.40-45.

74. Серебряков, А.С. Оценка сопротивления высоковольтной изоляции с помощью анализа кривых саморазряда [Текст] / А.С. Серебряков, Д.А. Семенов // Электричество. 2016. №7. С.34-42.
75. Серебряков, А. С. Методы и средства для диагностики изоляции электрических машин и аппаратов её защиты [Текст]: дис. ... докт. техн. наук. – М., 2000. – 425 с.
76. Семенов, Д.А. Разработка и совершенствование методов и средств диагностик и главной изоляции трансформаторов 6-10 кВ [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.09.03. – Нижний Новгород, 2013. – 244 с.
77. Гордеев, И.П. Исследование диэлектрических параметров изоляции силовых цепей электровозов [Текст] / И.П. Гордеев, А.Н. Калякулин, А.С. Тычков // Наука и образование транспорту: материалы VII Международной научно-практической конференции. – Самара: СамГУПС. – 2014. – С. 13-15.
78. Шепелин, П.В. Исследование влияния емкости изоляции силовой цепи локомотивов [Текст] / П.В. Шепелин, А.Н. Калякулин, А.С. Тычков // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы второй международной научно-практической конференции. – М.: ООО «Локомотивные технологии». – 2015. – С. 347-350.
79. Гордеев, И.П. Математическая модель силовой цепи электровозов постоянного тока ВЛ-10(ВЛ10У) с учётом конструктивной электрической ёмкости корпусной изоляции их тяговых двигателей [Текст] / И.П. Гордеев, А.Н. Калякулин, А.В. Мальцев // Вестник Транспорта Поволжья. – 2011. – Т.№3. – С.15-20.
80. Гордеев, И.П. Моделирование электрических процессов в силовых цепях локомотивов на схемах их замещения [Текст] / И.П. Гордеев, А.Н. Калякулин, А.В. Мыздарин // Вестник Транспорта Поволжья. – 2014. – Т.5. – С.46-51.
81. Гордеев, И.П. Моделирование процессов изменения токов и напряжений в силовых цепях локомотивов при различных состояниях их изоляции

/ И.П. Гордеев, Е.М. Тарасов, Балалаев А.Н., Калякулин А.Н. [Текст] // Вестник Транспорта Поволжья. – 2016. – Т.1. – С.29-32.

82. Калякулин, А.Н. Математическая модель силовой цепи тепловоза с учетом процессов в изоляции тяговых электродвигателей [Текст] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – Вып. 2. – Ч. 2. – С. 369 – 375.

83. Попов, Ю.И. Исследование процесса снижения электрической прочности изоляции тяговых электрических машин локомотивов, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях [Текст] / Ю.И. Попов, О.О. Соколов // Наука и техника транспорта. - 2015. - № 2. – С. 89–97

84. Гордеев, И.П. Исследование и разработка методов повышения надежности корпусной изоляции якорей тяговых электродвигателей тепловозов: [Текст]: дис. канд. техн. наук. – М., 1980. – 211 с.

85. Гордеев, И.П. Повышение надежности изоляции тяговых силовых цепей локомотивов [Текст]: дисс. докт. техн. наук. – М.: 2006. – 211 с.

86. Исследования условий теплового пробоя тяговых электродвигателей тепловозов и разработка мероприятий по повышению их надёжности. Отчёт о НИР по х/д с ЦТ МПС. Тема Т-120. Ташк. ин-т инж. ж.-д. трансп, (ТашИРГГ); Руководитель В. Н. Жидков [Текст]. – Ташкент, 1976. – 146 с.

87. Езовит, Г. П. Справочник электротехника [Текст]. – Киев. Наукова думка, 1975. – 271 с.

88. Комолов, В.Г. Ремонт электрических машин [Текст] / В.Г. Комолов, С.И. Файб, А.А. Алексеев. – М.: Транспорт», 1975. – 356 с.

89. ГОСТ 2582-72. Машины электрические постоянного и пульсирующего тока тяговые. Технические требования. М., Комитет стандартов при Совете Министров СССР, 1970, –20 с.

90. Патент на изобретение № 2273832. Способ измерения температуры изоляции обмоток электрических машин [Текст] / И.П. Гордеев, С.А. Мельников. — Оpubл. в Б.И., 2006, Бюл. №10. – 6 с.

91. Патент на полезную модель №45057. Устройство непрерывного контроля температуры изоляции обмоток электрических машин [Текст] / И.П. Гордеев, С.А. Мельников. - Опубл. в Б.И., 2005, Бюл. №10. – 2 с.
92. Патент на полезную модель №45574. Устройство для регулирования охлаждения тяговых двигателей локомотивов [Текст] / И.П. Гордеев, С.А. Мельников. - Опубл. в Б.И., 2005, Бюл. №13. – 2 с.
93. Агекин, Т.А. Основы теории ошибок для астрономов и физиков [Текст]. – М.: Наука, 1972. – 170 с.
94. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 400 с.
95. Зажигает, Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента [Текст] / Л.С. Зажигает, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков. – М.: Наука, 1968. – 228 с.
96. Патент на полезную модель №76513. Устройство защиты электрических цепей от короткого замыкания на корпус и перегревов. / И.П. Гордеев, А.И. Гордеев, А.В. Абросимов, А.Н. Калякулин. – Опубл. в БИ., 2008, №26. – 2 с.
97. Калякулин А.Н. Защита силовых цепей электровозов от коротких замыканий [Текст] / А.Н. Калякулин // Железнодорожный транспорт. – 2010. – Т. №7. – С.56-57.
98. К вопросу систем защиты от коротких замыканий силовых цепей электровозов на корпус [Текст] / А.С. Тычков, А.Н. Калякулин, А.В. Мальцев. // Актуальные проблемы развития транспортного комплекса: материалы VI Всероссийской дистанционной научно-практической конференции. – Самара: СамГУПС, 2010. – С. 26-27.
99. Гордеев, И.П. Разработка системы определения предотказного состояния тяговых электродвигателей локомотивов с селективной системой контроля температуры изоляции их обмоток [Текст] / И.П. Гордеев, А.В. Мальцев, А.Н. Калякулин. // Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура: материалы научн. - техн. конф. посв. 55-летию УрГУПС: в 2 т. / Уральский

государственный университет путей сообщения. – Екатеринбург, 2011. – Вып. 97(180), т. 1. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С.193-197.

100. Гордеев, И.П. Система безопасности силовых цепей электровозов постоянного тока [Текст] / И.П. Гордеев, А.Н. Калякулин, А.С. Тычков // Наука и образование транспорту: материалы V Международной научно-практической конференции. – Самара: СамГУПС. – 2012. – С. 11-13.

101. Шепелин, П.В. Совершенствование системы защиты тепловоза 2ТЭ116У [Текст] / П.В. Шепелин, А.Ю. Балакин, А.Н. Калякулин, А.С. Тычков // Локомотивы. XXI век: материалы III международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора В.В. Стрекопытова. – СПб: ПГУПС. – 2015. – С. 243-244.

102. Калякулин, А.Н. Диагностирование тяговых двигателей локомотивов с учетом диэлектрических свойств изоляции [Текст] / А.Н. Калякулин, А.Ю. Балакин, А.С. Тычков, П.В. Шепелин // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием в трех частях. Часть I / Омск. – Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2015. – С.231-235.

103. Калякулин, А.Н. Разработка способа защиты от замыканий на корпус силовых цепей тепловозов [Текст] / А.С. Тычков, П.В. Шепелин, А.Н. Калякулин, А.С. Тычков // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век: материалы VI Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС А.В. Плакса. – СПб: ПГУПС. – 2018. – С. 84-87

104. Калякулин, А. Н. Метод и устройство для обнаружения пробоя изоляции на корпус в силовых цепях тепловозов [Текст] // Омский научный вестник. – 2019. – № 1 (163). – С. 38– 42.

105. Белокозов, Б.П. Повышение надежности тяговых двигателей тепловозов [Текст] / Б.П. Белокозов, В.В. Егоров, А.Ю. Лянда, М.Н. Новиков, С.И. Силевский // Железнодорожный транспорт. – 1977. – Т. №12. – С.13-15.

106. Гордеев, И.П. Коррекция напряжений в силовых цепях локомотивов и диагностика в них коротких замыканий на корпус [Текст] / И.П. Гордеев, Е.М. Тарасов, А.Н. Калякулин, А.В. Мыздарин, А.И. Гордеев // Вестник Транспорта Поволжья. – 2015. – Т. 4. – С.22-30.

107. Калякулин, А.Н. Выравнивание рабочего напряжения в изоляции обмоток тяговых электродвигателей тепловозов [Текст] / А.С. Тычков, В.А. Силаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. Вып. 2. – Ч. 2. – С. 369 – 375.

108. Гордеев, И.П. Ресурс изоляции тяговых электродвигателей и перспективы его увеличения [Текст] / И.П. Гордеев, А.Н. Калякулин, А.В. Мальцев // Вестник транспорта Поволжья. – 2010. – Т. №2. – С.20-25.

109. Немухин, В. П. Повышение нагревостойкости и влагостойкости изоляции тяговых электрических машин [Текст] // Повышение надёжности электрооборудования тепловозов// Труды ВНИИ ж.-д трансп. (ВНИИЖТ). – М.: Транспорт, 1974. – Вып. 527. – С. 20-42.

110. Пойлов, Л. К. Исследование некоторых вопросов надёжности тяговых электродвигателей тепловозов [Текст]: дис. ...канд. техн. наук. – Л.: 1971. – 173 с.

111. Виноградов, Ю. Н. Повышение надёжности тяговых двигателей электровозов в эксплуатации [Текст] / А.К. Дудырев, В.С. Соболев, В.С. Сонин // Труды ВНИИ железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ). – М.: Транспорт, 1965. – Вып. 305. – 124 С.

112. Герцбах, И. Б., Кордонский, Х. Б. Модели отказов [Текст]. – М.: Советское радио, 1961. – 166 с.

113. Галушко, А. И. Надёжность изоляции электрических машин [Текст] / А.И. Галушко, И.С. Максимова, Р.Г. Оснач, П.М. Хазановский. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.

114. Разевиг, Д. В. Техника высоких напряжений [Текст]. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 472 с
115. Хевиленд, Р. Инженерная надёжность и расчёт на долговечность [Текст]. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 232 с.
116. Dakin, T. W. Electricale Insulations Deteriorations Treatedas a Chemicale Rate Phenomenon [Текст] / Trans, Am. Inst. Elec. Engrs. – 1948 – №67. – Pt. 113-122.
117. Malmflow, G. Thermal Ading Properties of cellulose Insulations Materials [Текст] / Trans, Roe. Inst. of Technology (Stskholm). – 1948. – №19. – Pt. 99-102.
118. Горбатюк В. А. Исследование характеристик и разработка системы контрольно-практических испытаний изоляции электрических машин тепловозов [Текст]: дис. ...канд. техн. наук. – М.:1969. – 168 с
119. Гордеев, И. П. Расчётная схема для определения норм испытательных напряжений корпусной изоляции [Текст] / И.П. Гордеев, М.М. Катанов Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ). – 1980. – 14 с. – Деп. в ЦНИИТЭИМП С 26. 11 80., № 1155.
120. Новиков, М.Н. Координация изоляции силовой цепи тепловоза ТЭ – 3 [Текст] / М.Н. Новиков, В.В. Егоров. // Вопросы повышения надёжности тяговых двигателей тепловозов; Межвузовск. сб. научн. тр. ТашИИТ. Вып. 146. – Ташкент, 1978. – С. 92–99.

Параметры силовой цепи тепловоза 2ТЭ25КМ

Таблица П1 - Таблица замыканий контроллера машиниста тепловоза 2ТЭ25КМ

Позиция КМ	Частота вращения вала дизеля, об/мин	Напряжение холостого хода на ТГ, В	Отсечка по напряжению на выходе ТГ, В	Отсечка по току на выходе ТГ, А	V, км/ч
1	350±6	110±5	110 ±5	2880 ±50	3
2	470 ±6	150±5	170 ±5	3240 ±50	6
3	590±6	205±5	350 ±5	3600 ±50	9
4	680±6	240±5	450 ±5	3960 ±50	12
5	735±6	270±5	500 ±5	4700 ±50	15
6	770±6	300±5	530 ±5	5200 ±50	18
7	790±6	320±5	540 ±5	5500 ±50	21
8	810±6	350±5	570 ±5	5750 ±50	24
9	820±6	370±5	580 ±5	5850 ±50	27
10	845±6	400±5	600 ±5	6120 ±50	30
11	875±6	425±5	640 ±5	6480 ±50	33
12	905±6	440±5	670 ±5	6900 ±50	36
13	940±6	460±5	700 ±5	6900 ±50	39
14	970±6	470±5	720 ±5	6900 ±50	42
15	1000±6	500±5	750 ±5	6900 ±50	45

Таблица П1 – Параметры тягового двигателя постоянного тока последовательного возбуждения ЭДУ133

Параметр	ЭДУ-133
Мощность, кВт	350
Напряжение, В	330/750
Ток, А	840/475
Частота вращения, об/мин	520/2320
КПД, %	91,14
Вращающий момент при низшей номинальной скорости, Н·м	6433
Максимальный ток при трогании, А	1250
Активное сопротивление обмотки главных полюсов, Ом	0,00675
Активное сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом	0,00641
Активное сопротивление обмотки якоря, Ом	0,0116
Суммарная индуктивность рассеяния якорной цепи, Гн	0,0025
Приведенное сопротивление контура вихревых токов, Ом	0,6

Е/п,
В/об/мин

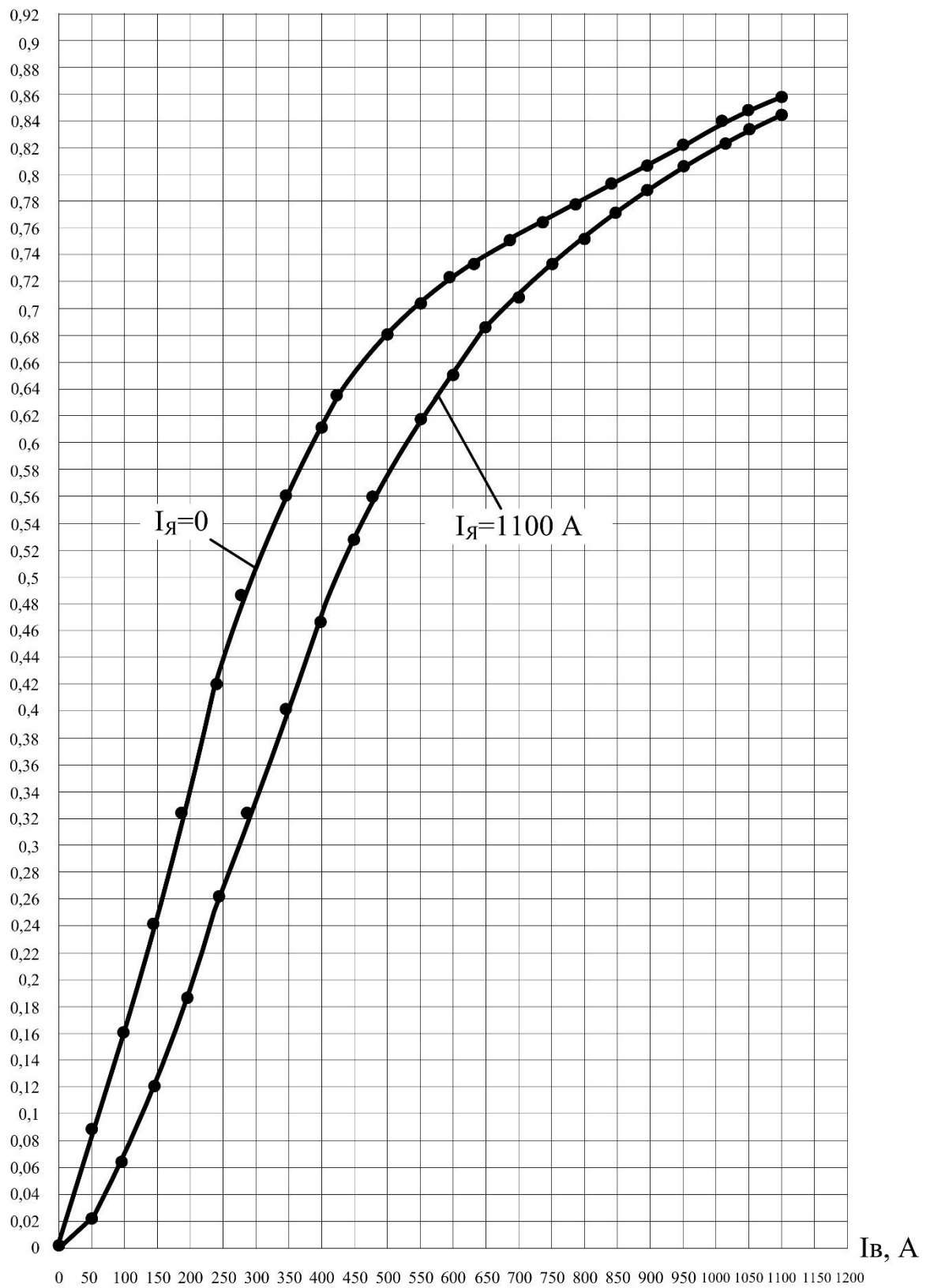
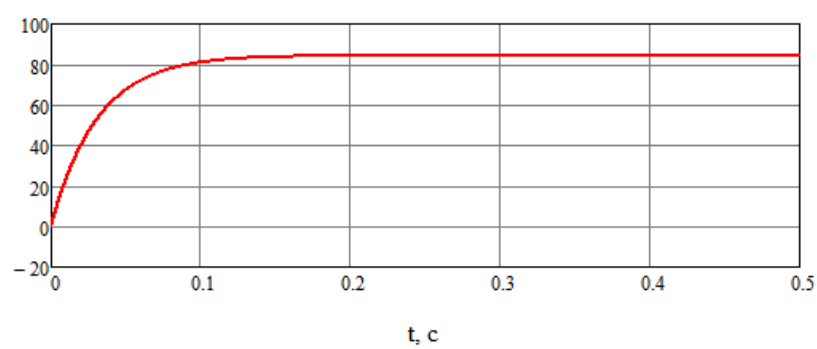
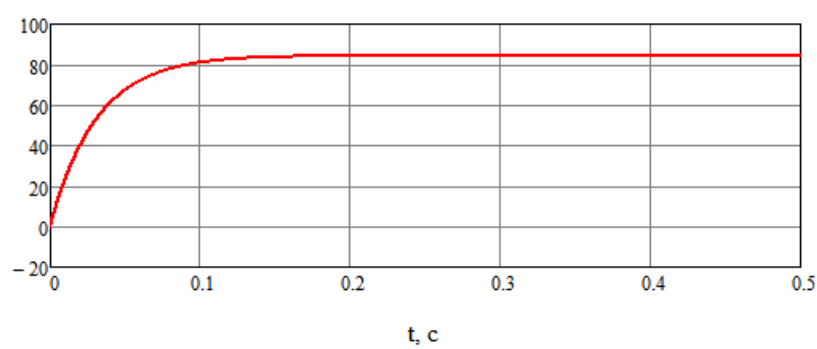
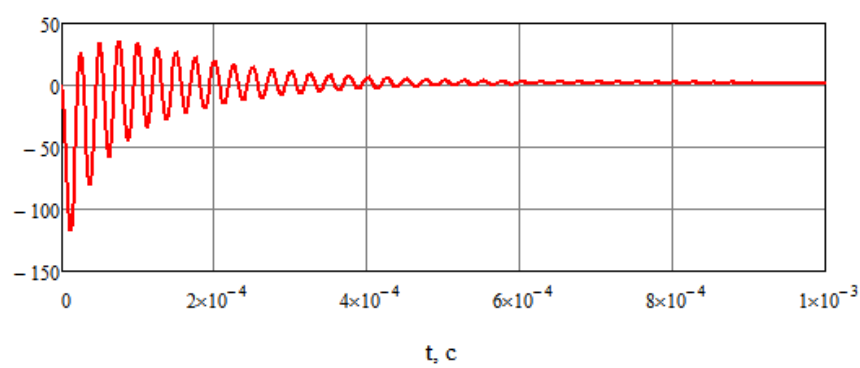
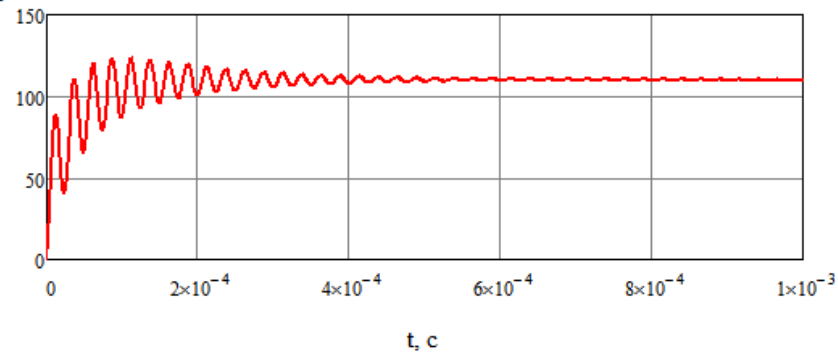
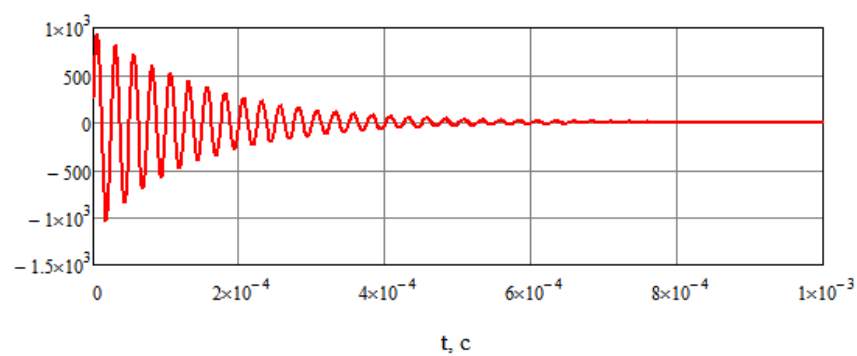
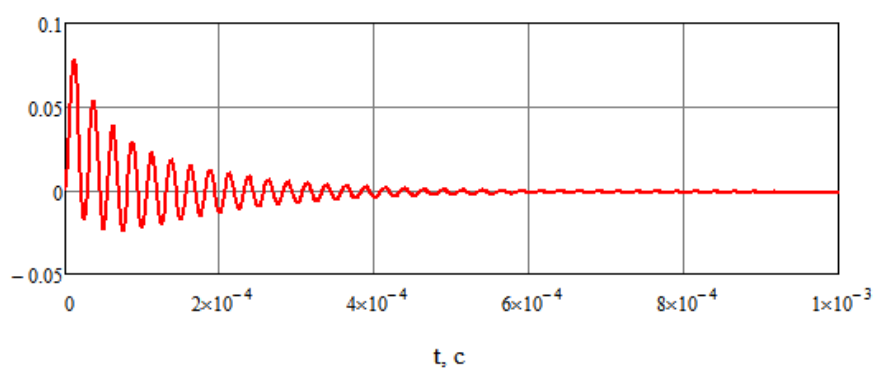
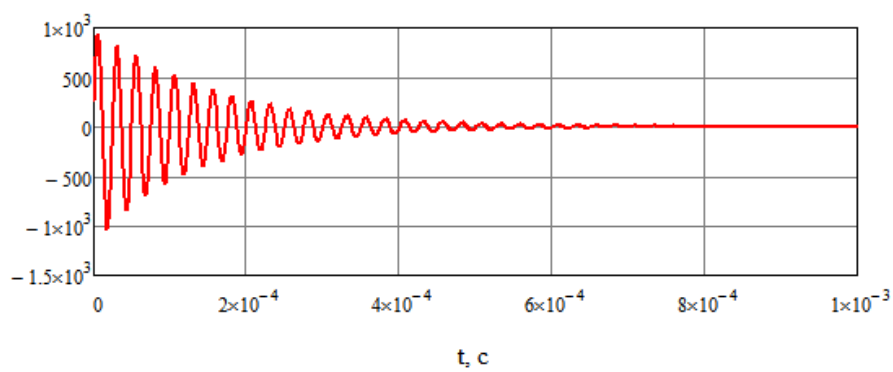
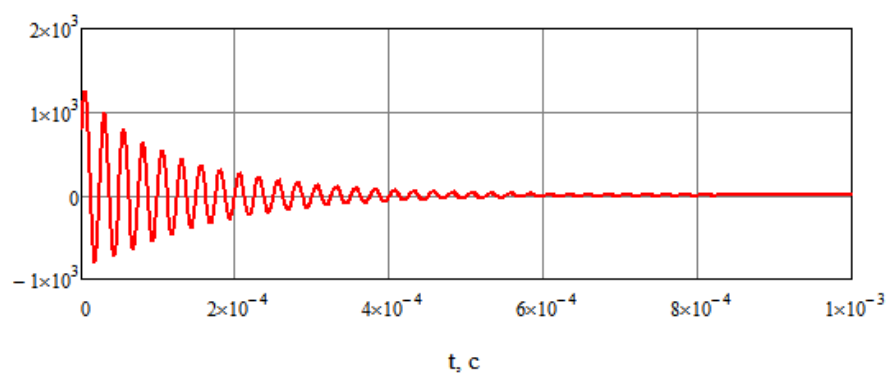


