

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

УДК 004.5: 622.25.:621.3

Маренич Ольга Константиновна

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ, АЛГОРИТМОВ И СТРУКТУРЫ
ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫМИ
ПРОЦЕССАМИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УЧАСТКА
ШАХТЫ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
Ковалева Инна Владимировна

Идентичность всех экземпляров
ПОДТВЕРЖДАЮ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
канд. техн. наук

Т.В. Завадская

Донецк – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	12
1.1 Электротехнический комплекс участка шахты: структура, функции, особенности эксплуатации	12
1.2 Коммутационный процесс отключения короткого замыкания как фактор воздействия на ресурс автоматического выключателя.....	19
1.3 Обзор технических средств токоограничения в контексте создания благоприятных условий отключения короткого замыкания.....	29
1.4 Анализ неблагоприятных условий электропитания удалённого электропотребителя с асинхронным двигателем высокой мощности.....	35
1.5 Обзор технических возможностей устройств регулируемой коммутации силовых электрических присоединений	39
1.6 Принципы и средства автоматизации технологических объектов и процессов в горной промышленности	45
1.7 Выводы по разделу 1. Обоснование цели и задач исследования.....	48
РАЗДЕЛ 2 ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИОННОГО ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ В КОНТЕКСТЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ	51
2.1 Обзор методов моделирования дугового разряда при коммутации сильноточной электрической цепи	51
2.2 Коммутационное дугообразование в сильноточной электрической цепи как фактор плазменной металлизации внутренних поверхностей корпуса автоматического выключателя	57
2.3 Энергетические показатели коммутационного дугообразования в автоматическом выключателе в функциональной связи с геометрическими и тепловыми параметрами плазмы	62
2.4 Обоснование способа ограничения энергетических параметров	

коммутационного дугообразования при отключении автоматическим выключателем тока короткого замыкания	68
2.5 Выводы по разделу 2	72
РАЗДЕЛ 3 ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ В СЕТИ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ	74
3.1 Анализ возможностей использования коммутатора обмоток трансформатора подстанции в качестве исполнительного устройства стабилизации напряжения питания удалённого электропотребителя	74
3.2 Обоснование алгоритмов автоматического управления коммутационными процессами в системе электроснабжения участка шахты.....	84
3.3 Выводы по разделу 3	88
РАЗДЕЛ 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА, ПИТАЮЩЕГО СИЛОВОЕ ПРИСОЕДИНЕНИЕ	90
4.1 Структура стенда и методика экспериментального исследования процессов ограничения энергетических параметров коммутационного дугообразования при отключении короткого замыкания	90
4.2 Анализ результатов экспериментов по п. 4.1	95
4.3 Исследование процесса корректировки величины выходного напряжения трансформатора на основе схемы коммутационного устройства ускорения отключения короткого замыкания	104
4.4 Выводы по разделу 4.....	110
РАЗДЕЛ 5 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	113
5.1 Обоснование условия применения плавкого предохранителя как функционального узла коммутационного устройства ускорения отключения короткого замыкания	113

5.2	Разработка устройства управления коммутационным процессом в цепи отключения короткого замыкания на выходе ТП	116
5.3	Разработка устройства управления скважностью коммутации вторичной обмотки трансформатора ТП	125
5.4	Выводы по разделу 5.....	127
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	129
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	132
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	133
	Приложение А Копии документов о внедрении результатов исследований	145
	Приложение Б Время-токовые характеристики предохранителей серии ПП57 на номинальное напряжение 660 В	147
	Приложение В Расчёт надёжности вариантов устройств управляемой коммутации силовой цепи трансформатора ТП	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Электротехнические комплексы шахт (ЭТК) обеспечивают электроэнергией технологическое оборудование. Нестационарность последнего обуславливает необходимость применения гибких кабелей, которые, ввиду отсутствия механической защиты, являются наиболее часто повреждаемым объектом. Возникающие при этом короткие замыкания (к.з.) сопровождаются высокими токами и создают мощные дугообразования в контактных группах автоматических выключателей (АВ) в процессе отключения.

Тенденция к повышению мощности установок обуславливает применение электросетей более высокого уровня напряжения (1140 В) и увеличение мощности междуфазного к.з. Применяемые низковольтные АВ серии 37XX зарекомендовали себя как эффективные коммутационные устройства в сети напряжения 660 В. Однако выявлена повторяющаяся повреждаемость этих АВ в сети напряжения 1140 В при отключении к.з., что обуславливает актуальность применения дополнительных устройств ограничения энергетических параметров этого процесса.

Повышение мощности установок участка шахты позволило увеличить протяжённость очистных забоев и применять асинхронные двигатели (АД) высокой мощности на значительном удалении от трансформаторных подстанций (ТП). Возникающие значительные потери напряжения в сети питания этих АД создают неблагоприятные условия их эксплуатации.

В связи с этим, актуальна задача автоматической стабилизации напряжения питания удалённого АД, которая может быть решена путём управления коммутационным процессом в структуре ТП.

Степень разработанности темы. Структура и функции шахтных ЭТК являются воплощением результатов исследований С.А. Волотковского, Г.Г. Пивняка, Ф.П. Шкрабца, Я.С. Римана и др. Применительно к эксплуатации систем электроснабжения участков шахт Р.М. Лейбовым, В.С. Дзюбаном, Е.А. Вареником, В.Н. Савицким и др. решена задача защиты человека от

электропоражения. В комплексе автоматическое защитное отключение ЭТК участка шахты обосновано В.П. Колосюком. Существенный вклад в развитие автоматизации горно-технологических процессов внесли исследования В.И. Грубы, П. Д. Гаврилова, Ю.В. Шевырёва, коллективов ГУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», ГУ «НИИВЭ» (г. Донецк), Макеевского НИИ по безопасности работ в горной промышленности. Исследования касались совершенствования технологических процессов горного предприятия. Они не связаны с управлением коммутационными процессами в контексте обеспечения безаварийности применения низковольтных АВ в сетях напряжения 1140 В и повышения эффективности эксплуатации АД, удалённых от ТП.

Цель и задачи исследования. Цель работы – повышение эффективности эксплуатации шахтных участковых электротехнических комплексов на основе научного обоснования и практической реализации методов, алгоритмов и структуры технических устройств управления коммутационными процессами в силовой цепи трансформатора комплектной подстанции участка шахты при отключении коротких замыканий и стабилизации напряжения питания потребителя в сети, создающей значительные по величине потери напряжения.

Задачи исследований:

- анализ проблемных вопросов эксплуатации ЭТК участка шахты, обусловленных увеличением энергетических параметров процесса отключения к.з. в сети напряжения 1140 В и потерями напряжения в сети электропитания АД, удалённого от ТП;
- исследование свойств коммутационного дугообразования в отношении металлизации элементов конструкции АВ и обоснование способа ограничения энергетических параметров дуги на основе управления процессом коммутации;
- обоснование способа стабилизации напряжения питания АД, удалённого от ТП, на основе автоматического управления процессами коммутации цепей вторичных обмоток трансформатора ТП;
- разработка стендов, программ, методики и выполнение экспериментальных исследований процессов в элементах ЭТК, обусловленных

управляемой коммутацией силовых цепей применительно к ускорению отключения к.з, а также при стабилизации величины напряжения электропитания потребителя в сети с высокими потерями напряжения;

- разработка устройств автоматизации управления коммутационными процессами в шахтной участковой электросети при ускорении отключения к.з. и стабилизации напряжения питания потребителя в сети с высокими потерями напряжения;

Объект исследования. Объектом исследования являются процессы в системе электроснабжения участка шахты, обусловленные междуфазными к.з. в силовых присоединениях и токовыми нагрузками в сети электропитания удалённых потребителей высокой мощности.

Предмет исследования. Предметом исследования являются принципы построения и алгоритмы работы устройств управления коммутационными процессами электротехнического комплекса участка шахты.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Получила развитие математическая модель коммутационного плазмообразования в процессе горения сильноточной электрической дуги, отличающаяся наличием функциональной зависимости сечения плазмы от продолжительности плазмообразования, учётом продолжительности нагрева поверхностей плазмообразующих контактов автоматического выключателя и параметров расширения ствола плазмы дуги в придиафрагменных областях, что позволило обосновать целесообразность и параметры управления коммутационным процессом отключения короткого замыкания, в соответствии с критерием опережения металлизации диэлектрических элементов конструкции автоматического выключателя;

2. Обоснован способ стабилизации напряжения питания потребителя в сети, создающей значительные потери напряжения, который состоит в автоматическом управлении коммутацией вторичных обмоток трансформатора питающей подстанции, обосновано применение одноконтурной системы автоматического управления процессом на основе сопоставления с заданным

параметром разности фактического напряжения трансформатора и вычисленных потерь напряжения в сети, определена структура исполнительного коммутационного устройства и принципы формирования управляющей функции в вариантах фазового и импульсного воздействия на коммутационный процесс, установлена функциональная связь величины напряжения трансформатора и параметров управления коммутационным процессом.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в раскрытии закономерностей воздействия плазмы электрической дуги на элементы конструкции автоматического выключателя, сопровождаемого их металлизацией, в процессе коммутации силовоточной электрической цепи переменного тока; обосновании параметров и способа управления ускорением коммутационного процесса и методов адаптации коммутационной функции применительно к решению задачи автоматической стабилизации напряжения питания электропотребителя в сети с высоким уровнем потерь напряжения.

Практическое значение результатов исследований состоит:

- в обосновании способов и устройств управления коммутацией схемы соединений вторичной обмотки трансформатора ТП участка шахты в качестве технических средств: ограничения энергетических параметров коммутационного дугообразования при отключении к.з.; стабилизации напряжения питания потребителя в сети с высоким уровнем потерь напряжения;

- в обеспечении возможности эксплуатации низковольтного АВ в структуре ТП, в сети напряжения 1140 В, на основе управления коммутацией обмоток её трансформатора как средства ускорения отключения тока к.з.;

- в создании технических средств автоматической стабилизации напряжения питания потребителя участка шахты в сети с высоким уровнем потерь напряжения на основе управления процессом коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП.

Методология и методы исследований. Исследования выполнены с использованием: теории электрических цепей; теории плазмообразования в

электрической дуге; теории переходных процессов; теории эксперимента; включая проведение натуральных экспериментов, теории автоматического управления процессами и объектами, методов систематизации, математического моделирования, гармонического анализа; цифровых измерительных устройств.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что металлизация диэлектрических элементов корпуса низковольтного АВ шахтной ТП в процессе отключения к.з. в сети напряжения 1140 В является следствием коммутационного дугообразования, сопровождаемого расширением столба плазмы в придиафрагменных областях, образуемых формой окна дугогасительной камеры. Энергетические параметры дуги имеют тенденцию линейного увеличения до установившегося уровня на интервале времени до 15 мс, что свидетельствует о недостаточности токоограничительных свойств применяемой максимальной токовой защиты (МТЗ), время срабатывания которой достигает $80 \div 100$ мс, и целесообразности ускорения отключения к.з. Достаточными функциональными свойствами обладает схема коммутации предохранителем выхода выпрямителя, объединяющего вторичные обмотки трансформатора ТП в трёхфазную цепь.

2. Разработан способ стабилизации напряжения питания потребителя в сети с высоким уровнем потерь напряжения на основе применения коммутатора трёхфазной цепи вторичных обмоток трансформатора ТП, функционирующего в режиме фазового управления, либо импульсной коммутации, и управляемого в автоматическом режиме. Установлено, что система автоматического управления (САУ) может быть построена по одноконтурной схеме на основе использования в качестве элемента сопоставляемого параметра величины потерь напряжения в кабельной сети потребителя, вычисленной с учётом величины тока и вводимых параметров используемых кабелей.

3. Установлено, что условием, препятствующим влиянию обратной ЭДС АД на параметры полупроводниковых элементов устройства управляемой коммутации является его подключение к вторичным обмоткам трансформатора со стороны, противоположной к цепи подключения АД. В случае импульсной

коммутации частота импульсов отключения проводимости этих обмоток должна составлять $6n$ от частоты сети, а их скважность – определяться параметром, поступающим от САУ.

Результаты диссертационного исследования приняты ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищённого и рудничного электрооборудования» (ГУ «НИИВЭ», г. Донецк) к использованию в профильных научно-исследовательских работах. Эти результаты внедрены в учебный процесс в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (Приложение А).

Личный вклад соискателя. Все разделы и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и её реализации, в разработке испытательных стендов, в выполнении теоретических и экспериментальных исследований.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами математического моделирования и натурных экспериментов при решения обоснованных задач.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки), в частности: п. 3 «Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП)»; п.15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.).

Основные положения диссертации докладывались, обсуждались и одобрены на XVII и XIX Международных научно-технических конференциях

аспирантов и студентов «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых» (Донецк, ДОННТУ, 2017 г., 2019 г.), XIX Международной молодёжной научной конференции «Севергеоэкотех - 2018» (Ухта, УГТУ, 2018 г.), IX Международной научно-практической конференции «Наука, техника, инновации» (Усинск, филиал УГТУ, 2019 г.), заседании круглого стола по теме «Новые способы и средства обеспечения безопасности применения электрической энергии в шахтах» (ГУ «МакНИИ», 2019 г.) в рамках V Международного научного форума ДНР «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие»; Международном научно-практическом форуме «Россия в XXI веке: глобальные вызовы, риски и решения» (Донецк, ДОННТУ - Москва, РАН, 2019 г.); Международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика» (Донецк, ДОННТУ, 2019 г.), XVII Всероссийской конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление» (Таганрог, ЮФУ, 2019 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 12 печатных работах, из них, 6 – в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН ДНР, 5 – в материалах конференций; 1 патент Украины на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 151 странице машинописного текста и состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка литературы и 3 приложений. Работа иллюстрирована 65 рисунками, содержит 2 таблицы. Список литературы включает 97 источников.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Электротехнический комплекс участка шахты: структура, функции, особенности эксплуатации

Производство по добыче угля это комплекс взаимосвязанных технологических процессов, каждый из которых реализуется совокупностью специализированных электромеханических установок, а очистной технологический участок представляет собой типичную для горного предприятия компоновку электромеханического оборудования. Специфика системы электроснабжения шахтного очистного участка, коммутационные, рабочие и аварийные процессы в ней, в основном, являются схожими для электротехнических комплексов (ЭТК) различных по назначению технологических участков горного предприятия [1]. Указанные особенности определяют функции, структуру схемы ЭТК (Рисунок 1.1), в частности, электрогенерирующую функцию, которую выполняет трансформаторная подстанция (ТП), включая перспективные образцы (Рисунок 1.2), преобразующая напряжение 6 кВ в напряжение U_n , соответствующее номинальному значению для электропотребителей (660 В, либо 1140 В) [2-3]; коммутационную функцию (магнитные пускатели (МП), автоматические выключатели (АВ), в т.ч., автоматический выключатель в составе ТП), агрегаты пусковые (АП) электропитания потребителей напряжения 127 В; пуско-регулирующую функцию по параметру скорости электроприводов (реализуется тиристорными регуляторами напряжения (ТРН), либо полупроводниковыми преобразователями (ПЧ) частоты); распределительную функцию между ТП и АВ и между МП и асинхронными двигателями (АД) потребителей (реализуется, соответственно, магистральным (МК) и гибкими (ГК) кабелями [3-6]. Такое компоновочное решение и функциональные взаимосвязи присущи как существующим схемам ЭТК участков шахт, так и перспективным разработкам, включая зарубежные [7-11].

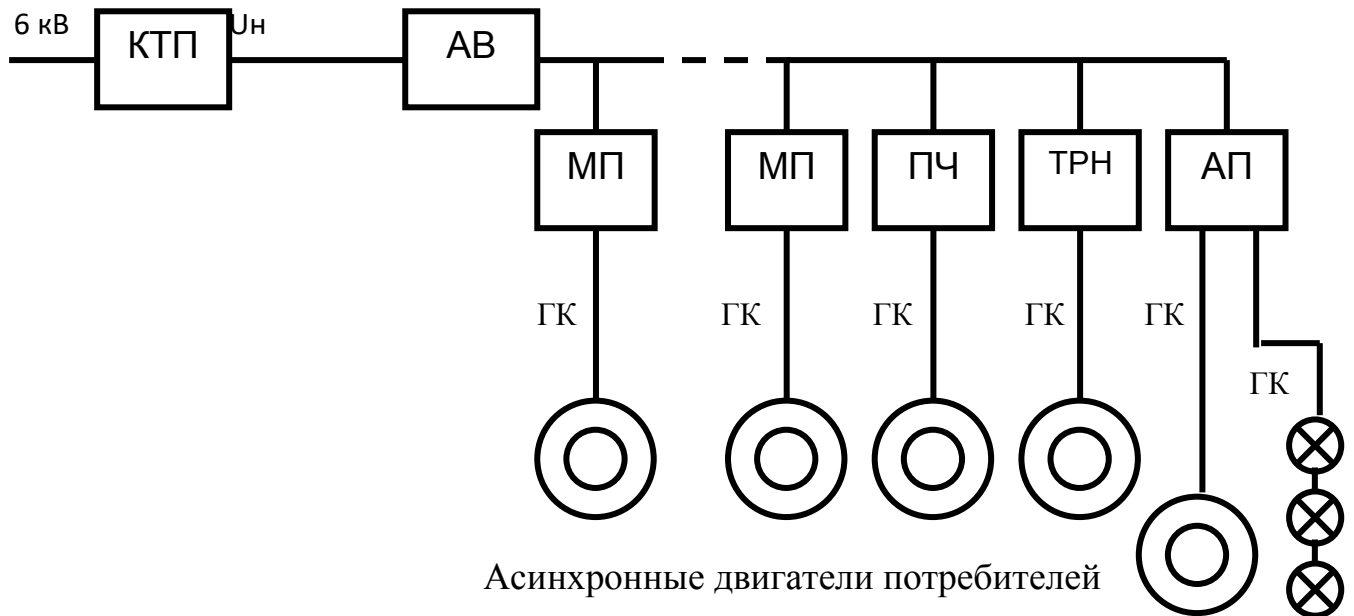


Рисунок 1.1 – Типовая структура ЭТК технологического участка шахты

Силовые коммутационные аппараты шахтного участкового ЭТК могут быть разделены на три группы в соответствии с функциями:

- дистанционное включение и отключение асинхронных двигателей потребителей осуществляется магнитными пускателями, основной функциональный элемент которых - контактор с воздушным или вакуумным дугогашением;

- дистанционное включение, отключение и управление скоростным режимом асинхронного электропривода горной машины. Здесь применяются установки плавного пуска (устройства «soft-start» и т.п. на основе силовых тиристорных регуляторов напряжения (фазовое регулирование, разомкнутые, либо замкнутые по параметру скорости системы автоматического управления) [12], а также системы глубокого регулирования скоростного режима АД «преобразователь частоты – двигатель» (реализация функции широтно-импульсной модуляции выходного напряжения преобразователя частоты) [13, 14].

- подача, снятие напряжения на группу потребителей вручную и автоматическое отключение напряжения от группы потребителей осуществляется

автоматическими выключателями (АВ), входящими в состав распределительного устройства низкого напряжения участковой ТП, а также применяющимися на входе магистрали подключения пускателей (Рисунок 1.1).

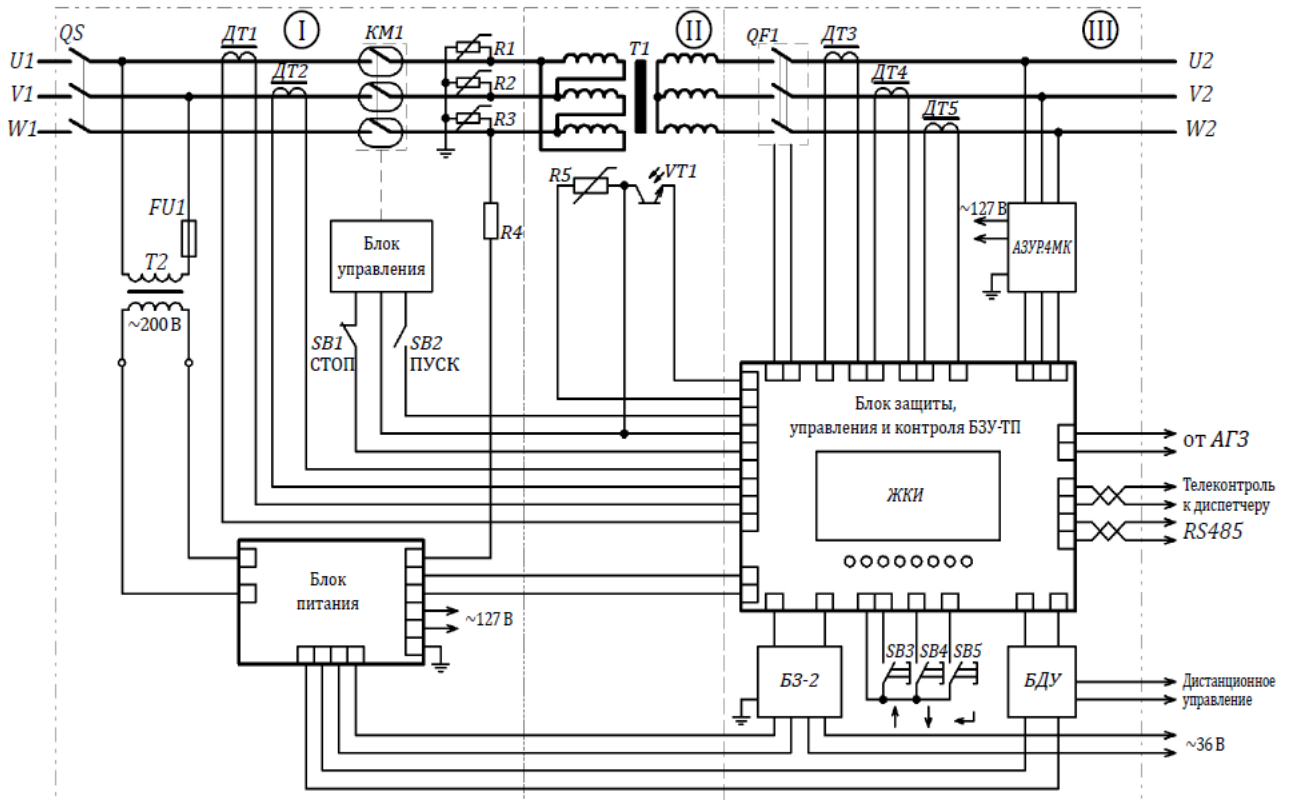


Рисунок 1.2 – Блочно-принципиальная электрическая схема шахтной ТП типа ТВПШ-630 /6 - 0,69/1,2: U1,V1,W1,U2,V2,W2 – клеммы входного и выходного напряжений; QS – высоковольтный разъединитель; QF – автоматический выключатель; ДТ1-ДТ5 – датчики тока; Т1 – силовой трансформатор; Т2 – трансформатор питания схемы; БЗ-2 – блок защиты выходных цепей напряжения 36 В; БДУ – блок дистанционного управления; АЗУР.4МК – аппарат защиты от токов утечки на землю; FU1 – предохранитель; R1-R3 – ограничители перенапряжений; R4 – фильтр присоединительный контроля изоляции цепи; R5 – датчик температуры; VT1 – датчик световых явлений; SB1-SB5 – кнопки управления; АГЗ – контакт устройства автоматической газовой защиты

Вариантом компоновки силовых коммутационных аппаратов является станция управления (Рисунок 1.3) [3, 15], где групповой АВ и пускатели объединены в один функциональный узел. Таким образом, выходы пускателей, либо контакторов станции управления соединены со статорами АД потребителей разветвлённой сетью гибких кабелей, представляющих радиальную схему.

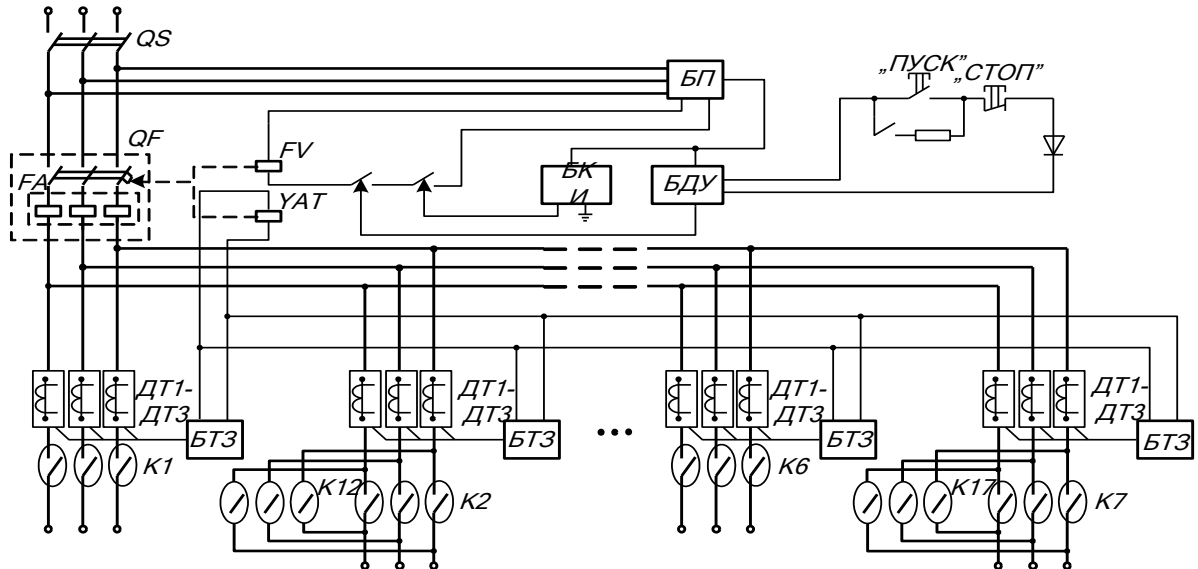


Рисунок 1.3 – Структурная схема станции управления СУВ-XXX: БП – блок питания; БКИ – блок контроля изоляции; БДУ – блок дистанционного управления; БТЗ – блок токовой защиты; ДТ1-ДТ3 – датчики тока; QS – разъединитель; QF – автоматический выключатель; FA1 – расцепитель максимального тока; FV – нулевой расцепитель; YAT – независимый расцепитель; K1-K7 – контакторы присоединений

Подобная компоновка общепринята, при этом повсеместно наблюдается устойчивая тенденция повышения мощности технологических установок шахт [16, 17]. Применение электромеханического оборудования высокой мощности, в т.ч., на значительном удалении от ТП и необходимость ограничения допустимых потерь напряжения в ТП и электросети, не превышающих 10% от номинального значения, обуславливают целесообразность перевода шахтных участковых электросетей на более высокий уровень линейного напряжения (1140 В).

Нестационарность технологического оборудования участка шахты предопределяет необходимость применения гибких экранированных кабелей (ГК) специального назначения (Рисунок 1.4) для передачи электроэнергии от МП к АД потребителей [18, 19]. Энергопередача от КТП к групповому автоматическому выключателю участка также осуществляется полугибким кабелем.

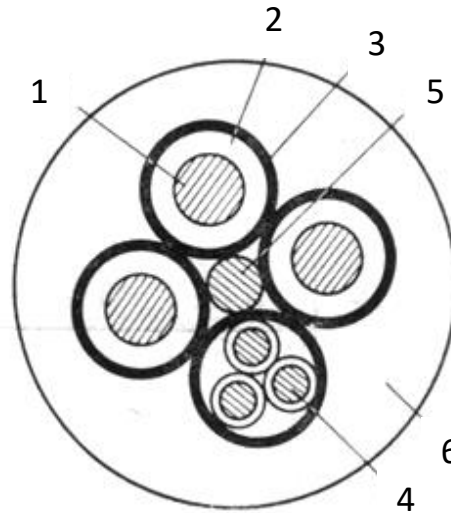


Рисунок 1.4 – Устройство гибкого шахтного кабеля марки КГЭШ:

1 – силовая жила; 2 – резиновая изоляция; 3 – экран из проводящей резины; 4 – сигнальная жила; 5 – заземляющая жила; 6 – оболочка

Эти электрические кабели являются самым механически незащищённым элементом структуры ЭТК. В то же время, они эксплуатируются в экстремальных условиях, характеризующихся стеснённостью, высокой вероятностью механического разрывного воздействия от перемещаемого оборудования, падения породы, наличием влажной проводящей (щёлочесодержащей), а также электропроводящей пыльной (угольная пыль) окружающей среды [20]. Эти обстоятельства определяют высокий процент повреждений кабелей участка, Статистика аварий [21] свидетельствует, что причиной воспламенений более 40% гибких кабелей в шахтах являются междуфазные к.з. их силовых жил.

Следствием внешнего механического повреждения защитной шланговой оболочки и изоляции кабеля является замыкание жил на землю или между собой.

Такие состояния возникают и в случае внешнего сдавливания кабеля. К последствиям подобных повреждений следует отнести пожар, либо взрыв метано-воздушной смеси (вследствие междуфазных к.з.), а также опасность электропоражения человека (при повреждении изоляции силовой жилы кабеля).

Учитывая опасные условия эксплуатации шахтной участковой электрической сети, её силовая коммутационная аппаратура оснащена защитами, многие из которых дублируются. В частности, речь идёт о следующем.