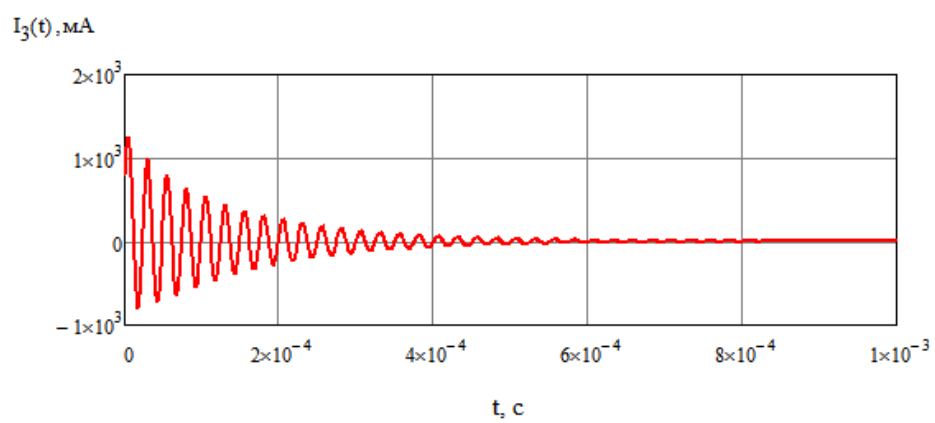
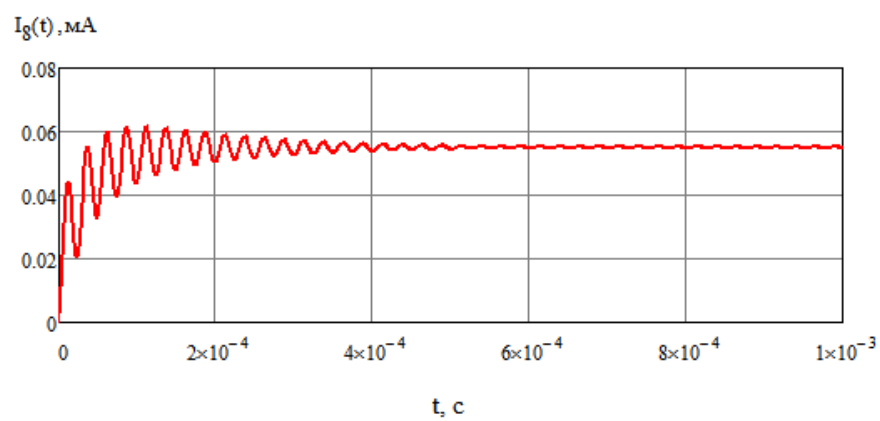
Рисунок П1 – Нагрузочные характеристики двигателя ЭДУ133

Графики токов и напряжений в силовой цепи тепловоза, а также зарядно – разрядные процессы в изоляции при переключении позиций контроллера машиниста (1-15)

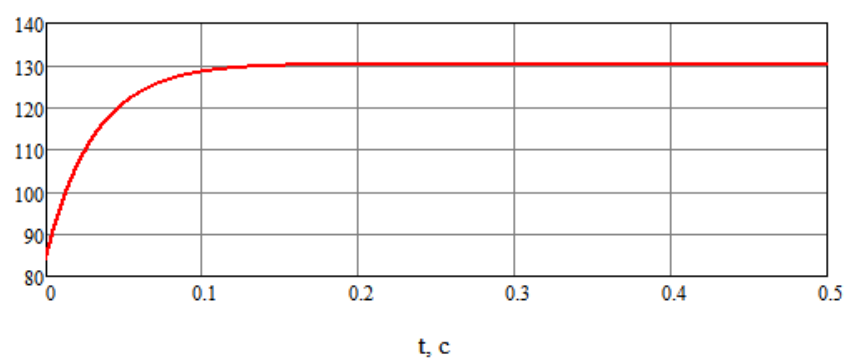
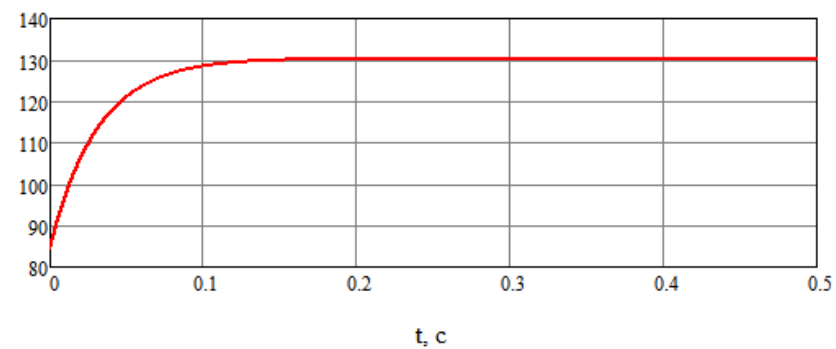
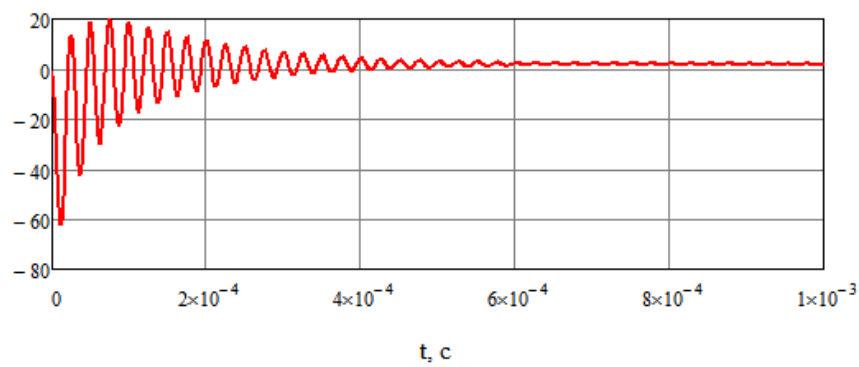
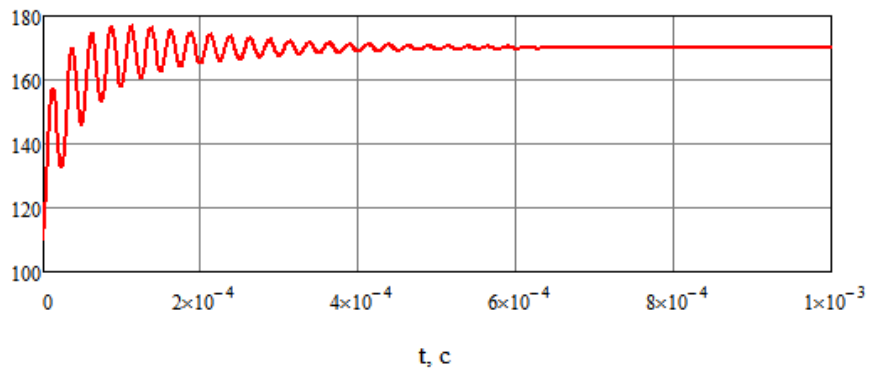
Позиция 1

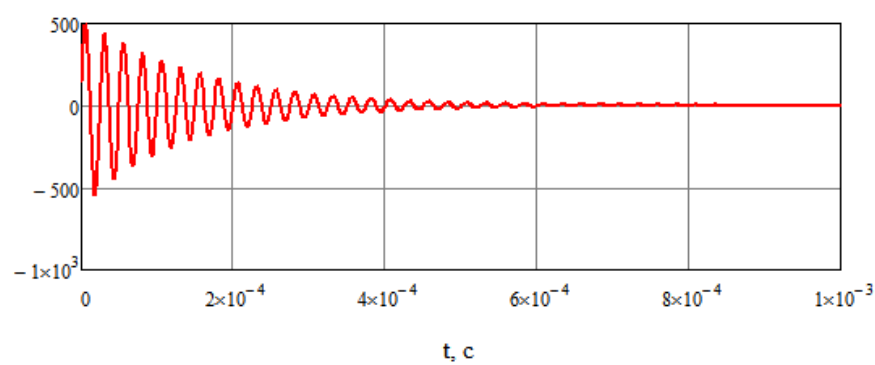
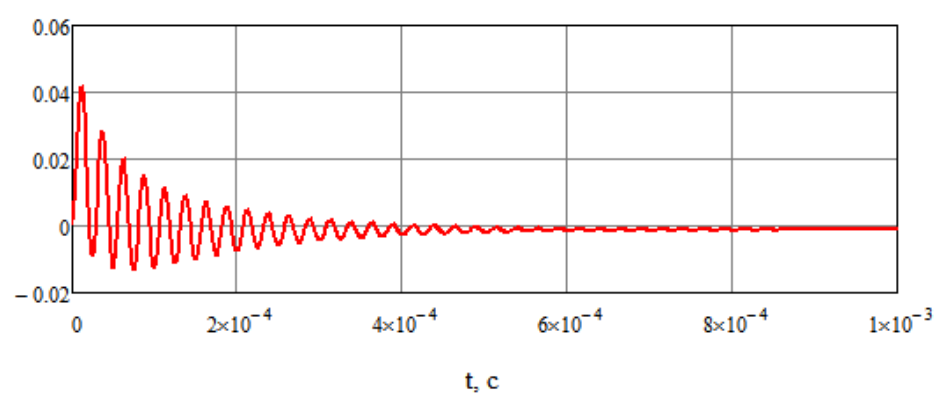
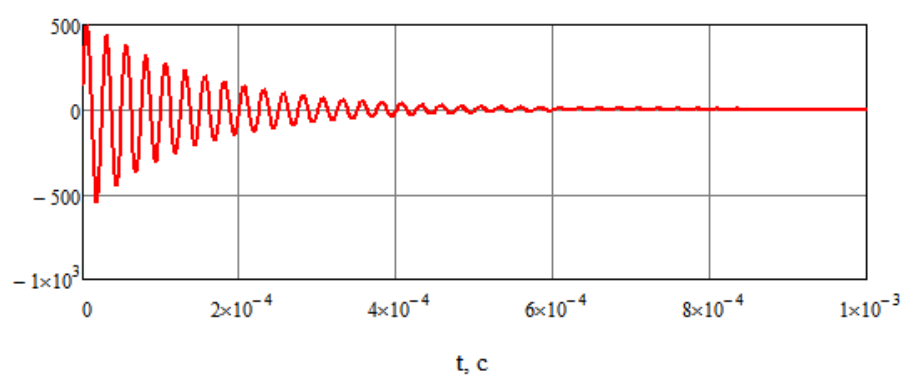
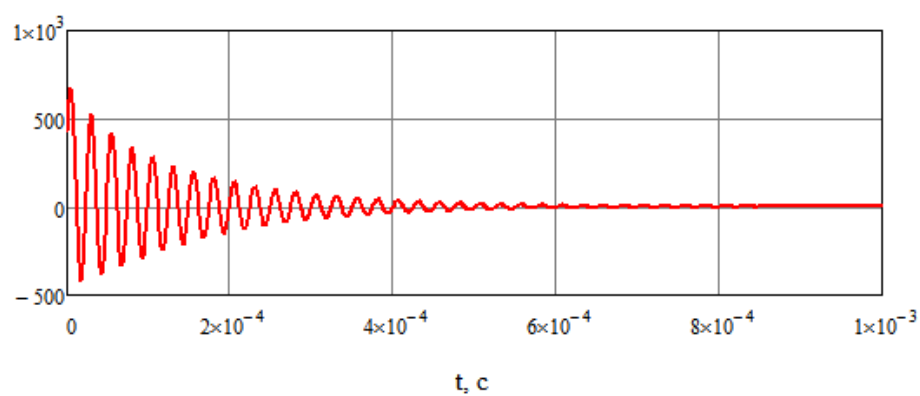
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

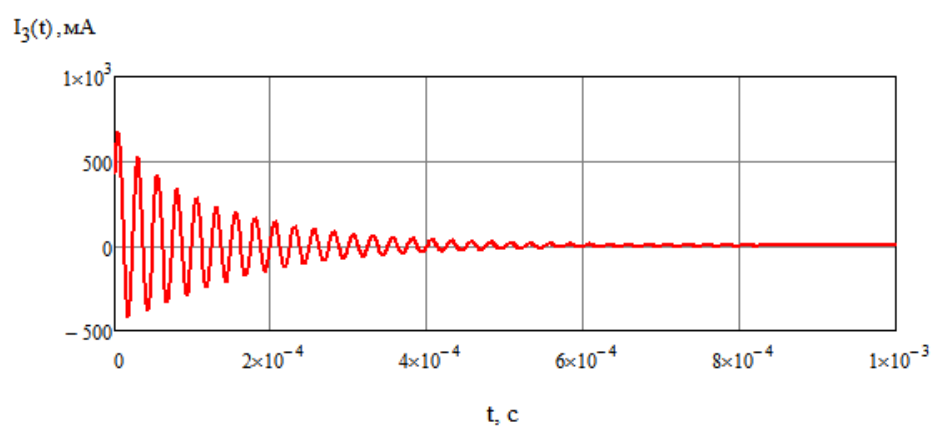
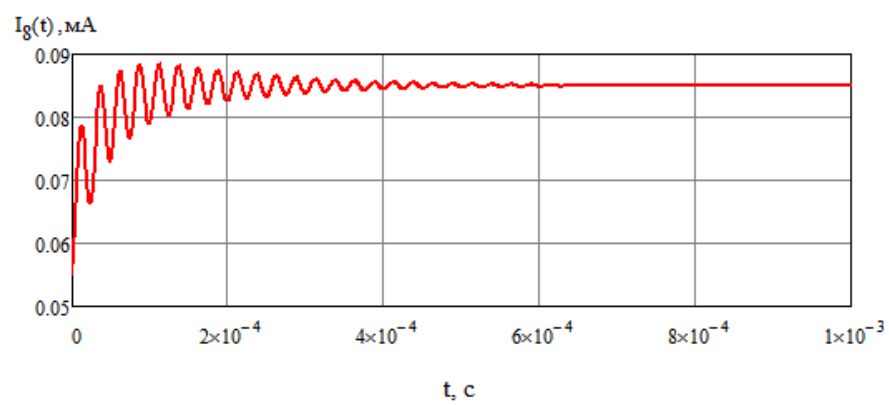
$I_5(t), \text{mA}$  $I_6(t), \text{mA}$  $I_4(t), \text{mA}$  $I_7(t), \text{mA}$ 



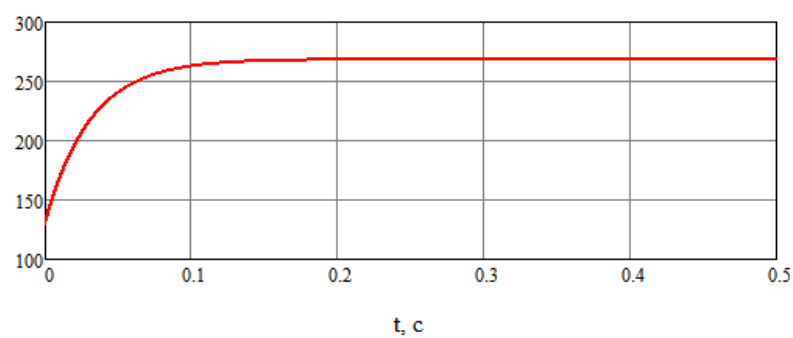
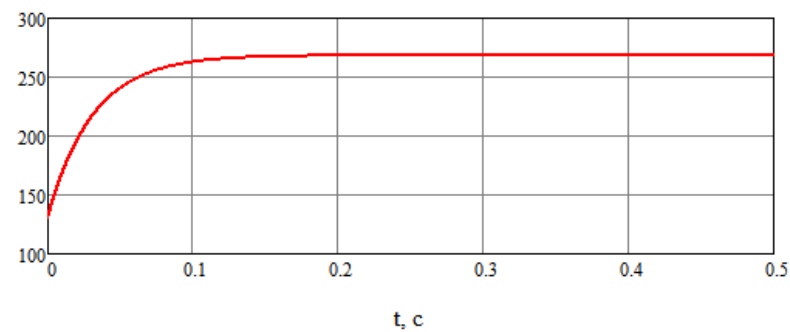
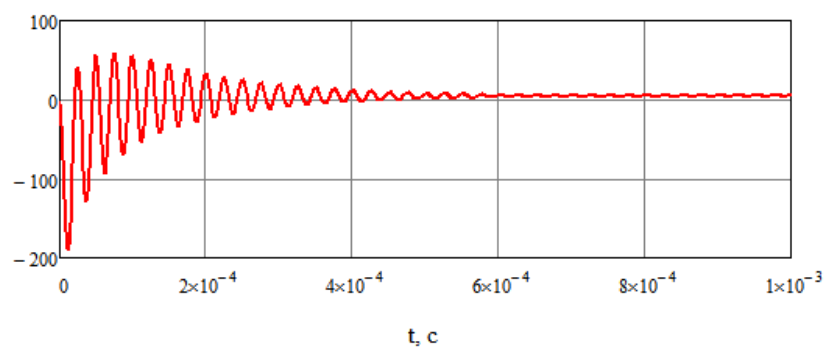
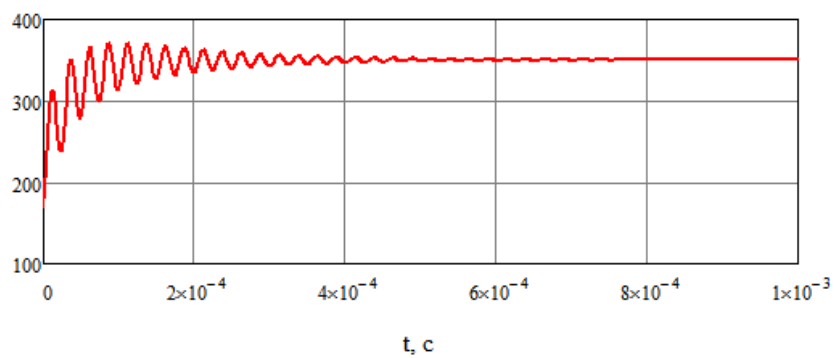
Позиция 2

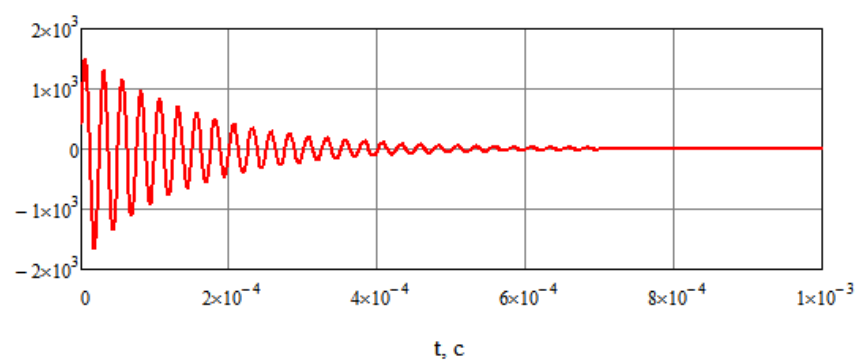
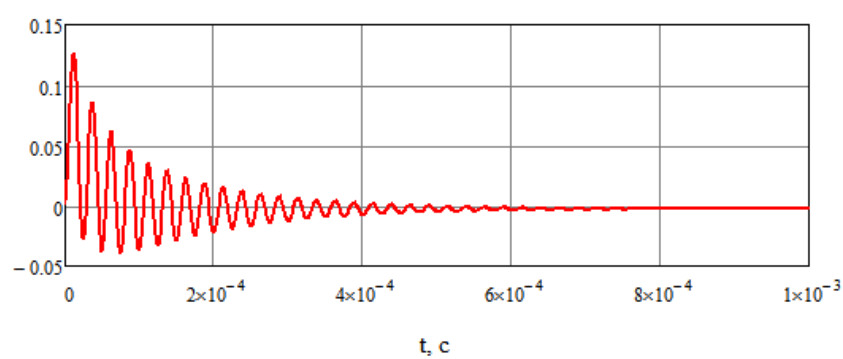
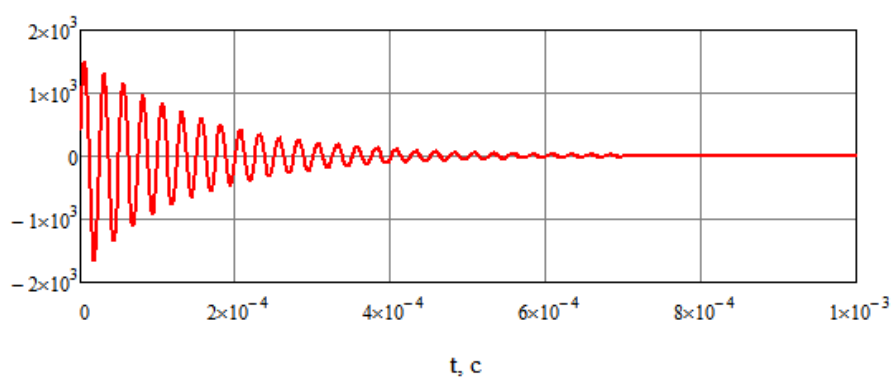
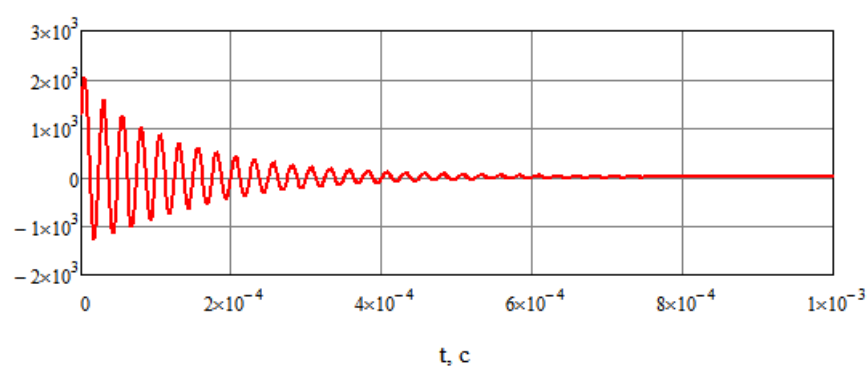
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

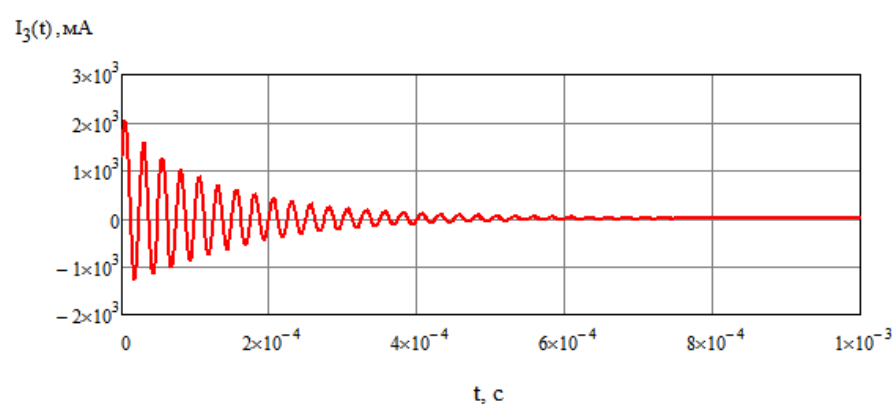
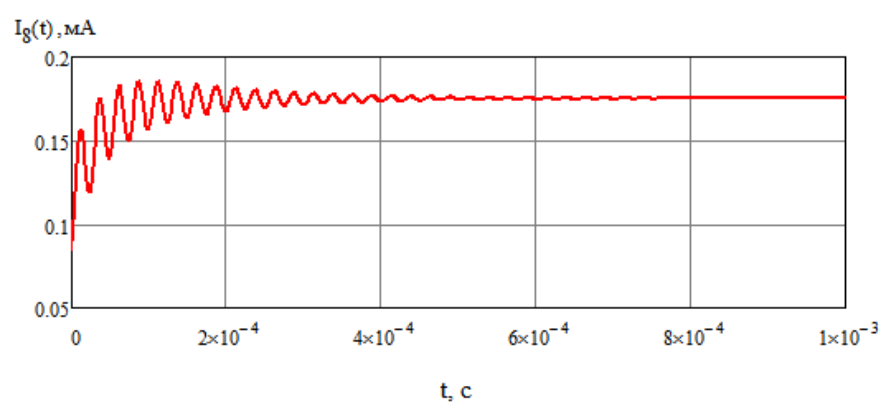
$I_5(t), \text{mA}$  $I_6(t), \text{mA}$  $I_4(t), \text{mA}$  $I_7(t), \text{mA}$ 



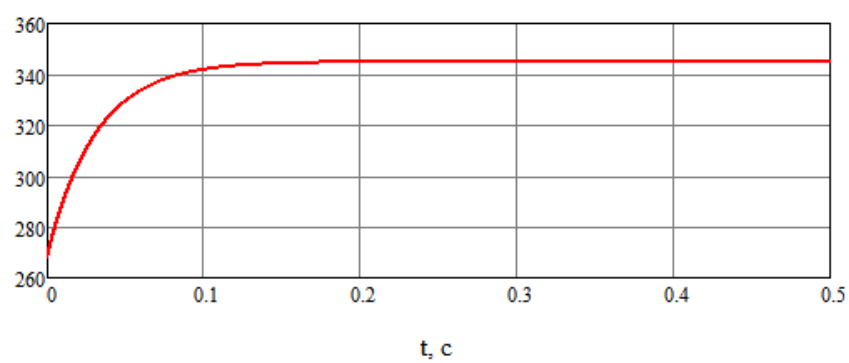
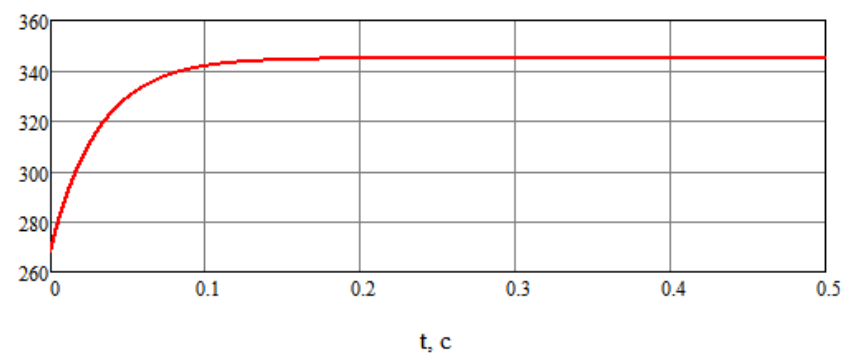
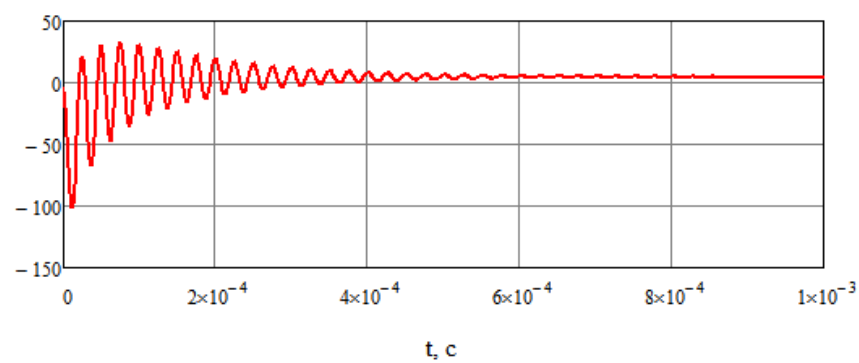
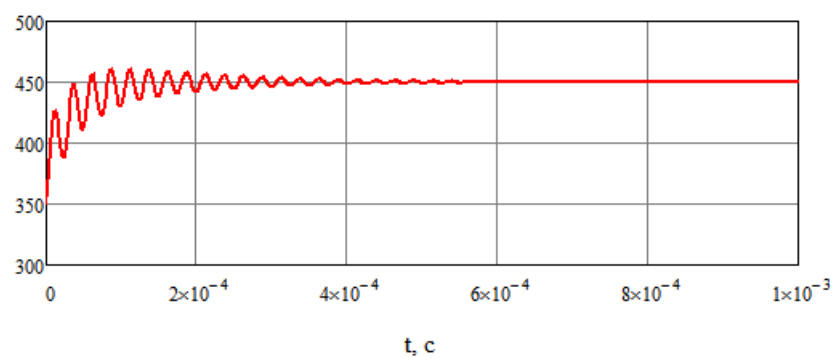
Позиция 3