ТП комплектуется автоматическим выключателем (АВ) типажного ряда А37ХХ, аппаратом защиты от утечек (АЗУ) тока на землю, устройством максимальной токовой защиты (МТЗ) с регулируемой уставкой срабатывания. Отключение отходящей от ТП электрической сети в случае к.з. в ней осуществляет АВ при срабатывании собственных расцепителей максимального тока (FA1-FA3), либо по команде МТЗ, воздействующей на его нулевой (FV), либо независимый (УАТ) расцепитель АВ (Рисунок 1.5).

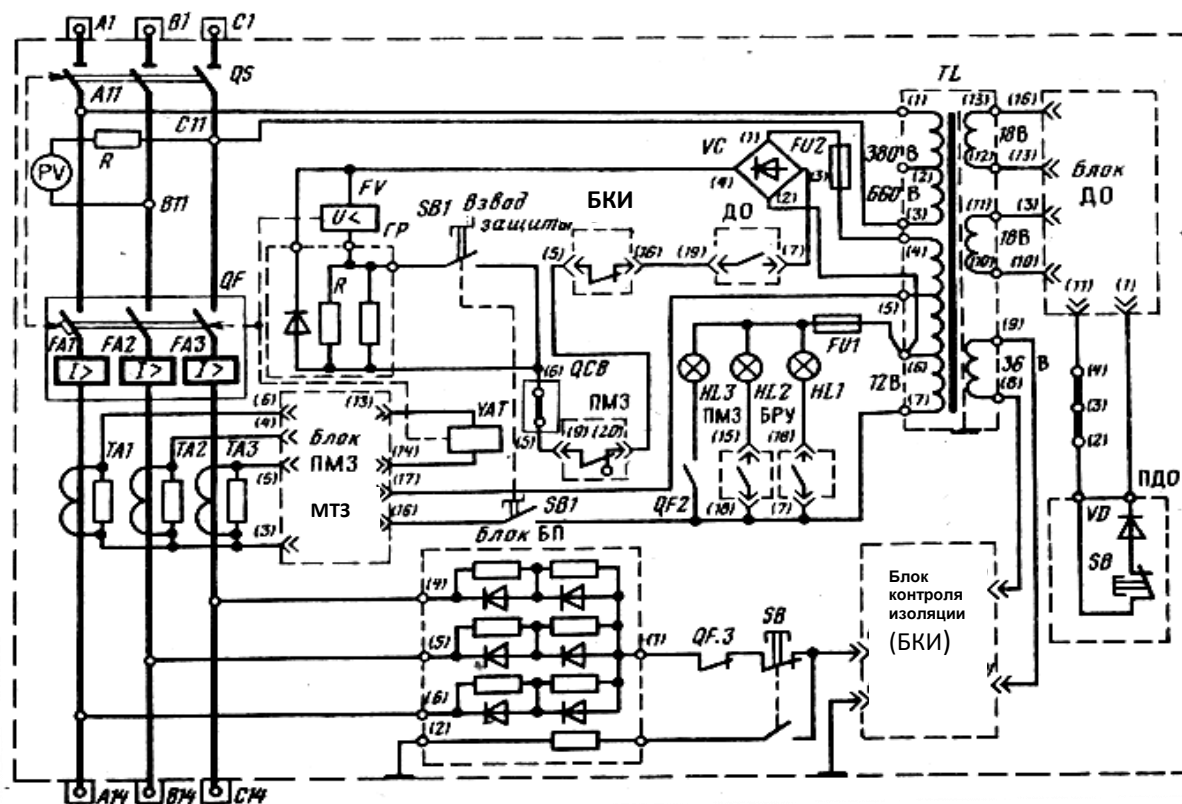


Рисунок 1.5 – Схема подключения функциональных узлов контроля и защит к функциональным узлам АВ

АЗУ воздействует на расцепители АВ РУНН при снижении сопротивления изоляции в отходящем силовом присоединении (появлении цепи утечки тока на землю) ниже предельно допустимого уровня [22]. В зависимости от модификации АЗУ осуществляет частичную (статическую) либо полную (автоматическую) компенсацию ёмкости изоляции сети в пределах до 1,0 мкФ/фазу.

Кроме этого, защитное отключение силового отходящего присоединения в состоянии междуфазного к.з. по команде встроенных в коммутационные аппараты МТЗ осуществляют магнитные пускатели и групповой АВ распределительного пункта участка. Этот же АВ может производить защитное отключение сети при срабатывании любого из встроенных расцепителей максимального тока.

Специфика к.з. в электрической сети участка шахты состоит в проявлении обратных энергетических потоков АД потребителей, которые подпитывают точку повреждения кабеля после защитного отключения на интервале времени выбега (Рисунок 1.6; Рисунок 1.7) [23].

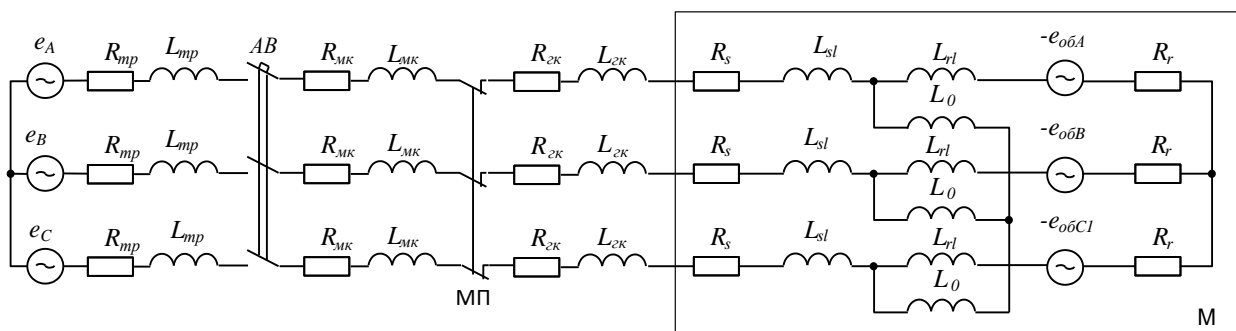


Рисунок 1.6 - Схема замещения электросети при электропитании АД (М):

e_A, e_B, e_C – мгновенные значения фазных напряжений на выходе ТП;
 $R_{mp}, R_{mk}, R_{зк}, L_{mp}, L_{mk}, L_{зк}$ – активные сопротивления и индуктивности, соответственно, трансформатора, магистрального и гибкого кабелей;
 R_s, R_r, L_{sl}, L_{rl} – активные сопротивления и индуктивности, соответственно, статора и ротора АД, L_0 – индуктивность цепи намагничивания; $e_{обA}, e_{обB}, e_{обC}$ – фазные ЭДС вращения АД, действующие в процессе выбега

Однако, несмотря на наличие встречно направленных энергетических потоков, защитная функция, реализуемая в настоящее время, состоит в отделении от электросети участка только энергетического потока, формируемого ТП. В случае возникновения междуфазного к.з. в отходящем присоединении основными исполнительными элементами защитного отключения будут выступать АВ РУНН ТП и групповой АВ (на входе РП участка). При этом в отношении первого из них токоограничивающую функцию будут составлять активные и индуктивные сопротивления вторичной обмотки трансформатора ТП, а в отношении второго, дополнительно ещё и активные и индуктивные сопротивления магистрального кабеля (от ТП до группового АВ).

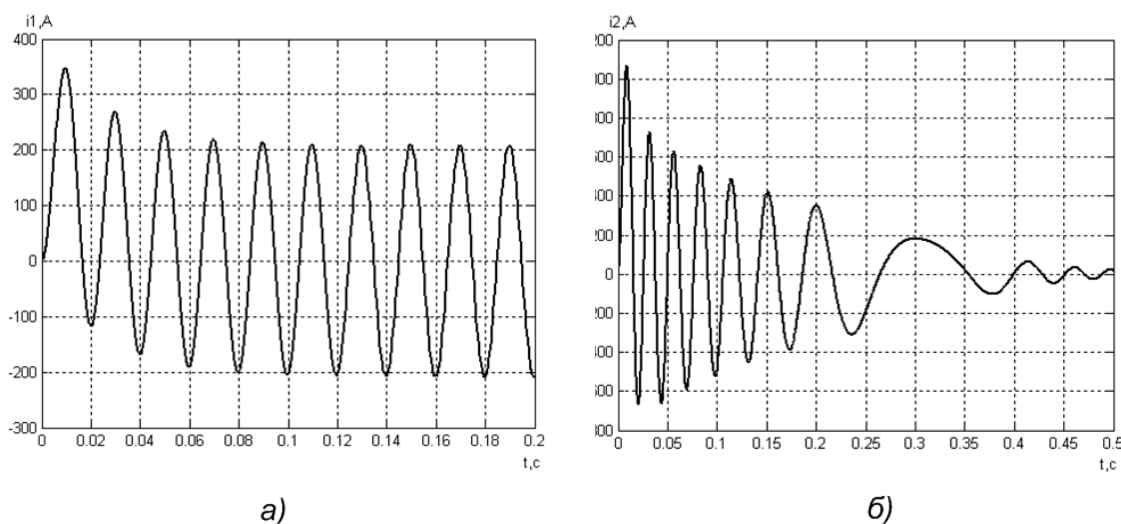


Рисунок 1.7 - Диаграммы фазного тока в ЭТК при возникновении к.з.:

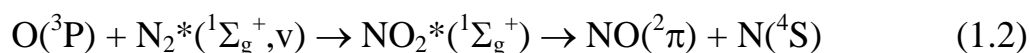
- а) обусловленного напряжением сети (до момента защитного отключения);
- б) обусловленного ЭДС вращения АД на временном участке выбега

1.2 Коммутационный процесс отключения короткого замыкания как фактор воздействия на ресурс автоматического выключателя

Многолетний успешный опыт эксплуатации аппаратов А37ХХ в шахтных сетях напряжения 660 В послужил основой для разработки модификации автоматического выключателя (А3792), адаптированной к промышленной

электросети напряжения 1140 В [24]. Эксплуатация данного аппарата в шахтной участковой электросети указанного напряжения (в составе РУНН ТП и аппаратов серии АВ) подтвердила рациональность его параметров и схемы. Однако при этом был выявлен неблагоприятный эффект, суть которого состоит в возникновении междуфазной (трёхфазной) проводимости в зоне расположения силовых контактов в момент перемещения подвижной силовой контактной группы в процессе включения аппарата после автоматического его срабатывания на отключение междуфазного к.з. сети [25]. Зафиксированные аварийные (опасные) состояния выключателя А3792 в сети линейного напряжения 1140В в основном приходятся на случаи автоматического отключения междуфазных к.з., возникших в отходящем присоединении в непосредственной близости от выхода ТП при мощности подстанции 630 кВА и выше (т.е., в зоне максимальных токов к.з.).

Воздействие высоких токов к.з. на контактные площадки силовых контактов контакторов исследовано в работах [26-28]. Установлено существенное влияние процесса дугообразования при размыкании активно-индуктивной цепи с высоким током на уровень ультрафиолетового излучения, Это обусловило возникновение в воздушной смеси агрессивных соединений атомарного азота и создания окислов азота (NO). Процесс создания NO в плазме характеризуется разрушением мощной связи молекулы N₂ при синтезе промежуточного колебательно-возбуждённого комплекса NO₂*(¹Σ_g⁺):



Концентрация окислов азота внутри взрывозащищённой оболочки и наличие влаги вследствие температурных перепадов и повышенной влажности окружающего пространства создают условия для появления агрессивных азот-содержащих соединений, пагубно воздействующих на изоляцию электрооборудования. Исходя из этого, в конструкции контакторов шахтных

магнитных пускателей предусмотрены технические решения, направленные на уменьшение интенсивности и продолжительности коммутационного дугообразования. В частности, типовым является применение прямоходных контакторов с несколькими контактными площадками в каждой коммутируемой паре фазы присоединения, применение дополнительных дугогасительных камер и максимальное смещение контактных площадок к местам их расположения.

Имеющаяся информация, полученная от эксплуатационных служб различных предприятий, позволяет сделать вывод о том, прецедент возникновения междуфазной проводимости и последующего к.з. внутри автоматического выключателя А3792 после отключения им тока к.з. в сети напряжения 1140 В также связан с воздействием электрической дуги в процессе коммутации и является повторяющимся. Это определяет актуальность разработки технических решений по предупреждению возникновения междуфазных проводимостей в элементах аппарата А3792, поскольку его замена на высоковольтный автоматический выключатель, потребует значительных материальных затрат, существенно увеличит габариты и усложнит конструкцию РУНН ТП; группового АВ технологического участка шахты, что также сопряжено со значительными материальными затратами.

Анализ процесса образования электрической дуги [29-34], в частности, рассмотрение физики ионизационных процессов применительно к АВ, а также учёт реальных показателей времени срабатывания, т.е., существования коммутационного дугообразования (Рисунок 1.8), дают основания делать предположение о наличии электроионизационных процессов и достаточности их продолжительности (80÷100 мс) как о причине формирования путей утечки в АВ вследствие медного напыления на поверхность электроизоляционных деталей.

Таким образом, представляется целесообразным рассмотреть конструкционные элементы автоматического выключателя А3792, находящиеся в зоне расположения силовых контактов на предмет выявления их способности создавать дополнительные пути утечки (Рисунок 1.9) [25].

Отношение тока нагрузки
к номинальному току I / I_n

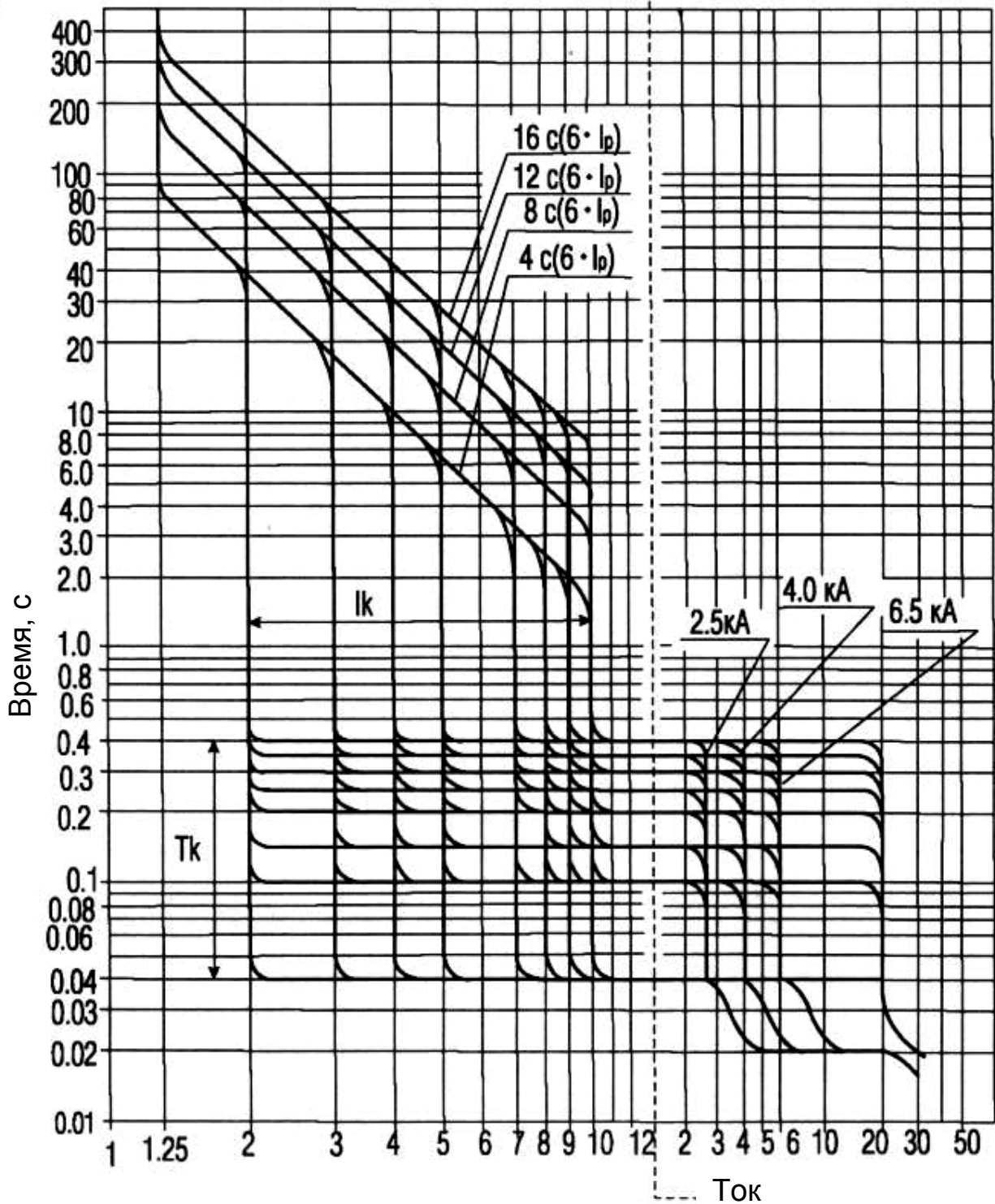


Рисунок 1.8 – Время-токовая характеристика выключателей переменного тока А3793Б и А3793С, А3794Б и А3794С



Рисунок 1.9 – Общий вид силовой трёхполюсной контактной группы автоматического выключателя А3792: 1 – подвижный контакт, 2 – дугогасительная камера, 3 – рукоятка выключателя

Применительно к силовым контактным группам практический интерес представляет исследование технического состояния подвижных и неподвижных контактов, дугогасительных камер, геометрии этих элементов. Рассматривая конструкцию размещения подвижного контакта 1 в полости дугогасительной камеры 2 следует отметить весьма малую величину зазора между контактом и пластинами дугогасительной решётки. Так, при ширине подвижного контакта 26,7 мм ширина прилегающей полости дугогасительной камеры составила 28,1 мм, что определило величину зазора с каждой стороны в 0,7 – 0,8 мм.

Техническое состояние силовых контактов, многократно выполнявших отключение промышленной электросети с номинальной активно-индуктивной нагрузкой и в состоянии перегрузки позволяет сделать вывод о высокой степени вероятности термического деформирования поверхности силовых контактов как реакции на воздействие электрической дуги, образующейся при коммутационном процессе. Так, в контактной группе со следами интенсивного электродугового

воздействия зафиксированы наплавления высотой до 1,4 мм, относительно плоскости контакта (Рисунок 1.10а), что в сравнении с исправной контактной группой (Рисунок 1.10б) существенно уменьшает площадь контакта и провоцирует ещё бóльшую тепловую перегрузку. Появление таких аномальных поверхностей силовых контактов обусловлено процессом формирования струи жидкого металла (адиабатический процесс) в межконтактном промежутке. В частности, минимальное термически стойкое сечение струи для определённого времени нагрева определяется выражением [33]:

$$S_T = \frac{I}{a} \cdot \sqrt{t_n}, \quad (1.3)$$

где I – ток в струе, t_n – время нагрева струи, a – параметр, зависящий от физических свойств жидкого металла, определяется по следующему выражению:

$$a = \sqrt{\frac{\gamma_{nl} \cdot c_{nl}}{\rho_{nl} \cdot \alpha} \left\{ \ln \frac{1 + \alpha \cdot (T_1 - T_{nl})}{1 + \alpha \cdot (T_o - T_{nl})} + (\beta + \xi) \left[T_1 - T_o - \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1 + \alpha \cdot (T_1 - T_{nl})}{1 + \alpha \cdot (T_o - T_{nl})} \right] + \right.} \quad (1.4)$$

$$\left. + \beta \cdot \xi \cdot \left[\frac{T_1^2 - T_o^2}{2} - \left(\frac{1}{\alpha} + T_{nl} \right) \cdot (T_1 - T_o) + \frac{1}{\alpha^2} \ln \frac{1 + \alpha \cdot (T_1 - T_{nl})}{1 + \alpha \cdot (T_o - T_{nl})} \right] \right\}}$$



а



б

Рисунок 1.10 – Состояния поверхности силовых контактов автоматического выключателя А3792: а – подвергшихся электродуговому воздействию в процессе отключения высоких токов; б – нормальное состояние контактов

В выражении (1.4) $\gamma_{\text{пл}}$, $c_{\text{пл}}$, $\rho_{\text{пл}}$ – плотность, удельная теплоёмкость, удельное сопротивление жидкого металла при температуре плавления $T_{\text{пл}}$; α , β , ξ – температурные коэффициенты его удельного сопротивления, удельной теплоёмкости и плотности; T_0 и T_1 – начальная и конечная температура жидкого металла; (T_1 зависит от конструкции и режима работы коммутационного аппарата, не превышает температуру кипения жидкого металла). Максимальная плотность тока термической стойкости в струе жидкого металла равна:

$$\delta_T = a \cdot \sqrt{\frac{v}{l}}, \quad (1.5)$$

где l – длина жидкометаллической струи, м, v – скорость жидкого металла в струе, м/с, $t_{\text{и}}$ – время импульса (продолжительность дугообразования), с.

Износ поверхностей контактов АВ, вызванный воздействием электрической дуги, является вероятностным и, в частности, определяется фактической площадью контактных поверхностей, скоростью их разъединения.

Показательно, что наиболее интенсивным оплавлениям подвергаются нижние части силовых контактов АВ. Частично это объясняется особенностями конструкции дугогасительной камеры, где зона коммутации нижних частей силовых контактов с обеих сторон охвачена керамическими накладками специальной формы с максимальными габаритами 51,5x26,9 мм (Рисунок 1.11а). Показательно также, что на керамических накладках имеется нагар, а металлическая дугогасительная решетка имеет многочисленные выгорания и оплавления (Рисунок 1.11б). Это свидетельствует о вероятности воздействия электродуговых коммутационных процессов на элементы конструкции дугогасительных камер. На внешних плоскостях металлических пластин решётки дугогасительной камеры имеется нагар и мателлическое напыление, расходящееся до 10-12 мм от края окна перемещения силового контакта (Рисунок 1.12). Это свидетельствует о наличии области расширения насыщенной парами металла плазмы электрической дуги перед дугогасительной камерой и после неё.

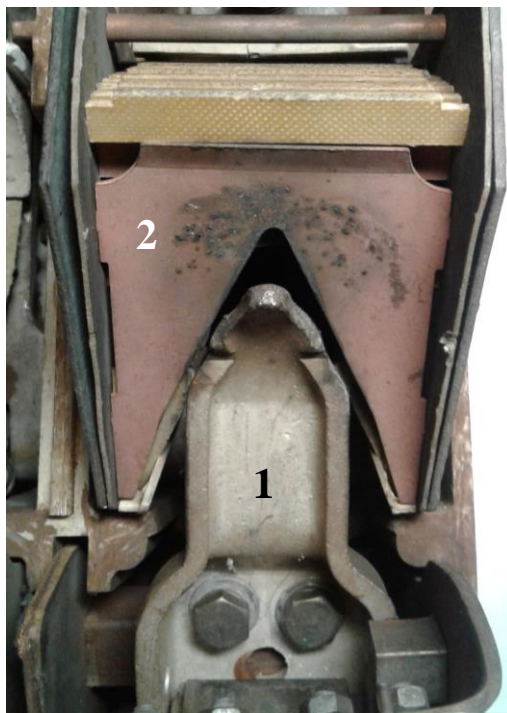


а



б

Рисунок 1.11 – Дугогасительная камера автоматического выключателя А3792 со следами электродугового воздействия при коммутации высоких токов:
 а – керамическая накладка в нижней части камеры со следами теплового воздействия дуги; б – медные наплавления на дугогасительной решётке



а



б

Рисунок 1.12 - Дугогасительная камера АВ типа А 3792 как объект диафрагмирования коммутационной электрической дуги:
 а – взаиморасположение силового контакта 1 (ширина 26,1 мм) и дугогасительной камеры 2; б – дугогасительная камера со следами придиафрагменного плазмообразования

С учётом отсутствия дугогасительного эффекта в местах перемещения нижних частей силовых контактов и крайне малых величин зазоров между ними и керамическими накладками резонно предположить, что при отключении чрезмерно высоких токов трёхфазного к.з. в сети напряжения 1140 В именно на поверхностях керамических накладок и близлежащих поверхностях вследствие энергетики (термоэлектронная и автоэлектронная эмиссия) электрических дуг произойдет напыление металлом (медью) силовых контактов выключателя.

Практический интерес представляет рассмотрение конструкции корпусных деталей автоматического выключателя АЗ792, прилегающих к нижним частям дугогасительных камер (Рисунок 1.13). В базовой части корпуса, выполненного из термостойкого и трекингоустойкого полистирола, практический интерес представляет форма и размеры изоляционного ребра между полостями размещения дугогасительных камер. В средней части ребра (шириной 9,3 мм), в углублении (глубина 9 мм) предусмотрена стеклотекстолитовая прокладка, выступающая из полости ребра на 3,6 мм (на рис. 4 не показана), которая входит в соответствующую полость крышки отсека дугогасительных камер. Такое исполнение исключает междуфазный электрический пробой через электроизоляционное ребро в пределах размещения стеклотекстолитовой прокладки.

Установлено наличие медного налета на полости нижней части изоляционного ребра 1, на поверхности текстолитовой изоляционной вставки 2 (ограждающей механизм свободного расцепления) и на фрагментах деталей, охватывающих указанную текстолитовую вставку. Именно нижняя часть изоляционного ребра непосредственно сопряжена с полостью максимально интенсивного дугообразования (нижние части коммутируемых силовых контактов). Здесь имеется площадка шириной 3,6 мм, не отгороженная между фазами изоляционными ребрами. Геометрически размеры изоляционного промежутка между фазами при отсутствии токопроводящей поверхности и с учётом наличия прилегающей крышки дугогасительных камер позволяют исключить междуфазный электрический пробой. В этом случае пробивное

напряжение рассчитывается на основе классических методов: $E_{np} = U_{np} / h$, (где E_{np} – электрическая прочность диэлектрика, кВ/м; U_{np} – пробивное напряжение, кВ; h – толщина диэлектрика в месте пробоя, м).

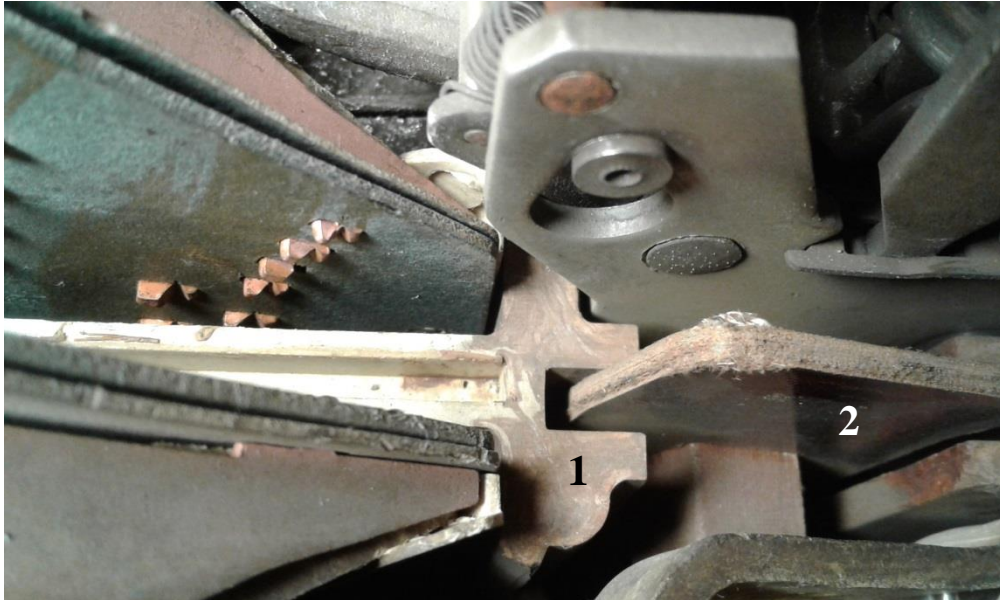


Рисунок 1.13 – Фрагмент основания корпуса автоматического выключателя А3792 – электроизоляционное ребро 1, отделяющее силовые контактные группы полюсов разных фаз и их дугогасительные камеры

В случае контактного отключения сверхвысоких токов при напряжении свыше 1000 В вероятен ионизационный пробой, тем более, если медное напыление охватывает всю междуфазную поверхность диэлектрического корпуса в местах, приближенных к силовым контактам автоматического выключателя. Этот вид пробоя воздуха обусловлен явлениями ударной и фотонной ионизации и подчинён действию закона Пашена, в соответствии с которым пробивное напряжение воздуха пропорционально произведению давления воздуха P на расстояние h между электродами [30].

Таким образом, выявлена недостаточность функции отдельных элементов конструкции автоматического выключателя А3792 в области ограничения энергетики коммутационного плазмообразования при отключении к.з. в сети напряжения 1140 В, что проявляется в металлизации диэлектрических

поверхностей вблизи дугогасительных камер, оплавлении поверхностей силовых контактов. В совокупности это предопределяет возможность междуфазного пробоя в момент соединения подвижных контактов АВ с неподвижными (на которые подано напряжение сети), что соответствует фактам реальных аварийных состояний аппарата А3792. Это определяет актуальность исследований и разработок в области управления коммутационным процессом отключения междуфазного к.з. на выходе КТП в контексте снижения энергетических параметров коммутационного дугообразования в контактных группах автоматического выключателя А3792.