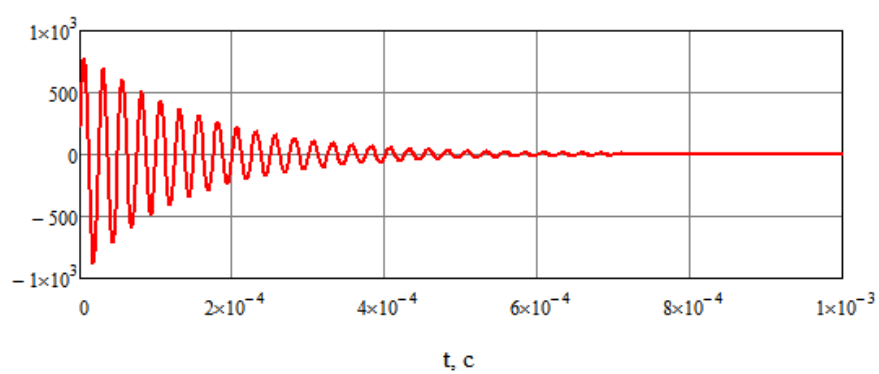
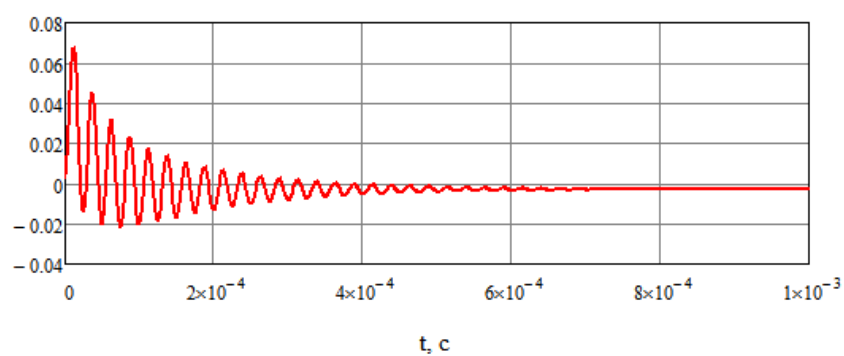
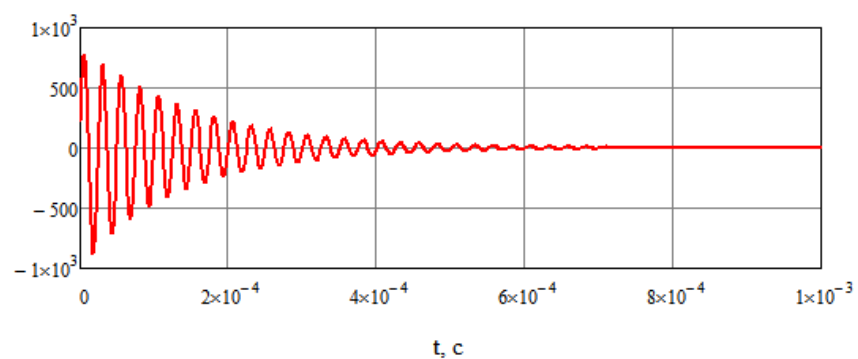
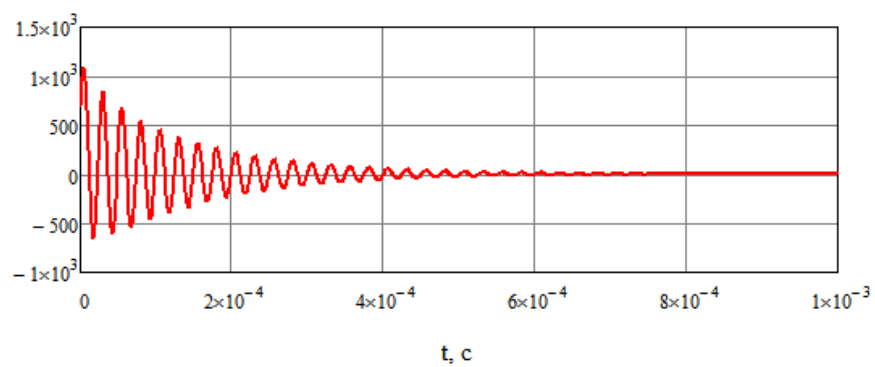
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

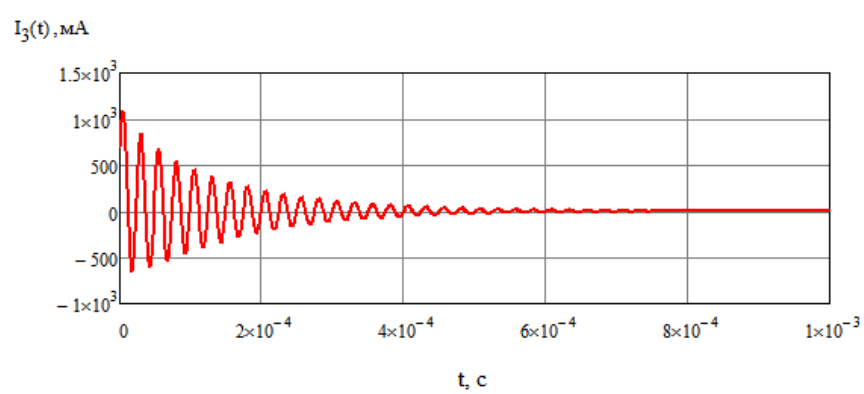
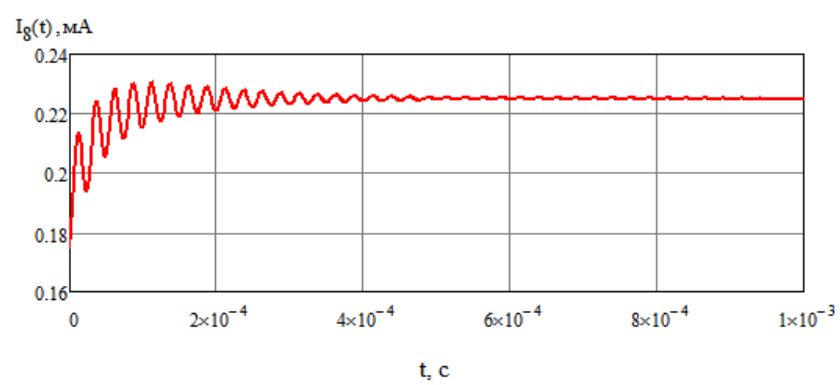
$I_5(t), \text{mA}$  $I_6(t), \text{mA}$  $I_4(t), \text{mA}$  $I_7(t), \text{mA}$ 



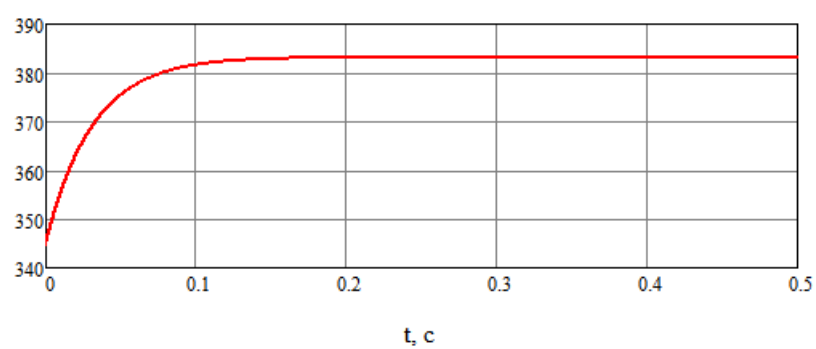
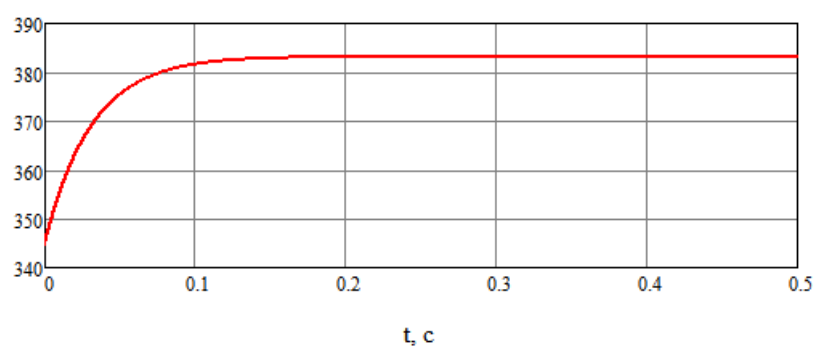
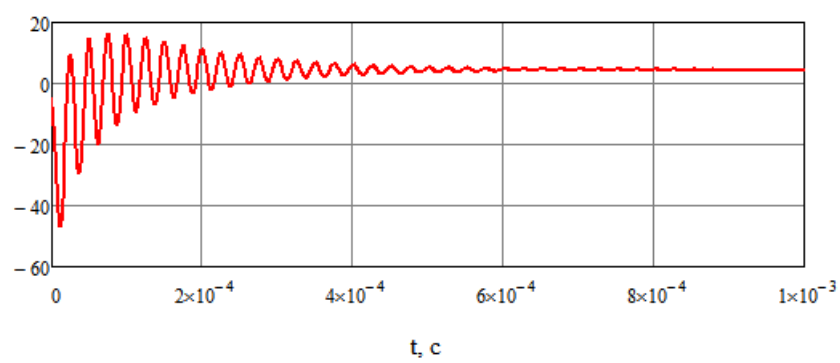
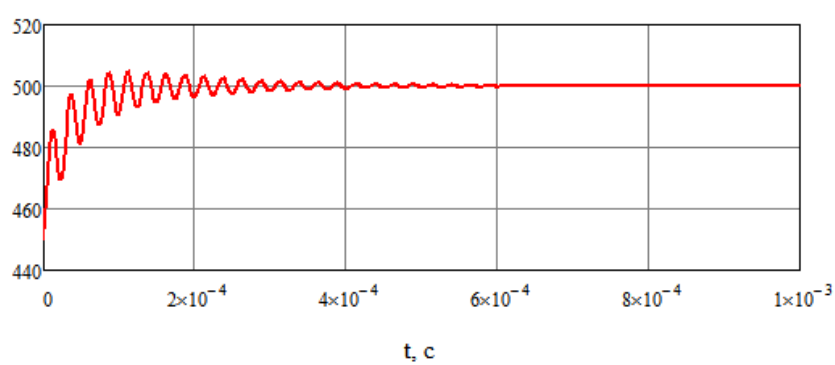
Позиция 4

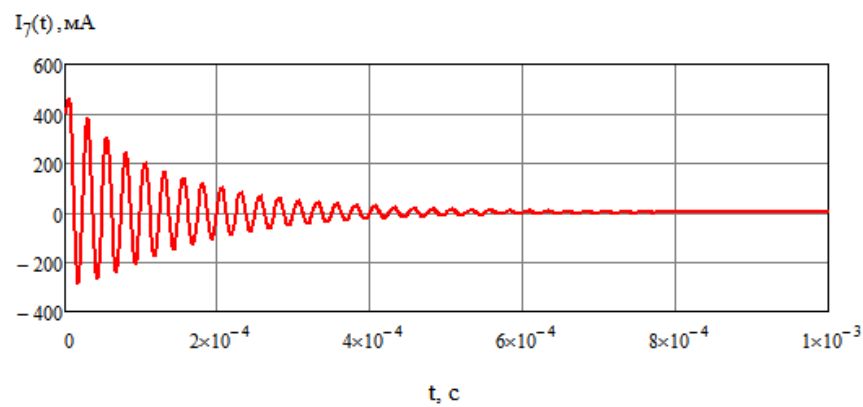
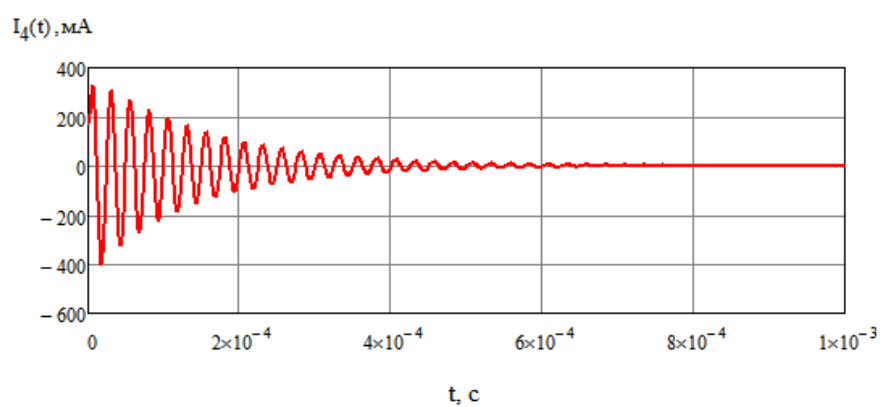
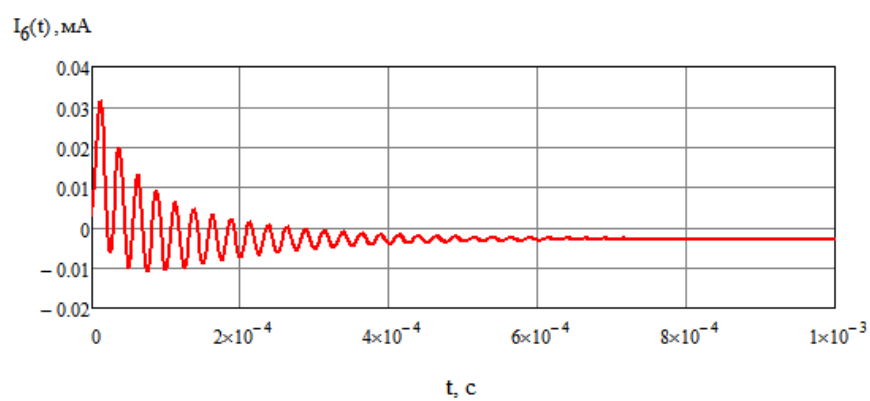
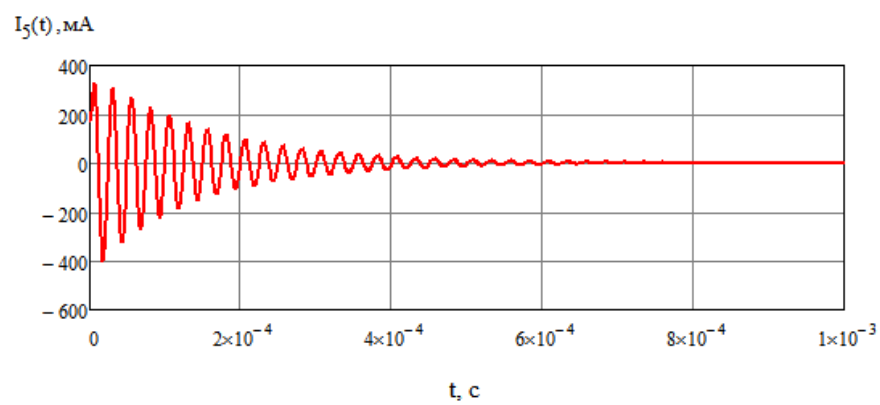
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

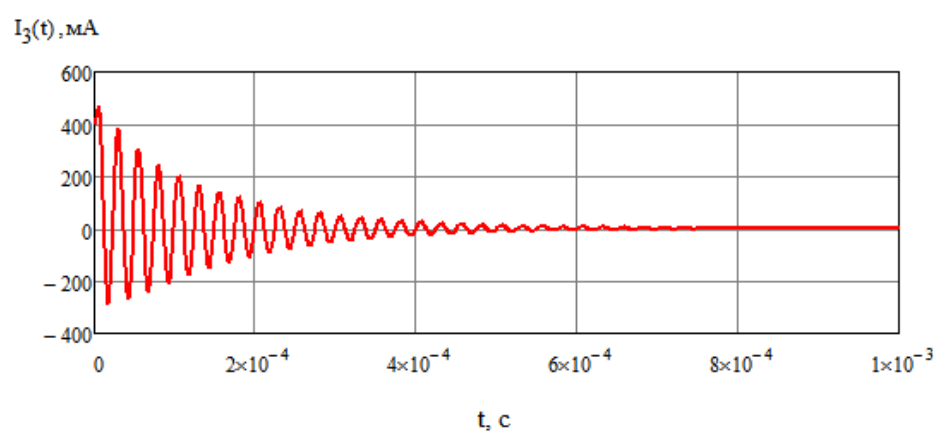
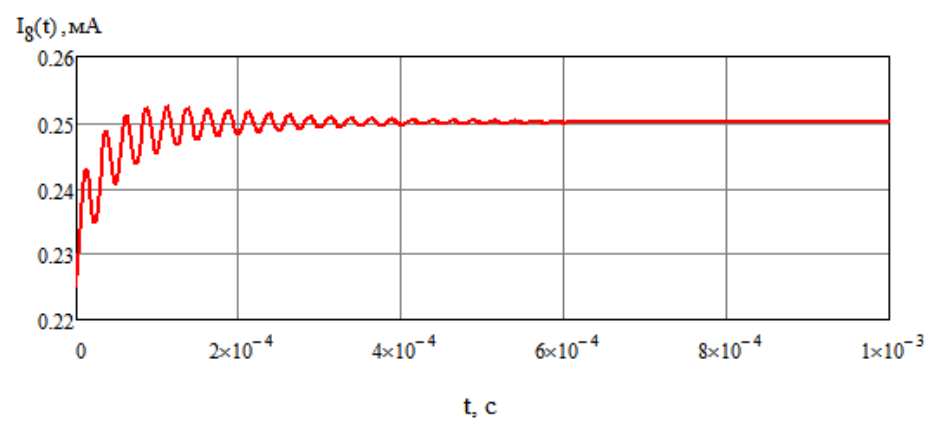
$I_5(t), \text{mA}$  $I_6(t), \text{mA}$  $I_4(t), \text{mA}$  $I_7(t), \text{mA}$ 



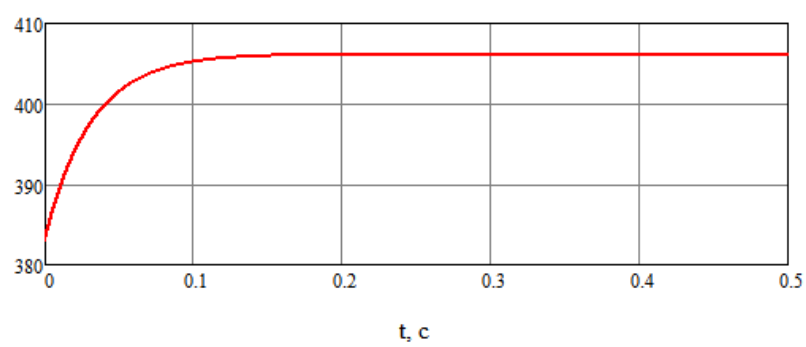
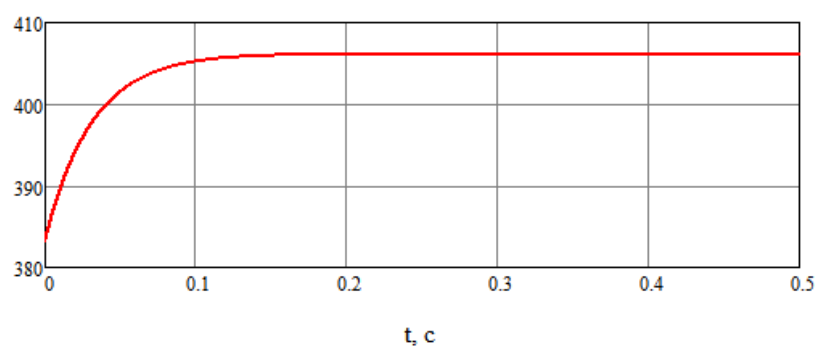
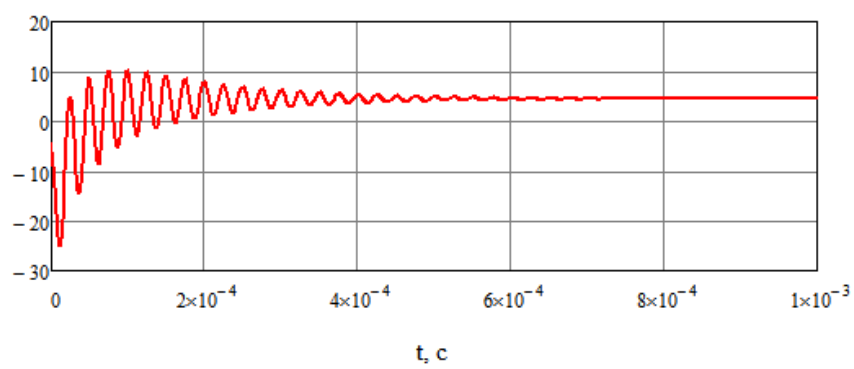
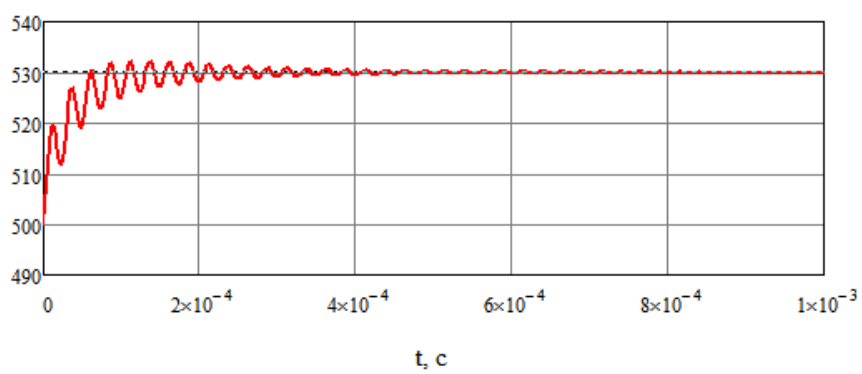
Позиция 5

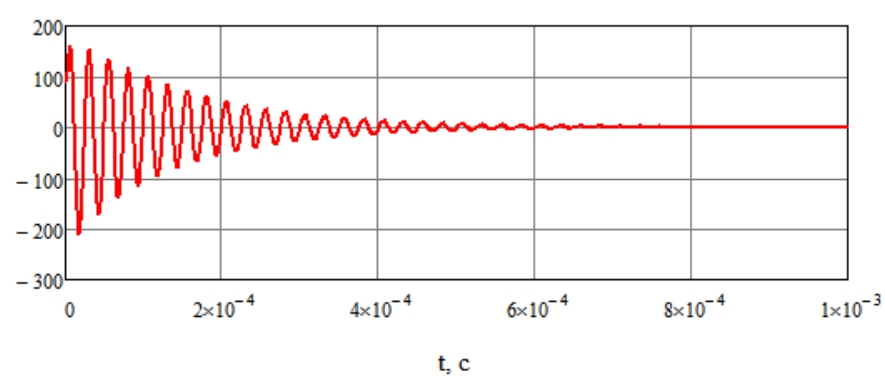
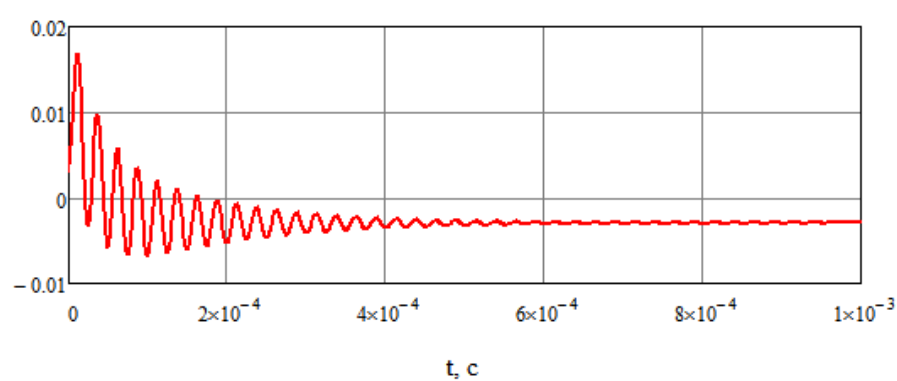
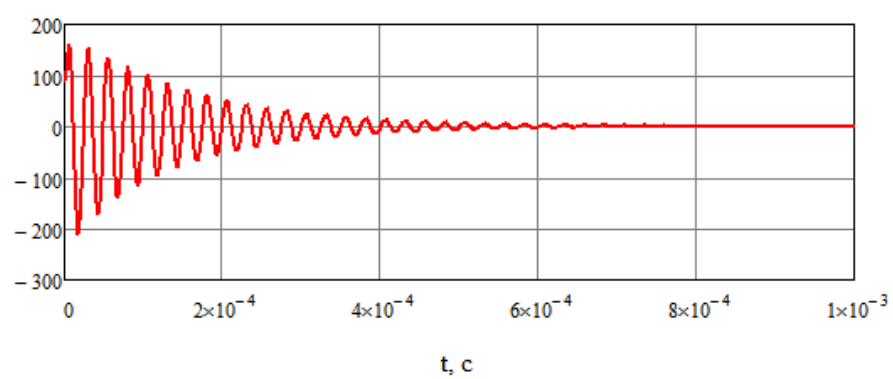
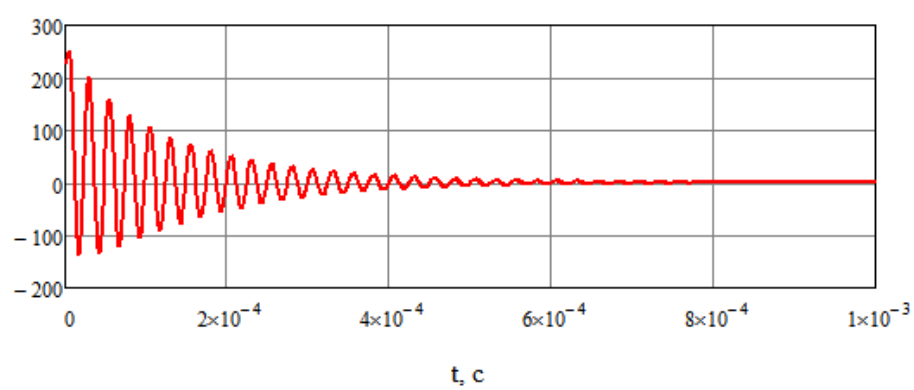
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