1.3 Обзор технических средств токоограничения в контексте создания благоприятных условий отключения короткого замыкания

Опасность воспламенения кабеля, значительные тепловые перегрузки при разъединении контактами коммутационных аппаратов цепи междуфазного к.з. обусловлены крайне низкими величинами активных и индуктивных сопротивлений трансформатора ТП и кабелей участковой электросети. Действующие значения трёхфазного ($I_{кз}^{(3)}$) и двухфазного ($I_{кз}^{(2)}$) тока к.з., обусловленные энергетическим потоком от КТП, определяются по формулам:

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{U_l}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_{mp} + R_k)^2 + (X_{mp} + X_k)^2}} \quad (1.6)$$

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{U_l}{2 \cdot \sqrt{(R_{mp} + R_k)^2 + (X_{mp} + X_k)^2}} \quad (1.7)$$

где U_l – линейное напряжение сети; R_{mp} ; X_{mp} – соответственно, активное и индуктивное сопротивления трансформатора ТП R_k ; X_k – соответственно, активное и индуктивное сопротивления кабеля от трансформатора до точки к.з.

Воздействие на процессы в шахтной участковой электросети оказывает не только действующее значение тока к.з., но и его мгновенные величины, в т.ч. ударный ток $i_{y\partial}$, возникающий в первый полупериод переходного процесса в сети с активно-индуктивными составляющими (вследствие возникновения аperiodического i_a и периодического i_n токов к.з. i_k , (Рисунок 1.4) [35]:

$$i_k = i_n + i_a = \sqrt{2}I_n \cdot \sin(\omega t - \varphi + \alpha_k) + i_{a0} \cdot e^{-t/T_a} ; \quad (1.8)$$

$$i_{y\partial} = I_{mn} + I_{ma} \cdot e^{-\frac{0.01}{T_a}} = I_{mn} \cdot k_{y\partial} , \quad (1.9)$$

где I_n – действующее значение периодической составляющей тока к. з.; i_{a0} – аperiodическая составляющая тока к. з. в момент возникновения; $\omega = 2\pi f$; φ – угол фазы смещения тока в цепи к. з.; α_k – фаза возникновения к.з.; f – частота сети; X_k, r_k – соответственно, индуктивное и активное сопротивление цепи к. з, I_{ma} – максимальное значение аperiodической составляющей тока к. з., I_{mn} – амплитуда периодической составляющей тока к. з. $k_{y\partial} = (1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}})$ – ударный коэффициент, зависящий от постоянной времени цепи к. з. , $T_a = x_k/\omega r_k$ – постоянная времени цепи к.з.

Из изложенного следует, что решение задачи эффективного токоограничения при возникновении междуфазного к.з. в шахтной участковой электрической сети имеет практическую актуальность, поскольку способствует снижению тепловой перегрузки в точке возникновения к.з. и снижению энергетических показателей дугообразования в месте контактного разъединения цепи аварийного присоединения техническими средствами коммутационного аппарата.

Апробирован метод ограничения тока к.з. основанный на последовательном подключении к аварийному присоединению индуктивностей. Такие индуктивности могут быть подключены постоянно (пример – применение

токоограничивающих дросселей в схеме главной поверхностной подстанции шахты на вводе ствольных кабелей при применении в составе центральной подземной подстанции комплектных распределительных устройств РВД-6 с относительно малой коммутационной способностью (4800 А) [36].

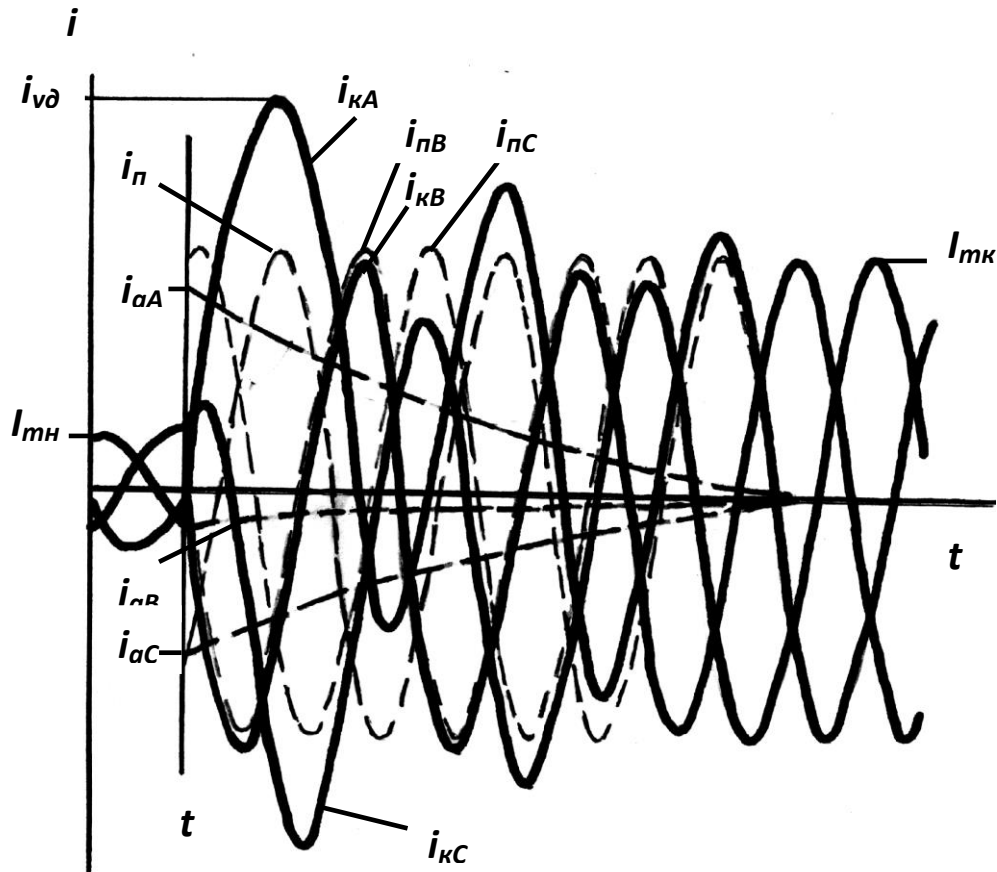


Рисунок 1.14 – Переходный процесс при трёхфазном к.з.: индексами *A*; *B*; *C* отмечены составляющие токов к. з. соответствующих фаз; $I_{мн}$; $I_{мк}$ – амплитуды номинального тока сети и установившегося тока к.з.

Анализ технических решений в области токоограничения шахтных низковольтных электросетей дан в работе [37]. Функцией токоограничения цепи к.з. обладает схема, в которой дроссельные токоограничители подключаются в последовательную цепь в момент возникновения и в процессе протекания тока к.з. (Рисунок 1.15) [38]. Устройство содержит управляемый реактор, подключенный в фазы сети между источником питания и защищаемым присоединением.

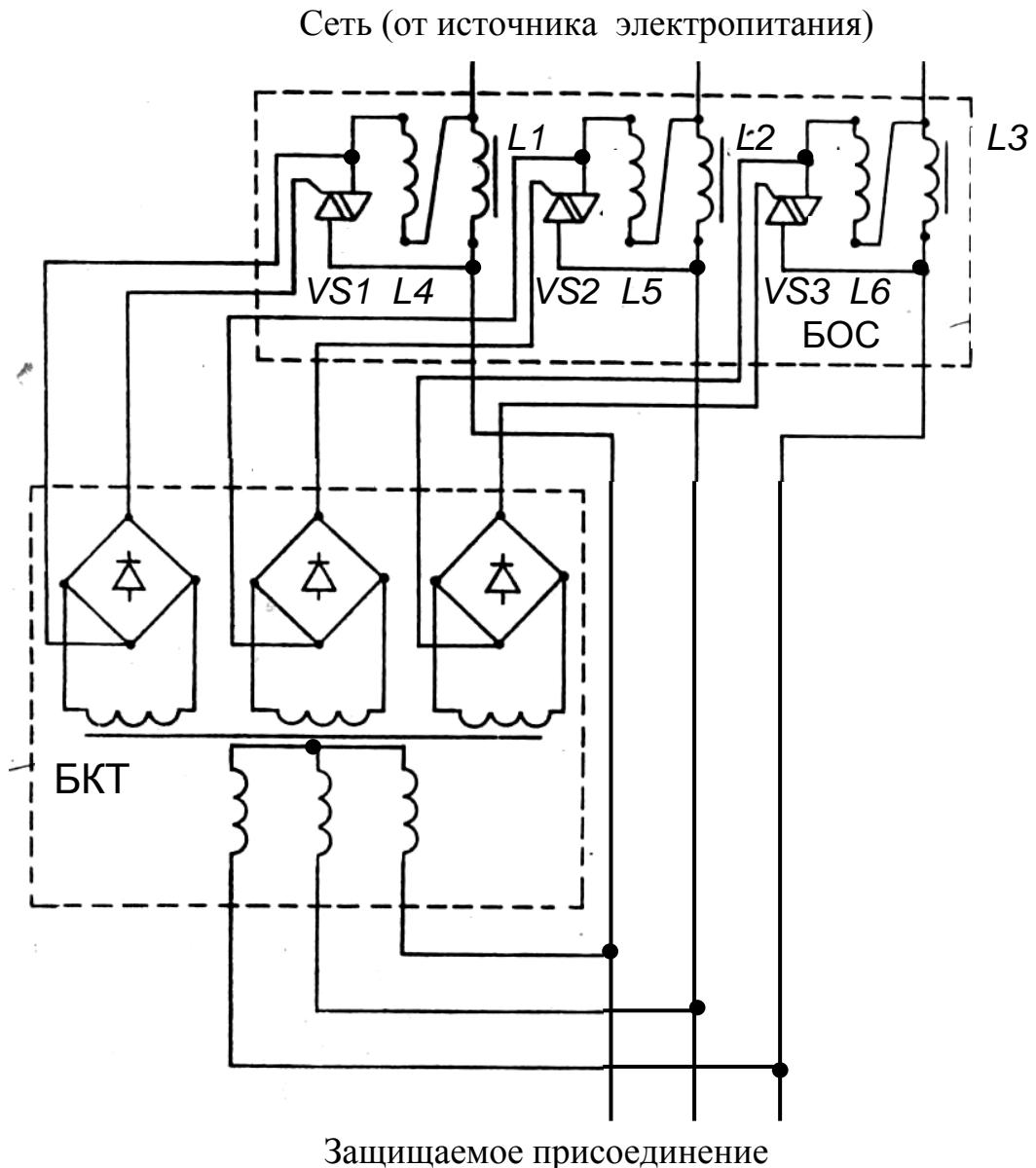


Рисунок 1.15 – Схема устройства автоматического ограничения тока к.з.

При нормальном режиме эксплуатации через включенные встречно рабочие обмотки $L1$; $L2$; $L3$ и обмотки управления $L4$; $L5$; $L6$ фаз реактора протекает номинальный ток линии. В этом случае, поскольку рабочие обмотки и обмотки управления геометрически совмещены в пространстве и охватывают определённое сечение магнитной цепи, будет иметь место полная компенсация их магнитных потоков, что определит близкую к нулю величину индуктивного сопротивления реактора. Падение напряжения на реакторе будет определяться, преимущественно, величиной активного сопротивления обмоток, которое не велико.

В случае возникновения к.з. в линии исчезают управляющие сигналы с выходов блока контроля тока БКТ, и обмотки управления отключаются полупроводниковыми ключами VS1-VS3. Возникает раскомпенсация магнитных потоков обмоток. Магнитные потоки рабочих фазных обмоток существенно увеличиваются и этим повышается их индуктивное сопротивление. Применение управляемого реактора позволяет в автоматическом режиме скачкообразно увеличить сопротивление фаз электрического присоединения с цепью к.з. и уменьшить ток в этом присоединении до величины, соразмерной с рабочим током.

Установлено [39], что в зависимости от установленной мощности потребителя (от 200 кВт до 800 кВт) падение напряжения на реакторе достигалось, соответственно, от 3,5 % до 13,7 %, что применительно к процессу токоограничения к.з. является недостаточным показателем. Ограничение тока начинается с задержкой, обусловленной временем отключения симисторов (до полупериода напряжения сети).

К недостаткам данного технического решения можно также отнести значительные габариты устройства (габариты дросселей, устройств охлаждения симисторов), затрудняющие его использование в корпусе шахтной ТП (поскольку речь идёт об ограничении тока непосредственно в силовой цепи её АВ). Габариты дросселей находятся в соотношении с мощностью нагрузки, что ограничивает их применение в сетях с потребителями высокой мощности.

Задача ограничения тока к.з. в промышленной электросети может быть также решена на основе применения кабелей с расщеплёнными силовыми жилами. Применительно к условиям шахты такое техническое решение было разработано с целью ограничения тепловой мощности в точке внутреннего междуфазного повреждения кабеля на допустимом уровне на время защитного отключения сети. Установлено [21], что в случае возникновения электрической дуги под оболочкой кабеля температура нагрева её поверхности является случайной величиной, распределённой по нормальному закону Гаусса, а доверительный интервал с вероятностью $p = 0,99$ составляет 87°C . При этом в случае возникновения междуфазной дуги оболочка кабеля повреждается повышенным давлением

интервале $0,02 \div 1,18$ МПа., (случайная величина, распределённая по нормальному закону с доверительной вероятностью $p = 0,95$).

В целях обеспечения взрыво-пожаробезопасности разработан шахтный экранированный гибкий упрочнённый кабель марки КГЭШуС-ПБ, в котором предусмотрено расщепление каждой фазы на две жилы (Рисунок 1.16). Особенностью конструкции кабеля является также расщепление заземляющей жилы на три жилы, каждая из которых покрывается электропроводным экраном.

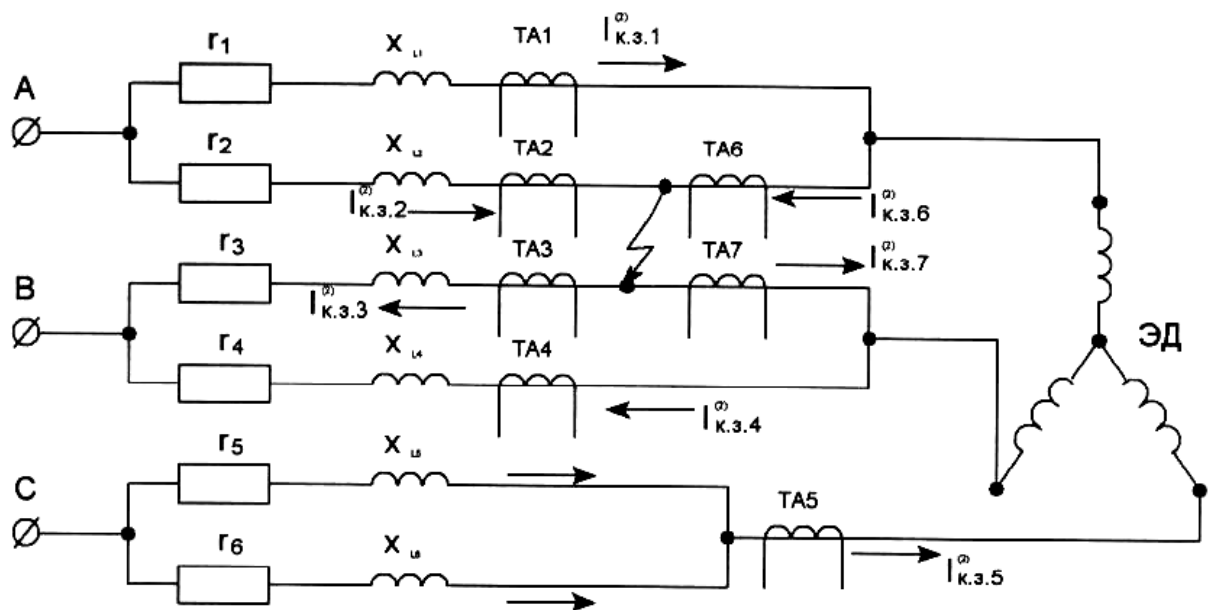


Рисунок 1.16 – Схема электроснабжения потребителя при применении кабеля КГЭШуС-ПБ (при возникновении междуфазного к.з.)

Конструкция кабеля снижает вероятность одновременного повреждения обеих жил фазы при их сжатии, т.к. силовые проводники каждой фазы рассредоточены в пространстве. Замыкание будет между отдельными ветвями фазных проводников. Это позволяет снижать величину тока двухфазного к.з. в $1,3 \div 1,8$ раза относительно величины тока к.з. в трёхфазном кабеле (Рисунок 1.17), что достигается шунтированием дугового промежутка неповреждённой жилой этой же фазы. Цепь к.з. между ветвями фазных проводников (Рисунок 1.16) будет отличаться повышением сопротивлений кабеля в сравнении с аналогичным состоянием междуфазного к.з. в трёхфазном кабеле.

Применение шестижильного кабеля не исключает к.з. при задействовании спаренных жил фазных проводников. На отдельных расстояниях точки к.з. от ТП величины токов в шестижильном и трёхжильном кабелях имеют несущественные различия (Рисунок 1.17). Кроме этого, в случае возникновения междуфазного к.з. непосредственно на выходе ТП или вблизи выхода токоограничивающая функция кабеля будет отсутствовать. В связи с этим, применение шестижильного кабеля является недостаточным решением в области токоограничения в силовой цепи АВ ТП в процессе отключения тока к.з.

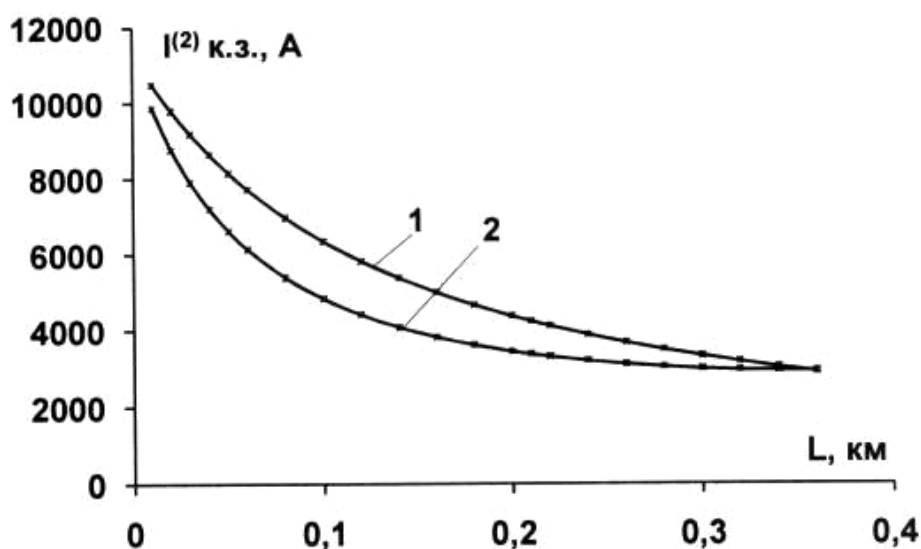


Рисунок 1.17 – Кривые токов короткого замыкания в кабелях КГЭШ 3x50 (1) и КГЭШуС-ПБ 6x25 (2) в зависимости от длины L кабеля

1.4 Анализ неблагоприятных условий электропитания удалённого электропотребителя с асинхронным двигателем высокой мощности

Анализируя особенности эксплуатации шахтных ЭТК следует выделить проблематику обеспечения достаточного уровня напряжения на статорах электродвигателей потребителей при электропитании удалённых асинхронных электроприводов высокой мощности. Актуальность решения этой задачи обусловлена критичностью электромеханических показателей (величина

критического электромагнитного момента M_k) асинхронного двигателя к величине питающего напряжения ($M_k \approx kU^2$). Техническими условиями на АД определены допустимые потери напряжения в длительном $\Delta U = 0,1U_n$ и пусковом $\Delta U = 0,2U_n$ режимах эксплуатации (где U_n – номинальная величина напряжения питания АД). Более высокие потери напряжения обусловят существенное увеличение продолжительности разгона электрической машины, её работу на более низкой (в сравнении с номинальной) угловой скорости или полную остановку. В любом случае процесс будет сопровождаться повышением потребляемого тока вплоть до уровня пускового. Повышенный ток будет протекать по обмоткам АД и при превышении величиной питающего напряжения номинального уровня (Рисунок 1.18) [40]:

$$I_2' = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (1.10)$$

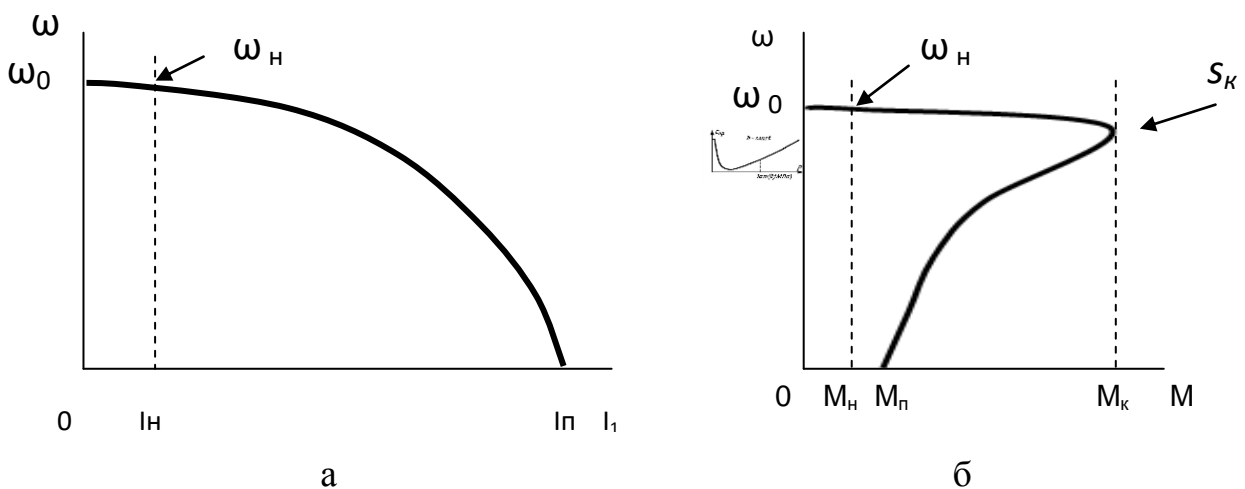


Рисунок 1.18 – Характеристики $\omega = f(I)$ (а) и $\omega = f(M)$ (б) АД

В выражении (1.10) и на рисунке 1.18 имеются следующие обозначения: U_ϕ – фазное напряжение на зажимах статора АД; I_2' – приведенные ток ротора АД; R_1 , X_1 – активное и индуктивное сопротивления статора АД; R_2' , X_2' – приведенные активное и индуктивное сопротивления ротора АД; $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ – скольжение АД; ω_0 – угловая скорость холостого хода АД; ω – текущее значение

угловой скорости АД; s_k – критическое скольжение АД; I_n , M_n – номинальные ток и электромагнитный момент АД; M_n – пусковой момент АД.

Применительно к схеме ЭТК технологического участка шахты потери напряжения в сети электропитания АД определяются суммой потерь напряжения в трансформаторе КТП (ΔU_{mp}), в магистральном ΔU_{mk} и гибком (ΔU_{zk}) кабеле [41]:

$$\Delta U_{об} = \Delta U_{mp} + \Delta U_{mk} + \Delta U_{zk}, \quad (1.11)$$

где

$$\Delta U_{TP} = \sqrt{3} \cdot I_{MK} \cdot \beta \cdot [r_{TP} \cdot \cos \varphi_{CB} + x_{TP} \cdot \sin \varphi_{CB}], \quad (1.12)$$

$$\Delta U_{MK} = \sqrt{3} \cdot I_{MK} \cdot [r_{MK} \cdot \cos \varphi_{CB} + x_{MK} \cdot \sin \varphi_{CB}], \quad (1.13)$$

$$\Delta U_{ГК} = \sqrt{3} \cdot I_{ОП} \cdot [r_{ОП} \cdot \cos \varphi_{ОП} + x_{ОП} \cdot \sin \varphi_{ОП}], \quad (1.14)$$

где $I_{MK} = K_C \cdot \sum_{i=1}^n I_{Pi} = K_C \cdot \sum_{i=1}^n I_{ОП}$ – ток магистрального кабеля, $I_{ОП}$ – ток отходящего присоединения, (ток одного из электропрёмников РП); r_{mp} , x_{mp} – соответственно, активное и индуктивное сопротивления трансформатора ТП, приведенные к его вторичной обмотке (паспортные величины).

Применительно к эксплуатации очистных технологических комплексов шахт наиболее критичным к показателю качества (достаточной величины) напряжения питания является процесс пуска очистного комбайна – наиболее мощного и наиболее удалённого электроприёмника с АД, нагруженными значительной массой комбайна (привод подачи) и сопротивлением угля режущему органу, находящемуся в толще угольного пласта (приводы резания). Для этих условий минимальное напряжение на зажимах запускаемого асинхронного электропривода горной машины ($U_{n.min}$) описывается выражением:

$$U_{n.min} = U_{mp.xx} - \Delta U_{mp.n} - \Delta U_{mk.n} - \Delta U_{zk.n}, \quad (1.15)$$

где $\Delta U_{тр.п.}$, $\Delta U_{мк.п.}$, $\Delta U_{зк.п.}$ – падения напряжения при пуске АД, соответственно, в трансформаторе, магистральном кабеле, и кабеле отходящего присоединения запускаемого асинхронного электропривода горной машины:

$$\Delta U_{тр.п.} = \sqrt{3} \cdot I_{ОБ.П} \cdot [r_{ТР} \cdot \cos \varphi_{ОБ.П} + x_{ТР} \cdot \sin \varphi_{ОБ.П}], \quad (1.16)$$

$$\Delta U_{мк.п.} = \sqrt{3} \cdot I_{ОБ.П} \cdot [r_{МК} \cdot \cos \varphi_{ОБ.П} + x_{МК} \cdot \sin \varphi_{ОБ.П}], \quad (1.17)$$

$$\Delta U_{зк.п.} = \sqrt{3} \cdot I_{ОП.ПМ} \cdot [r_{ОП.М} \cdot \cos \varphi_{ОП.ПМ} + x_{ОП.М} \cdot \sin \varphi_{ОП.ПМ}], \quad (1.18)$$

где $I_{ОБ.П}$ – общий ток магистрального кабеля при пуске очистного комбайна состоит из геометрической суммы пускового тока очистного комбайна (пускового тока в кабеле отходящего присоединения комбайна $I_{ОП.ПМ}$) и номинальных токов остальных электроприёмников РП. В этом случае общий пусковой коэффициент мощности $\cos \varphi_{ОБ.П}$ электросети участка шахты описывается выражением:

$$\cos \varphi_{ОБ.П} = \frac{I_{ОП.ПМ} \cdot \cos \varphi_{ОП.ПМ} + \sum I_{НО} \cdot \cos \varphi_{НО}}{I_{ОБ.П}}, \quad (1.19)$$

где $\cos \varphi_{ОП.ПМ}$ – коэффициент мощности электродвигателя запускаемой горной машины (на интервале пуска: $\cos \varphi_{ОП.ПМ} \approx 0,5$). Тогда $\sin \varphi_{ОП.ПМ} \approx 0,867$.

Изложенные соображения позволяют сделать вывод о том, что при пуске мощных и удалённых электропотребителей участка шахты в сети их электроснабжения могут возникать сверхнормативные потери напряжения, что будет сопровождаться повышением потребляемого тока и снижением ресурса изоляции электродвигателей. Корректирующие $\pm 5\%$ отпайки трансформатора ТП также нельзя считать полноценным средством обеспечения достаточного качества

напряжения питания мощного удалённого потребителя, т.к. они не обеспечивают автоматическую корректировку величины напряжения в функции тока вторичной обмотки ТП, а также вследствие человеческого фактора вообще могут быть не задействованы. В связи с этим, автоматизация процесса корректировки выходного напряжения трансформатора ТП с целью поддержания достаточных качественных показателей электропитания удалённых асинхронных электроприводов высокой мощности потребителей технологического участка шахты является актуальной в области научных исследований и практической реализации.

1.5 Обзор технических возможностей устройств регулируемой коммутации силовых электрических присоединений

В условиях эксплуатации шахтных участковых ЭТК устройства регулируемой коммутации силовых электрических присоединений применяются для обеспечения плавности пуска асинхронных электроприводов и регулирования скорости асинхронных двигателей в полном диапазоне. В первом случае регулирование угловой скорости АД осуществляется трёхфазными тиристорными регуляторами напряжения, во втором – полупроводниковыми преобразователями частоты.

ТРН (рисунок 1.19) в схеме асинхронного электропривода функционируют в режиме фазового управления на интервалах разгона и замедления АД (на рисунке 1.19 обозначены: источник питания с фазными напряжениями U_A ; U_B ; U_C , ТРН (VS1-VS6); АД, в котором: R_s ; L_{sl} – соответственно, активное сопротивление и индуктивность статора; R_r ; L_{rl} – активное сопротивление и индуктивность ротора; L_m – индуктивность главного магнитного поля в расчёте на фазу, e_{sp} – ЭДС вращения ротора). На интервале работы АД на номинальной скорости тиристоры ТРН, как правило, зашунтированы контактором [42].

В таком электроприводе может быть применена разомкнутая система автоматического управления (САУ), функция которой состоит в изменении угла отпирания тиристоров ТРН по заданному закону. Наряду с этим, в качестве

устройств управления пуском электроприводов горных машин применяют аналогичные силовые схемы с одноконтурными, замкнутыми по параметру скорости САУ, что позволяет стабилизировать диаграмму разгона привода при колебаниях момента сопротивления [43].

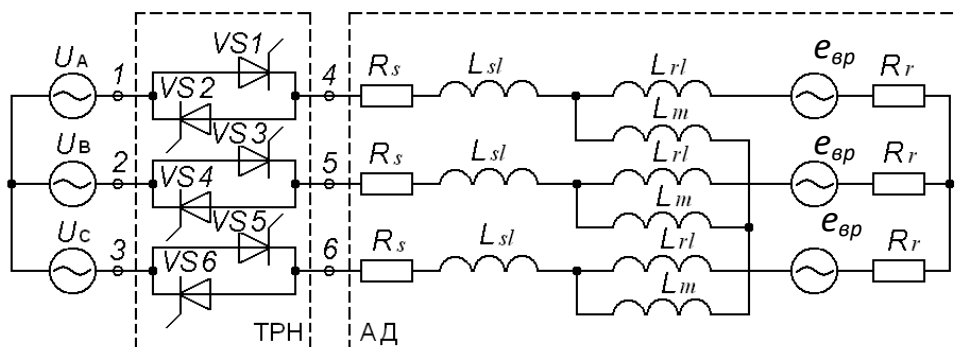


Рисунок 1.19 – Расчётная схема системы «ТРН-АД»

Характерной особенностью эксплуатации системы «ТРН-АД» является наличие трёхфазной ЭДС вращения $-e_{ep}$, индуцированной в обмотках статора полем токов ротора:

$$-e_{ep} = \frac{1}{\sqrt{3}} p \omega (L_m (2i_{sA} + i_{sB}) + L_r (2i_{rB} + i_{rA})), \quad (1.20)$$

где p – число пар полюсов АД; i_s и i_r – токи статора и ротора, ω – угловая скорость ротора АД.

Будучи приложенной к ТРН со стороны статора, ЭДС вращения АД оказывает существенное влияние на параметра коммутации тиристоров в случае, если угловая скорость ротора АД соразмерна с номинальной, а формируемый системой импульсно-фазового управления угол α отпирания тиристоров ТРН превышает нулевое значение (обычно находится в диапазоне $60 \div 80$ эл. град.). Выполненный в работах [44, 45] анализ процессов в системе «ТРН-АД» по методу фиксированных состояний показывает, что фиксированной величине напряжения

питания АД соответствует несколько решений дифференциальных уравнений, определённых в функции $\omega_{u} = \text{const}$.

$$\begin{aligned}\bar{u}_s &= r_s \bar{i}_s + (d\bar{\psi}_s / dt) + j \omega_k \bar{\psi}_s \\ \bar{u}_r &= r_r \bar{i}_r + (d\bar{\psi}_r / dt) + j(\omega_k - p \omega_u) \bar{\psi}_r;\end{aligned}\quad (1.21)$$

$$\begin{aligned}\bar{\psi}_s &= L_s \bar{i}_s + L_0 \bar{i}_r; \\ \bar{\psi}_r &= L_0 \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r; \\ M &= (3/2) p L_0 L_m [\bar{i}_r \times \bar{i}_s];\end{aligned}\quad (1.22)$$

$$J d\omega / dt = M \pm M_{оп},$$

где \bar{u}_r – вектор напряжения ротора; \bar{u}_s и $\bar{\psi}_s$ – векторы напряжения и потокосцепления статора АД, ω_u – угловая скорость системы координат; J и M – соответственно, момент инерции и электромагнитный момент АД, M_c – момент сопротивления АД; L_s и L_r – эквивалентные фазные индуктивности статора и ротора АД, соответственно, $L_s = L_{sc} + L_0$ и $L_r = L_{sc} + L_0$.

Учитывая, что фактическому режиму соответствует только одна угловая скорость ротора, а именно, та, при которой $M = M_{оп}$ и при условии, когда заданный угол $\alpha > 0$ (эл. град), а угловая скорость $\omega_u = \omega_1$ близка к номинальной ω_2 , АД находится на устойчивой части своей механической характеристики. В этом случае магнитный поток АД уменьшен соответственно уменьшению величины питающего напряжения $U(\alpha)$:

$$\Phi(\alpha) = U(\alpha) / 4,44 f \omega k \quad (1.23)$$

Постоянство электромагнитного момента ($M = M_c = \text{const}$) при уменьшенном напряжении питания обеспечивается повышением тока АД:

$$M = k \Phi(\alpha) I_r \cos \varphi_2, \quad (1.24)$$

где k – конструктивный коэффициент; φ_2 – угол между ЭДС вращения АД и током его ротора:

$$\cos \varphi_2 = r_r' / s / \sqrt{(r_r' / s)^2 + (2\pi f L_r)^2}, \quad (1.25)$$

где f – частота напряжения сети; s – скольжение ротора АД.

Таким образом, повышенный (в сравнении с номинальным) ток АД и близкая к номинальной угловая скорость ротора АД обуславливают увеличение ЭДС вращения. Это, в свою очередь, обуславливает увеличение фактических углов отпирания α (до 120 эл. град.) и, в большей степени, – проводимости β (до 180 эл. град.) тиристорных ТРН, что приводит к увеличению напряжения, поступающего на АД, последующему снижению потребляемого тока и ЭДС вращения и перемещению фактических углов α и β к исходным значениям. Это означает, что следствием воздействия ЭДС вращения АД на ТРН при угловой скорости АД, близкой к номинальному значению и $\alpha > 0$, будет возникновение автоколебательных процессов в системе «ТРН-АД» (Рисунки 1.20, 1.21).

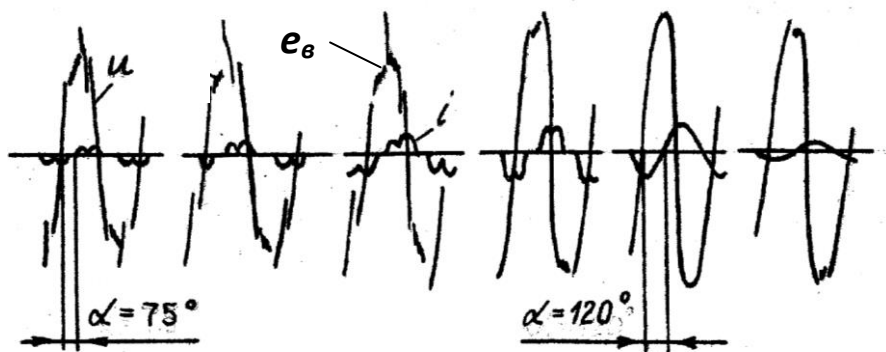


Рисунок 1.20 – Фрагменты осциллограмм фазных: напряжения u , ЭДС вращения e_s и тока i статора АД в течение периода автоколебаний параметров системы ТРН-АД (двигатель типа КОФ-32 мощностью 32 кВт)

Таким образом, применение тиристорных регуляторов напряжения в системах управления скоростными параметрами асинхронных электроприводов горных машин позволяет регулировать величину напряжения, подаваемого

потребителю в диапазоне от нуля до номинальной величины. При этом исключается возможность увеличения напряжения, подаваемого на нагрузку. Наличие эффекта автоколебаний электрических параметров системы «ТРН-АД» делает неприемлемым применение ТРН на участке между ТП и АД в качестве исполнительного устройства корректировки величины напряжения питания удалённого асинхронного электропривода высокой мощности.

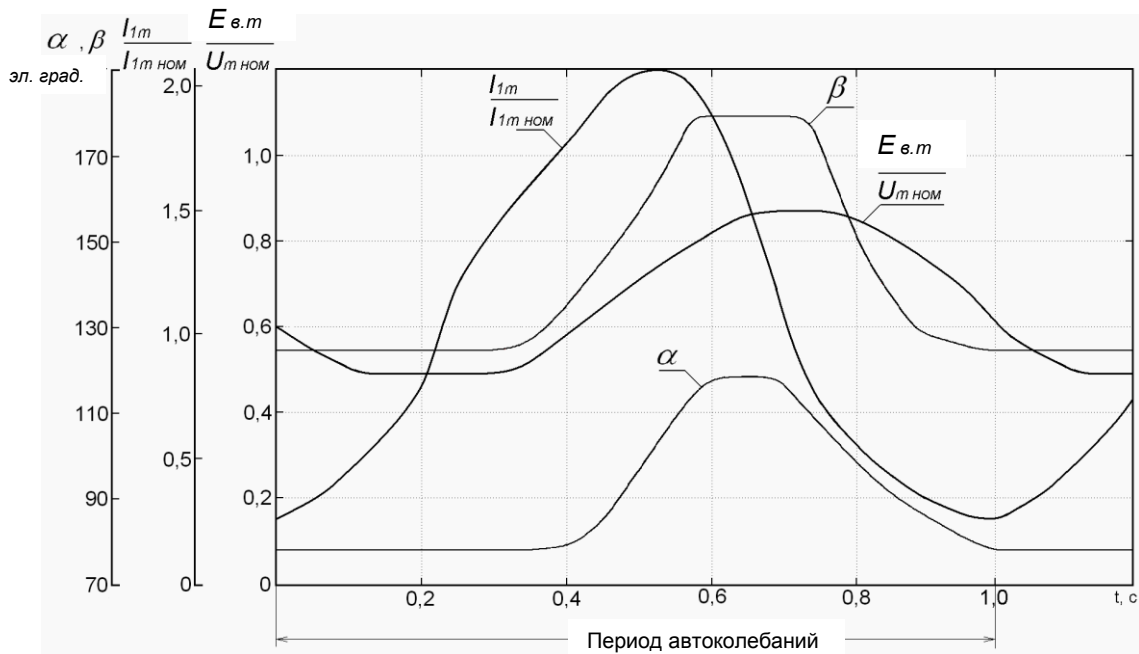


Рисунок 1.21 – Диаграммы параметров системы «ТРН-АД» при наличии автоколебаний: α и β – фактические углы, соответственно, отпирания и проводимости тиристоров ТРН, $E_{в.т}/U_{т.ном}$ – отношение амплитуд ЭДС вращения и номинального напряжения соответствующей фазы; $I_{1т}/I_{1т.ном}$ – отношение амплитуд фактического и номинального тока статора АД

В настоящее время в горной промышленности используются силовые схемы преобразователя частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока, инвертор которого выполнен на транзисторах (IGBT), либо запираемых тиристорах, формируя трёхфазную систему напряжений величины U в диапазоне частот f , меньших частоты сети, в соответствии с законом $U^2/f^2 = const$. С целью выполнения данной закономерности и приближения формы фазных токов к синусоидальной

формирование выходных напряжений ПЧ сопровождается эффектом широтно-импульсной модуляции (Рисунки 1.22, 1.23) [46].

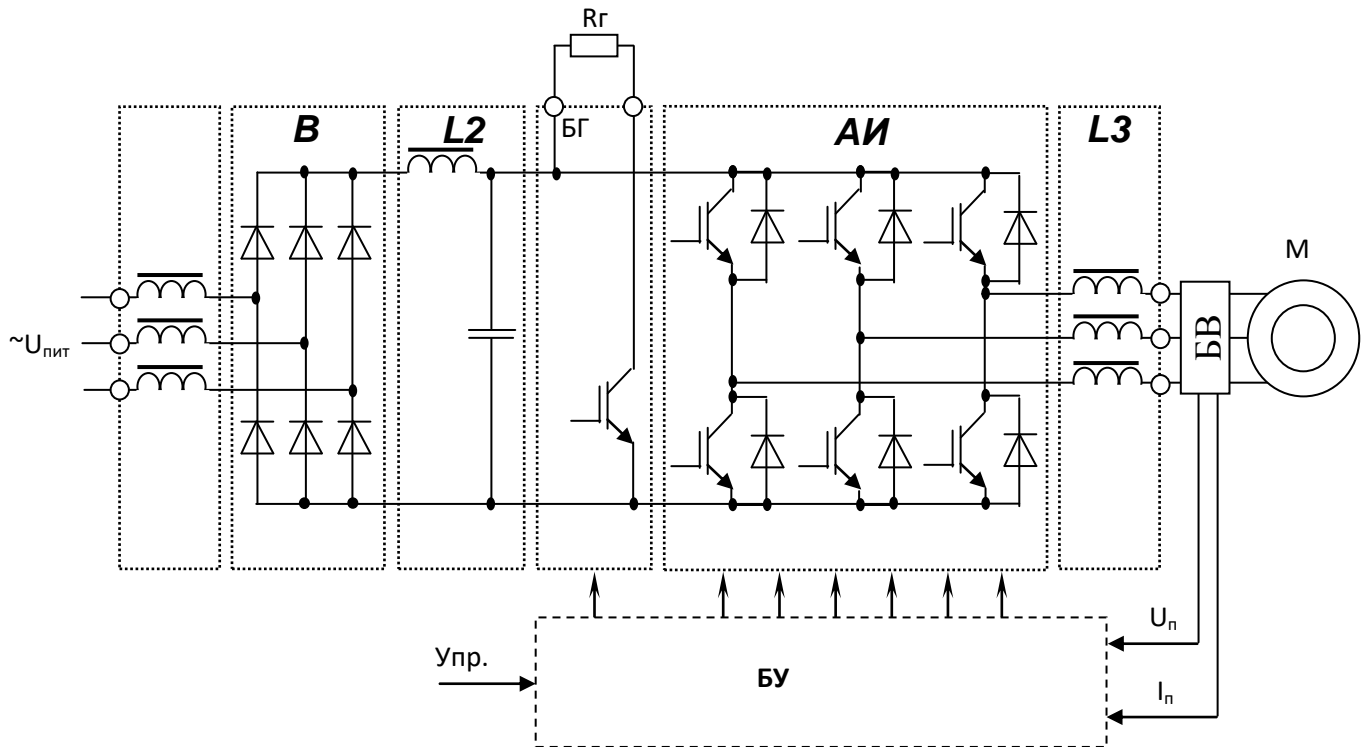


Рисунок 1.22 – Структурная схема частотно-управляемого электропривода

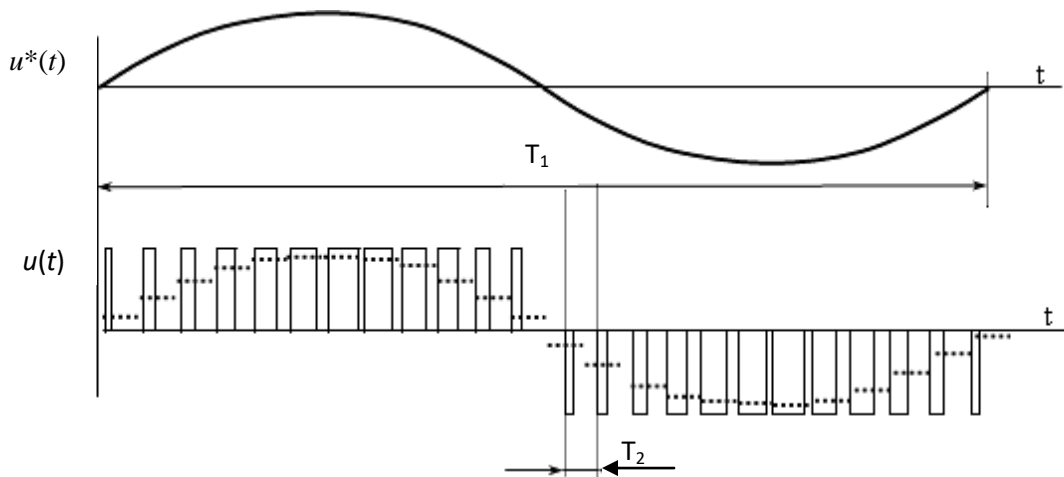


Рисунок 1.23 – Диаграмма процесса широтно-импульсной модуляции выходного напряжения автономного инвертора преобразователя частоты

Существующие системы частотного регулирования не позволяют повышать величину напряжения стабильной промышленной частоты, однако широко

применяемый эффект широтно-импульсной модуляции при управлении АД позволяет сделать вывод о возможности реализации импульсного способа регулирования напряжения в качестве технического решения по корректировке величины напряжения питания удалённого электропотребителя с АД высокой мощности.

1.6 Принципы и средства автоматизации технологических объектов и процессов в горной промышленности

В контексте проблематики управления коммутационными процессами в электросети технологического участка шахты представляется актуальным аналитический обзор существующих принципов и средств автоматизации технологических объектов и процессов в горной промышленности. Несмотря на разнообразие технологических процессов горного предприятия, применяемые способы и технические средства автоматизации могут быть систематизированы, объединением в группы по назначению, а именно [47, 48, 49]:

- автоматическое управление технологическим процессом;
- автоматическое управление скоростными параметрами электропривода технологической установки;
- автоматическое выявление опасного состояния технического объекта и формирование команды на выполнение защитной функции.

Функция автоматического управления технологическим процессом распространяется на установки шахтного подъёма, главного и местного водоотлива, конвейерный транспорт, частично – на электромеханическое оборудование очистных и подготовительных работ (очистные комбайны, струги, проходческие комбайны).

Применительно к установкам шахтного подъёма автоматизирован процесс загрузки / выгрузки скипа, перемещения подъёмного сосуда по стволу с заданное многопериодной диаграммой скорости [50]. Автоматизация шахтного конвейерного транспорта касается магистралей ленточных конвейеров и состоит в

управлении очередностью включения/отключения конвейеров транспортной линии, выявления неприемлемого технического состояния элементов конструкции конвейера [51]. Развитие элементной базы систем автоматизации, применение компьютерно-интегрированных технологий позволило распространить процедуру управления конвейерным транспортом на сложные структуры конвейерных линий, создать информационный ресурс о параметрах и состоянии каждого технологического датчика, применяемого на конвейерах конкретной транспортной линии [52].

Процесс автоматизации шахтного водоотлива заключается в управлении количеством включаемых в работу насосов в зависимости от степени заполнения водой зумпфа (водосборника). Применительно к технологическому оборудованию, применяемому на очистных работах автоматизирована функция управления положением режущего органа комбайна по границе «порода / уголь», функция достижения прямолинейности линии очистного забоя при его струговой отработке на основании многократного реверса движения струга на участке выявленной кривизны линии забоя. Кроме этого, автоматизирован процесс очередности включения в работу технологических установок очистного комплекса (по добыче угля).

Функция автоматического управления скоростными параметрами электроприводов технологических установок реализуется в электроприводах: шахтного подъёма; подачи очистных комбайнов, а также в устройствах плавного пуска / замедления электроприводов ленточных конвейеров и установок перемещения вагонеток по наклонным выработкам. Применительно к электроприводам шахтного подъёма управление реализовано на основе, как правило, двухконтурных систем подчинённого регулирования (с внешним контуром скорости и внутренним контуром тока). Такой принцип распространяется на электроприводы как постоянного тока («управляемый выпрямитель – двигатель»), так и переменного тока («преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД)»; «преобразователь частоты – синхронный двигатель») [53, 54]. Применительно к электроприводам подачи очистных

комбайнов (обычно, это ПЧ-АД) управление строится на базе одноконтурной системы с обратной связью по параметру скорости привода и корректировкой задающего параметра в функции его ограничения в зависимости от токов привода подачи и привода резания.

Электроприводы технологических установок, перемещающих грузы по наклонным выработкам, оснащены АД с фазным ротором. Для управления скоростным режимом их разгона применяются реостатные схемы, либо системы «асинхронный вентильный каскад» и разомкнутые системы САУ, задающие параметр скорости, изменяемый в течение времени разгона. Электроприводы ленточных конвейеров, оснащённые АД с короткозамкнутым ротором также реализуют принцип управляемого разгона. При этом применяются тиристорные регуляторы напряжения с разомкнутыми, либо одноконтурными, замкнутыми по параметру скорости САУ [55].

Автоматизированная система управления технологическим процессом АСУТП «Электроснабжение» по существу выполняет функцию оптимизации электропотребления в часы максимумов нагрузки. Кроме этого, к функции автоматического управления электроснабжением шахты может быть отнесено автоматическое включение резерва при обесточивании одной из секций подключения электропотребителей.

Вопросы автоматизации в области защиты технологического оборудования от аварийных и опасных режимов эксплуатации сводятся к выявлению таких режимов и формированию команд на защитное отключение технологического оборудования. Непрерывный контроль осуществляется в отношении процентного содержания метана в воздухе, в процессе эксплуатации непрерывно контролируется величина сопротивления изоляции, величина электрического тока в сети (на предмет выявления междуфазного короткого замыкания), другие технологические параметры, специфические для конкретных видов оборудования.

Из сказанного следует, что существующие способы и средства автоматизации технологических объектов и процессов горного предприятия не ориентированы на выполнение функций автоматического управления

коммутационными процессами в структуре шахтного участкового электротехнического комплекса в контексте обоснованных задач настоящего исследования.

1.7 Выводы по разделу 1. Обоснование цели и задач исследования

Анализ особенностей эксплуатации шахтных участковых электротехнических комплексов свидетельствует о высокой степени вероятности механических повреждений гибких кабелей, что является причиной междуфазных к.з. Несмотря на многократное дублирование функции максимальной токовой защиты, основным исполнительным устройством защитного отключения силового присоединения участковой трансформаторной подстанции является автоматический выключатель её распределительного устройства низкого напряжения.

Многолетний положительный опыт эксплуатации автоматического выключателя А37ХХ в составе ТП всех типоразмеров в электрической сети линейного напряжения 660 В создал предпосылки его адаптации к сети линейного напряжения 1140 В, в связи с чем создана и промышленно эксплуатируется модификация А3792 аппарата серии А37ХХ. Опыт его эксплуатации в сети напряжения 1140 В показал критичность к процессу отключения междуфазного к.з. Коммутационный процесс в этом случае сопровождается созданием путей междуфазной проводимости внутри АВ и междуфазным к.з. в нём при перемещении подвижных контактных групп в процессе повторного включения.

Анализ конструкции аппарата А3792 выявил узлы, способствующие созданию междуфазного медного напыления в результате ионизационных электрохимических процессов, обусловленных плазмообразованием электрической дуги при размыкании энергетического потока высокой мощности.

Замена автоматического выключателя А3792 на высоковольтный силовой коммутационный аппарат экономически нецелесообразна. Поэтому приемлемым решением данного технического противоречия может быть применение

технических средств автоматического ограничения энергетических параметров дугового коммутационного процесса при появлении и отключении междуфазного к.з. в силовом присоединении, отходящем от ТП.

Анализ технических решений в области токоограничения шахтных электрических сетей свидетельствует об их недостаточной функциональности применительно к объекту токоограничения.

Применительно к эксплуатации ЭТК с электропотребителями высокой мощности к числу проблемных может быть отнесен вопрос электроснабжения удалённых мощных асинхронных двигателей напряжением, близким к номинальному по величине в условиях значительных потерь напряжения в ТП и кабелях большой протяжённости. Существующие технические средства регулирования напряжения промышленной электросети не адаптированы к решению этой задачи, тем более, что корректировка параметров электропитания удалённого асинхронного электропривода должна выполняться в автоматическом режиме с учётом конкретных режимов работы и предполагает наличие источника повышенного в сравнении с номинальным напряжения сети. В контексте изложенного, определена принципиальная возможность применения ТРН в режиме фазового регулирования и применения импульсного способа регулирования в качестве вариантов реализации коммутационных процессов при корректировке параметров напряжения питания удалённого асинхронного электропривода высокой мощности. Однако, установлена неприемлемость подключения для указанных целей ТРН на участке между ТП и АД в связи с возможностью возникновения автоколебательных процессов.

Указанными обстоятельствами обусловлена цель исследования – повышение эффективности эксплуатации шахтных участков электротехнических комплексов на основе научного обоснования и практической реализации методов, алгоритмов и структуры технических устройств управления коммутационными процессами в силовой цепи трансформатора комплектной подстанции участка шахты при отключении коротких замыканий и стабилизации

напряжения питания электропотребителя в сети, создающей значительные по величине потери напряжения.

Для достижения этой цели должны быть решены следующие задачи:

- анализ проблемных вопросов эксплуатации электротехнического комплекса участка шахты, обусловленных увеличением энергетических параметров процесса отключения к.з. в сети напряжения 1140 В и потерями напряжения в сети электропитания удалённого электропотребителя высокой мощности;

- исследование свойств коммутационного дугообразования в отношении металлизации элементов конструкции автоматического выключателя и обоснование способа ограничения энергетических параметров коммутационной электрической дуги на основе управления процессом коммутации;

- обоснование способа стабилизации напряжения питания удалённого электропотребителя с асинхронным двигателем высокой мощности на основе автоматического управления процессами коммутации цепей вторичных обмоток трансформатора ТП участка шахты;

- разработка исследовательских стендов, программ, методики и выполнение экспериментальных исследований процессов в элементах ЭТК, обусловленных управляемой коммутацией силовых цепей в контексте её применения при реализации функции ускорения отключения к.з, а также при стабилизации величины напряжения электропитания удалённого потребителя в сети с высокими потерями напряжения;

- разработка схемных решений в области автоматизации управления коммутационными процессами в шахтной участковой электросети при ускорении отключения коротких замыканий и стабилизации напряжения питания удалённого асинхронного электропривода высокой мощности.

РАЗДЕЛ 2

ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИОННОГО ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ В КОНТЕКСТЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

2.1 Обзор методов моделирования дугового разряда при коммутации сильноточной электрической цепи

Наличие медного налета на диэлектрических поверхностях деталей автоматического выключателя А3792 вблизи мест расположения силовых контактов даёт основание рассматривать в качестве причины ионизационные и высокотемпературные процессы, сопровождающие коммутационный дуговой разряд и проявляющиеся, в виде испарения материала коммутирующих контактов.

В связи с этим, представляется актуальным обоснование метода исследования коммутационного дуго-плазмообразования в сильноточной электрической цепи переменного тока при напряжении, превышающем 1000 В. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость анализа известных методов и научных подходов к анализу подобных процессов.

К наиболее близким относятся исследования [56-59]. Так, в работах [56, 57] дугообразование при отключении силовой электрической цепи коммутационным аппаратом условно представлено пятью стадиями:

- исходное состояние: замкнутые контакты с фиксированным уровнем переходного сопротивления (доли Ом);
- процесс разъединения контактов, сопровождающийся ростом переходного сопротивления, температуры точек контактирования, плавлением контактных поверхностей, вытягиванием металла;
- взрыв расплавленного металлического мостика с образованием паров металла, пробиваемых приложенным напряжением;
- образование газового разряда между контактами аппарата, включая его дуговую стадию с испарением материала контакта [58];

- последующее гашение дуги, обусловленное расхождением контактов на достаточное расстояние и действием дугогасительных устройств (межконтактный промежуток превращается в диэлектрик, на вводных контактах коммутационного аппарата восстанавливается напряжение сети).

Доказывается, что силовоточной электрической цепи при напряжении, превышающем 1000 В, продолжительность дугообразования следует полагать равной продолжительности перемещения контактов коммутационного аппарата.

В исследовании [56] получена картина изотерм, расчётная зависимость температуры от расстояния до оси катода при горении дуги в цепи постоянного тока в аргоне, в условиях атмосферного давления (Рисунок 2.1). На графике максимальная температура составила 21800 К, а максимальная скорость на оси в катодной струе составила 275 м/с, что согласуется с аналогичными исследованиями других авторов. Из анализа исследования можно сделать выводы о тенденции изменения энергетических параметров и размеров электрической дуги. Однако, применительно к объекту исследования существенными отличиями являются: газовая среда, род тока, форма (площадь) контактных поверхностей, между которыми образуется дуга.

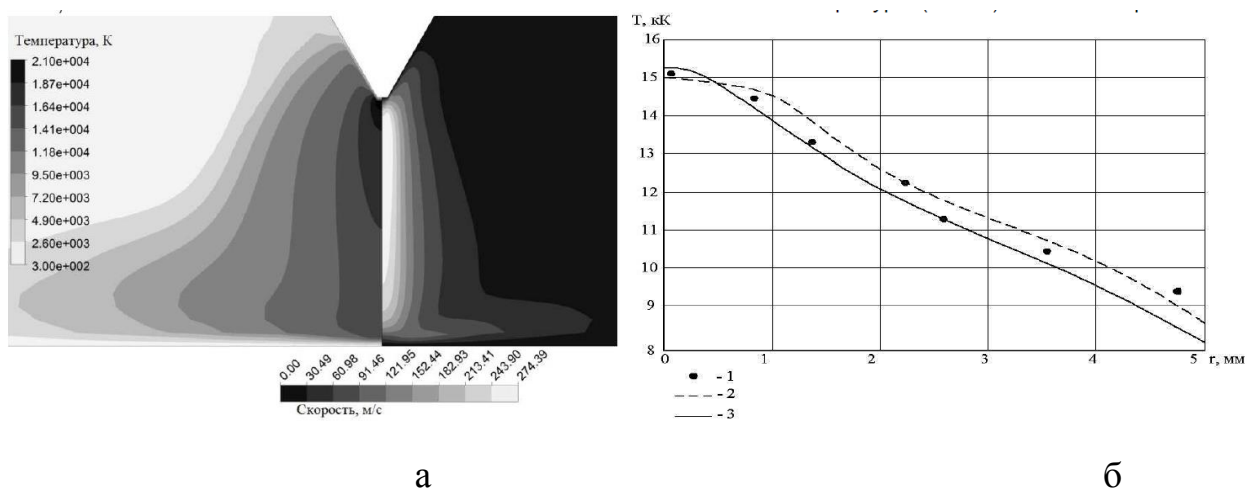


Рисунок 2.1 – Расчётная диаграмма поля температуры (слева) и течение аргонной плазмы (а) и зависимость температуры плазмы от расстояния до оси катода (б);

1 – экспериментальные данные Haddad Farmer; расчётные данные [56]

Наиболее полно отвечает объекту исследования модель дуги с изменяющимися геометрическими параметрами, приведенная в работе, относящейся к проблематике повышения эффективности контактно-дугогасительных систем сильноточных коммутационных аппаратов [57]. При построении модели дуги использовалось уравнение теплового баланса для столба дуги и экспоненциальная зависимость удельной проводимости дуги от удельного теплосодержания её столба:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{P_o}{Q_o} \frac{\sqrt{4\pi}}{\sqrt{S}} \left(\frac{U I}{P_o l \sqrt{4\pi S}} - 1 \right) - \frac{1}{l} \frac{dl}{dt} \left(1 + \ln \frac{g l}{\sigma_o S} \right) + \frac{1}{S} \frac{dS}{dt} \left(1 - \ln \frac{g l}{\sigma_o S} \right), \quad (2.1)$$

где g , U , I , l , S – проводимость, напряжение, ток, длина, площадь поперечного сечения дуги.