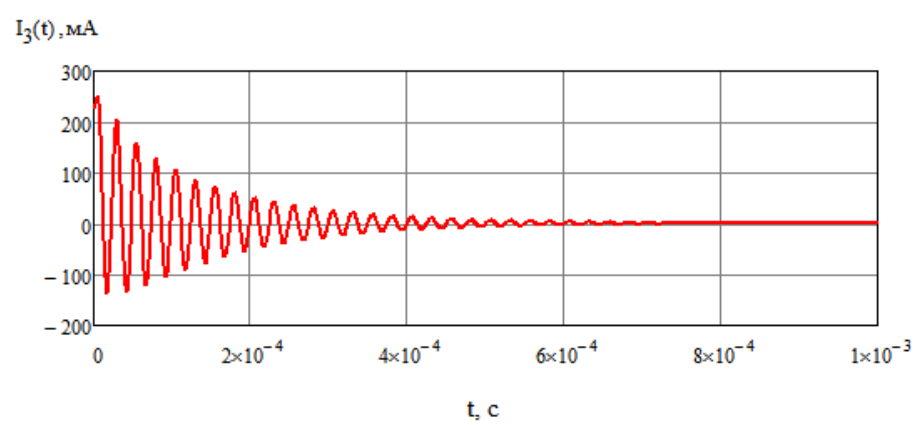
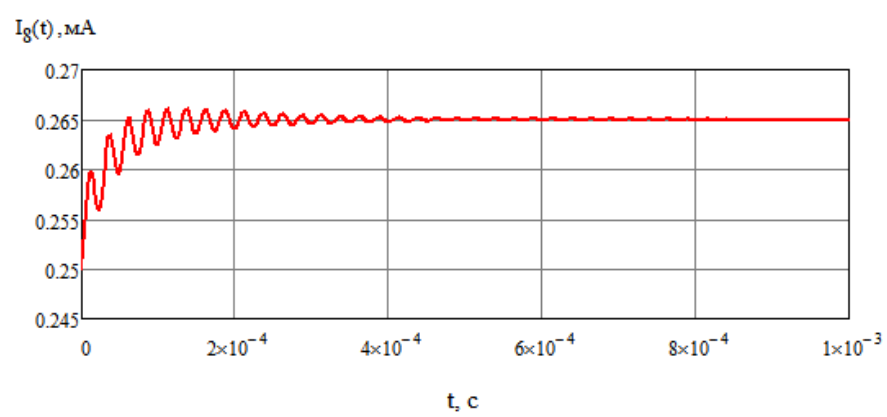




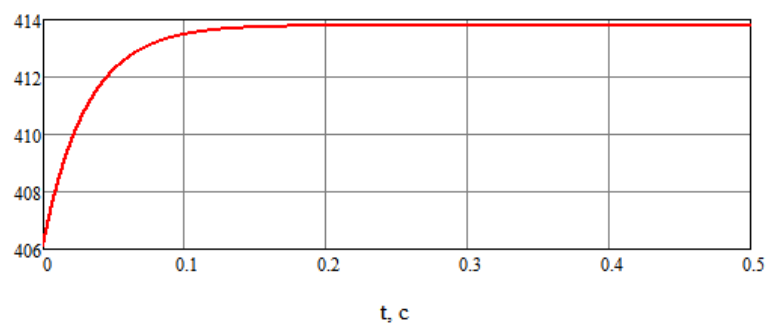
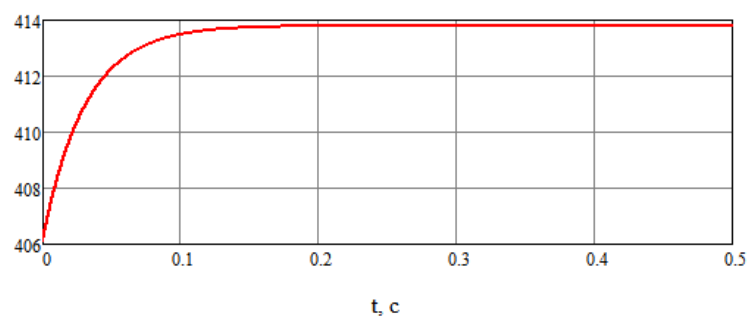
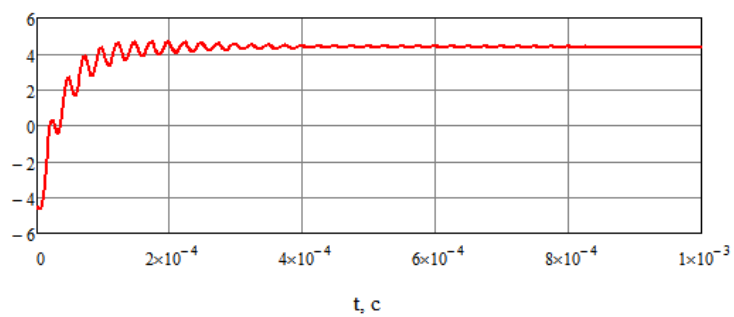
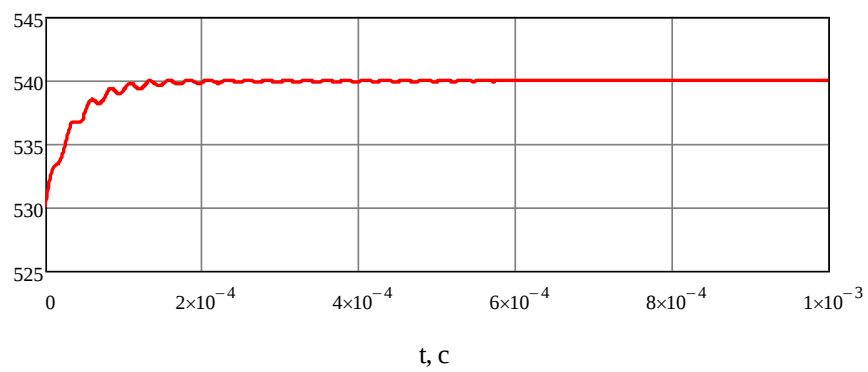
Позиция 6

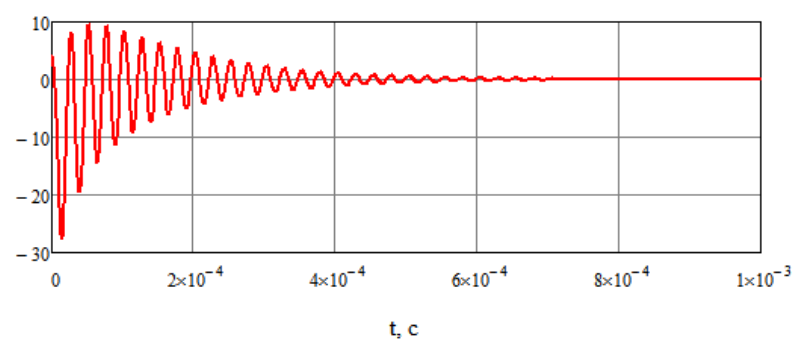
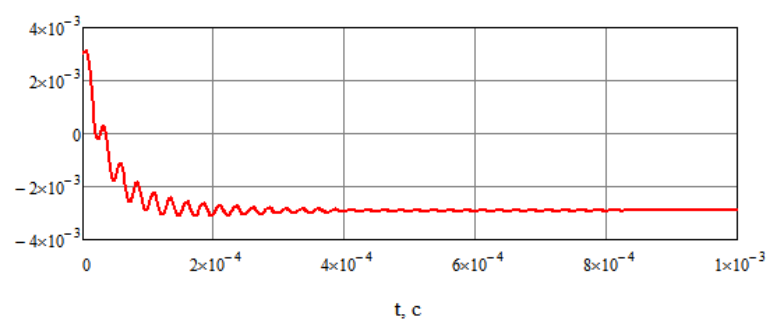
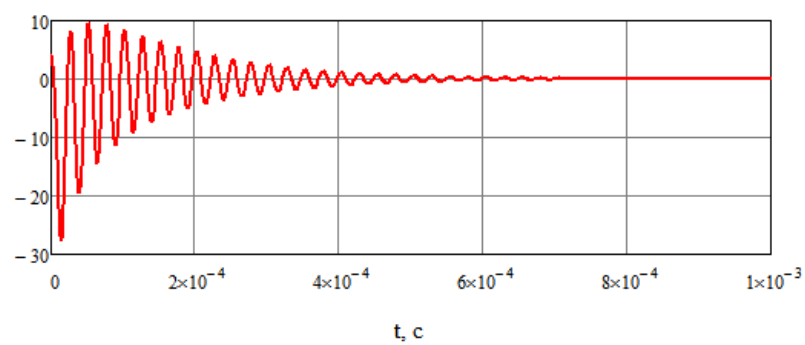
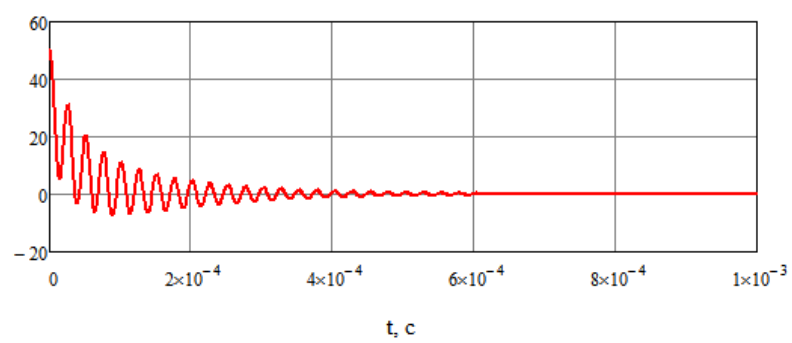
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

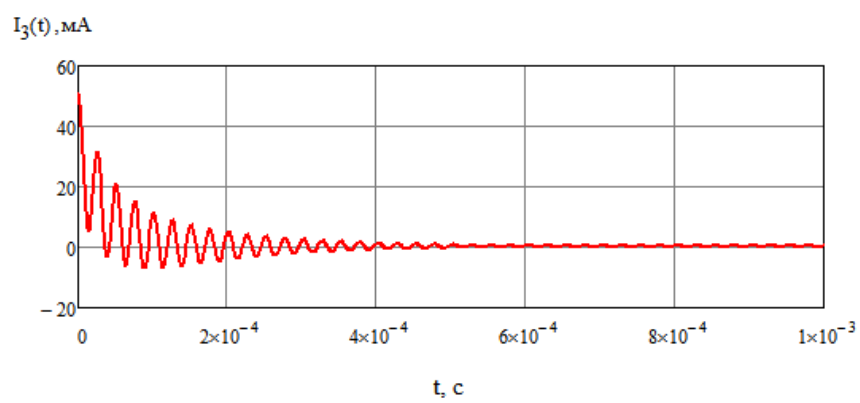
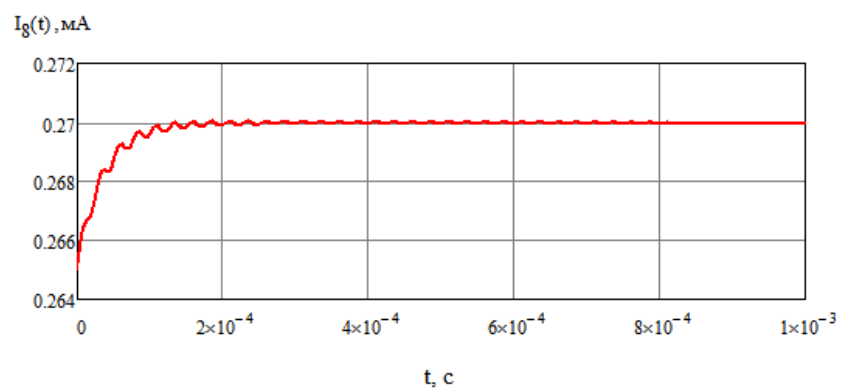
$I_5(t), \text{mA}$  $I_6(t), \text{mA}$  $I_4(t), \text{mA}$  $I_7(t), \text{mA}$ 



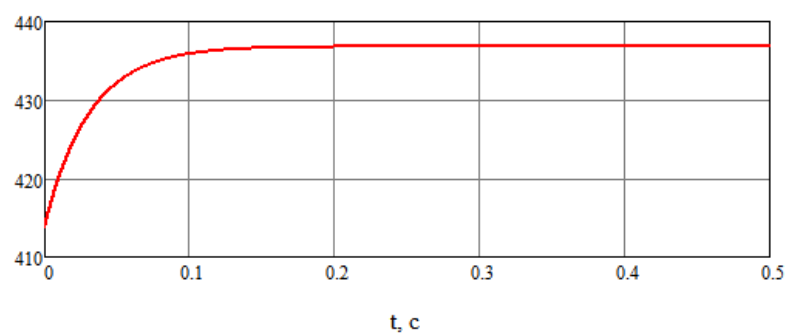
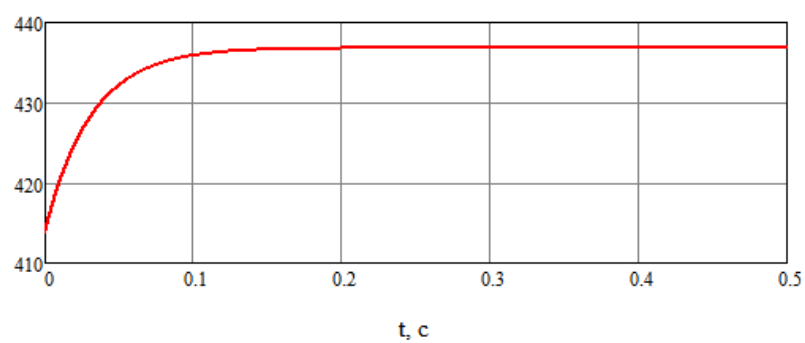
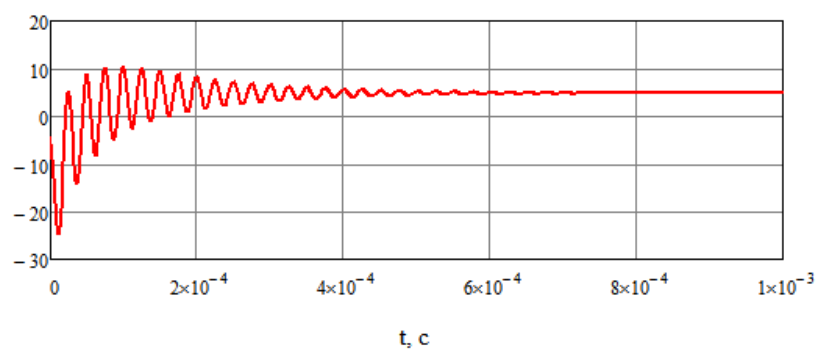
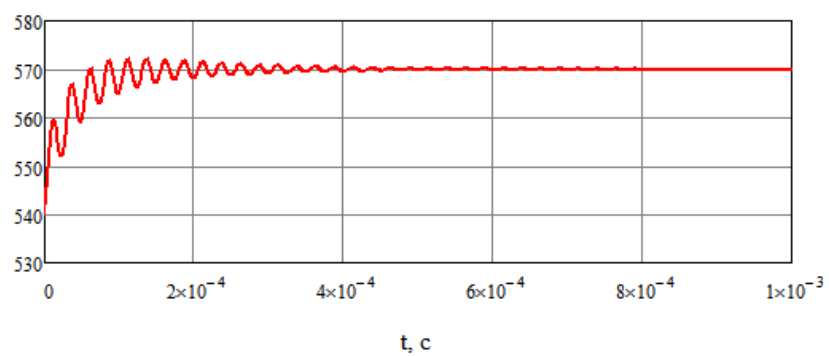
Позиция 7

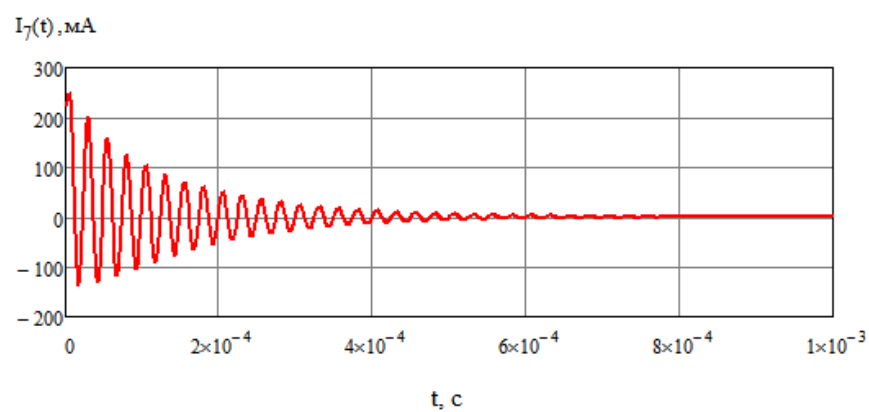
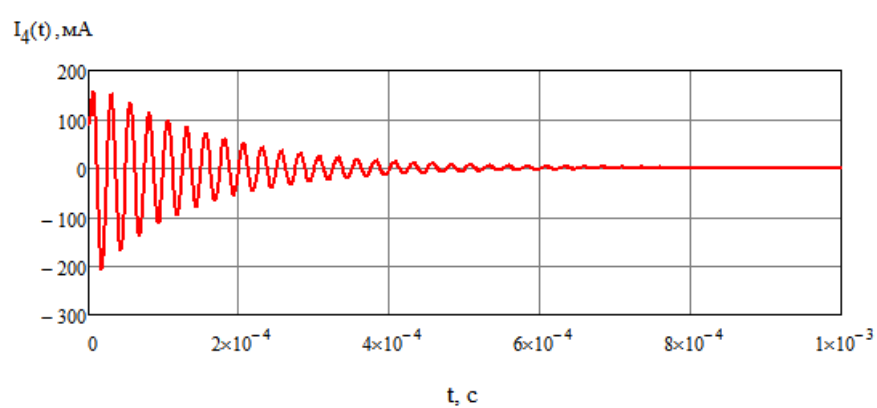
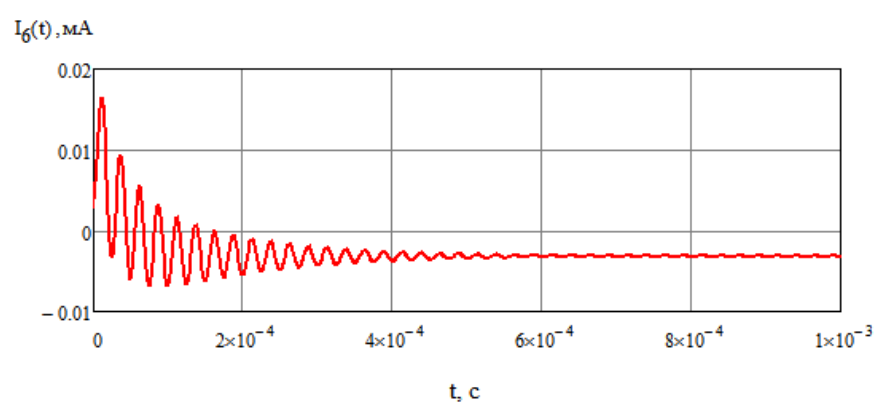
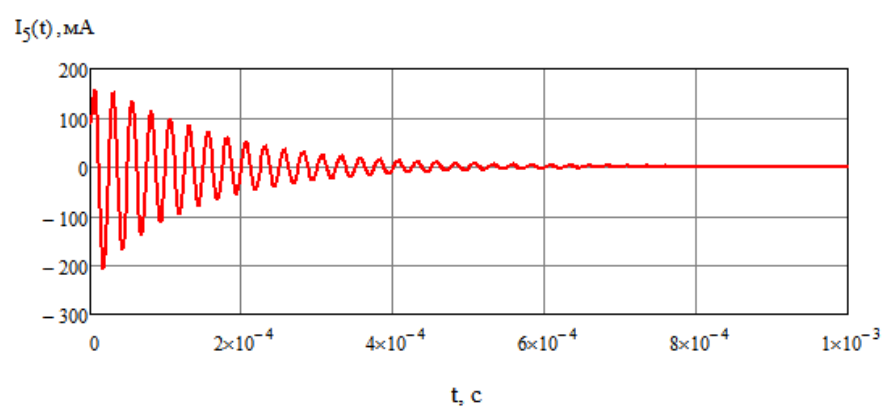
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), \hat{A}$ 

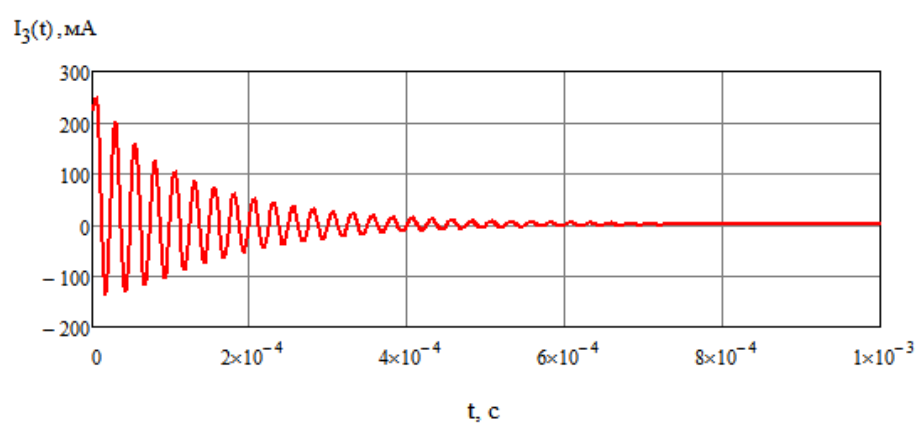
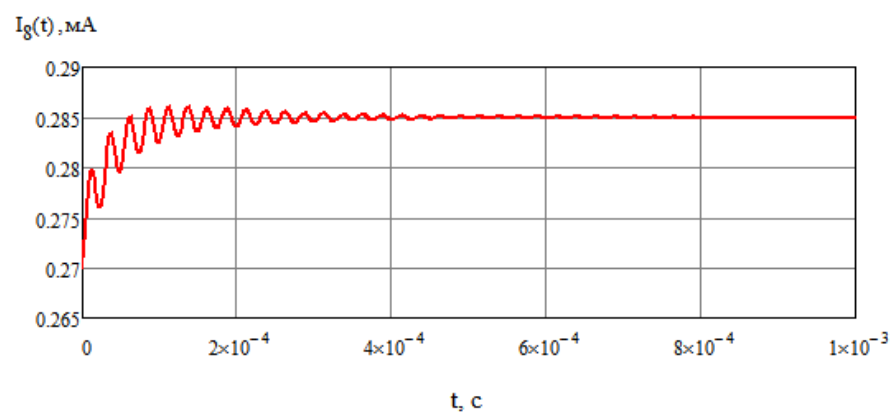
$I_5(t), \text{mA}$  $I_6(t), \text{mA}$  $I_4(t), \text{mA}$  $I_7(t), \text{mA}$ 