Модель, описываемая уравнением (2.1), содержит три неизвестных параметра: величину теплоотвода от единицы поверхности дуги – P_o , Вт/м²; Q_o – количество тепла, при выносе которого из единицы объёма столба удельная проводимость дуги изменяется в $e = 2.7$ раза, Дж/м³; коэффициент σ_o , имеющий размерность удельной проводимости, См/м. Эти параметры определяются по результатам эксперимента и принимаются постоянными. При этом модель дуги представляется в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}_i = f_i(\vec{x}, \vec{a}, t), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.2)$$

где \vec{a} – вектор определяемых параметров, например, в случае модели Майра [60] – это постоянная времени дуги и мощность теплоотвода от ствола дуги.

Утверждается, что часть переменных x_i (проводимости дуги g и т.п.) не может быть непосредственно получена в эксперименте и определяется по наблюдаемым переменным y_j (току, напряжению дуги и т.п.):

$$x_i = h(\vec{y}(t), \vec{\xi}), \quad (2.3)$$

где $\vec{\xi}$ – вектор случайных величин, влияющих на измерения в момент времени t .

Форма функций f_i и h_j и статистические свойства $\bar{\xi}$ полагались известными, а оценивание вектора параметра \vec{a} по наблюдаемым значениям \vec{y} производилось методом наименьших квадратов путём минимизации функции суммы квадратов невязок:

$$\Phi(\vec{a}) = \sum_{k=1}^n \left[f_k(\vec{x}, \vec{a}, t) - x_k \right]^2 \quad (2.4)$$

По предлагаемой методике были определены параметры модели Майра с использованием тестовых осциллограмм $i=f(t)$ и $u=f(t)$, которые представляли собой точные значения тока и напряжения и значения напряжения с наложенным «шумом».

Подобный подход предпринят при моделировании термодинамических процессов гашения дуги в потоке элегаза (SF_6) в высоковольтных электрических аппаратах [61, 62]. Автором развиты методы математического моделирования газо-термодинамических процессов в дуговом разряде в потоке плазмообразующего газа при отключении к.з. Доказано, что в условиях коммутационного дугообразования можно ввести значение расхода:

$$G = 2\pi \int_0^R V_z \rho dr \quad (2.5)$$

и описать процесс уравнениями:

$$-\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} + \sigma(S) E^2 - P_{us}(S) = G \frac{h-h_0}{L\pi R^2} \quad (2.6)$$

$$V(r) = \frac{\Delta P}{L} \int_r^R \frac{r dr}{2\mu(S(r))}, \quad (2.7)$$

$$I = 2\pi E \int_0^R V \sigma dr, \quad (2.8)$$

где L – слой, по которому производится расчёт скоростей и температур для граничных условий: при $r = R$; $S=S_w$, при $r = 0$, $\partial S/\partial r=0$, h – среднemasсовая энтальпия; μ – среднemasсовый расход газа; $S(T)$ – функция теплового потенциала.

На основе этого математического обеспечения в работе [59] описан эффект расширения элементарных ячеек газовой плазмы, выраженный в массопереносе части газа ячейки в форме обмена импульсами с оказанием влияния своими параметрами на следующую ячейку. Определены составляющие физических параметров массопереноса в процессе горения дуги: скорость, масса части газа при массопереносе, масса газа, оставшегося в ячейке, часть удельной энергии, отведенной конвективно газовым потоком:

$$\frac{Q_c}{m} = \frac{P}{\rho} + \frac{c_v T}{m} + \frac{\omega^2 dt}{2} + zg, \quad (2.9)$$

где ρ – плотность газа; g – ускорение свободного падения; z – координата горловины сопла элегазового выключателя; Q_c – энергия, отводимая конвективно; m – масса газа; C_v – объёмная теплоёмкость; P – давление газа; T – температура газа.

При этом, джоулева мощность, выделяющаяся в газе, описывается уравнением:

$$W_o = \sigma_o E^2 - \frac{4\lambda T_o}{R_o^2} - P_{изл}, \quad (2.10)$$

где σ_o – проводимость среды при заданных условиях; λ – теплопроводность, R_o – радиус дуги, T_o – начальная температура, $P_{изл}$ – мощность, затраченная на излучение.

Кроме этого, в исследованиях используется теория теплового взрыва и, в частности, закономерности выделения энергии в разряд. За основу принимается гипотеза омического поведения, согласно которой мощность, поступающая в дугу, полностью идёт на джоулев нагрев [63]:

$$P_{in} = ui = gu^2 \quad (2.11)$$

где g , u , i – проводимость, напряжение и ток дуги.

Исходным материалом исследования были также зависимости, предложенные Отто Майром [60, 64]:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau(g)} \left(\frac{gu^2}{P_{охл}(g)} - 1 \right) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{i_q u g}{Pg} - 1 \right) \quad (2.12)$$

где $P_{охл}$ – охлаждающая мощность, τ – постоянная времени дуги (время, в течение которого проводимость дуги g уменьшается в $1/e$ раз (на 63%).

При этом, формализации требуют постоянная времени дуги и охлаждающая мощность. Допускается, что температура T дуги однородна внутри столба дуги постоянного поперечного сечения, является переменной во времени и зависит от запасённой энергии Q . В условиях отрезка дуги неизменного поперечного сечения, её температура T непосредственно определяет величину баланса мощности;

Рассмотренные работы позволяют сделать взвод о возможности установления степени воздействия тока цепи дугообразования, продолжительности его протекания, напряжения коммутируемой цепи на энергетические параметры ствола дуги в предположении, что испарение металла поверхности контактов будет иметь место на всём временном промежутке, когда температура плазмы дуги будет достаточной для плавления контактной площадки каждого контакта.

2.2 Коммутационное дугообразование в силовоточной электрической цепи как фактор плазменной металлизации внутренних поверхностей корпуса автоматического выключателя

Предварительный анализ методов исследования энергетических параметров коммутационной электрической дуги в силовоточной цепи позволил сформулировать исходные условия и допущения относительно моделирования процесса и определить метод Майра [60] в качестве универсального инструмента исследования. Его интерпретация применена в исследовании [58] для получения функциональной зависимости и численных результатов относительно влияния электрических параметров процесса на энергетику плазмы коммутационного дугообразования. В качестве расчётной зависимости принята энергия дугового разряда с учётом потерь на электродах:

$$A_{\text{разр}} = \frac{1}{6}(U - U^*)iT_p + \frac{1}{2}Li^2 \quad (2.13)$$

где T_p – длительность дугового разряда; U^* – сумма падений напряжения (В) на электродах при коммутационном дугообразовании; U – напряжение источника питания; i – размыкаемый ток; L – индуктивность цепи дугообразования; мощность, поступающая в дугу: (где q и u – проводимость и напряжение дуги).

Полагая, что коммутационное дугообразование происходит в воздухе при атмосферном давлении и температура процесса 10000 К, принимаем концепцию зависимости постоянной времени τ дуги от тока дуги и радиуса r_0 её столба [65]:

$$\tau = \frac{r_0^2 D_b (2\pi r_0 \sqrt{B_p})^{\frac{2(1-b)}{p+1}}}{i^{\frac{2(1-b)}{p+1}}}, \quad (2.14)$$

где коэффициенты: $B_p = 1,76 \cdot 10^{-7}$; $\epsilon = 0,25$; $D_\epsilon = 0,18$; $p = 3,5$.

В соответствии с [66], радиус дуги на открытом воздухе приближённо может быть определён эмпирической зависимостью в функции тока:

$$r_0 = 0,135\sqrt{I} , \quad (2.15)$$

Охлаждающая мощность в сети переменного тока частоты f определяется выражением:

$$P_{\text{охл}} = P_q 2\pi f \tau_0 , \quad (2.16)$$

где τ_0 – постоянная времени дуги без учёта её зависимости от проводимости; P_q – постоянный фактор параметра $P_{\text{охл}}$, соответствующий статическому режиму горения дуги. Проводимость q дуги может быть найдена из выражения (2.12).

Приведенные выражения в своей совокупности образуют составляющую математического описания коммутационного дугообразования для решения задачи определения условий плавления поверхностей размыкаемых контактов при разрыве цепи междуфазного к.з., а также для определения геометрических параметров насыщенного пара меди газа в предположении, что вся испаряющаяся медь с поверхности контактов равномерно распределяется в теле дуги.

Принципиальную важность в вопросах исследования коммутационного дугообразования в сильноточной электрической цепи представляет выявление эффекта придиафрагменного расширения столба дуги [67, 68]. В исследовании [67] рассматривается осесимметричная электрическая дуга 1, горящая в сильноточной электрической цепи постоянного тока между электродами 2 (плоским анодом и стержневым катодом) через металлическую диафрагму 3 (Рисунок 2.2). Здесь обоснованы математические зависимости и установлена общая тенденция к изменению размеров дуги в придиафрагменных областях. Применительно к сети переменного тока здесь следует учесть процесс смены

полярностей электродов с частотой сети и фактические размеры контактных площадок электродов.

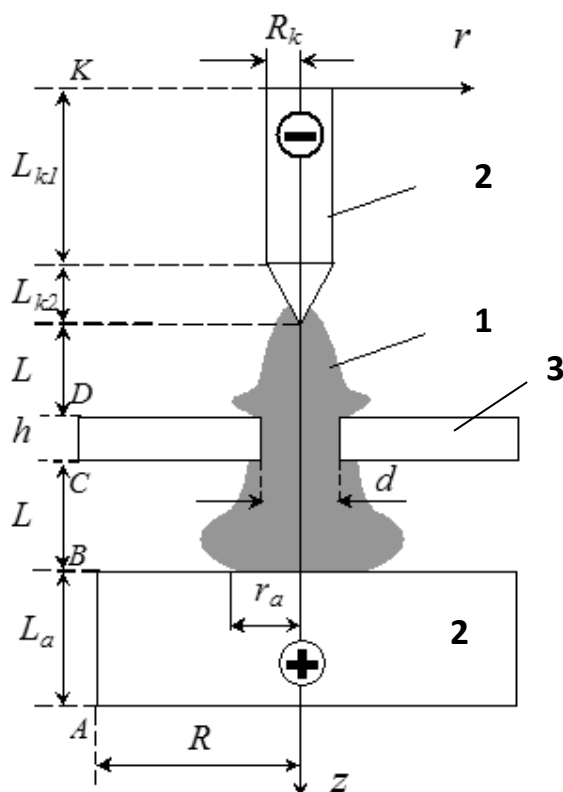


Рисунок 2.2 - Расчетная схема диафрагмированной дуги

Предложенная методика решения системы дифференциальных уравнений способом конечных разностей в физических переменных и итерационным способом с использованием релаксации и прогоном в радиальном направлении позволяет получить пространственную картину распространения плазмы дуги в придиафрагменной области с учётом геометрических размеров канала (диафрагмы), материала и размеров (формы) электродов (контактов), величины тока дугового промежутка.

Как следует из результатов моделирования, наличие диафрагмы ведёт к перераспределению давлений в теле дуги, в результате чего в придиафрагменной области наблюдается расширение её столба (увеличение диаметра). Исследуемый объект (объём пространства перемещения контактов силовой группы выключателя А3792, включая объём дугогасительной камеры) также может быть

косвенно приравнен к объекту дугообразования с элементом диафрагмирования. Следовательно, в малых объёмах придиафрагменных областей следует ожидать расширение плазмы, что подтверждается практикой эксплуатации автоматического выключателя АЗ792 при отключении высоких токов, в т.ч., токов к.з. в отходящих силовых присоединениях (Рисунок 1.12). Процесс сопровождается повышением температуры дуги в диафрагме, увеличением напряжённости электрического поля, давления, из диафрагмы наблюдаются интенсивные потоки плазмы.

Исследованиями [67] установлено, что подсос газа в ядро дуги идёт вдоль стенок диафрагмы от обоих электродов. В центральном сечении диафрагмы газодинамические линии тока радиально втекают в ствол дуги, изменяют направление, газ интенсивно разогревается, выходит из диафрагмы противоположными симметричными потоками плазмы и ускоряется к электродам под действием собственных электромагнитных сил. При этом формируются разнообразные конфигурации изотерм и линий электрического тока (Рисунок 2.3). Предложенный метод позволяет исследовать форму и распределение потоков плазмы в зависимости от силы тока и диаметра диафрагмы (Рисунок 2.4).

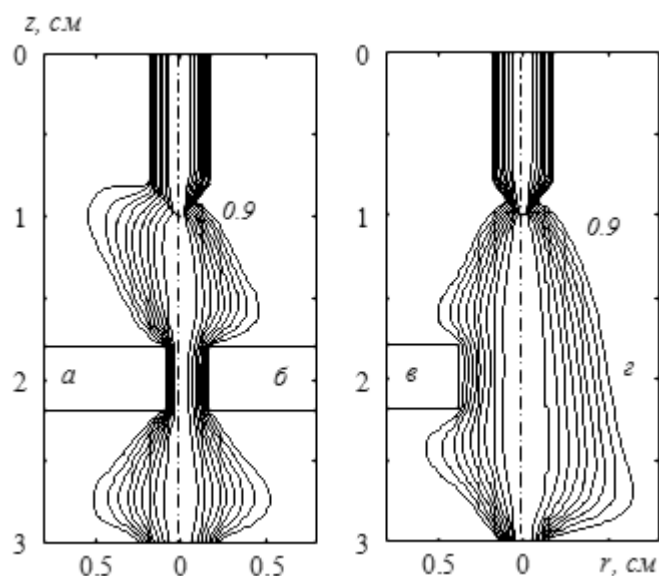


Рисунок 2.3 - Распределение линий электрического тока газа (шаг 0,1) в дуге ($I = 200$ А) в зависимости от диаметра диафрагмы: $d = 2$ (а); $d = 4$ (б); 8 (в); $d = 16$ (г) мм [67]

Применительно исследованию коммутационного дугообразования в АВ типа А3792 представляется целесообразным руководствоваться соображениями и выводами, согласованными с исследованием [69]:

- формирование устойчивого плазменного ядра происходит при токе, превышающем 35А, при этом размеры ядра растут пропорционально силе тока;
- с ростом тока увеличивается максимум температуры электродов, расширяется токопроводящий канал дуги, возрастают собственные электромагнитные силы, что ведёт к интенсивному ускорению и нагреву плазмообразующего газа;
- увеличение силы тока не меняет приведенный характер распределения, а сказывается только на конкретных значениях скорости дугообразования.

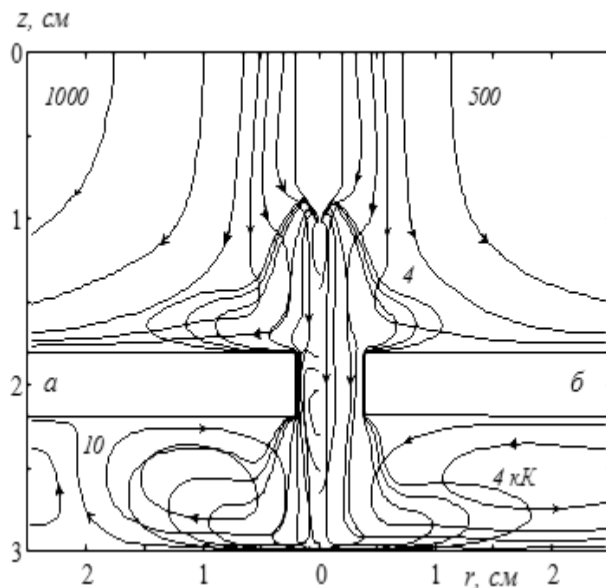


Диаграмма 1

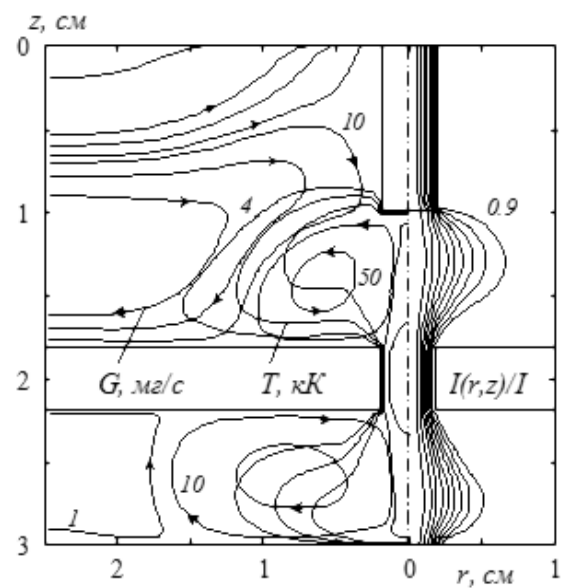


Диаграмма 2

Рисунок 2.4 - Распределение линий тока газа ($G = 1, 10, 50, 100, 200, 500, 1000$ мг/с) и поля изотерм (жирные линии $T = 4, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35$ кК) в дуге $I = 200$ А в зависимости от диаметра диафрагмы $d = 4$ (а); $d = 8$ (б) (диаграмма 1) и распределение линий тока газа ($G = 1, 10, 50, 100, 500$ мг/с), поля изотерм (жирные линии $T = 4, 7, 10, 15, 20$ кК) и линий электрического тока (с шагом 0,1) в дуге с плоским торцом катода; $I = 200$ А, $d = 4$ (диаграмма 2)

Анализируя эффект расширения плазмы в придиафрагменном пространстве и учитывая, что согласно [67], при диаметре диафрагмы, превышающим 16 мм, эффект расширения тела дуги в указанной области исчезает. Закономерность изменения радиуса r_{nl} распределения линий электрического тока газа в плазме зависит от диаметра d (мм) диафрагмы и в физических единицах (мм) применительно к эмпирическим данным, частично приведенным на рисунке 2.3, выражается зависимостью:

$$\begin{cases} r_{nl} = (16/d) - (9 - a); \\ a = 7 - 0,4375d + (d/2). \end{cases} \quad (2.17)$$

В общем случае, здесь представлена тенденция расширения тела дуги в придиафрагменном пространстве, если диаметр диафрагмы меньше диаметра дуги. Применительно к АВ типа А3792 канал перемещения плазмы коммутационной дуги является полостью дугогасительных камер, представляет собой форму неправильного треугольника с закруглёнными углами и, с учётом своих размеров и размеров зазоров (около 1 мм) между дугогасительной решёткой и силовым контактом, входит в область предельного параметра (16 мм). Это обуславливает вероятность проявления эффекта придиафрагменного расширения плазмы дуги, что соответствует практике эксплуатации автоматических выключателей А3792 в составе ТП (Рисунок 1. 12б).

2.3 Энергетические показатели коммутационного дугообразования в автоматическом выключателе в функциональной связи с геометрическими и тепловыми параметрами плазмы

Анализ исследований энергетических характеристик, процессов плазмообразования сильноточной электрической дуги, возникающей в воздухе в процессе коммутации цепи напряжения переменного тока позволяет сделать

вывод о том, что основанием для их выполнения служат экспериментальные данные о распределении температуры вдоль электродов, радиусах привязки дуги к электродам и т.п. Наибольшая сложность при моделировании связана с постановкой граничных условий вблизи электродов, где происходит взаимодействие плазмы с электродом, идут процессы интенсивного тепловыделения, осложнённые присутствием электромагнитного поля [69]. В этом случае важным фактором в получении исходного экспериментального материала исследования выступают результаты скоростной фото- видеосъёмки коммутационного дугообразования поля [70]. Принимая во внимание перечисленные доводы, представляется корректным использовать известные эмпирические данные, относящиеся к энергетике подобных коммутационных сильноточных дугообразований, апробированную методику и математические зависимости, характеризующие процессы, для определения энергетических показателей коммутационной дуги АВ типа А3792 в функциональной связи с геометрическими и тепловыми показателями плазмы, с учётом допущений:

- материалом всех электродов является медь (температура кипения материала 2835 К);

- ток дуги равен току трёхфазного к.з. на выходе трансформатора ТП и ограничен исключительно активными и индуктивными сопротивлениями вторичных его обмоток при частоте сети 50 Гц и линейном напряжении 1140 В;

- продолжительность тока дуги в исследуемом примере может находиться в пределах от 0,005 с до 0,2 с ;

- мощности трансформаторов ТП составляют: 630 кВА; 1000 кВА; 1250 кВА; 1600 кВА.

Применительно к влиянию на ресурс АВ практический интерес представляют функциональная зависимость диаметра и температуры столба коммутационной дуги от её тока, а также зависимость диаметра и скорости распространения потоков плазмы от продолжительности горения дуги.

Теоретические наработки, выполненные в этой области и изложенные в п.2.1; п.2.2, в обобщённом виде могут быть представлены выражениями [70]:

$$r_k = \left(\frac{2\lambda(T_m - T_0)}{W_{II}} \left(\sqrt{1 + \frac{I^2 W_{II}}{4\pi^2 \lambda^2 \sigma (T_m - T_0)^2}} - 1 \right) \right)^{1/2} \approx \sqrt{\frac{I}{\pi \sqrt{\sigma W_{II}}}} ; \quad (2.18)$$

$$p_m = \mu I^2 W_{II} / 8\pi^2 \lambda (T_m - T_0) \left(\sqrt{1 + \frac{I^2 W_{II}}{4\pi^2 \lambda^2 \sigma (T_m - T_0)^2}} - 1 \right), \approx \frac{\mu I}{4\pi} \sqrt{\sigma W_{II}} \quad (2.19)$$

где r_k – радиус канала дуги, p_m – давление на оси дуги, I и σ – ток и электропроводность дуги, λ – теплопроводность дугового канала, W_{II} – объёмная плотность энергии излучения (зависит от температуры T в стволе дуги, т.е. от мощности, поступающей в дугу, и определяется по кривым (Рисунок 2.5); T_0 , T_m – соответственно, температура столба дуги при достижении $\sigma = 0$ и максимальная температура столба дуги при минимальном электрическом сопротивлении.

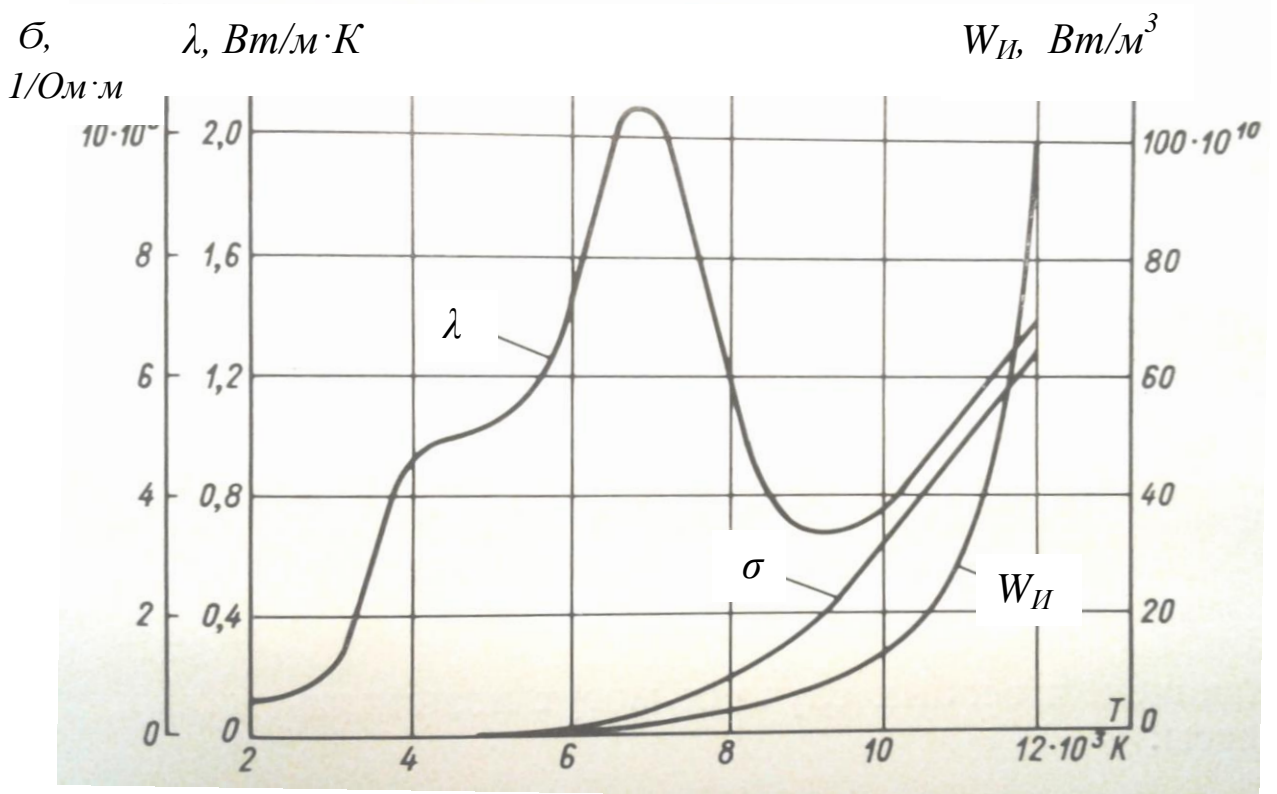


Рисунок 2.5 – Зависимость теплопроводности, электропроводности и удельных объёмных потерь на излучение в стволе дуги, горящей в воздухе, от температуры

Выражение (2.18) позволяет определить радиус столба коммутационной сильноточной электрической дуги в функциональной зависимости от её тока. С учётом исследований [70, 71] полагаем, что весь объём тела дуги насыщен продуктами испарения металла контактов (в устойчивом состоянии горения дуги).

Следует учитывать, что потоки плазмы состоят из отдельных частиц, имеющих массу и обладающих поэтому инерцией. Процесс коммутации цепи к.з., создающий плазму, характеризуется определённой инерционностью, т.к. нагрева поверхностей силовых контактов АВ до температуры плавления, кипения металла контактов также не протекает мгновенно.

Исследование параметров запаздывания образования потоков плазмы сильноточной электрической дуги основано на комплексе экспериментальных материалов (включая скоростную визуальную фиксацию процесса) и систематизированы в виде графических зависимостей (Рисунок 2.6) [72].

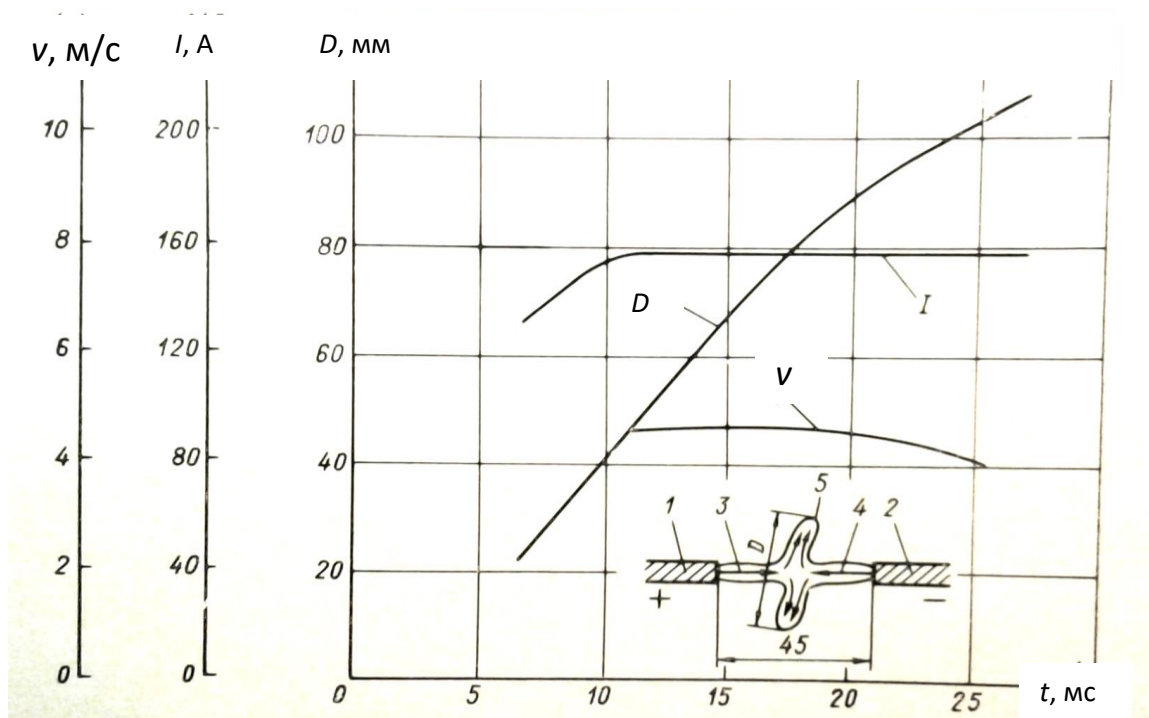


Рисунок 2.6– Зависимость тока (I), скорости (v) распространения потоков и диаметра (D) плазменного диска 5 при соосном расположении стержневых электродов от времени: 1, 2 – электроды; 3, 4 – потоки плазмы

Из диаграмм следует, что коммутационное дугообразование в сильноточной электрической цепи сопровождается образованием плазменного диска, диаметр которого имеет тенденцию увеличения на начальном этапе дугообразования от начального размера, соответствующего начальному диаметру столба дуги - диаметру поверхностей разъединяемых контактов. В этом случае правомерно говорить об изменении геометрических размеров столба дуги в целом. Так, в соответствии с [72], диаметр столба электрической дуги имеет близкую к линейной зависимость увеличения в диапазоне времени Δt от 0,005 с до 0,025 с при токах, меньших 300 А, и линейную в диапазоне времени Δt от 0,002 с до 0,015 с в сильноточных электрических цепях (Рисунок 2.7). Таким образом, расчётное максимальное значение диаметра D столба электрической коммутационной дуги может быть существенно уменьшено за счёт ограничения продолжительности t_k дугового коммутационного процесса.

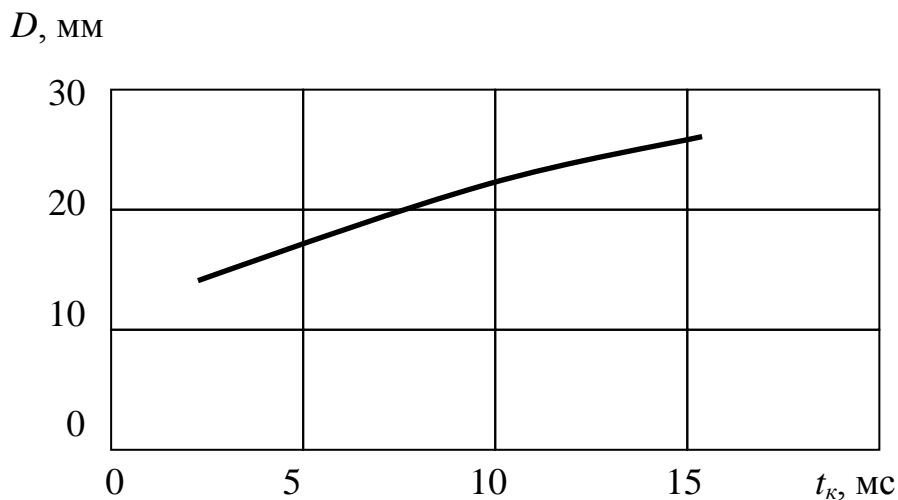


Рисунок 2.7 – Зависимость диаметра распространения потока плазмы при коммутации тока 1400 А от времени [70] на стержневых электродах

Исследование обобщений экспериментальных данных, представленных в [70, 72], позволяет получить регрессионную зависимость для плазмы сильноточной электрической дуги, горящей в воздухе (что соответствует коммутационному дугообразованию в АВ типа А3792), в диапазоне времени 0,002

$c \leq t_k \leq 0,015$ с в предположении, что начальный момент $D=2 r_k$, а t_k принимаем в секундах [73]:

$$D \approx r_k (2 + 1.1(t_k \cdot 10^3 - 2) / 6,4), \quad (2.20)$$

Анализируя коммутационное дуго- плазмообразование, с насыщением плазмы парами металла поверхностей силовых контактов, отдельного внимания заслуживает рассмотрение процесса испарения материала электродов. Так, согласно [58], начальная скорость $v_{нач}$ потока пара определяется уравнением:

$$v_{нач} = W / Q\rho, \quad (2.21)$$

где $W = \delta_3 U_3$ – поверхностная плотность энергии у электрода, δ_3 – плотность тока у электрода, U_3 – падение напряжения на электроде, Q – количество тепла, необходимое для испарения одного грамма материала электрода, ρ – плотность пара при испарении материала поверхности электрода.

Следует учитывать зависимость температуры T на поверхности электрода от плотности энергии W и времени $t_{дуг}$ (продолжительности) дугообразования:

$$T(t) = \frac{2W t_{дуг}^{1/2}}{(\pi\lambda c\rho)^{1/2}}, \quad (2.22)$$

где λ , c , ρ – теплопроводность, теплоёмкость, плотность материала электрода, соответственно.

Выражения (2.21) и (2.22) позволяют установить временной интервал горения дуги при конкретных величинах тока и напряжения, недостаточный для испарения поверхности металла электрода и насыщения плазмы парами металла. Следовательно, на начальном этапе коммутационного дугообразования сечение дуги уменьшено по сравнению с установившимся режимом и линейно возрастает, при этом насыщение дуги парами металла поверхности электрода происходит

спустя интервал времени, необходимый для разогрева электродов и начала процесса испарения металла с их поверхностей.

Таким образом, за счёт ограничения продолжительности дугообразования может быть примерно в 2 раза уменьшен диаметр плазмы дуги и ограничено её расширение в придиафрагменных областях на отдельных участках каналов дугогасительных камер. Отсюда следует вывод о приемлемости ограничения продолжительности дугообразования как способа ограничения энергетических параметров коммутационного процесса отключения автоматическим выключателем ТП междуфазного к.з. в отходящем присоединении.

2.4 Обоснование способа ограничения энергетических параметров коммутационного дугообразования при отключении автоматическим выключателем тока короткого замыкания

В ходе анализа функциональных возможностей способов и устройств ограничения токов к.з., применяемых в составе промышленных ЭТК, установлена невозможность их адаптации для управления коммутационным процессом отключения к.з. автоматическим выключателем ТП в контексте ограничения энергетических параметров коммутационного дугообразования. С учётом пропорциональности энергетических параметров процесса коммутационного дугообразования его времени протекания на начальном этапе горения дуги (п.2.3) представляется рациональным выполнять их ограничение управлением продолжительностью процесса. Такое решение обусловлено также тем, что задержки, определяемые собственными параметрами максимальной токовой защиты (МТЗ) и исполнительных коммутационных элементов требуют применения безынерционных токоограничивающих устройств. Очевидным техническим решением являлось бы применение плавких предохранителей в последовательной цепи каждой фазы силового присоединения. Однако вероятное аварийное состояние двухфазного к.з. (Рисунок 2.8) приведет в этом случае к перегоранию неполного комплекта предохранителей, что создаст потенциально

опасное состояние кабельной сети ЭТК после срабатывания защиты (на схеме: e_A, e_B, e_C - мгновенные значения фазного напряжения на выходе ТП; R_{mp}, L_{mp} - активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки трансформатора; $R_{к1}, L_{к1}, R_{к2}, L_{к2}$ - активное сопротивление и индуктивность ГК до и после точки к.з.; i_A, i_B, i_C - мгновенные значения фазных токов; R_s, L_{sl} - активное сопротивление и индуктивность статора АД).

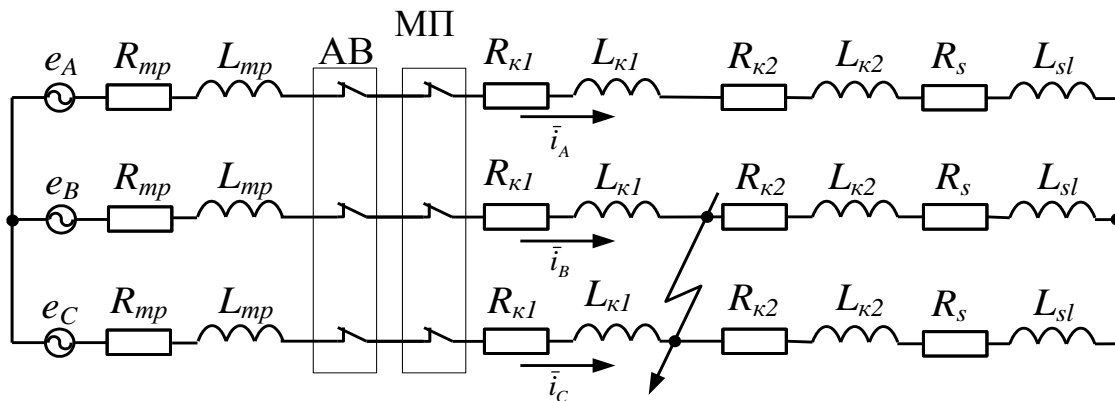


Рисунок 2.8 – Схема замещения ЭТК в состоянии двухфазного к.з.

Решением технического противоречия, обусловленного приемлемостью параметров быстрого действия защиты электросети плавкими предохранителями и недопустимостью их применения в последовательных подключениях в фазах трёхфазной сети с изолированной нейтралью трансформатора является техническое решение, представленное на рисунке 2.9 [74]. Данная схема предполагает разрыв цепи «звезда» вторичной трёхфазной обмотки трансформатора ТП в случае значительной токовой перегрузки, в частности, к.з. С этой целью фазные обмотки трансформатора подключаются ко входу выпрямителя, нагрузкой которого может быть предохранитель FU, либо однополюсный контактор (КМ), отключаемый по команде МТЗ. Эффективность такого решения состоит в одновременном, либо опережающем срабатывании по отношению к процессу штатного отключения АВ ТП. Это позволяет ограничить продолжительность тока к.з. и энергетические параметры дугообразования в контактных группах АВ. Параллельно предохранителю может быть подключен

резистор, что позволит снизить ток присоединениях трансформатора после разрыва цепи FU, либо КМ и защитить силовые цепи ТП от перенапряжений при разрыве цепи «звезда» вторичных обмоток трансформатора ТП.

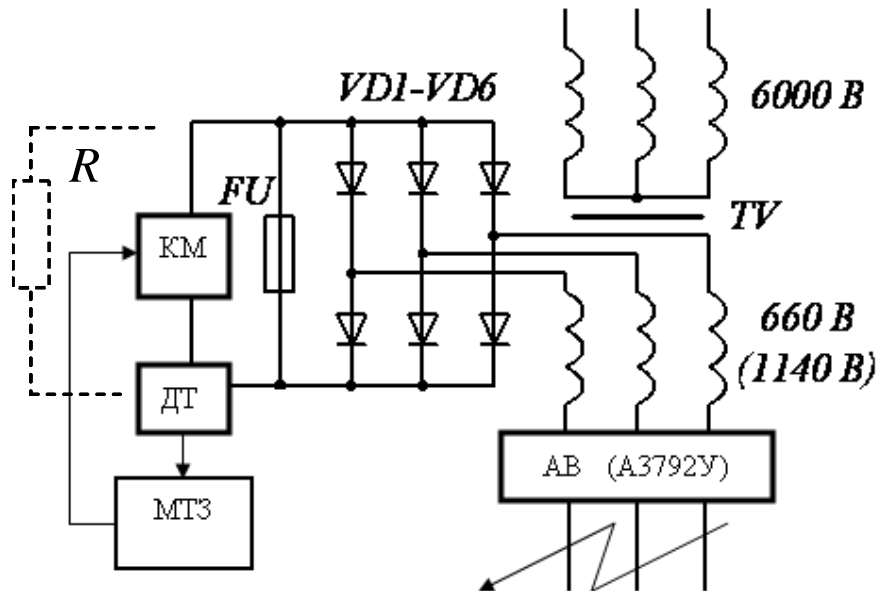


Рисунок 2.9 – Схема ускорения коммутационного процесса отключения к.з. автоматическим выключателем, адаптированная к сети напряжения 1140 В

Моделирование процесса токоограничения, который обеспечивается предлагаемым техническим решением, может быть выполнено на основе расчётной схемы (Рисунок 2.8) в предположении использования следующих структурных элементов и электрических параметров: номинальное линейное напряжение выхода ТП - 660 В; частота 50 Гц; Тип ТП - КТПВ – 1000 – 6/0,69; гибкий экранированный кабель марки КГЭШ 3x70 в цепи питания АД; длина кабеля 200 м; точка двухфазного к.з. – в 20 м от выхода ТП. Принято, что время срабатывания плавкого предохранителя с учётом величин токов к.з. не превышает 0,05 с. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.10, где индексом t_1 обозначен момент перегорания предохранителя, а также на рисунке 2.11, где представлены параметры схемы (Рисунок 2.9) при подключенном резисторе $R=50$ Ом к выходу выпрямителя VD1-VD6 и перегорании предохранителя FU [75, 76].

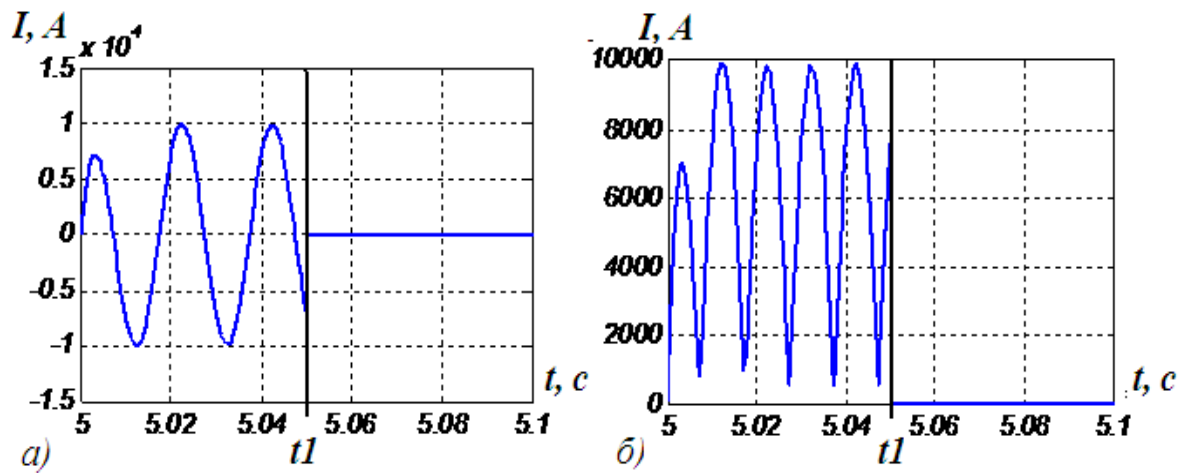


Рисунок 2.10- – Диаграммы величины тока двухфазного к.з. в сети 660 В (КТПВ-1000) с учётом срабатывания плавкого предохранителя (а) и величины тока на выходе выпрямителя VD1-VD6 (б) ($R = \infty$)

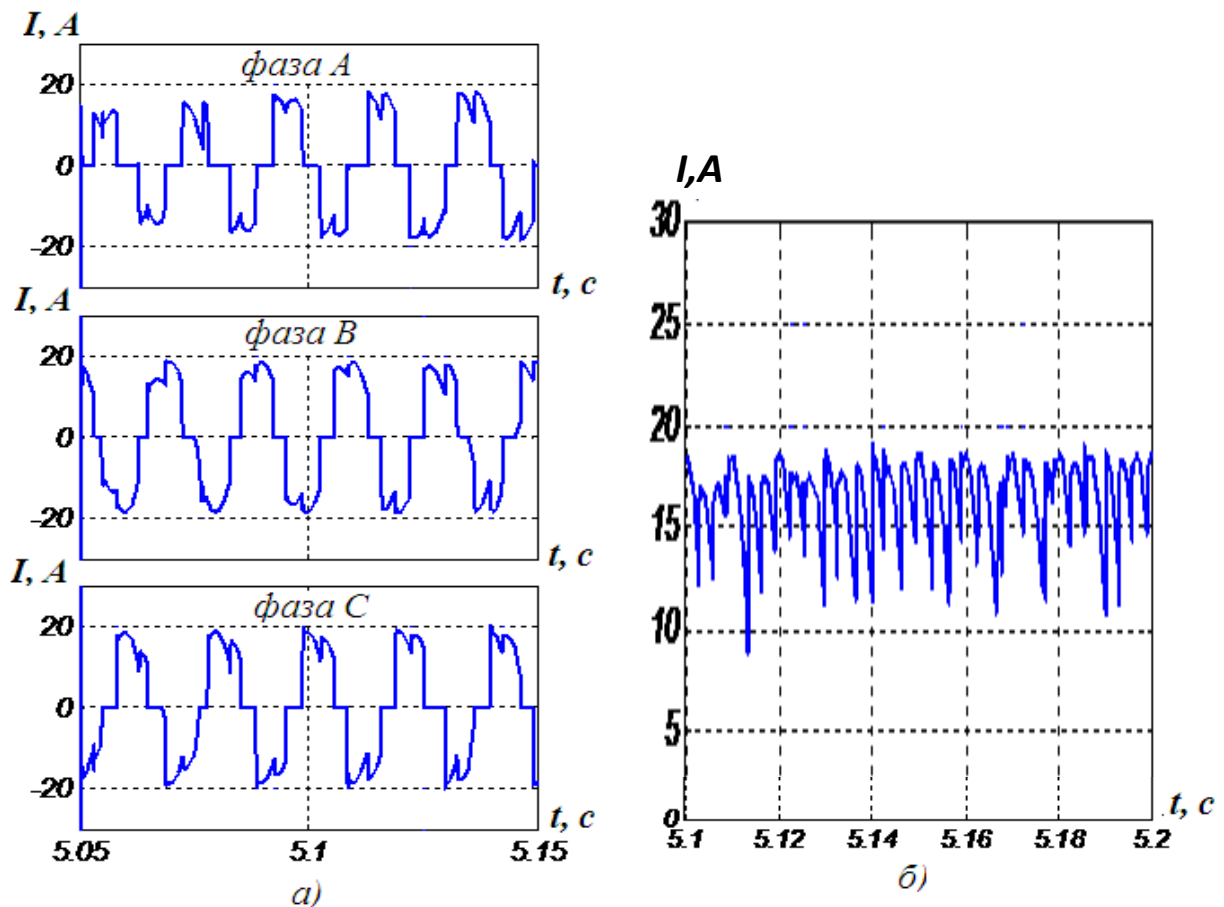


Рисунок 2.11 – Расчетные диаграммы фазных токов присоединения с цепью двухфазного к.з. при токоограничении резистором $R = 50$ Ом нагрузки выпрямителя (Рисунок 2.9) с учётом влияния обратных ЭДС АД (а) и величины тока на выходе выпрямителя (б)

Таким образом, схема (Рисунок 2.9) позволяет выполнить защитное разъединение цепи «звезда» вторичных обмоток трансформатора ТП при возникновении к.з. С учётом продолжительности перегорания предохранителя, на порядок меньшей, чем время срабатывания штатных средств максимальной токовой защиты, применение данной схемы может быть рассмотрено в качестве технического решения по управлению процессом коммутации (отключения) силового присоединения ТП, позволяющего ограничить энергетические параметры коммутационной электрической дуги за счёт сокращения времени дугообразования. Возможный отрицательный эффект от перенапряжения, вызванного перегоранием предохранителя FU в устройстве (Рисунок 2.9) может быть компенсирован параллельным подключением к нему резистора R.

2.5 Выводы по разделу 2

1. На основании комплексного анализа результатов исследований в плазмообразовании обоснована принципиальная возможность металлизации диэлектрических элементов конструкции автоматического выключателя А3792 как результат коммутационного плазмообразования при отключении высоких токов в сети напряжения, превышающего 1000 В. Конкретизированы факторы влияния на процесс дугового коммутационного плазмообразования и параметры дуговой плазмы, подлежащие исследованию применительно к конструкции элементов силовой коммутации автоматического выключателя А3792.

2. Разработана математическая модель коммутационного плазмообразования в процессе горения сильноточной электрической дуги, отличающаяся наличием функциональной зависимости сечения плазмы от продолжительности плазмообразования, учётом продолжительности нагрева поверхностей плазмообразующих силовых контактов и параметров расширения ствола плазмы дуги в придиафрагменных областях.

3. Установлена возможность предупреждения металлизации диэлектрических компонентов конструкции автоматического выключателя

А3792У за счёт предотвращения расширения и ограничения мощности столба плазмы электрической дуги методом ограничения продолжительности коммутационного дугообразования.

4. Собственное время срабатывания автоматического выключателя А3792, составляющее от 80 до 100 мс в диапазоне токов 5-15 кА создаёт все условия для начала и протекания процесса коммутационного плазмообразования при достижении диаметром плазмы установившегося значения; а собственное время срабатывания узла МТЗ устройства БЗУ-ТП в составе ТП (до 40 мс) не препятствует развитию плазмообразующих процессов при коммутации силовых электрических цепей.

5. Сравнивая функции токоограничения и ограничения продолжительности дугообразования в контексте противодействия плазмообразующим процессам, предпочтение следует отдать техническим решениям в области ограничения времени дугообразования, т.к. это позволит препятствовать разогреву поверхности контактов (что затруднит плазмообразование) и ограничить диаметр тела дуги (в сравнении с установившимся значением). В частности, при продолжительности дугообразования менее 10 мс, диаметр тела дуги может быть уменьшен в 2 и более раза.

6. Эффект ограничения энергетических показателей коммутационного дугообразования может быть достигнут схемой коммутации плавким предохранителем выхода мостового выпрямителя, объединяющего вторичные фазные обмотки трансформатора ТП в трёхфазную цепь. Данное техническое решение позволяет отключать цепь к.з. либо с опережением по отношению к срабатыванию штатных защитных устройств, либо совместно с ними, при снижении продолжительности процесса, что соответствует решению задачи ограничения энергетических параметров коммутационного дугообразования на уровне, недостаточном для создания условий металлизации диэлектрических элементов корпуса автоматического выключателя А 3792. Техническое решение, реализующее данную концепцию, защищено патентом Украины на изобретение.

РАЗДЕЛ 3

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ В СЕТИ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ

3.1 Анализ возможностей использования коммутатора обмоток трансформатора подстанции в качестве исполнительного устройства стабилизации напряжения питания удалённого электропотребителя

Разработанная схема (Рисунок 2.9) может быть рассмотрена в контексте реализации способа автоматической стабилизации (корректировки) величины напряжения питания АД высокой мощности удалённых потребителей участка шахты, актуальность которого обоснована в п. 1.4. Суть предложения поясняется схемами (Рисунок 3.1) и состоит в том, что трёхфазная вторичная обмотка трансформатора ТП может быть выполнена в расчёте на 1,05 величины номинального напряжения U_n участковой сети. Тогда регулирование выходного напряжения в диапазоне $0,95 U_n \leq U \leq 1,05 U_n$ представляется возможным при использовании в качестве выпрямителя (Рисунок 2.9) управляемой схемы в режиме фазового регулирования тиристоров VS1-VS6.

В качестве альтернативного может быть также рассмотрен принцип импульсной коммутации мостового выпрямителя VD1-VD6 ключевым силовым транзистором VT1. Данное техническое предложение основывается на следующем. Вопросы импульсного питания электроустановок неоднократно поднимались в разработках отраслевых научно-исследовательских институтов и в ряде случаев находили корректную практическую реализацию. В частности, в работе [77] представлены результаты исследований и разработок в области повышения эффективности электропитания силовых рудничных потребителей постоянного тока на основе использования электрогенерирующих установок с импульсными силовыми полупроводниковыми переключателями. Обоснованные,

структурные и принципиальные решения схем, а также результаты экспериментов позволяют сделать вывод о принципиальной возможности распространения импульсных способов коммутации и на шахтные участковые электросети переменного тока.

Косвенно приемлемость импульсной коммутации силовой нагрузки (АД) в промышленной электросети переменного тока может быть обоснована положительным опытом применения в промышленности принципа широтно-импульсной модуляции (Рисунок 1.23), реализуемого в системе «преобразователь частоты со звеном постоянного тока – асинхронный двигатель» (Рисунок 1.22).

Принцип автоматического управления процессом стабилизации напряжения питания удалённого АД высокой мощности поясняется схемой (Рисунок 3.2) [78].

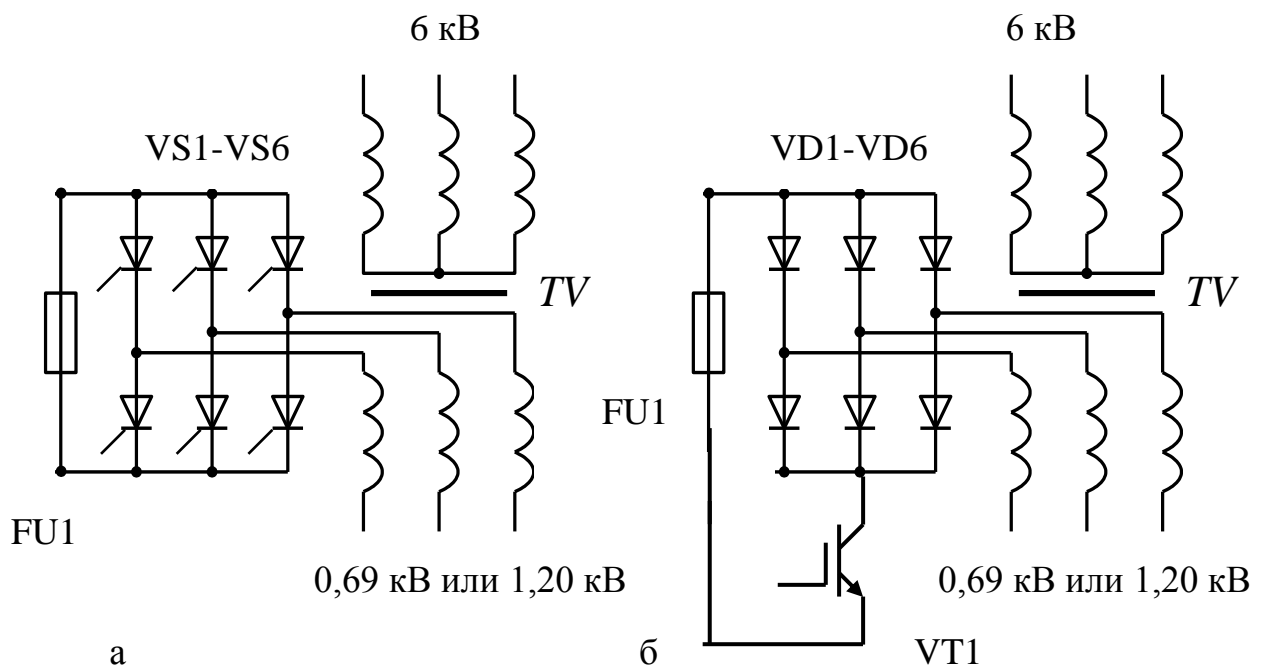


Рисунок 3.1 – Варианты схем ограничения энергетических параметров цепи отключения к.з. в присоединении ТП, адаптированных к функции автоматической стабилизации величины напряжения питания удалённого АД высокой мощности на основе применения: управляемого выпрямителя (а); полупроводникового коммутатора (б)

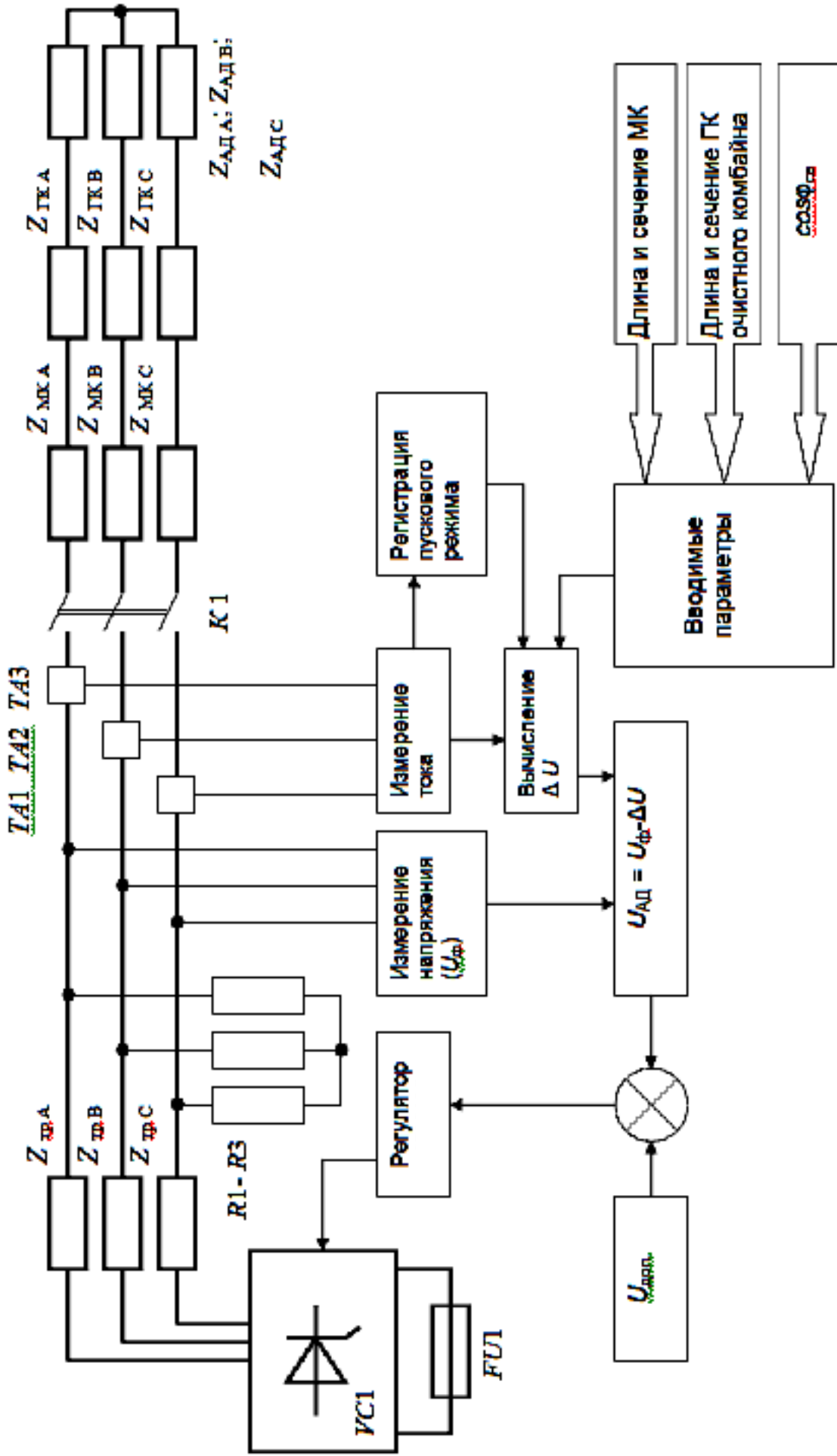


Рисунок 3.2— Функциональная схема устройства стабилизации напряжения питания удалённого АД высокой мощности на основе применения схемы коммутационного устройства ускорения отключения к.з..в присоединении комплектной трансформаторной подстанции

Он состоит в следующем. Трансформатор ТП участка представлен фазными вторичными обмотками с комплексными сопротивлениями $z_{трА}$, $z_{трВ}$, $z_{трС}$. Магистральный (МК) и гибкий (ГК) кабели, а также статор АД потребителя представлены комплексными сопротивлениями, соответственно, $z_{МКА}$, $z_{МКВ}$, $z_{МКС}$; $z_{ГКА}$, $z_{ГКВ}$, $z_{ГКС}$; $z_{АДА}$, $z_{АДВ}$, $z_{АДС}$. Отличительной особенностью является увеличение на 5% по сравнению с номинальным напряжения на вторичных обмотках трансформатора ТП. Это позволяет средствами управляемого выпрямителя (VC1) в режиме фазового управления регулировать величину выходного напряжения ТП в диапазоне $0,95 U_n \leq U_\phi \leq 1,05 U_n$ (где U_ϕ – измеренное, фактически существующее напряжение на выходе ТП). Выпрямитель VC1, нагруженный предохранителем FU1, представляет собой структуру устройства (Рисунок 2.9). Его исходное проводящее состояние при отключенных коммутационных аппаратах (обобщённый элемент K1) обеспечивается наличием балластных резисторов R1, R2, R3, присоединённым к фазам сети на выходе ТП и включенным в схему «звезда».