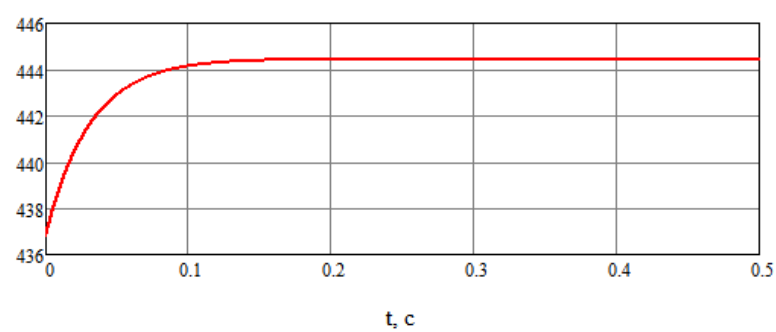
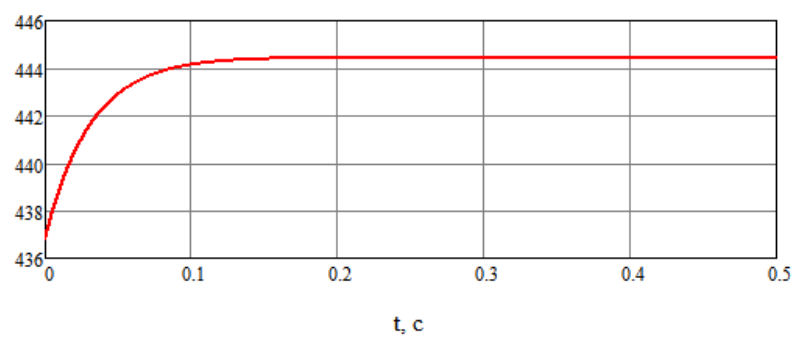
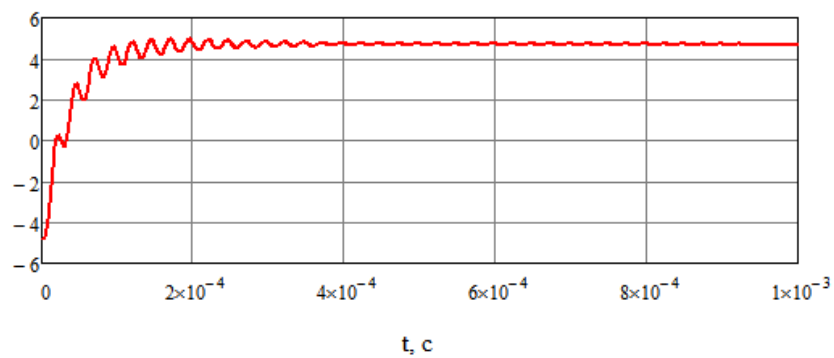
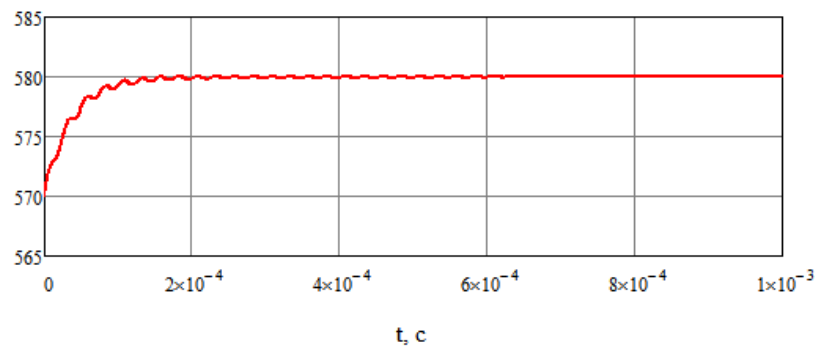
Позиция 8

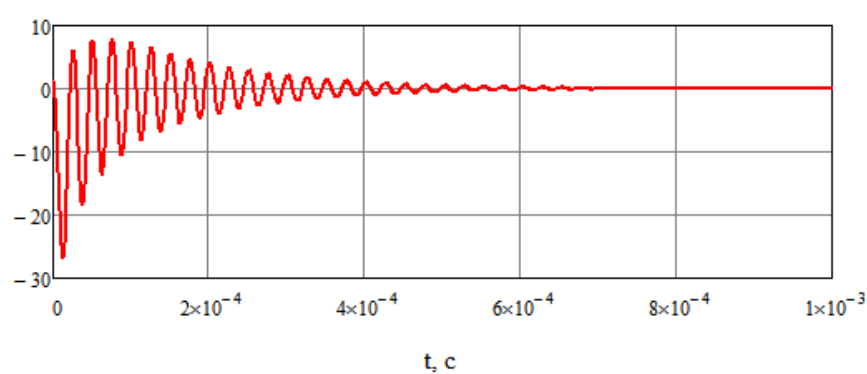
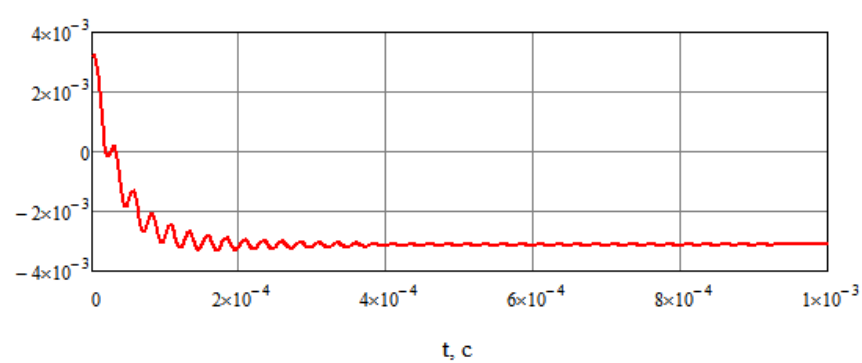
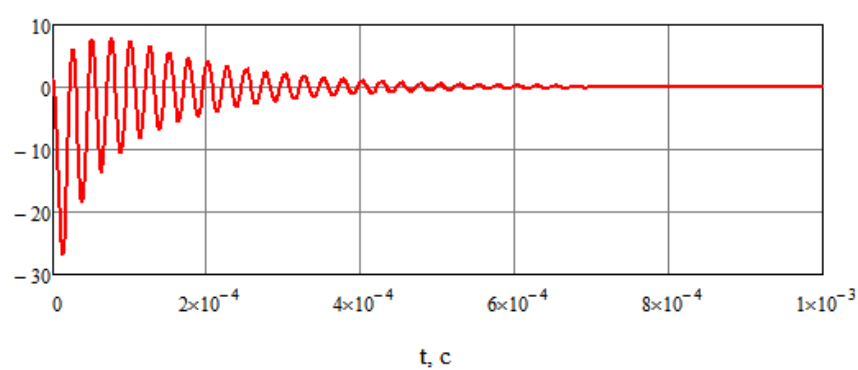
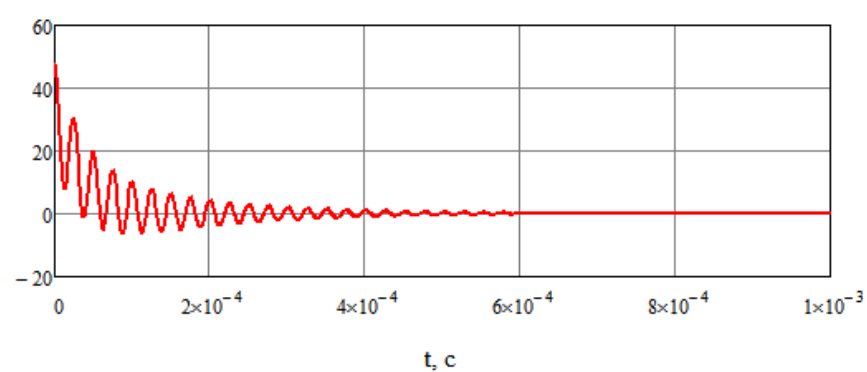
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

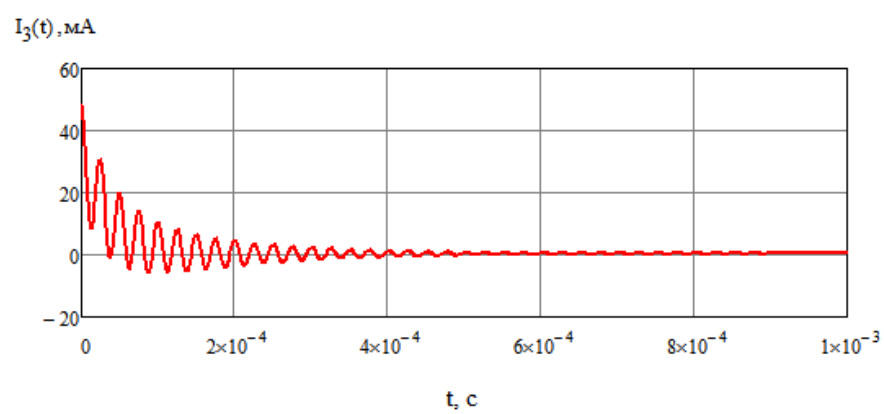
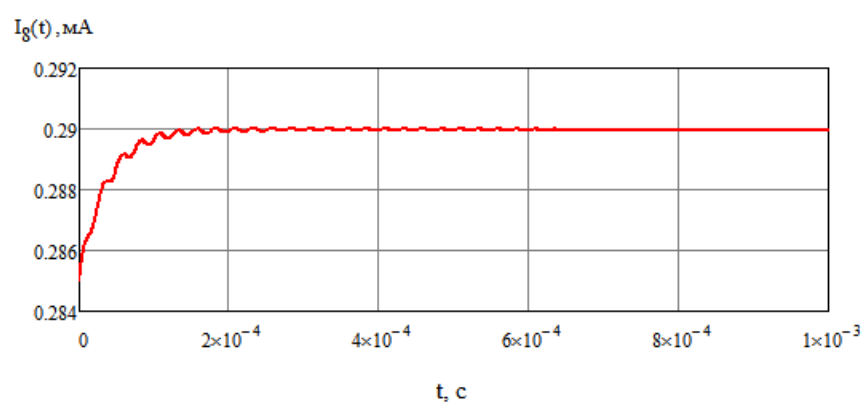




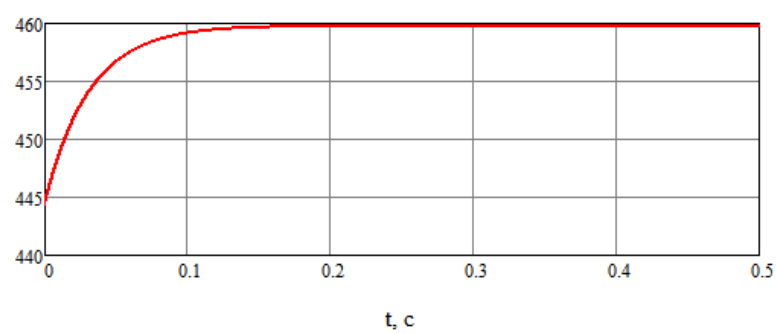
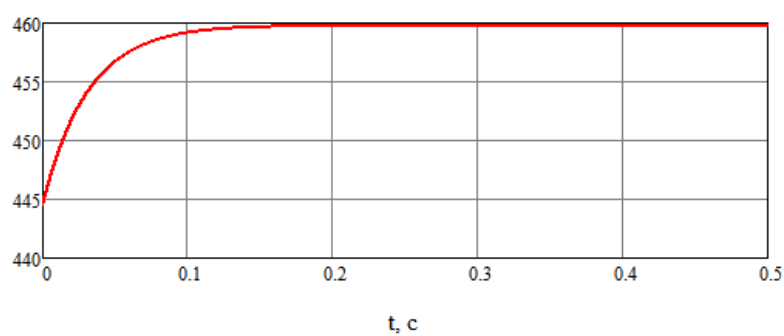
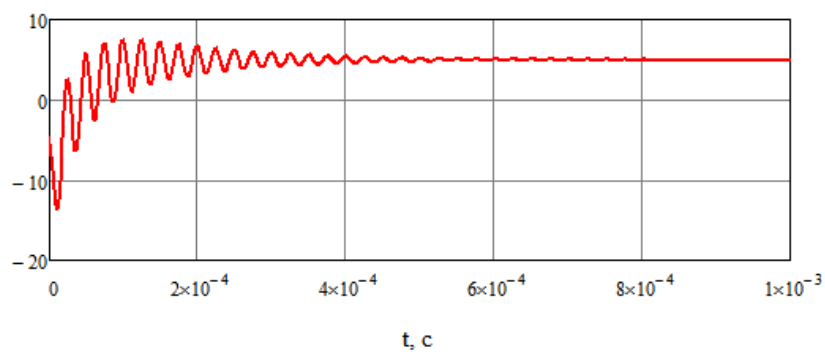
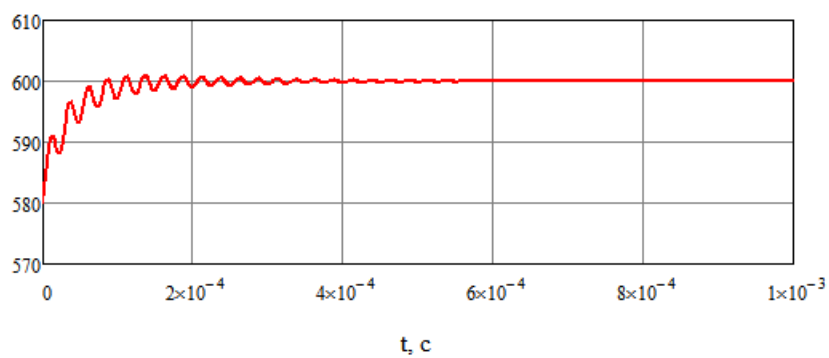
Позиция 9

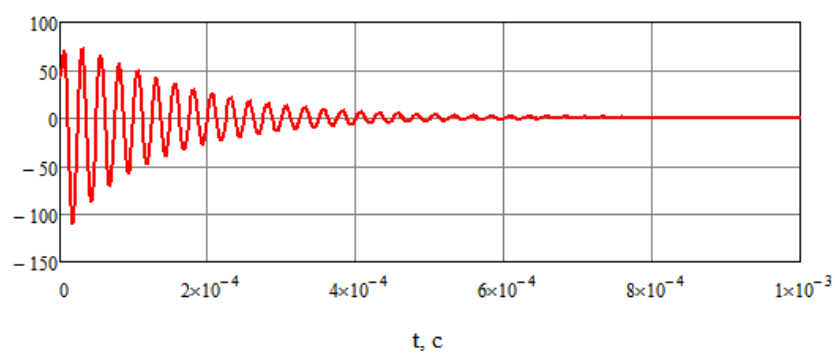
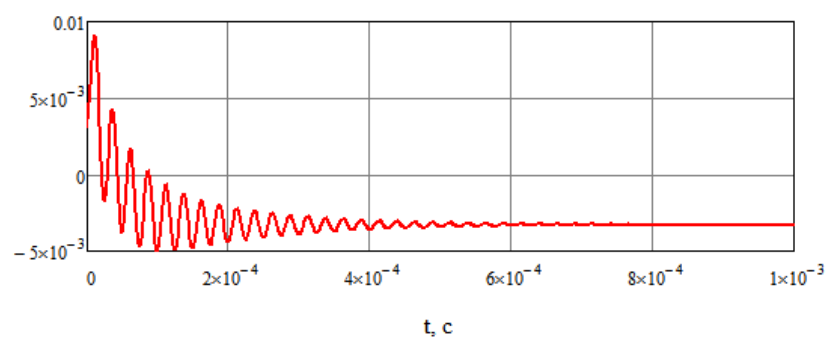
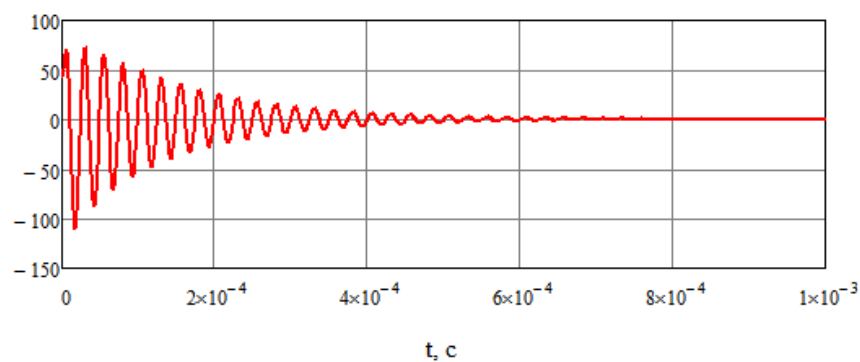
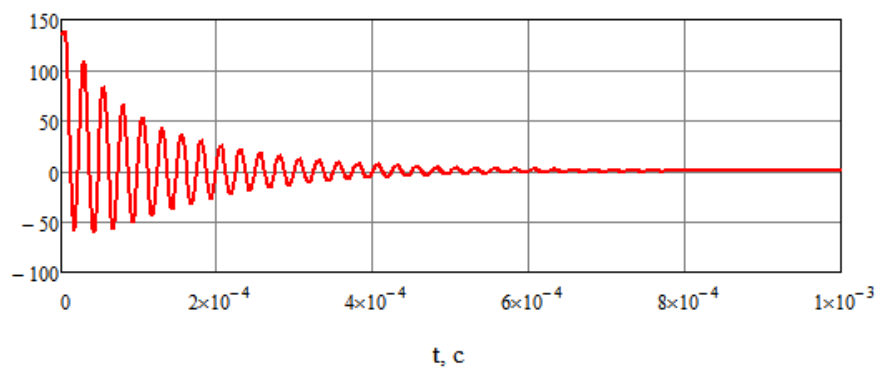
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

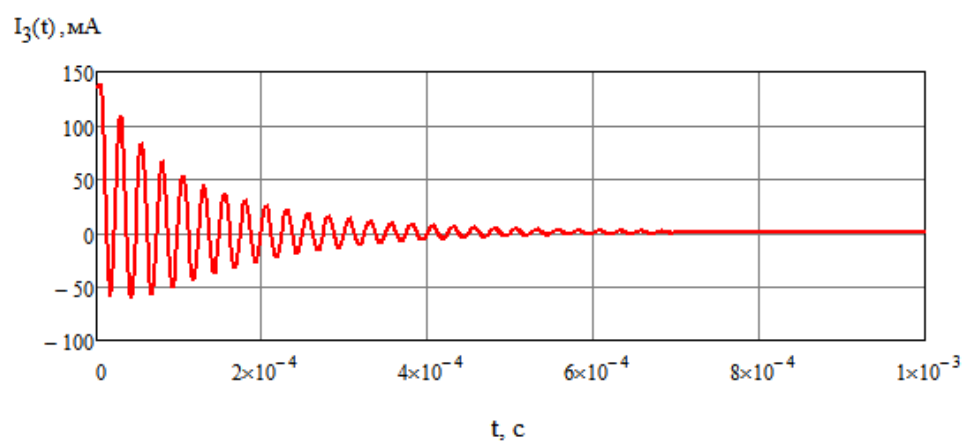
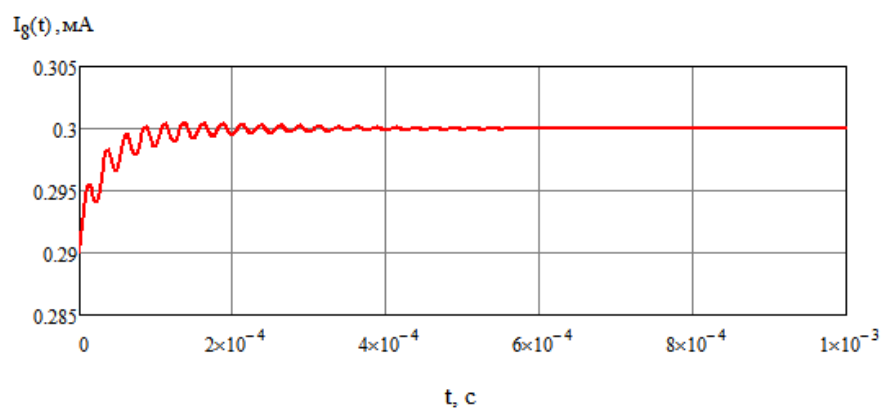
$I_5(t), \text{mA}$  $I_6(t), \text{mA}$  $I_4(t), \text{mA}$  $I_7(t), \text{mA}$ 



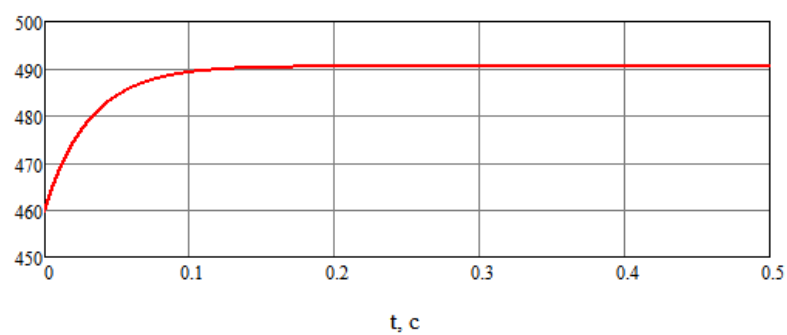
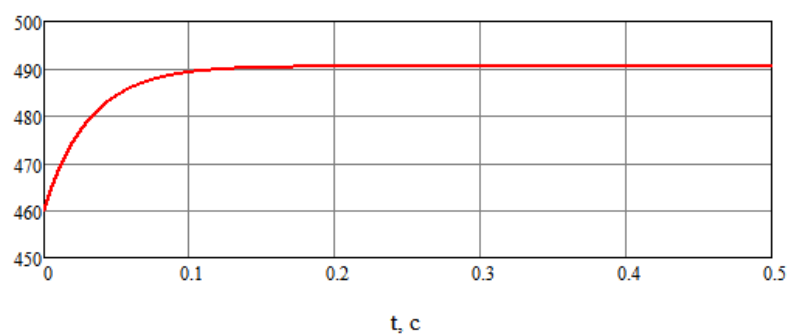
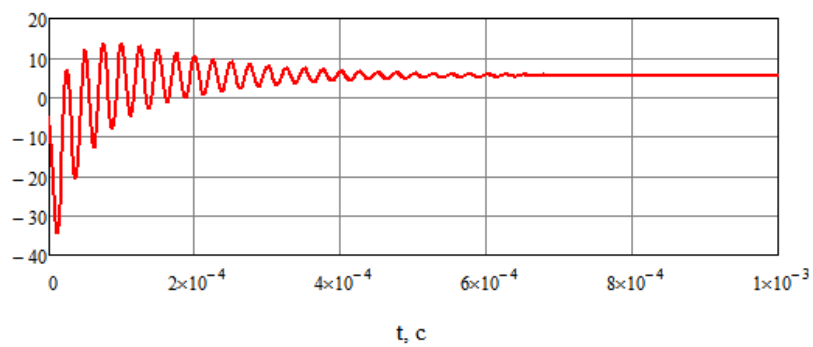
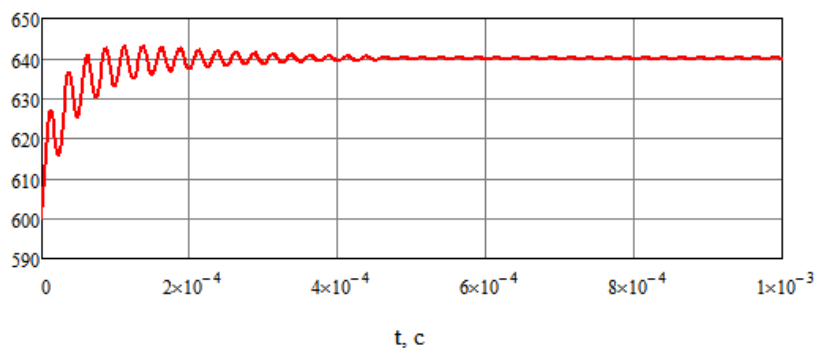
Позиция 10

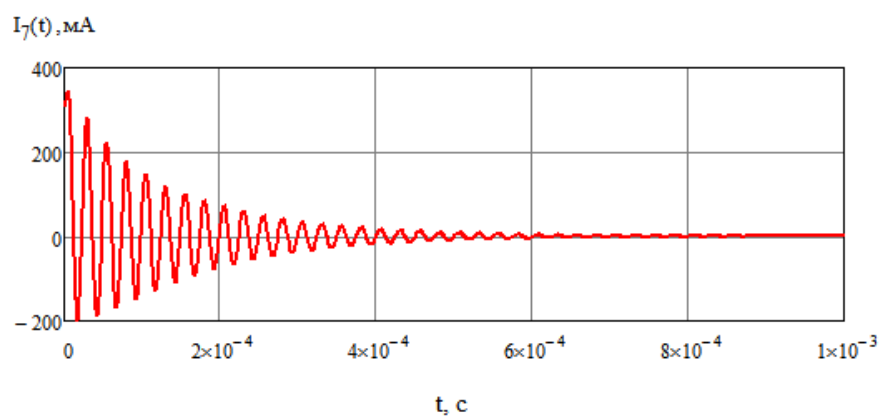
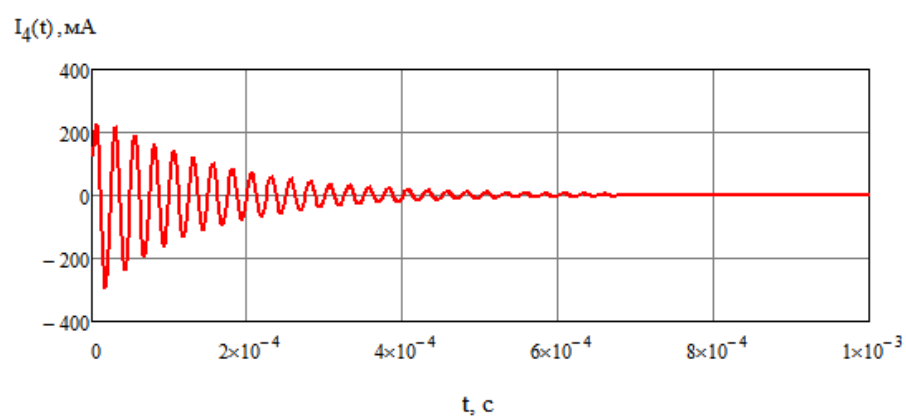
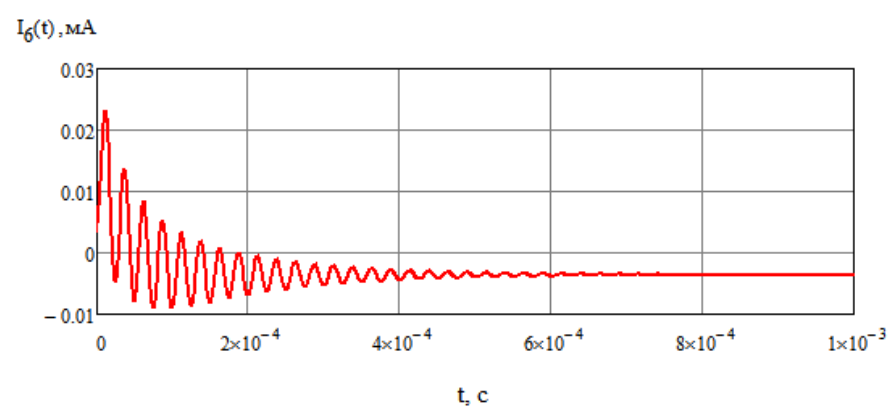
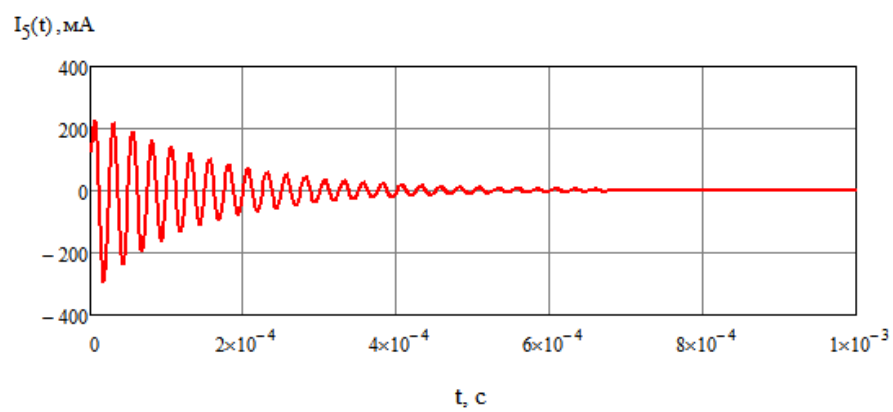
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