Принцип автоматической стабилизации напряжения на статоре АД удалённого электропотребителя с АД высокой мощности основан на вычислении фактического напряжения на статоре двигателя $U_{АД}$, сравнении его с заданным допустимым напряжением $U_{доп.}$ и формировании корректирующей команды в функции разности заданного и фактического параметров посредством управления величиной углов α отпирания тиристоров VS1-VS6 выпрямителя (Рисунок 3.1, а), либо посредством изменения скважности импульсов коммутации ключевого транзистора VT1 (Рисунок 3.1,б), следующих со стабильной частотой f_k .

Вычисление параметра $U_{АД} = U_\phi - \Delta U$ осуществляется на основании зависимостей (1.12 – 1.14) в номинальном режиме работы электроприводов технологического участка и зависимостей (1.16 – 1.19) в режиме пуска удалённого АД высокой мощности. Соответствующее переключение обеспечивается регистратором пуска, действующим в функции измерения величины фазного тока электросети. Вычисление параметра ΔU осуществляется на основе использования измеренного параметра тока сети с учётом величин активных и индуктивных

сопротивлений гибкого (ГК) кабеля очистного комбайна, магистрального кабеля (МК). Параметры вводятся персоналом как функции сечений и длин соответствующих кабелей. В число вводимых параметров входит расчётная величина средневзвешенного коэффициента мощности $\cos\varphi_{\text{св}}$ потребителей технологического участка.

В связи с относительно небольшим диапазоном регулирования параметра $U_{\text{ф}}$ и, соответственно, угла α отпираания тиристоров VS1-VS6 выпрямителя предполагается, что процесс будет протекать при минимальном искажении синусоид выходных фазных напряжений ТП (Рисунок 3.3).

Существенным преимуществом схем (Рисунок 3.1) в сравнении с общепринятым способом применения тиристорного регулятора напряжения при его расположении между питающим трансформатором и АД потребителя (Рисунок 1.19) является подключение силовых полупроводниковых структур к обмоткам питающего трансформатора со стороны, противоположной подключению к ним кабелей питания АД потребителей. Это препятствует проявлению возмущающих воздействий обратных ЭДС со стороны статоров АД в отношении силовых полупроводниковых регуляторов и способствует стабильности параметров, формируемых в электрической сети участка шахты.

Импульсное регулирование величины выходного напряжения трансформатора ТП согласно схемы (Рисунок 3.1а), предполагает коммутацию тока с выхода выпрямителя VD1-VD6 на цепь предохранителя FU1 с заданной частотой f_k , превышающей частоту сети f_c . Преимущества данного способа по сравнению с применением регулируемого выпрямителя (Рисунок 3.1а) заключается в упрощении схемы, в существенном уменьшении количества регулируемых элементов, что снижает вероятность отказа, обусловленного сбоями системы управления, выходом из строя тиристора выпрямителя. При этом сохраняется форма синусоид выходных фазных напряжений, а наличие коротких по времени нулевых уровней напряжения в синусоидах (Рисунок 3.4) делает процесс сопоставимым с широтно-импульсной модуляцией выходных

напряжений преобразователя частоты, широко применяемой при управлении электроприводами, в т.ч. горных машин.

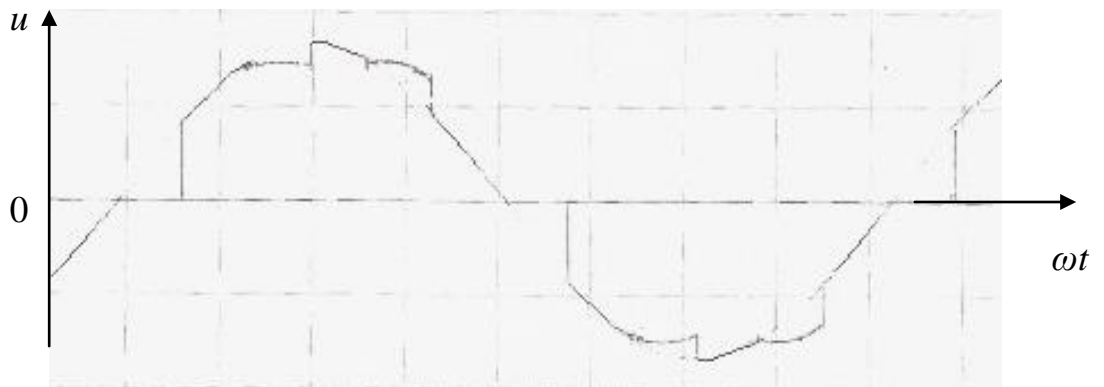


Рисунок 3.3 – Форма кривой напряжения на фазе трёхфазной активной нагрузки трансформатора ТП при фазовом регулировании тиристоров выпрямителя схемы (Рисунок 3.1а): угол α отпирания тиристоров 30 эл. град.

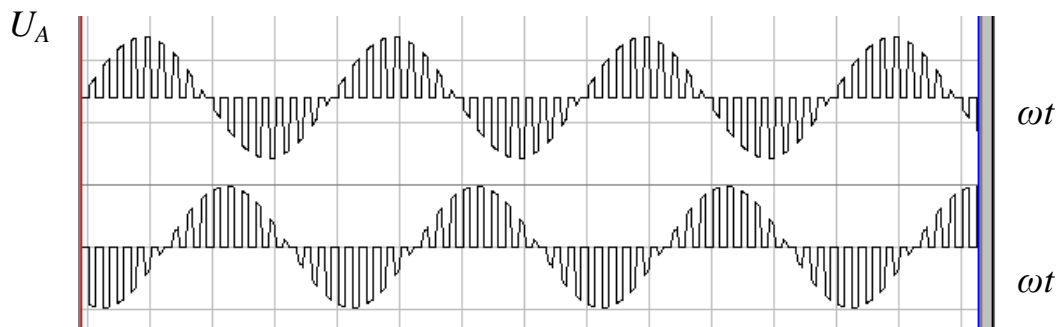


Рисунок 3.4 – Расчётные диаграммы форм напряжений двух фаз вторичной трёхфазной обмотки трансформатора ТП при импульсном регулировании их действующего значения согласно схеме (Рисунок 3.1б) при работе на активную нагрузку. Частота коммутации $f_k = 900$ Гц, скважность импульсов – 50%

Применительно к импульсному регулированию величины трёхфазного напряжения на присоединениях выхода трансформатора ТП принципиальное значение имеет выбор способа управления полупроводниковым ключом VT1, обеспечивающего строгую симметрию форм фазных напряжений в полуволнах и фазах. Учитывая, что период напряжения формируется шестью комбинациями

проводящих состояний диодов VD1 – VD6 выпрямителя, логично допустить, что каждой такой комбинации должно соответствовать одинаковое по количеству импульсов кратковременное прерывание проводящего состояния. Это определяет отношение частоты коммутации $f_{к.}$ ключевого элемента VT1 (Рисунок 3.1б) к частоте f_c сети (при условии, что n – число натурального ряда):

$$f_{к.} = 6n \cdot f_c \quad (3.1)$$

Правильность этого решения подтверждается исследованием модели, (Рисунок 3.5) имитирующей работу схемы (Рисунок 3.1б), в частности, формами выходных напряжений трансформатора ТП при $f_{к.} = 300$ Гц и при $f_{к.} = 200$ Гц, (Рисунок 3.6).

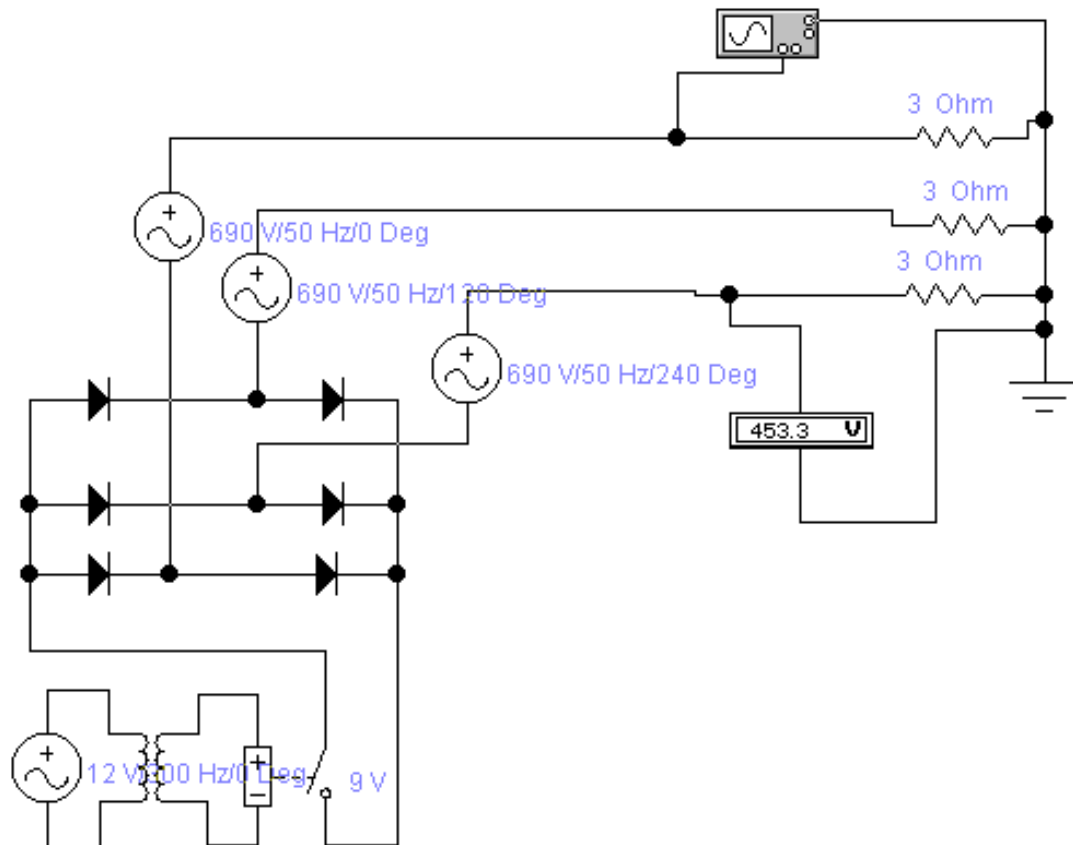


Рисунок 3.5 – Компьютерная модель, имитирующая работу схемы (Рисунок 3.1б) на активную нагрузку

Поскольку процесс регулирования сопровождается некоторым искажением форм фазных напряжений, в отличие от синусоиды, представляется целесообразным установить уровень количественных показателей такого искажения. Этой цели соответствует гармонический анализ фазного напряжения как периодической величины, который предполагает следующую последовательность действий [79]:

- полупериод основной гармоники исследуемого напряжения разбивается на m равных частей $\Delta x = \pi / m$;

- рассчитываются суммы: $A'_k = 2\sum f(x)\sin kx/m$ и $A''_k = 2\sum f(x)\cos kx/m$ (k - номер гармоники; $f(x)$ – функция кривой, в каждой конкретной точке её можно записать ординатой графика периодической функции);

- рассчитывается амплитуда k – й гармоники $A_k = \sqrt{A'^2_k + A''^2_k}$ и угол сдвига относительно основной гармоники $\psi_k = \arctg A''_k / A'_k$.

По знаку $\sin kx$ и $\cos kx$ устанавливается квадрант расположения угла ψ_k , что необходимо для построения высших гармонических составляющих периодического сигнала.

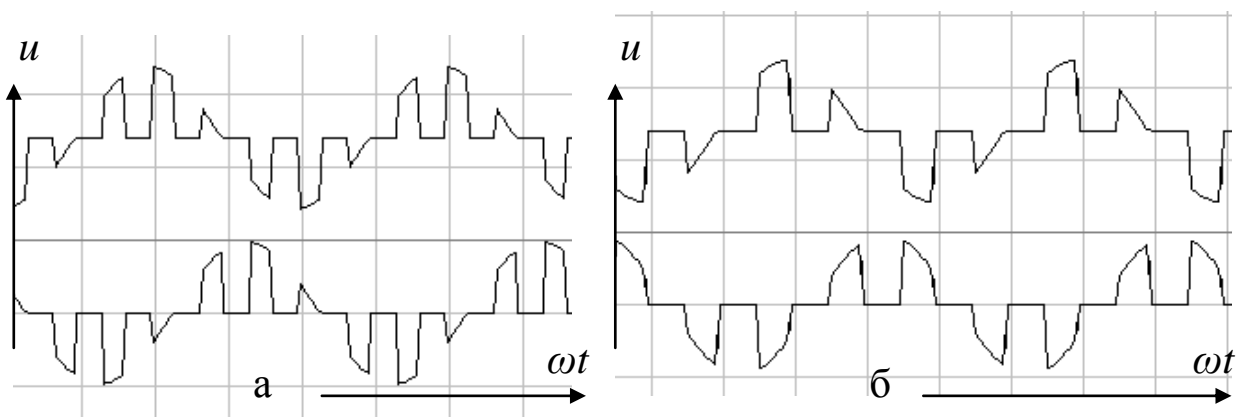


Рисунок 3.6 – Расчётные диаграммы форм напряжений двух фаз вторичной трёхфазной обмотки трансформатора ТП при импульсном регулировании их действующего значения, полученные на модели (Рисунок 3.5) при работе на активную нагрузку: а – частота коммутации $f_k = 300$ Гц; б – частота коммутации $f_k = 200$ Гц; скважность импульсов – 50%

Поскольку кривые фазных напряжений при регулировании схемой (Рисунок 3.1а; Рисунок 3.1б) представляют собой функцию, изменяющуюся периодически как в первую, так и во вторую половину периода, эти фазные напряжения могут включать в себя только нечётные гармоники.

Получены данные, позволяющие утверждать, что как при фазовом, так и при импульсном регулировании в формах фазных напряжений на нагрузке ТП превалирует 1-я гармоника (промышленной частоты). Удельный вес высших гармоник 5-й; 7-й, а также колебательной 3-й гармоники крайне невелик. Поэтому следует ожидать, что такой принцип регулирования не окажет негативного воздействия на работу АД потребителей участка шахты.

Так, кривая фазного напряжения u_ϕ , приведенная на рисунке 3.3 (фазовое регулирование тиристоров VS1-VS6 мостового выпрямителя схемы по рисунку 3.1а, при величине угла отпирания $\alpha = 30$ эл. град) описывается функцией:

$$u_\phi = 0,948U_m(\sin\omega t + 1,5^0) + 0,056U_m(\sin 3\omega t - 35,9^0) + 0,04U_m(\sin 5\omega t - 35,9^0) + 0,034U_m(\sin 7\omega t - 7,2^0) + \dots \quad (3.2)$$

где U_m – амплитуда фазного напряжения трансформатора ТП при полностью открытых тиристорах выпрямителя схемы по рисунку 3.1а.

В отношении импульсного регулирования по схеме (Рисунок 3.1б) практический интерес представляет определение приемлемых диапазонов времени (в течение периода напряжения сети) формирования импульсных отключений полупроводникового ключа VT1. При частоте коммутации $f_k = 300$ Гц ($f_k = 6n \cdot f_c$ при $n=1$) на каждый полупериод выходного напряжения ТП должно приходиться три интервала отключения ключевого элемента VT1 одинаковой продолжительности, отстоящих друг относительно друга (по начальным моментам времени) на 60 эл. град. В этом случае могут быть выделены два принципиально различных состояния: интервалы отключения элемента VT1 смещены либо к началам, либо к концам полуволн фазных напряжений.

В первом случае, когда первый интервал отключения элемента VT1 находится в диапазоне углов $0 \leq \gamma \leq 20$ (эл. град.) относительно начала полуволны соответствующего фазного напряжения u_ϕ трансформатора ТП, второй и третий интервалы отключения не перекрывают амплитуду синусоиды этого напряжения. В частности, при $\gamma = 10$ эл. град. и продолжительности импульсов отключения элемента VT1 $\Delta\gamma = 7,5$ эл. град. это напряжение u_ϕ описывается выражением:

$$u_\phi = 0,879U_m(\sin\omega t - 0,5^0) + 0,003U_m(\sin 3\omega t - 16,7^0) + 0,124U_m(\sin 5\omega t + 89,9^0) + 0,126U_m(\sin 7\omega t - 88,9^0) + \dots \quad (3.3)$$

В первом случае, когда первый интервал отключения элемента VT1 находится в диапазоне углов $20 \leq \gamma \leq 40$ (эл. град.) относительно начала полуволны соответствующего фазного напряжения u_ϕ трансформатора ТП, второй и третий интервалы отключения не перекрывают амплитуду синусоиды этого напряжения. В частности, при $\gamma = 25$ эл. град. и продолжительности импульсов отключения элемента VT1 $\Delta\gamma = 7,5$ эл. град. это напряжение u_ϕ описывается выражением:

$$u_\phi = 0,877U_m(\sin\omega t - 0,6^0) + 0,004U_m(\sin 3\omega t - 58,8^0) + 0,13U_m(\sin 5\omega t + 0,9^0) + 0,121U_m(\sin 7\omega t + 0,13^0) + \dots \quad (3.4)$$

Важным результатом следует считать установление принципиальной возможности регулирования величины напряжения на выходе ТП импульсным способом, выявление отсутствия колебательной 3-й гармоники в полуволнах выходного напряжения ТП и формирование минимальных уровней амплитуд других высших гармоник, что является основанием для рекомендации этого способа к дальнейшему использованию.

3.2 Обоснование алгоритмов автоматического управления коммутационными процессами в системе электроснабжения участка шахты

Способ ограничения энергетических параметров коммутационного дугоплазмообразования в процессе отключения цепи к.з. автоматическим выключателем ТП, реализуемая схемой (Рисунок 2.9) предполагает выполнение разрыва схемы соединения вторичных обмоток трансформатора ТП в трёхфазную цепь вследствие плавления плавкого элемента предохранителя. Этот способ не предусматривает процедуры измерения тока защищаемой цепи, сравнения с током уставки и, кроме этого, не предусматривает механических перемещений функциональных узлов исполнительных элементов защитного отключения, что иллюстрируется блок-схемой алгоритма данной защитной функции (Рисунок 3.7).

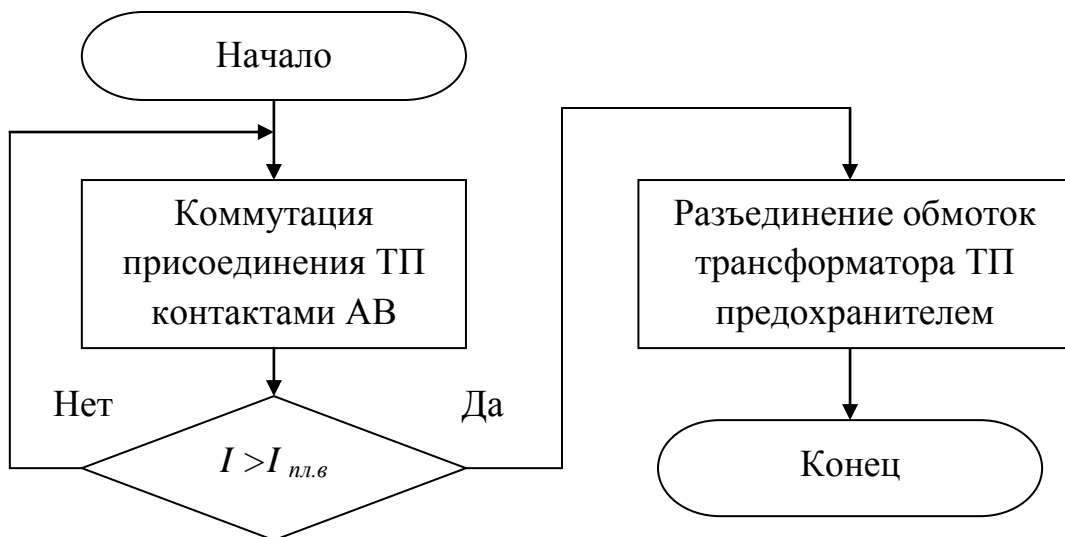


Рисунок 3.7 - Алгоритм ускоренного разъединения устройством (Рисунок 2.9) обмоток трансформатора ТП в силовой цепи АВ при отключении к.з.

Указанные особенности определяют быстродействие защитной функции в сравнении с функцией МТЗ, осуществляемой штатными измерительными и исполнительными средствами, входящими в структуру ТП, что иллюстрируется блок-схемами (Рисунок 3.8).

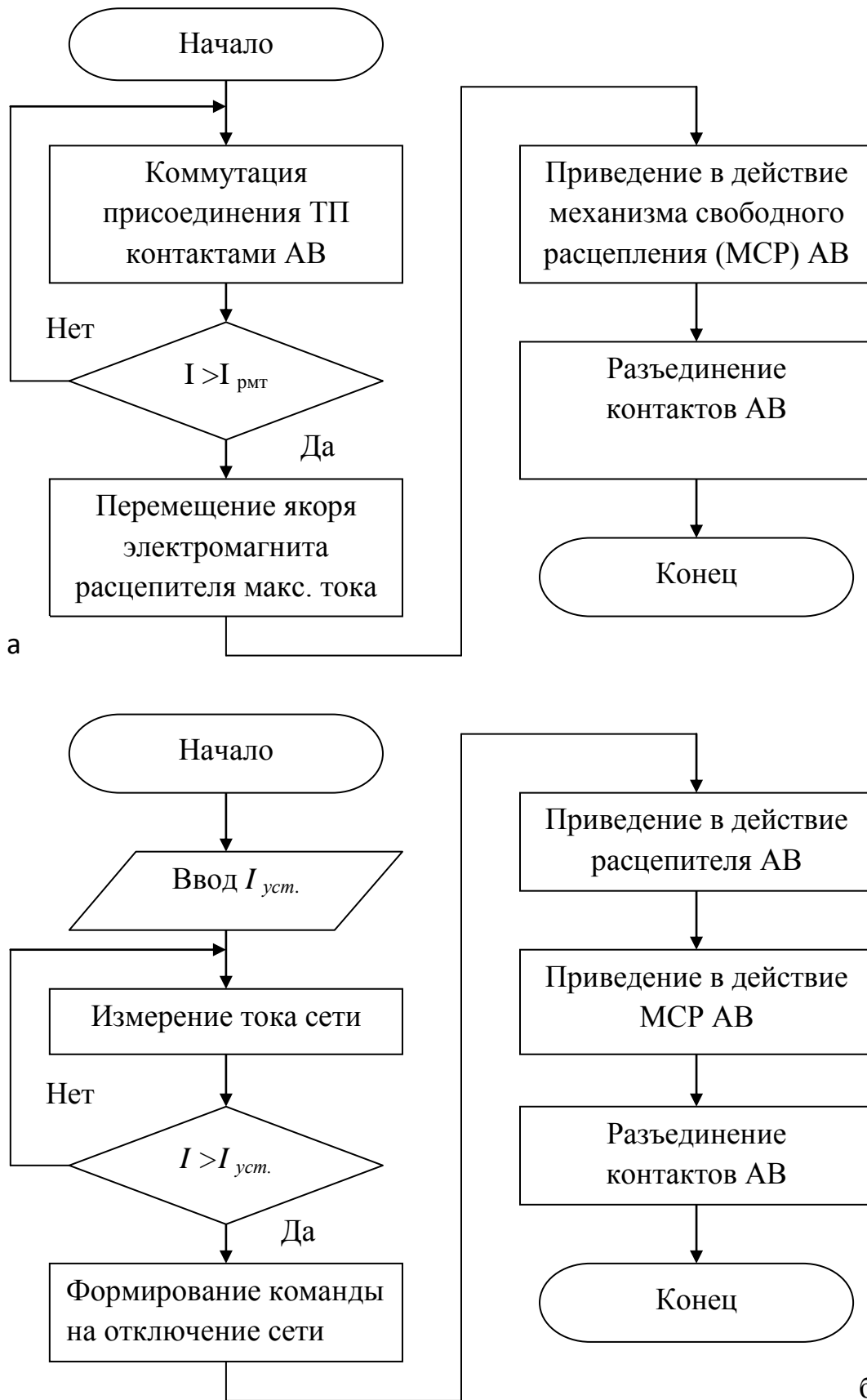


Рисунок 3.8 – Алгоритмы защитного отключения к.з. автоматическим выключателем ТП при срабатывании расцепителя максимального тока АВ (а); при срабатывании дополнительной МТЗ (блок БЗУТП) (б)

Как следует из анализа блок-схем алгоритмов функционирования МТЗ выходных присоединений ТП, несмотря на дублирование данной функции, как применение расцепителя максимального тока АВ (Рисунок 3.8а), так и применение дополнительной МТЗ с воздействием на расцепитель (независимый, либо нулевой) АВ ТП (Рисунок 3.8б) предполагает выполнение дополнительных процедур, каждая из которых создаёт задержку времени. Это подтверждает предположение о свойстве применяемых средств защиты силовой электрической сети участка шахты задерживать защитное отключение на время, достаточное для полного развития процесса коммутационного плазмообразования с максимальным расширением столба плазмы в придиафрагменных областях дугогасительных камер автоматического выключателя ТП. Таким образом, применение схемы (Рисунок 2.9) является рациональным и целесообразным техническим решением [73].

Распространение данной схемы на процесс стабилизации величины напряжения питания удалённого асинхронного электропривода высокой мощности иллюстрируется блок-схемой алгоритма (Рисунок 3.9) [78]. Условием реализации способа является применение трансформатора ТП, формирующего рабочие фазные напряжения (не относящиеся к режиму холостого хода), составляющие 1,05 от номинального фазного напряжения сети. Т.е., применительно к величине номинального линейного напряжения сети 1140 В величина номинального фазного напряжения трансформатора ТП должна составлять не 660 В, а 690 В. В соответствии со структурой (Рисунок 3.2) вводными данными САУ коммутационным процессом являются величины длин и сечений магистрального кабеля и гибкого кабеля электропитания удалённого электропотребителя, величина средневзвешенного коэффициента мощности электропотребителей участка, величина максимально допустимого напряжения электропитания потребителя ($U_{\max.} = 1140$ В) и величины минимально допустимых напряжений его электропитания в пусковом режиме ($U_{\text{donI}} = 0,8 U_n$) и в номинальном режиме ($U_{\text{donI}} = 0,9 U_n$), а также величина опорного тока (I_{on}), характеризующая наличие/отсутствие пускового режима.