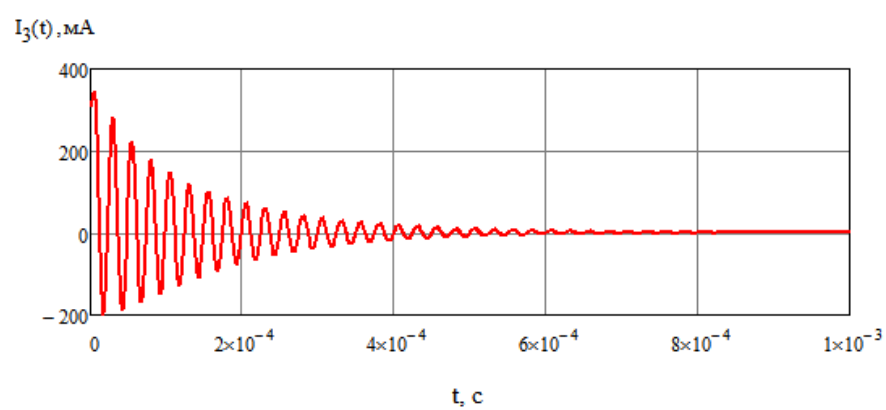
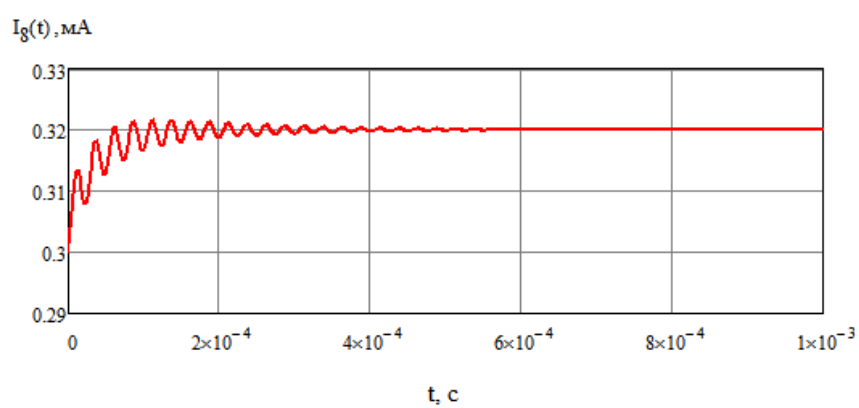
$I_5(t), \text{mA}$  $I_6(t), \text{mA}$  $I_4(t), \text{mA}$  $I_7(t), \text{mA}$ 



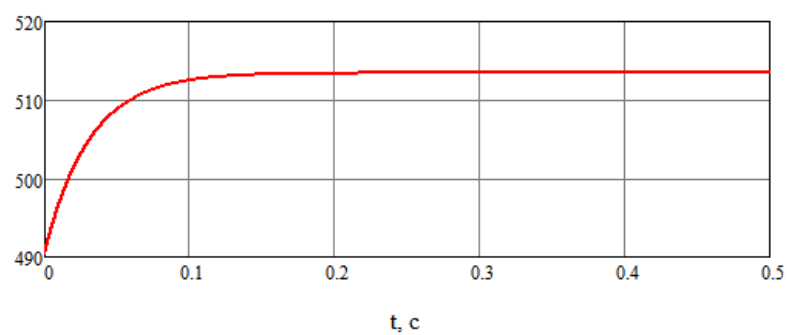
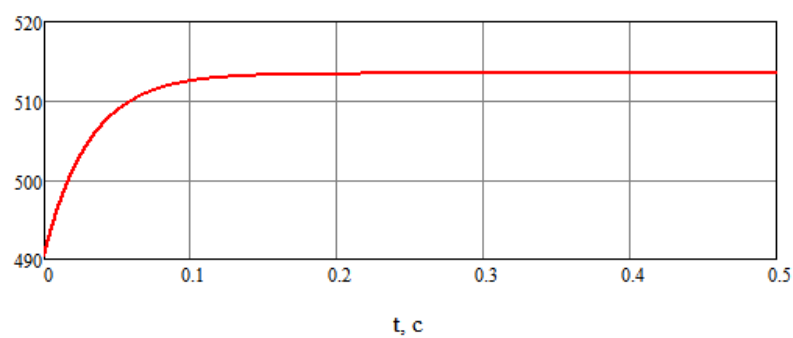
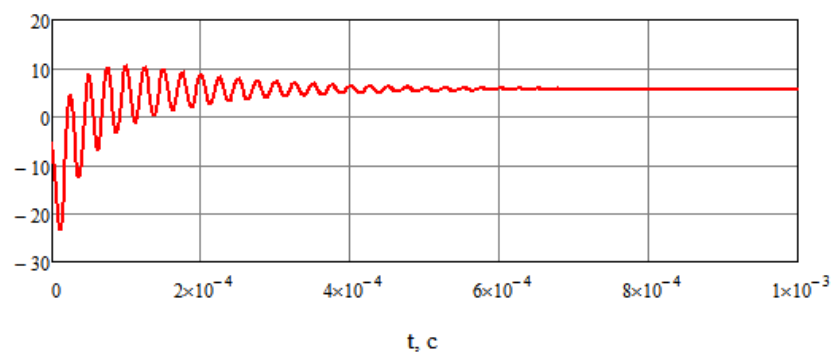
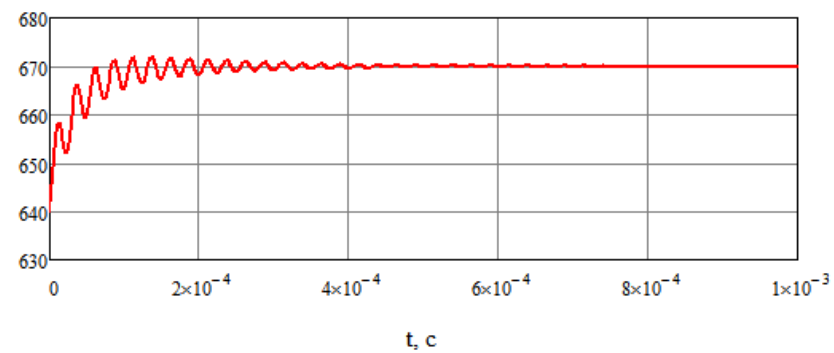
Позиция 11

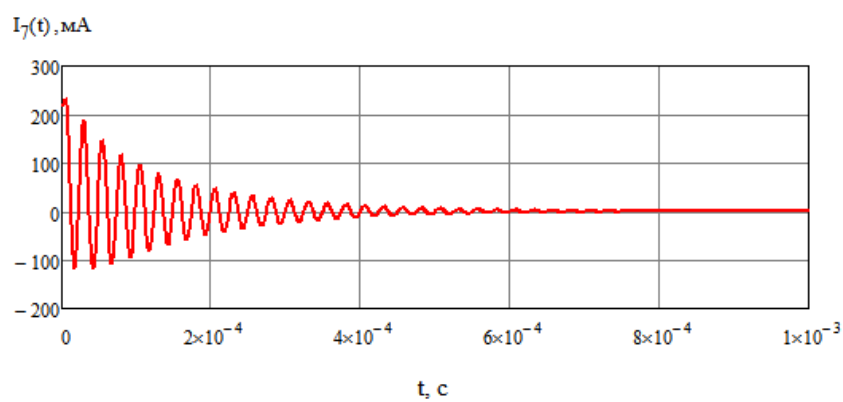
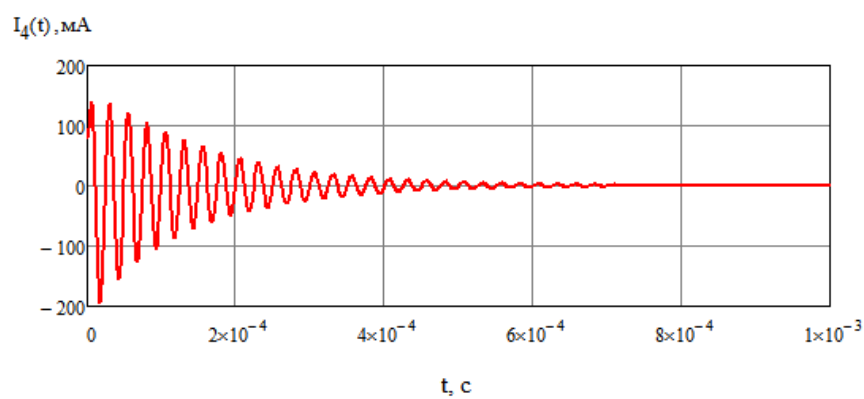
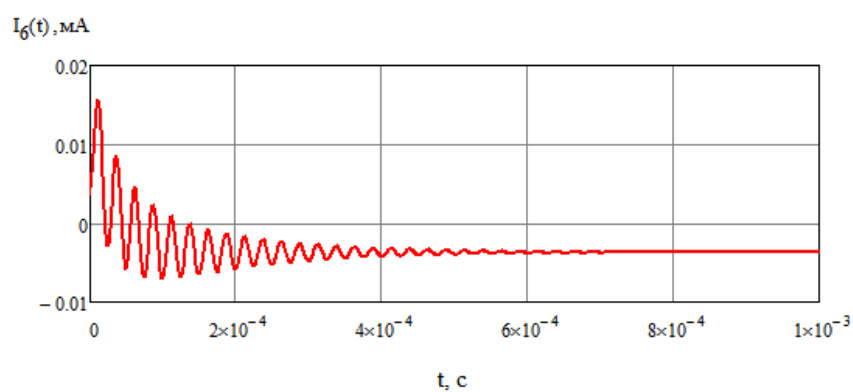
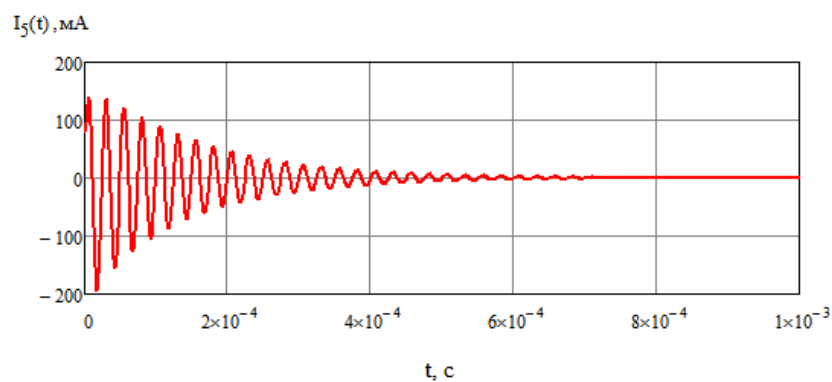
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

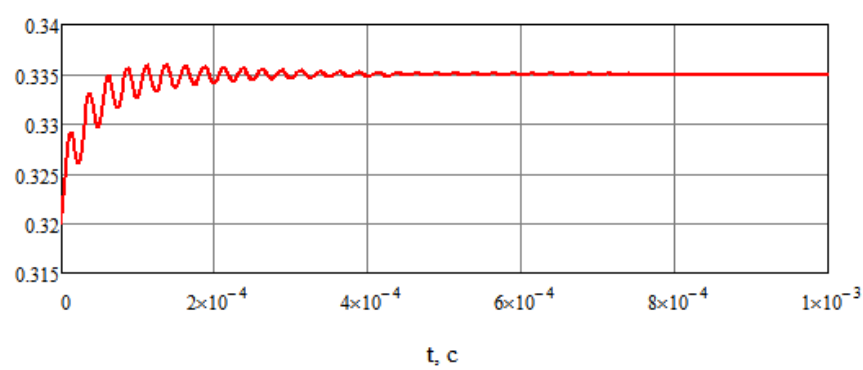
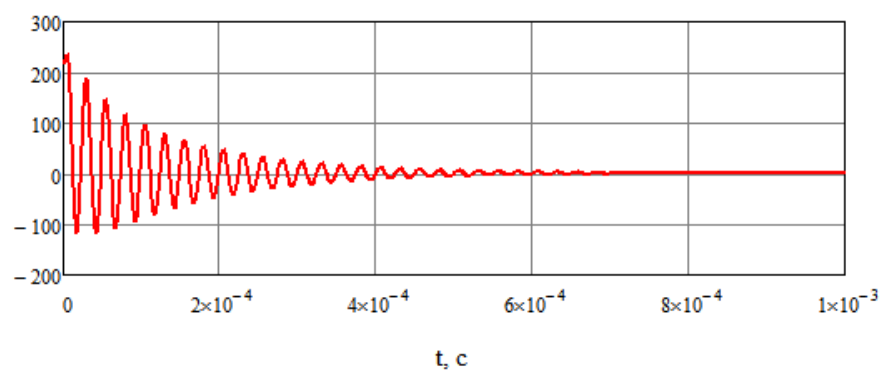




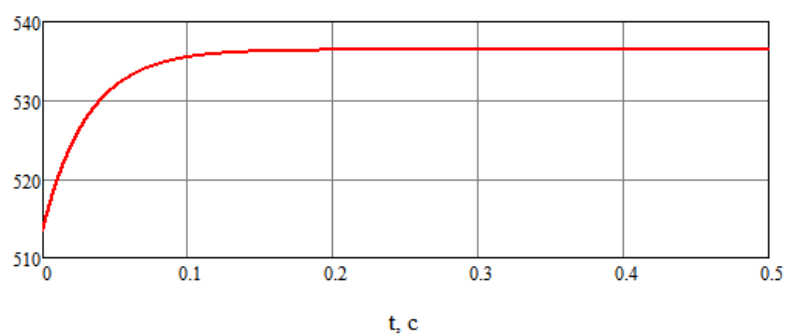
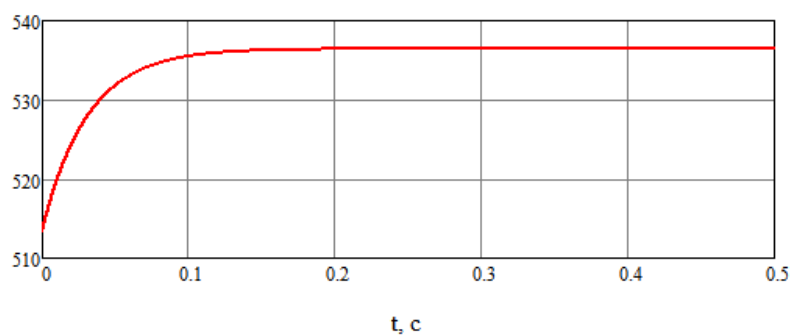
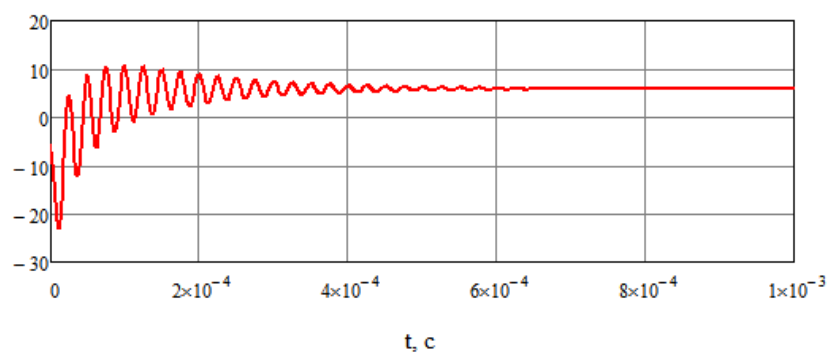
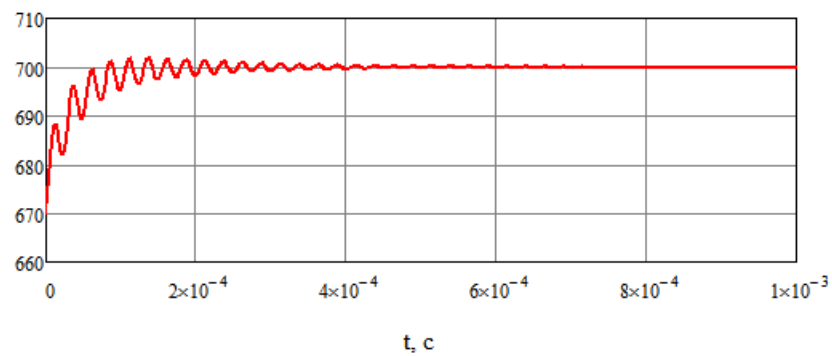
Позиция 12

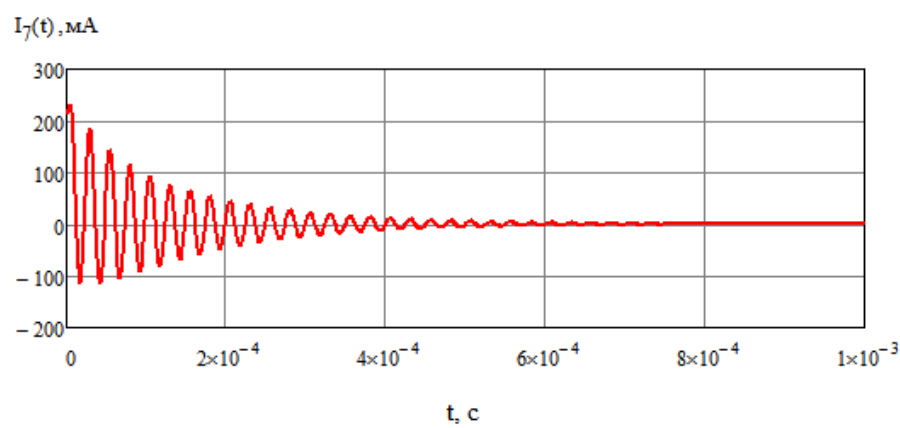
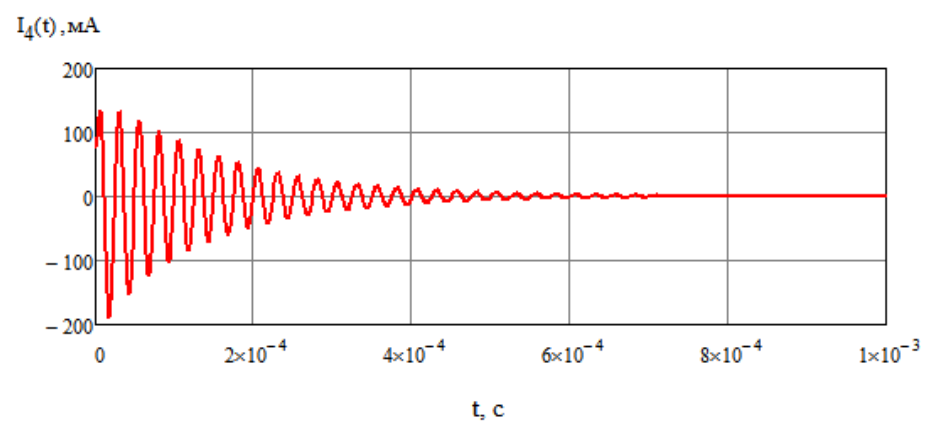
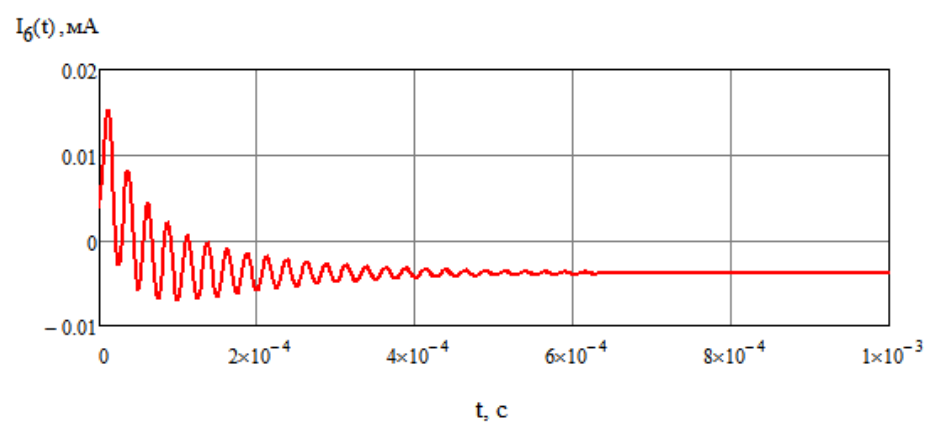
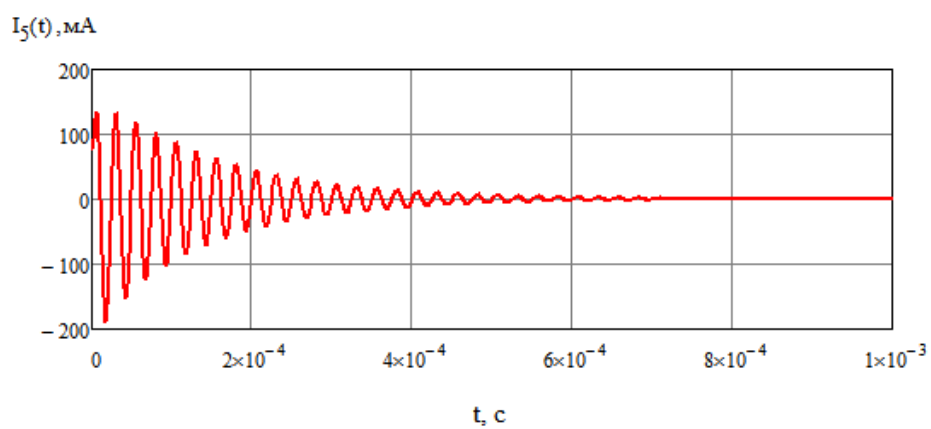
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

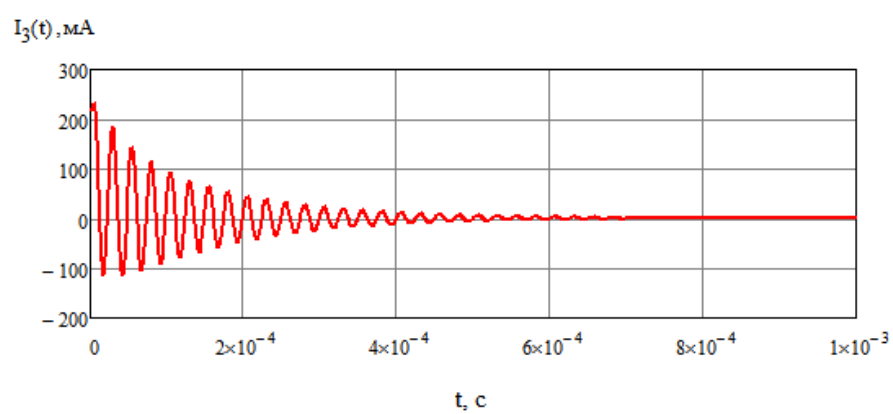
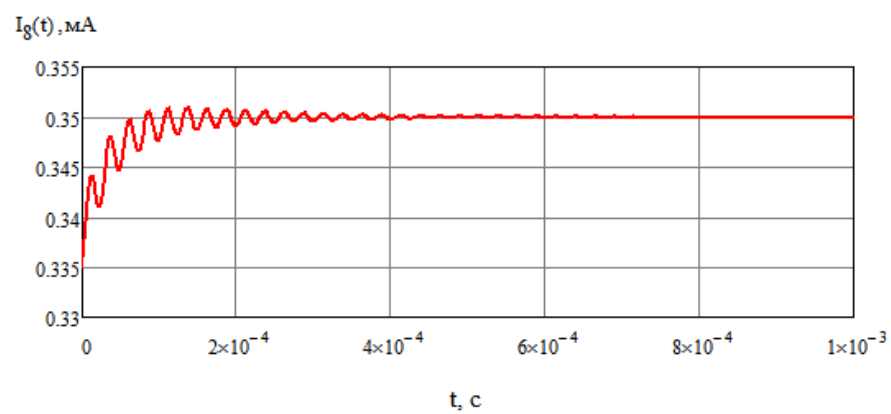


$I_8(t), \text{mA}$  $I_3(t), \text{mA}$ 

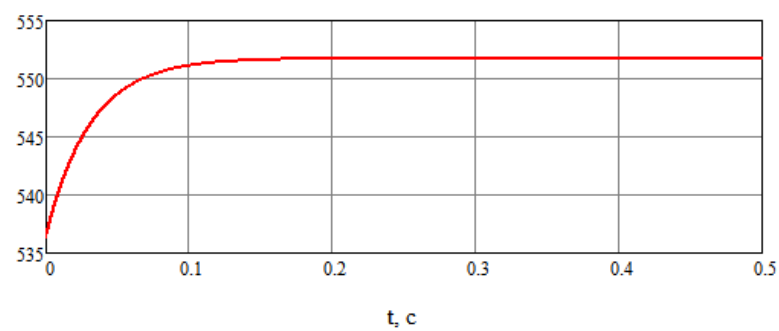
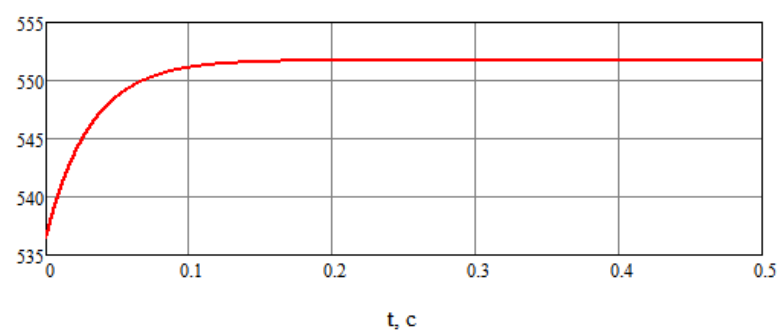
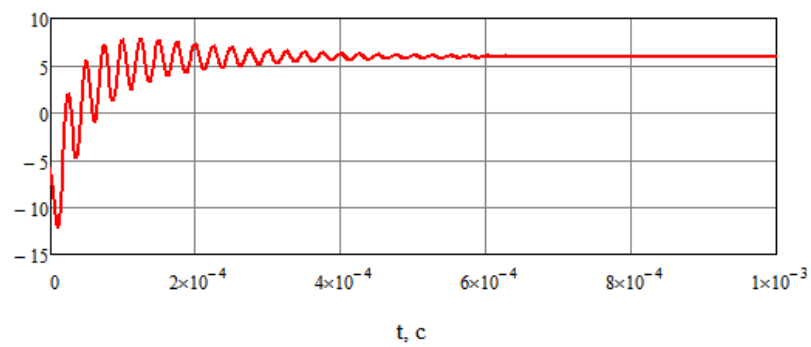
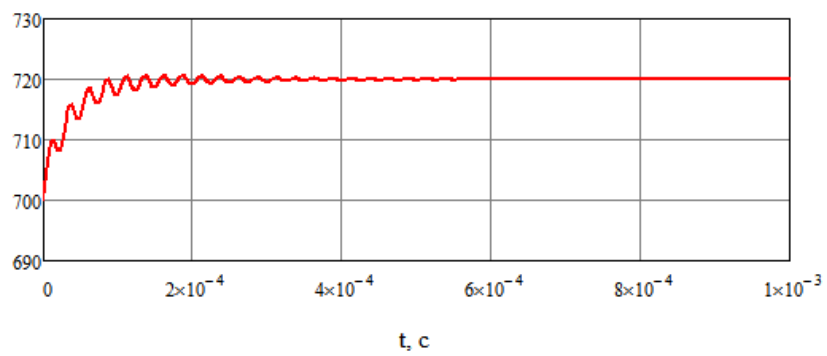
Позиция 13

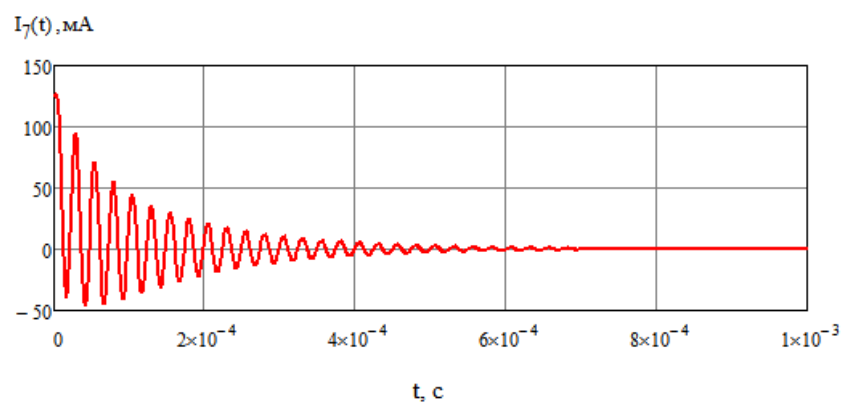
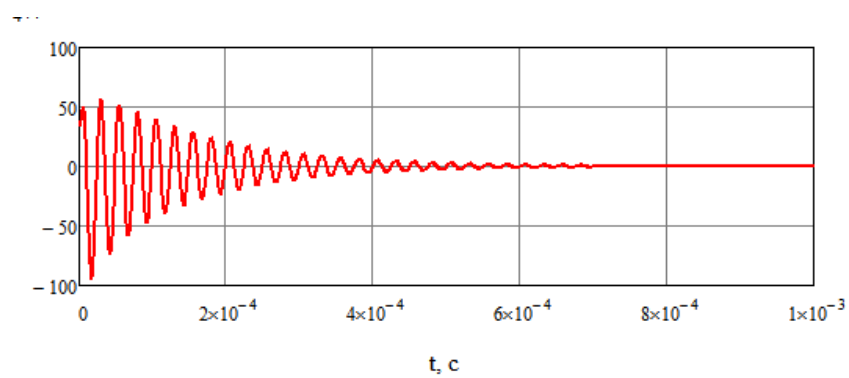
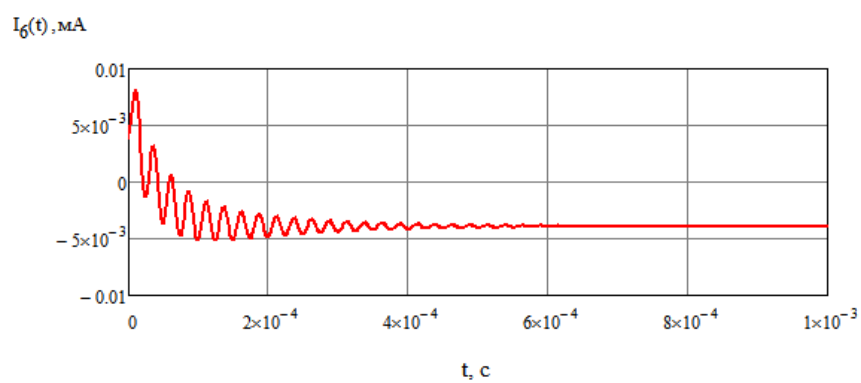
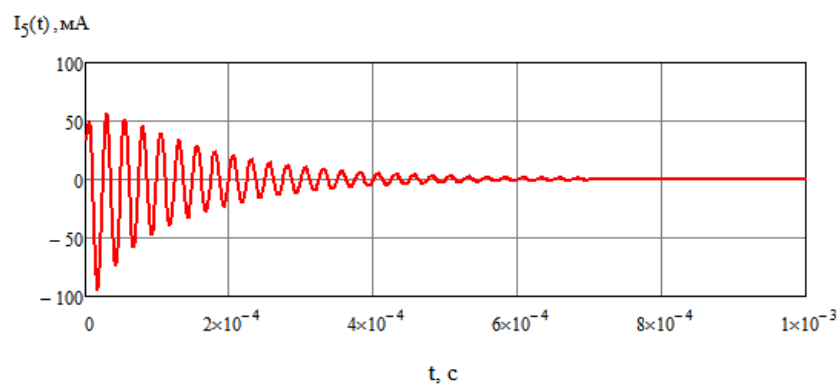
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

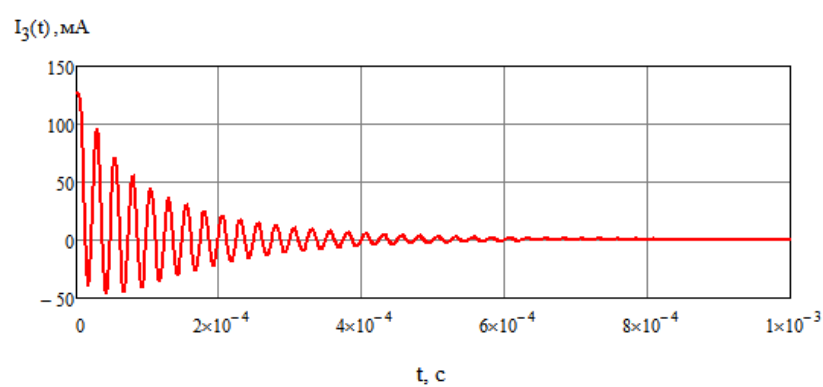
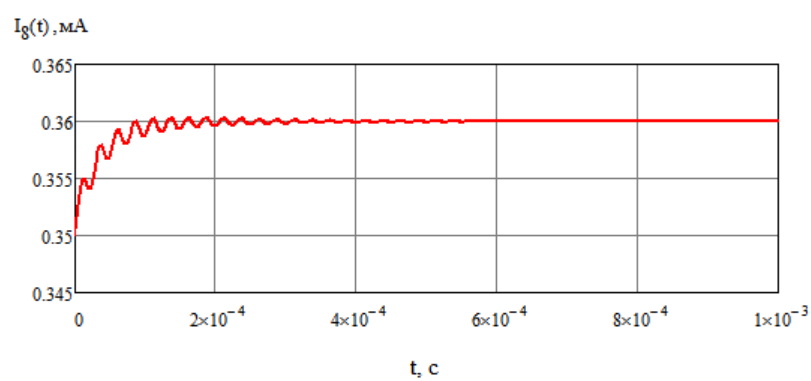




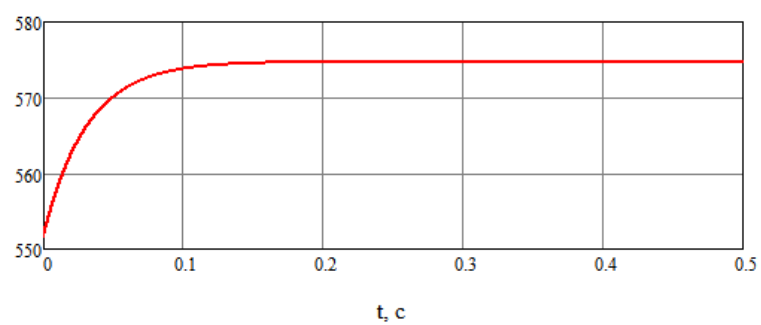
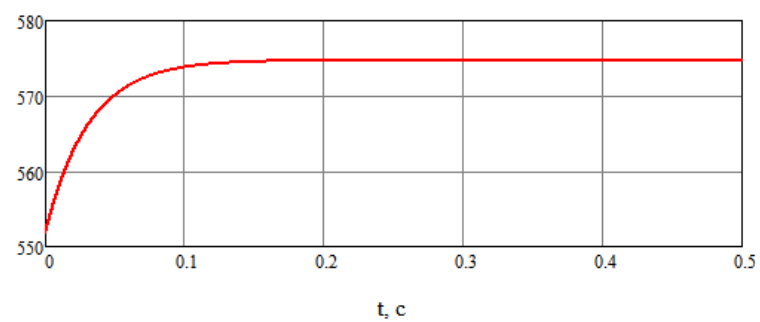
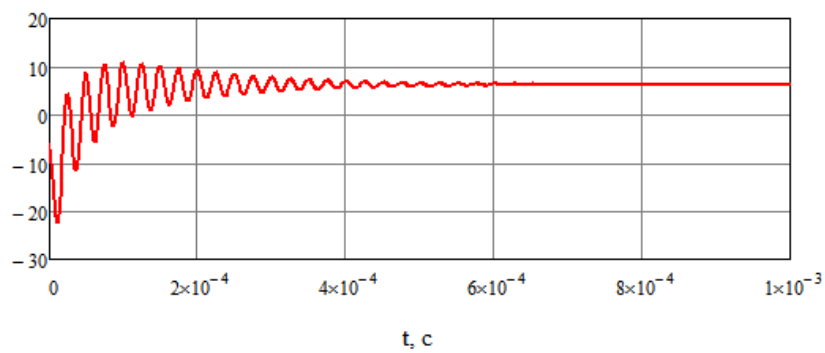
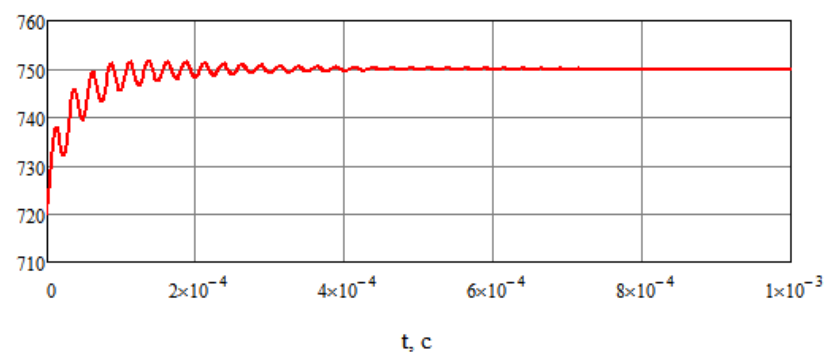
Позиция 14

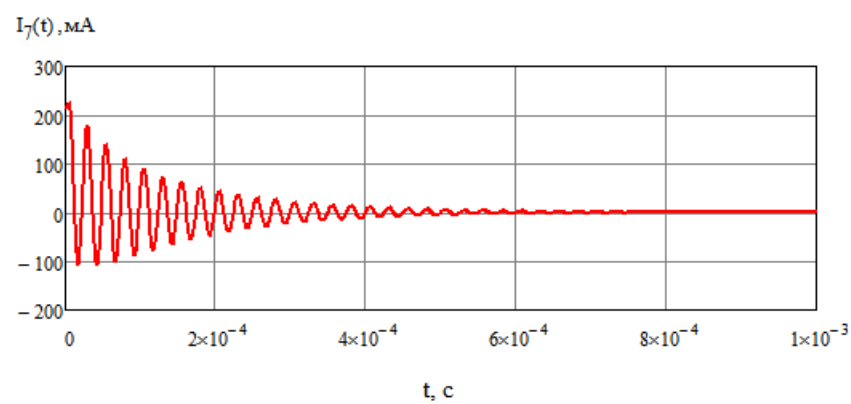
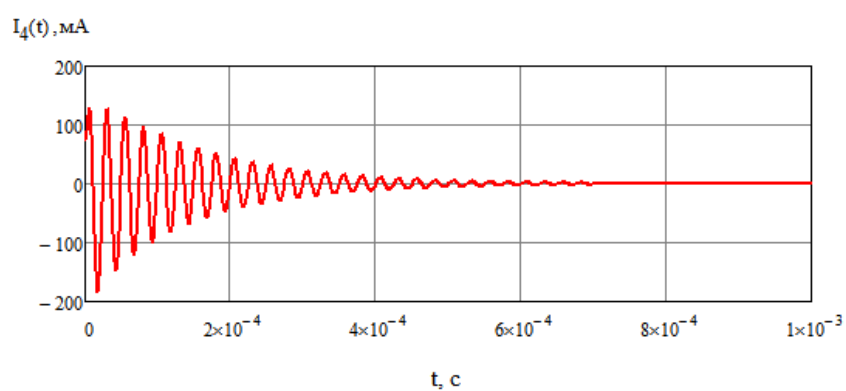
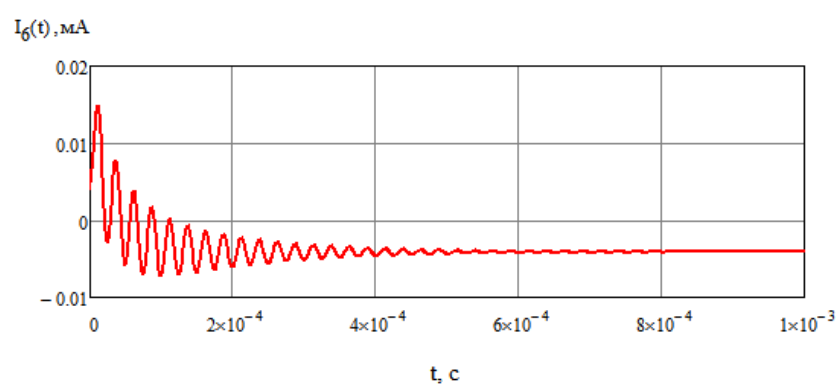
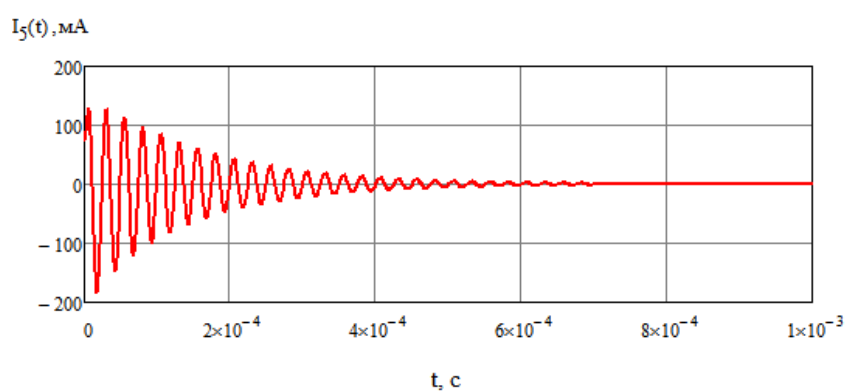
 $I_2(t), A$  $I_1(t), A$  $U_{c1}(t), B$  $U_{c2}(t), B$ 

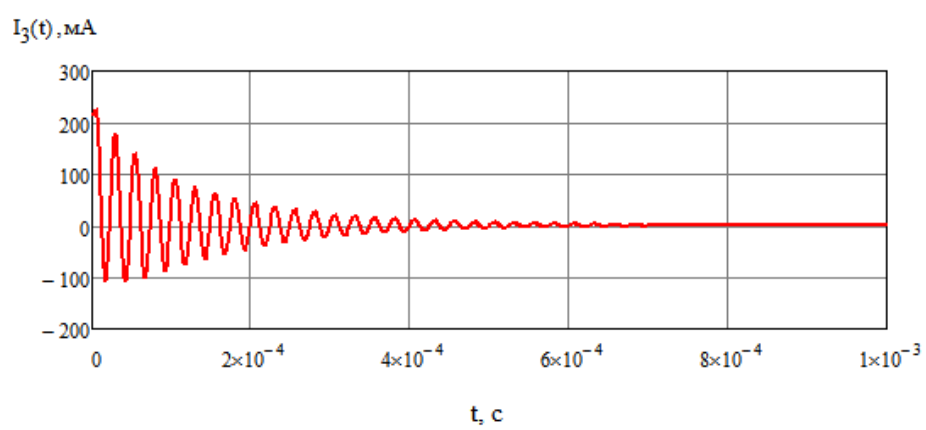
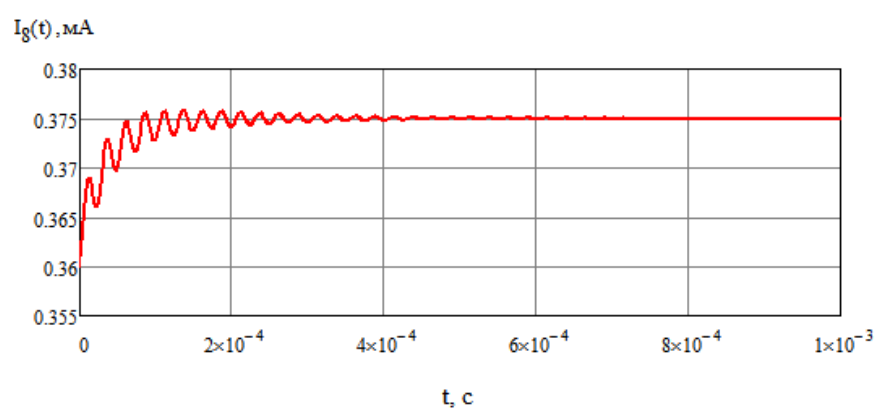




Позиция 15

 $I_2(t), \text{A}$  $I_1(t), \text{A}$  $U_{c1}(t), \text{B}$  $U_{c2}(t), \text{B}$ 





Документ, подтверждающий новизну технической разработки

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 76513

**УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОТ
КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА КОРПУС И
ПЕРЕГРЕВОВ**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
"Самарский государственный университет путей
сообщения" (СамГУПС) (RU)*

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2008118184

Приоритет полезной модели 07 мая 2008 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 20 сентября 2008 г.

Срок действия патента истекает 07 мая 2018 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) **RU** (11)**76 513** (13) **U1**

(51) МПК

H02H 3/14 (2006.01)(12) **ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ (титульный лист)**

(21), (22) Заявка: 2008118184/22, 07.05.2008

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
07.05.2008

(45) Опубликовано: 20.09.2008 Бюл. № 26

Адрес для переписки:

443066, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18,
СамГУПС, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Гордеев Игорь Петрович (RU),
Гордеев Андрей Игоревич (RU),
Абросимов Алексей Валерьевич (RU),
Калякулин Алексей Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Самарский государственный университет путей
сообщения" (СамГУПС) (RU)(54) **УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА КОРПУС И ПЕРЕГРЕВОВ**

(57) Формула полезной модели

Устройство защиты электрических цепей от короткого замыкания на корпус и перегревов, содержащее источник переменного тока, исполнительный элемент и измерительный мост, одним плечом которого является конструктивная емкость защищаемой электрической цепи и эквивалентная емкость, отличающееся тем, что во второе плечо измерительного моста введена вторая эквивалентная емкость и параллельная цепь из переменных резистора и конденсатора, причем источник переменного тока подключен к защищаемой силовой цепи и измерительному мосту через разделительный конденсатор.

RU 76513 U1

RU 76513 U1

Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы

АКТ ИСПЫТАНИЙ

результатов диссертационной работы на предприятии

г.Ершов

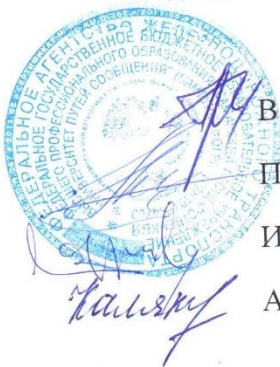
21.03.2015 г.

Мы, нижеподписавшиеся, представители Самарского государственного университета путей сообщения, где выполнялась диссертационная работа, проректор по научной работе и инновациям Покацкий В.А., заведующий кафедрой «Электрический транспорт» Шепелин П.В., профессор кафедры «Электрический транспорт» Гордеев И.П., старший преподаватель кафедры «Электрический транспорт» Калякулин А.Н.

и представители Сервисного локомотивного депо Ершовское филиала «Южный» ООО «ТМХ-сервис», на котором проводились испытания результатов диссертационной работы, заместитель начальника депо Бортовов Е.А., главный технолог Кошавцев В.В., составили настоящий акт о том, что разработанное устройство защиты силовых цепей локомотивов от коротких замыканий (патент на полезную модель RU №76513) испытано на работающем тепловозе 2ТЭ116У №0058, находящемся на путях депо.

В результате проведенных испытаний, разработанное устройство подтвердило свою работоспособность, однако для внедрения результатов диссертационной работы необходимо провести испытания в эксплуатации.

Подписи:



В.А. Покацкий
П.В. Шепелин
И.П. Гордеев
А.Н. Калякулин



Е.А. Бортовов
В.В. Кошавцев

АКТ № 1
от 3 июля 2019 г.

ввода в эксплуатацию
системы защиты от пробоя изоляции на корпус
в силовой цепи тепловоза

Мы, нижеподписавшиеся, представители федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Самарский государственный университет путей сообщения" и представители Куйбышевской дирекции тяги – структурного подразделения Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД», составили настоящий акт в том, что система защиты от пробоя изоляции на корпус в силовой цепи тепловоза введена в опытную эксплуатацию на тепловозе 2ТЭ25КМ № в эксплуатационном локомотивном депо Ульяновск – структурном подразделении Куйбышевской дирекции тяги – структурном подразделении Дирекции тяги – филиале ОАО «РЖД». Систему защиты от пробоя изоляции на корпус в силовых цепях тепловозов разработал старший преподаватель кафедры «Электрический транспорт» Калякулин Алексей Николаевич при выполнении диссертации на соискание степени кандидата технических наук.

От
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
университет путей сообщения»

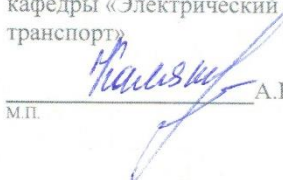
Ректор

 И.К. Андрончев

Заведующий кафедрой
«Электрический транспорт»

 П.В. Шепелин

Старший преподаватель
кафедры «Электрический
транспорт»

 А.Н. Калякулин
М.П.

От

Куйбышевской Дирекции тяги –
структурного подразделения Дирекции тяги –
филиала ОАО «РЖД»

Гл. инженер

 Зоробанов Г.И.

Начальник депо

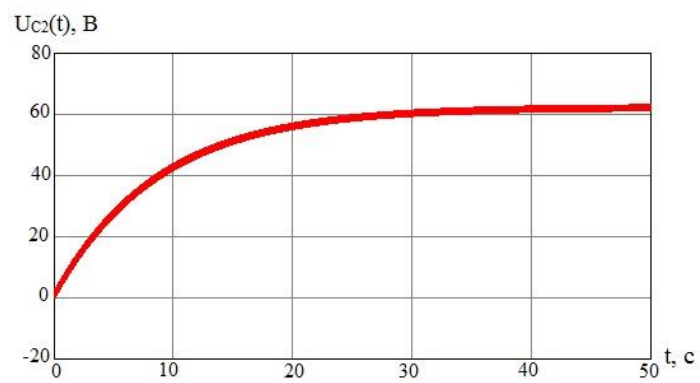
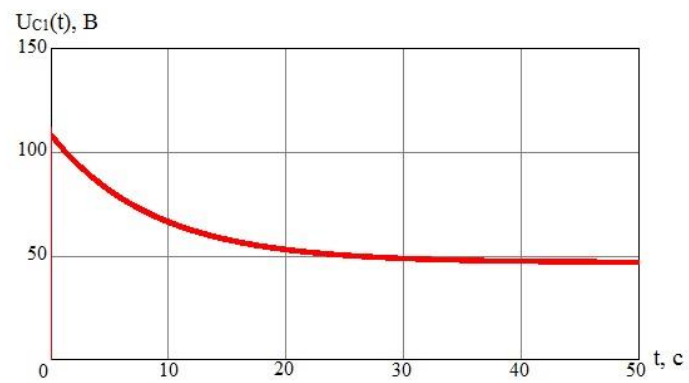
 Мушин М.А.

Гл. инженер депо

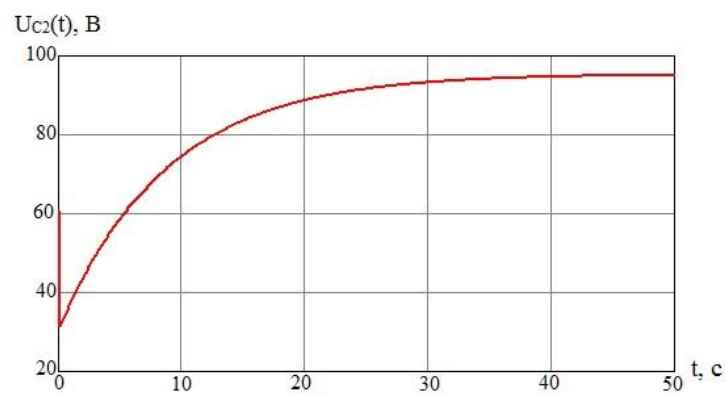
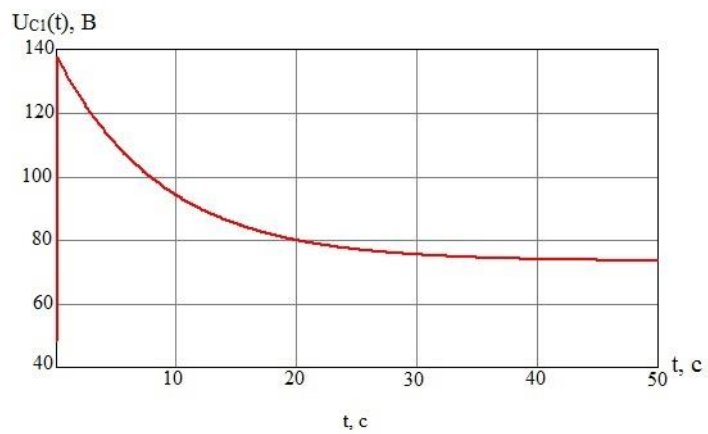
 Патрашин С.М.
М.П.

Графики нарастания напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 при переключении позиций контроллера машиниста (1-15) в предложенной силовой цепи тепловоза

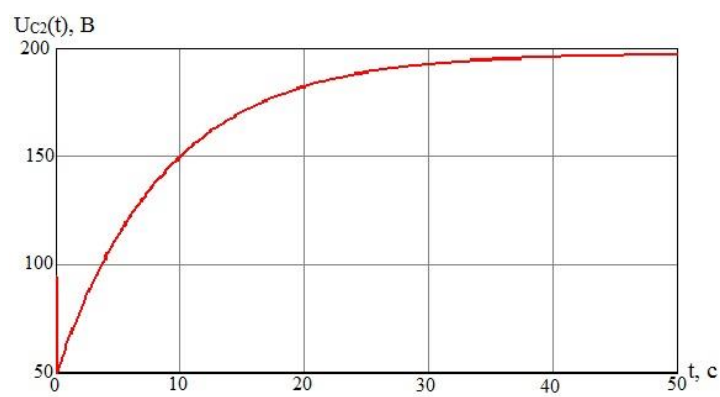
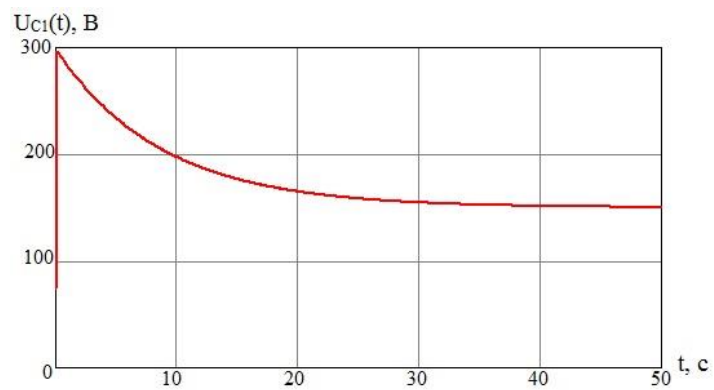
Позиция 1



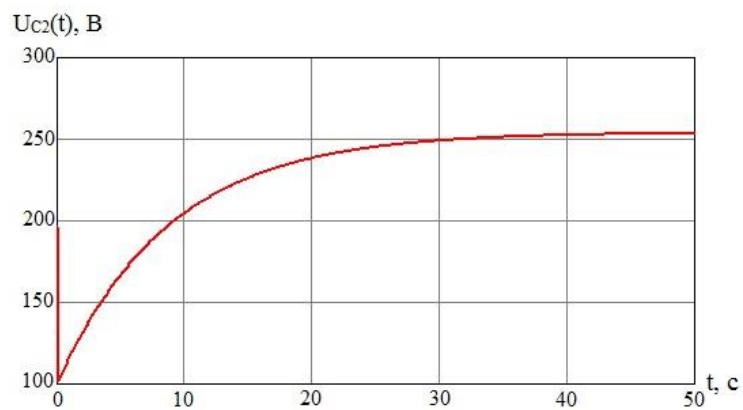
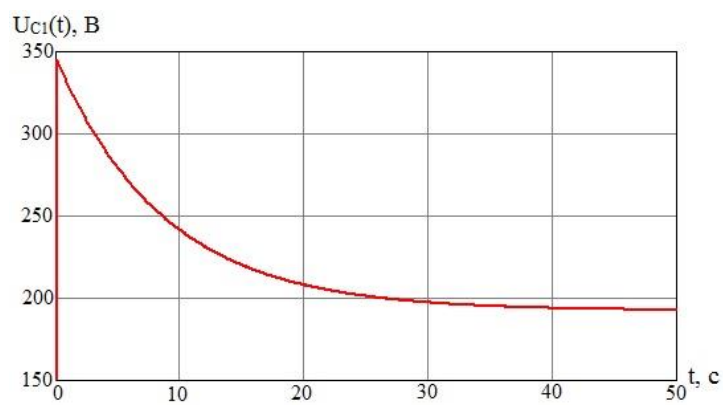
Позиция 2



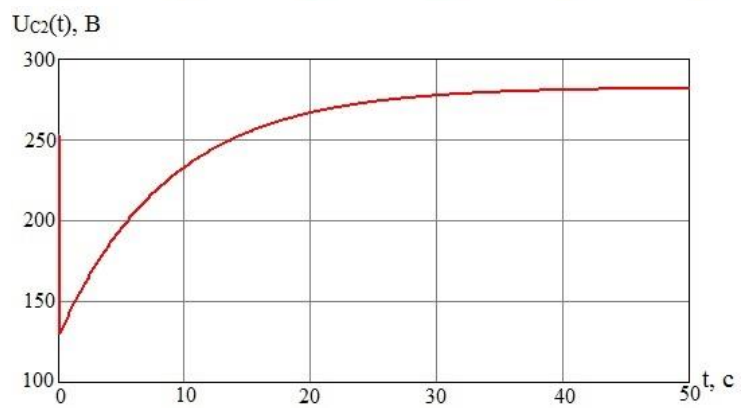
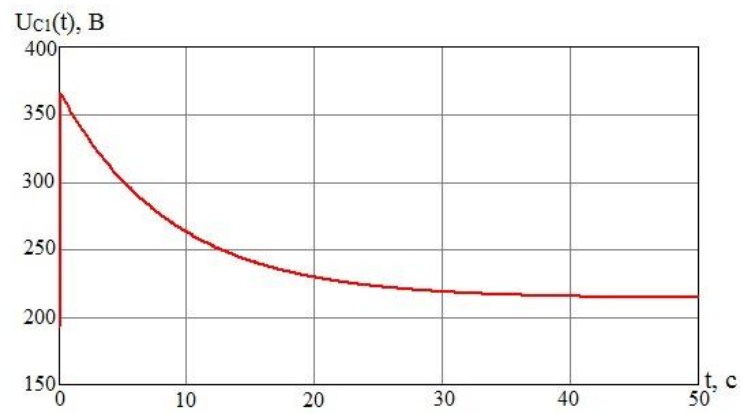
Позиция 3



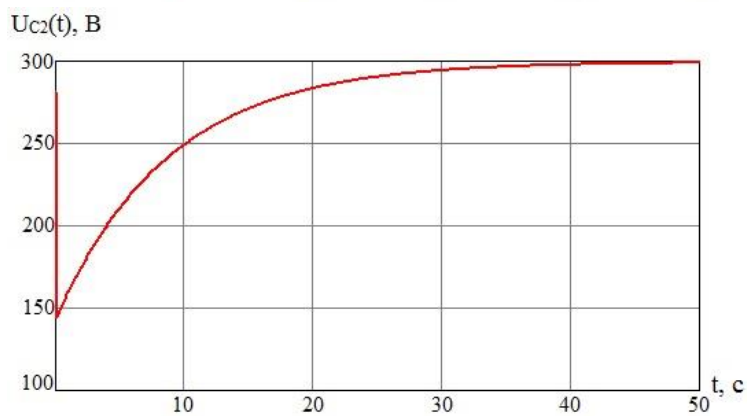
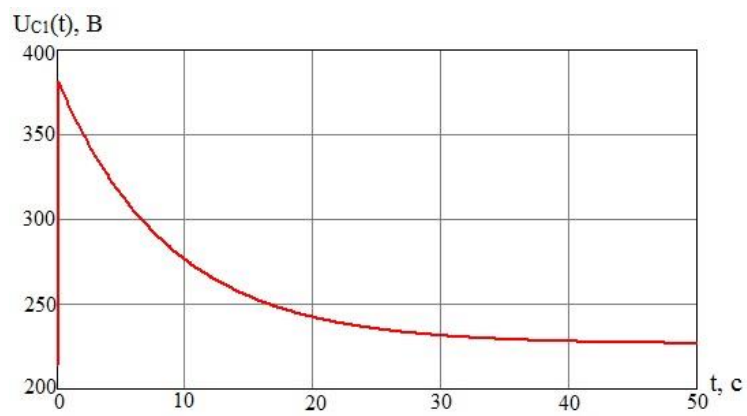
Позиция 4



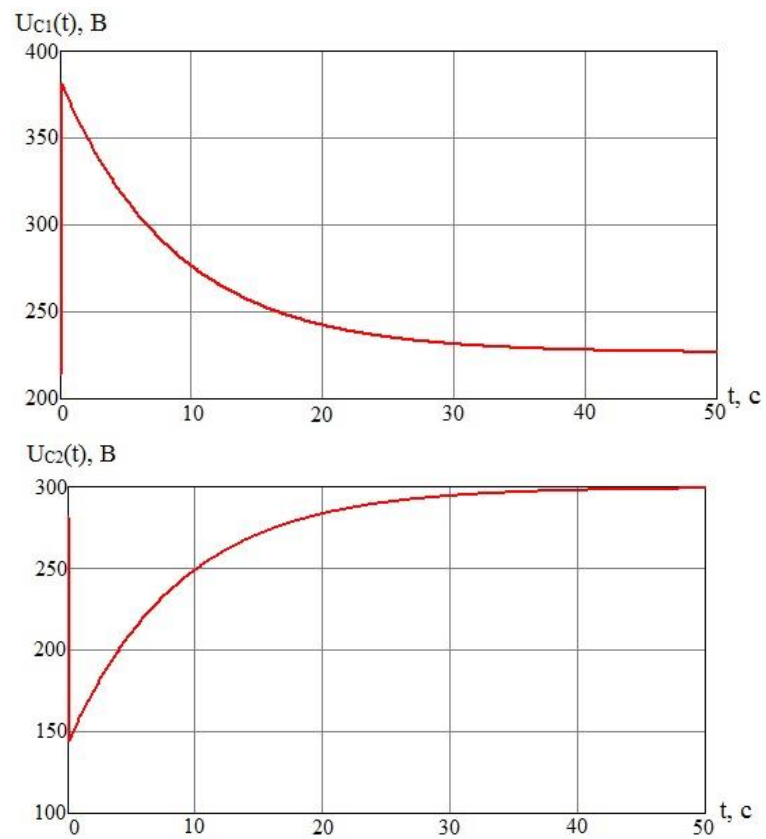
Позиция 5



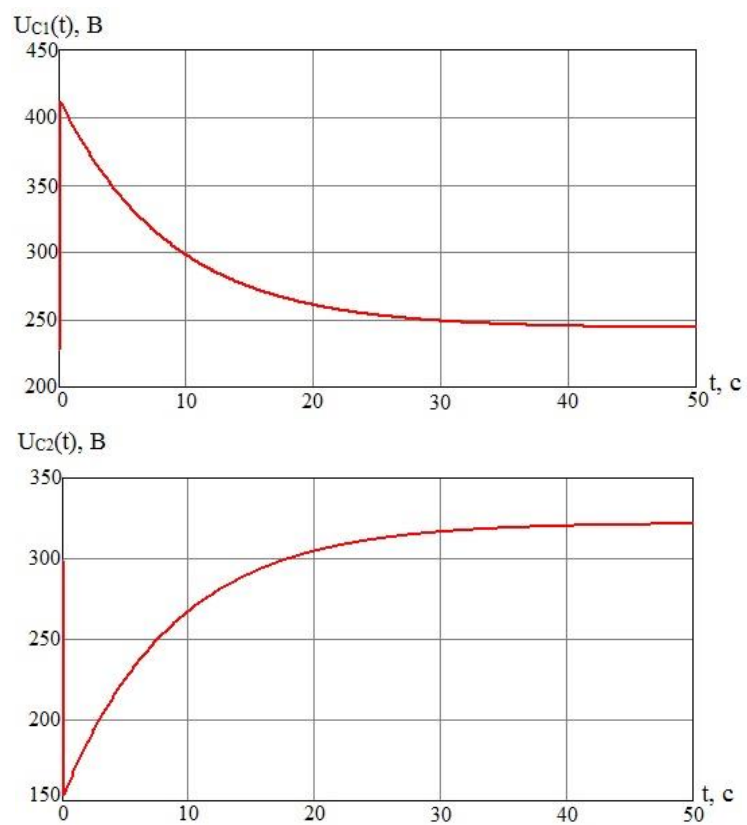
Позиция 6



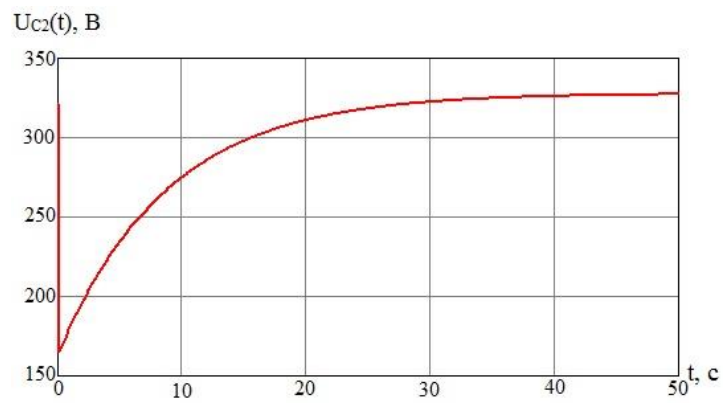
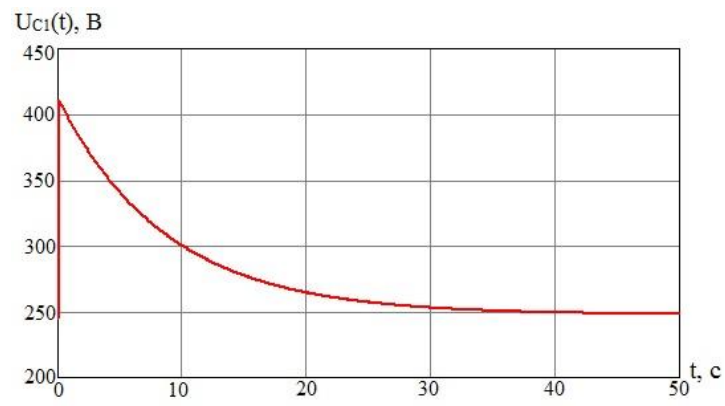
Позиция 7



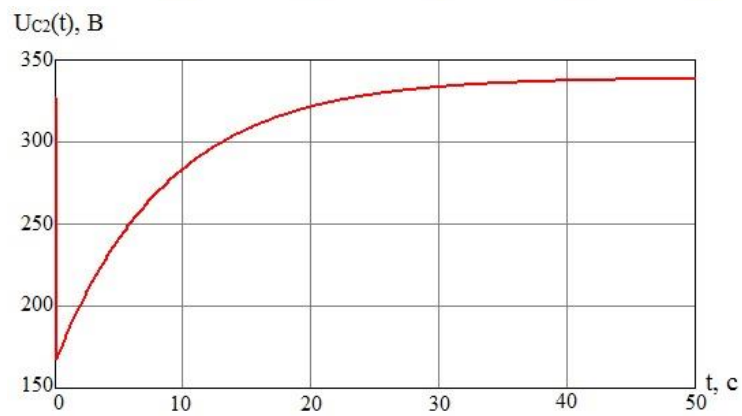
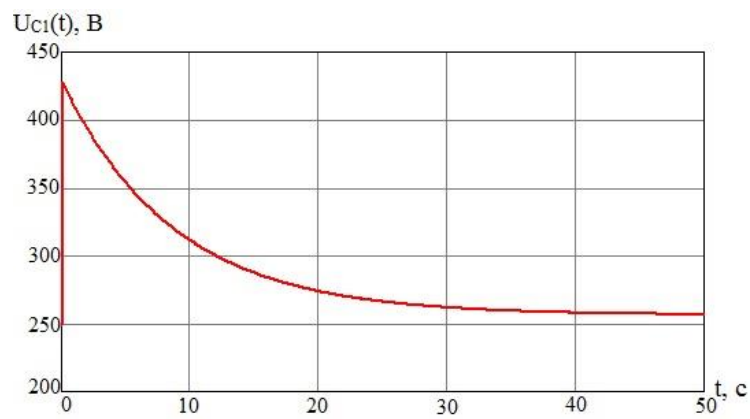
Позиция 8



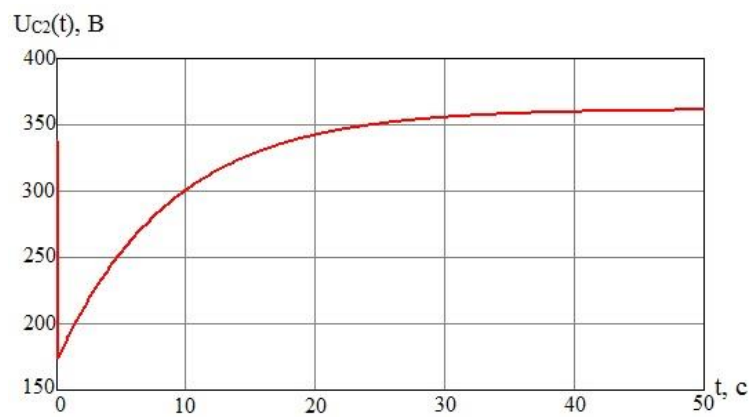
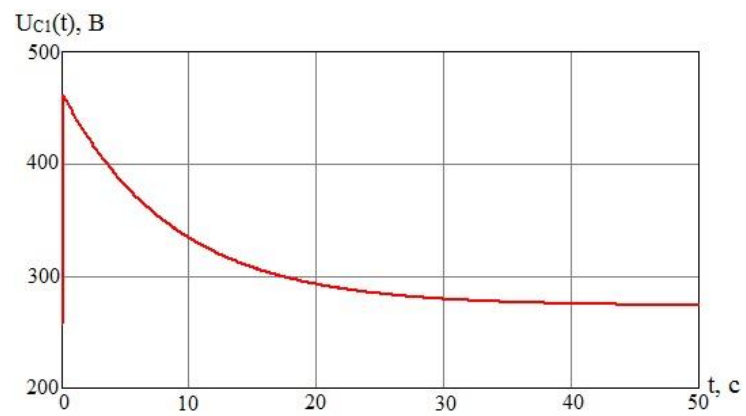
Позиция 9



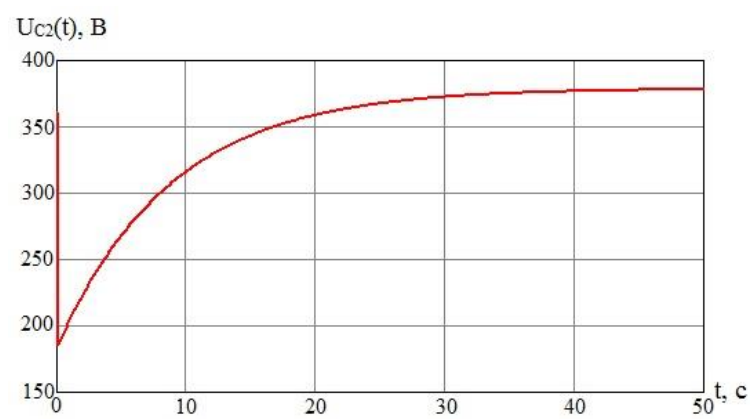
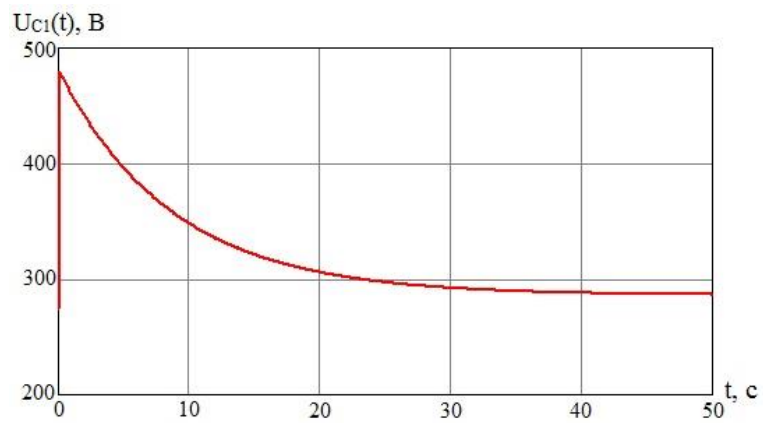
Позиция 10



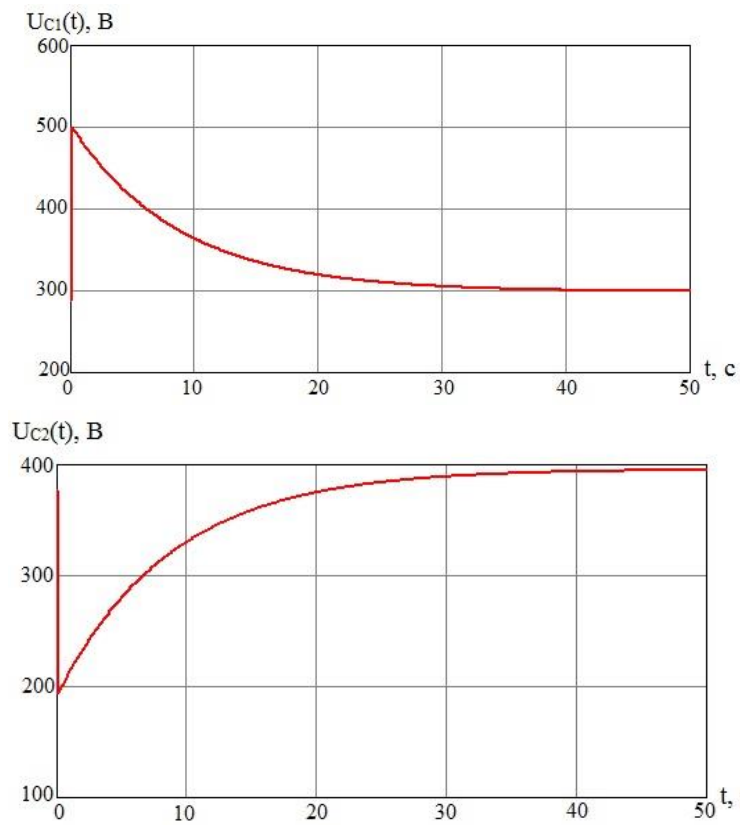
Позиция 11



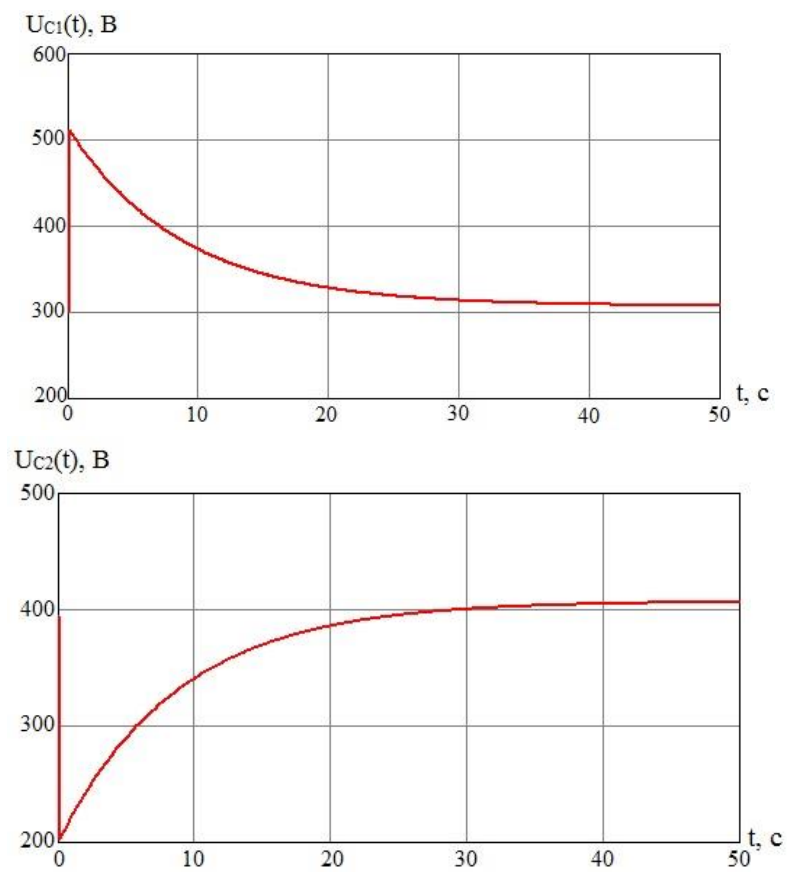
Позиция 12



Позиция 13



Позиция 14



Позиция 15