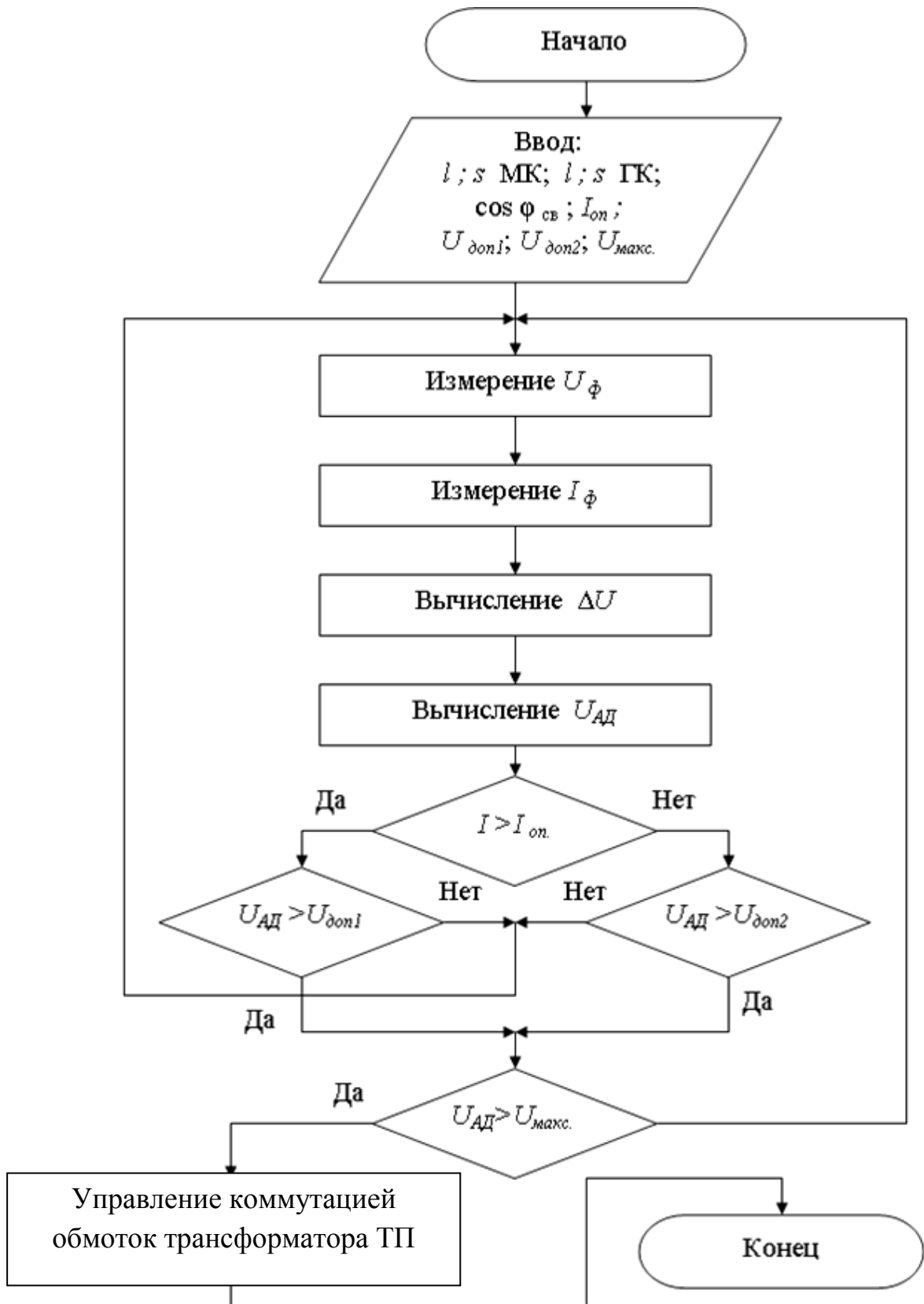


Рисунок 3.9 – Алгоритм процесса стабилизации величины напряжения питания удалённого электропотребителя средствами управляемой коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП

Таким образом, алгоритм предусматривает, что в исходном состоянии выходное линейное напряжение трансформатора ТП будет увеличено до $1,05 U_n$, что даст возможность его снижения средствами коммутации обмоток, представленных схемами (Рисунок 3.1) в случае, если напряжение на двигателе $U_{АД}$ превышает величину $U_{макс.}$. Вычисление величины напряжения $U_{АД}$ осуществляется на основе вводных данных способом, описанным в п. 3.1.

Техническая реализация процесса ограничения (снижения) величины напряжения $U_{АД}$ возможна как методом фазового регулирования тиристорных мостового выпрямителя (Рисунок 3.1 а) в диапазоне углов регулирования от нуля до 60 эл. град., так и методом импульсного регулирования коммутацией силового полупроводникового ключа трёхфазной цепи вторичных обмоток трансформатора ТП (Рисунок 3.1б) с частотой 300 Гц и заданными величинами фазового угла первого импульса отключения (γ) проводимости фазных обмоток в полуволне фазного напряжения и продолжительности ($\Delta\gamma$) такого импульса.

3.3 Выводы по разделу 3

1. Обоснован способ автоматического управления процессом коммутации вторичных обмоток трансформатора участковой ТП, реализация которого позволяет поддерживать величину напряжения питания удалённого электропотребителя с асинхронным двигателем высокой мощности на уровне, близком к номинальному. Необходимым условием выполнения данной функции является применение трансформатора ТП при величине выходного фазного напряжения, составляющей 1,05 от номинальной величины. Вариантами реализации данного способа являются фазовое регулирование мостовой схемы, объединяющей в трёхфазную цепь вторичные обмотки трансформатора ТП, либо импульсная их коммутация с заданной продолжительностью $\Delta\gamma$ бестоковых пауз.

2. Разработаны алгоритм функционирования и функциональная схема устройства автоматической стабилизации величины напряжения, подводимого к удалённому АД высокой мощности, действие которого основано на определении

величины напряжения на зажимах двигателя на основе измерения напряжения на выходе ТП и вычисления потерь напряжения в элементах электросети и формировании управляющего воздействия применительно к цепи коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП при условии превышения вычисленным значением напряжения на зажимах АД величины номинального напряжения.

1. Моделированием процесса корректировки величины выходного напряжения трансформатора (в диапазоне 10% от номинальной величины) на основе применения фазового регулирования тиристорных выпрямителей в цепи коммутации вторичных обмоток, а также на основе применения импульсной коммутации вторичных обмоток с частотой $f_k = 6n \cdot f_c$ установлено преобладание 1-й гармоники в форме полуволн выходных фазных напряжений подстанции, минимальные уровни напряжений высших гармоник при отсутствии 3-й (колебательной) гармоники, что не противоречит применению данных способов при эксплуатации промышленных участков электротехнических комплексов шахты, оснащённых АД.

2. Установлено, что при реализации процесса корректировки выходного напряжения ТП участка шахты (в диапазоне от 1,05 до 0,95 номинальной величины) способом импульсной коммутации вторичных обмоток её трансформатора симметрия форм фазных напряжений будет обеспечена, если импульсы коммутации будут следовать с частотой $f_k = 6n \cdot f_c$ (где n – число натурального ряда), при этом предпочтительным условием по критерию приближения формы выходного напряжения трансформатора к синусоиде является: $n=1$; формирование первого (из группы) импульса кратковременного разъединения трёхфазной схемы вторичных обмоток трансформатора – в диапазоне углов $0 \leq \gamma \leq 20$ (эл. град.) относительно начала полуволны соответствующего фазного напряжения.

РАЗДЕЛ 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА, ПИТАЮЩЕГО СИЛОВОЕ ПРИСОЕДИНЕНИЕ

4.1 Структура стенда и методика экспериментального исследования процессов ограничения энергетических параметров коммутационного дугообразования при отключении короткого замыкания

Выполненные теоретические разработки и рекомендации предполагают проведение экспериментальных исследований с целью установления фактических показателей эффективности обоснованного направления в области ограничения энергетических показателей процессов в цепи защитного отключения трёхфазного к.з. в силовом присоединении выхода шахтной участковой ТП. Такая трактовка представляется более уместной в сравнении с термином «токоограничение», поскольку применение плавкого предохранителя (без параллельного подключения резистора) в цепи разъединения «звезды» вторичных обмоток трансформатора ТП (Рисунок 3.1) предполагает сокращение продолжительности коммутационного дуго-плазмообразования. Применение параллельного соединения предохранителя и резистора в данной схеме создаёт эффект первоначального ограничения продолжительности тока к.з. с последующим ограничением его величины (в течение остаточного времени срабатывания автоматического выключателя подстанции). И в одном, и во втором случае может быть достигнуто снижение энергетических параметров процесса коммутационного дугообразования, что призвано решить задачу ограничения температурных параметров силовых контактов автоматического выключателя на уровне, не достаточном для насыщения плазмы электрической дуги парами металла с концентрацией, достаточной для последующего напыления на диэлектрических элементах внутренней части корпуса данного аппарата.

Специфика экспериментов заключается в практической невозможности их проведения на реальном объекте в виду крайне высоких мощностей реальных трёхфазных к.з. в промышленной электросети напряжения 1140 В, в присоединениях трансформаторных подстанций высоких мощностей (630 кВА, 100 кВА, 1250 кВА, 1600 кВА и т.п.).

Подобные опыты, предполагающие создание реальных междуфазных к.з. характеризуются опасностью воспламенения электрооборудования, и защитным отключением высоковольтных коммутационных устройств в муниципальных электрических сетях внешних присоединений. В связи с этим, целесообразно создание физической модели с масштабированием параметров реального объекта. Практическую актуальность представляет выяснение возможностей предохранителя как сопутствующего защитного элемента, последовательно соединённого в цепи силовых контактов автоматического выключателя, ускоренно, либо совместно с другими видами максимальных токовых защит реагировать на междуфазные к.з. в присоединении, отходящем от автоматического выключателя. В этой связи в качестве сопоставимых средств МТЗ должны рассматриваться расцепители максимального тока АВ а также дополнительная внешняя МТЗ, воздействующая на независимый расцепитель автоматического выключателя. Поскольку оперативным параметром реагирования выступает ток, в составе экспериментального стенда должен быть регулируемый источник тока трёхфазной цепи.

Это определяет структуру лабораторного стенда (Рисунки 4.1, 4.2) [80]. Трёхфазное напряжение сети 380 В преобразуется силовым автотрансформатором TV1 (АТМК-250) в напряжение регулируемой величины в диапазоне от 5 В до 400 В. В последующем оно поступает на нагружающий силовой трансформатор TV2 (ТСУ-160), имеющий понижающий коэффициент трансформации $k_{mp} = 10$. Это создаёт возможность подключить к выходу вторичной трёхфазной обмотки трансформатора TV2 цепь к.з. и создать в ней ток до 6000 А. В качестве внешней цепи трёхфазного к.з., подключаемой к выходу автоматического выключателя А3792У могут быть использованы медные плавкие элементы предохранителей

FU1, FU2, состоящие из расчётного количества провода из материала «медь» марки М1р ГОСТ 859-78. Диаметр d проводника измеряется микрометром, что позволяет рассчитать ток его плавления $I_{пл} = 80\sqrt{d^3}$ и определить необходимое количество параллельных проводников. В качестве внешнего устройства МТЗ принимаем серийное изделие БЗУ-ТП (позиция 7, Рисунок 4.2), входящее в состав ТП типа ТВПШ. Его схема предполагает воздействие на независимый расцепитель АВ [81].

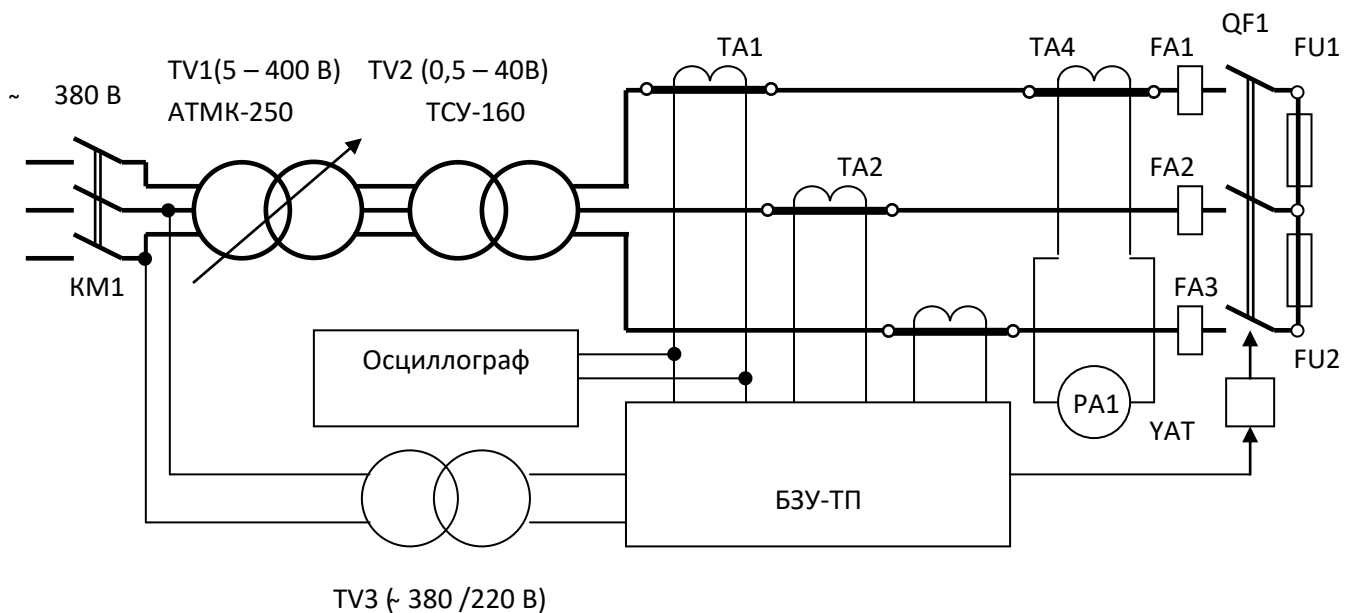


Рисунок 4.1 – Схема лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований параметров токоограничителя цепи отключения междуфазного короткого замыкания: TV1 – автотрансформатор АТМК-250, TV2 – трансформатор ТСУ-160, TV3 – трансформатор питания схемы, ТА1-ТА4 – трансформаторы тока, РА1 - амперметр, КМ1 – контактор, QF1 – контактная группа автоматического выключателя QF (А3792); FA1-FA3 – расцепители максимального тока автоматического выключателя QF, YAT – независимый расцепитель автоматического выключателя QF, FU1 - FU2 – плавкие предохранители, БЗУ-ТП – блок защиты и управления ТП

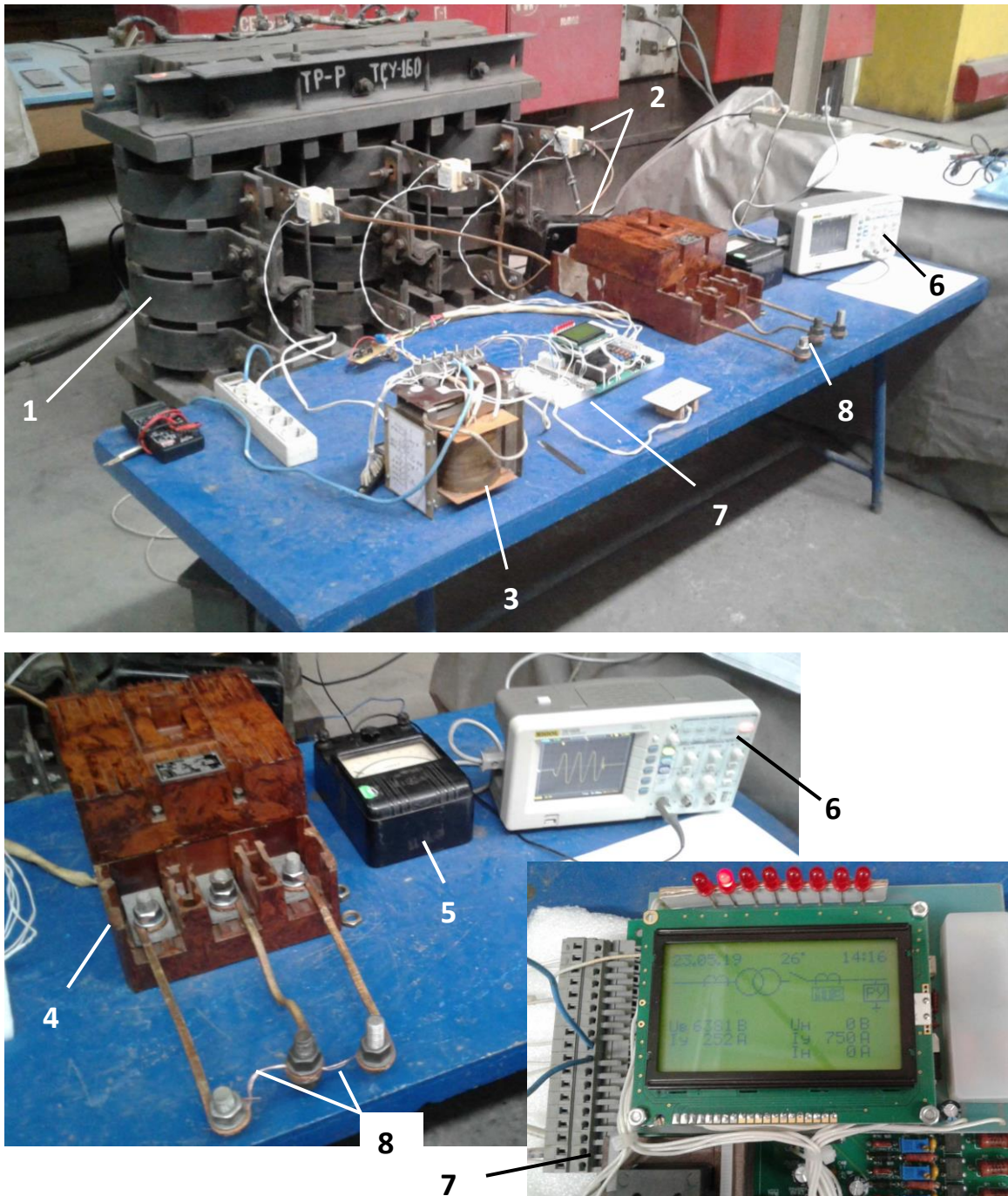


Рисунок 4.2 - Стенд для проведения экспериментальных исследований ограничения энергетических параметров цепи отключения междуфазного к.з. и его компоненты: 1 – нагружающий трансформатор ТСУ-160, 2 – трансформаторы тока, 3 – трансформатор питания схемы, 4 – автоматический выключатель А3792, 5 – амперметр, 6 – осциллограф цифровой DS1052E, 7 – блок БЗУ-ТП (без корпуса), 8 – медные плавкие элементы

Альтернативным по отношению к применению предохранителя в схеме (Рисунок 2.9) является применение вакуумного контактора в качестве устройства коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП, отключаемого по сигналу максимальной токовой защиты [73]. В связи с этим, схема стенда (Рисунок 4.1) должна быть преобразована к виду (Рисунок 4.3).

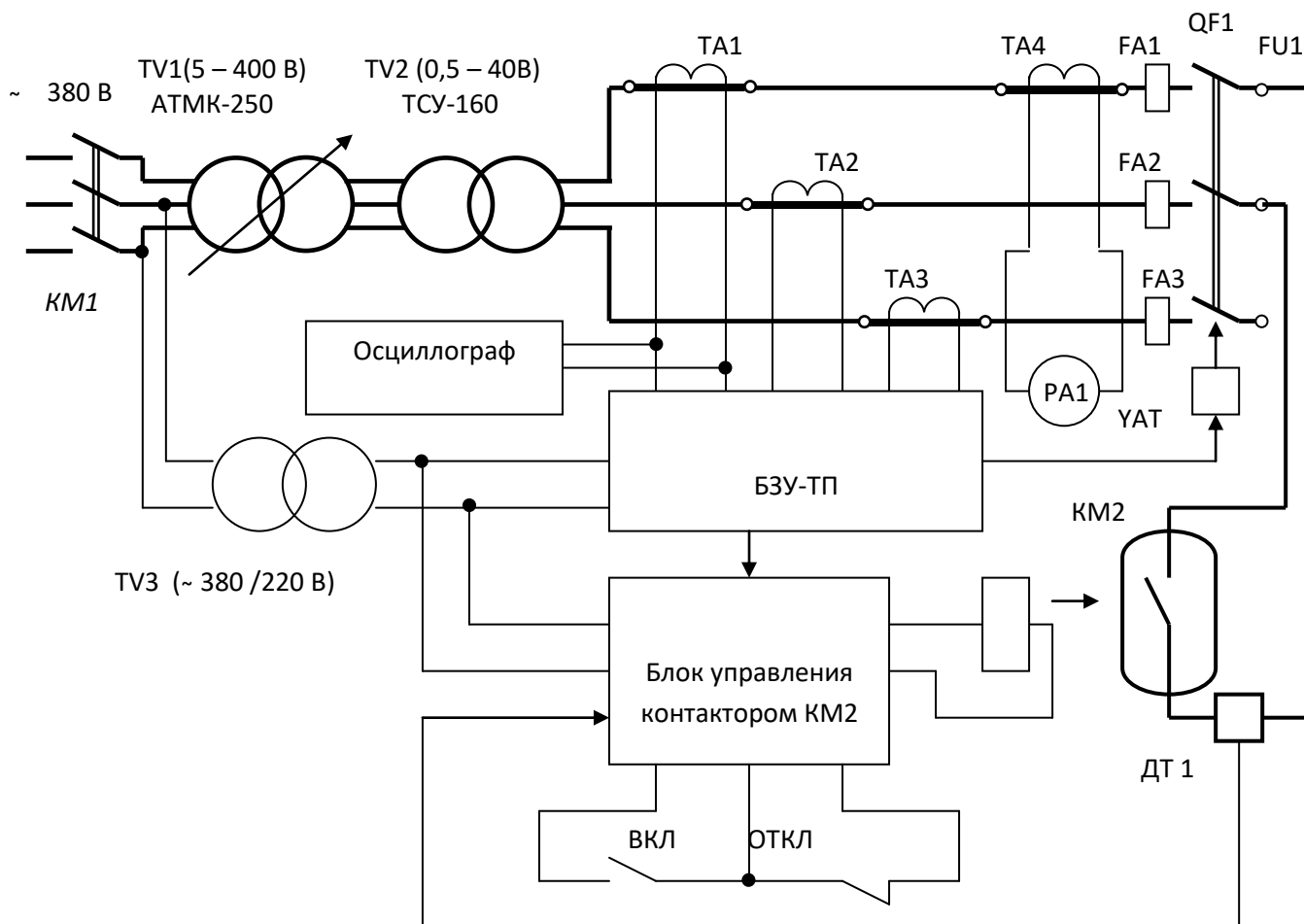


Рисунок 4.3 – Схема стенда для проведения исследований ограничителя энергетических параметров цепи отключения междуфазного к.з. на основе применения вакуумного контактора типа SPVC-630 (KM2): TV1 – автотрансформатор ATMK-250, TV2 – трансформатор нагружающий TCU-160, TV3 – трансформатор питания схемы, TA1-TA4 – трансформаторы тока, PA1 – амперметр, KM1 – контактор, QF1 – контактная группа АВ (A3792); FA1-FA3 – расцепители максимального тока АВ, YAT – независимый расцепитель АВ, БЗУ-ТП – блок защиты и управления; ДТ1 – датчик тока, встроенный в контактор KM2

Искомым параметром в ходе опытов будет служить фазный ток (его амплитуда и продолжительность). Ток записывается цифровым осциллографом 6 (Рисунок 4.2). Тарировка производится в ходе продолжительной подачи в силовую схему тока, меньшего величины тока срабатывания максимальных защит с контролем по амперметру РА1 (позиция 5, Рисунок 4.2), подключенному к измерительному трансформатору тока ТА4 (Рисунок 4.1).

Количество повторных опытов, методику обработки результатов экспериментов выполняем в соответствии с положениями классической теории эксперимента [82-84].

4.2 Анализ результатов эксперимента по п. 4.1

В ходе проведения экспериментов [80] установлено, что наиболее характерными, выявленными состояниями элементов защиты, являются:

- отключение автоматического выключателя по сигналу БЗУ-ТП и целостность плавкого элемента;
- синхронное отключение автоматического выключателя по сигналу БЗУ-ТП и перегорание плавкого элемента (Рисунок 4.4);
- перегорание плавкого элемента за время, недостаточное для срабатывания БЗУ-ТП (Рисунок 4.6), автоматический выключатель А3792 остаётся во включенном состоянии после перегорания плавких элементов в цепи нагрузки. Примеры осциллограмм токов в силовой цепи короткого замыкания приведены на рисунках 4.5 - 4.7, результаты измерений – в таблице 4.1

Осциллографированием определены амплитуда тока; продолжительность: к.з. до начала перегорания плавкого элемента (момент t_1 , Рисунок 4.6; Рисунок 4.7); отключения силовой цепи, зафиксирован дребезг силовых контактов автоматического выключателя в процессе их отключения (всплески перенапряжения в моменты t_1 и t_2 (Рисунок 4.5,а).

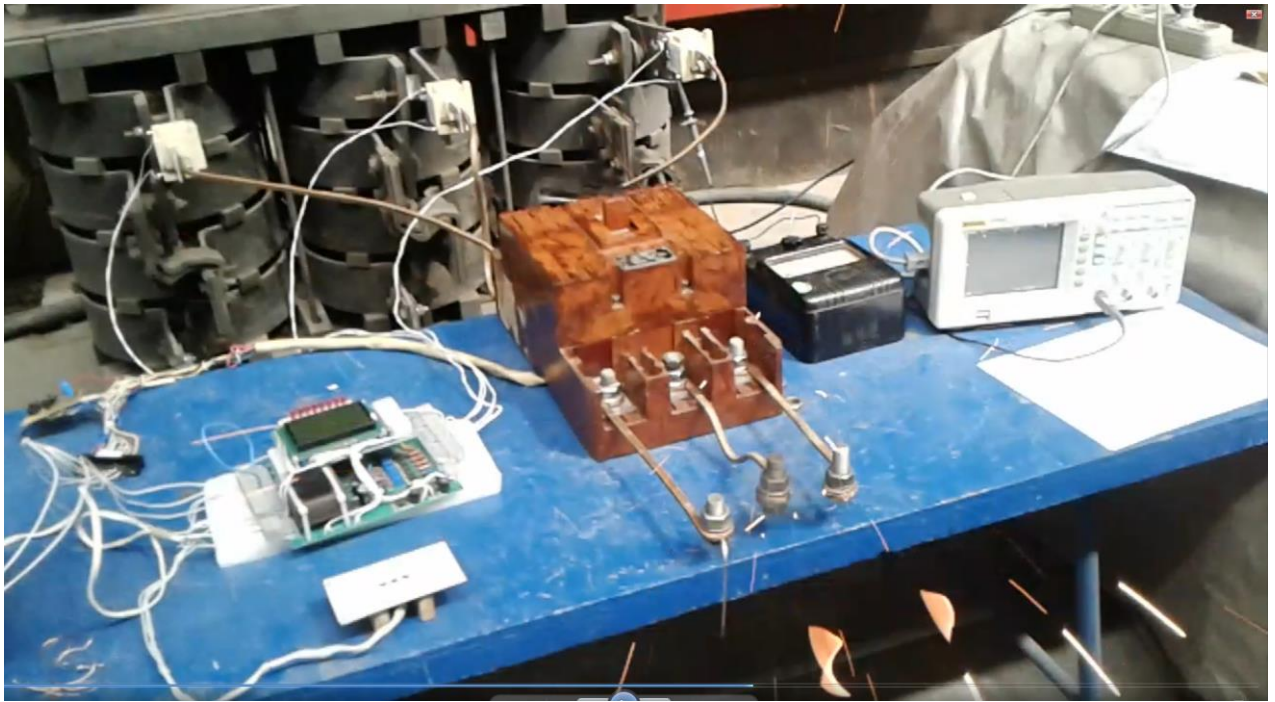
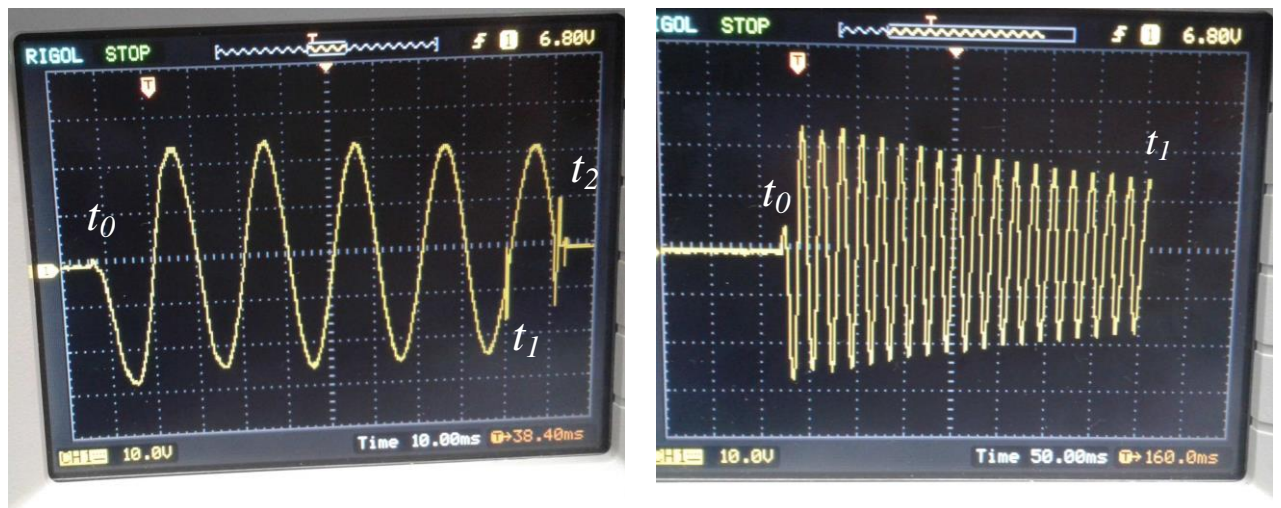


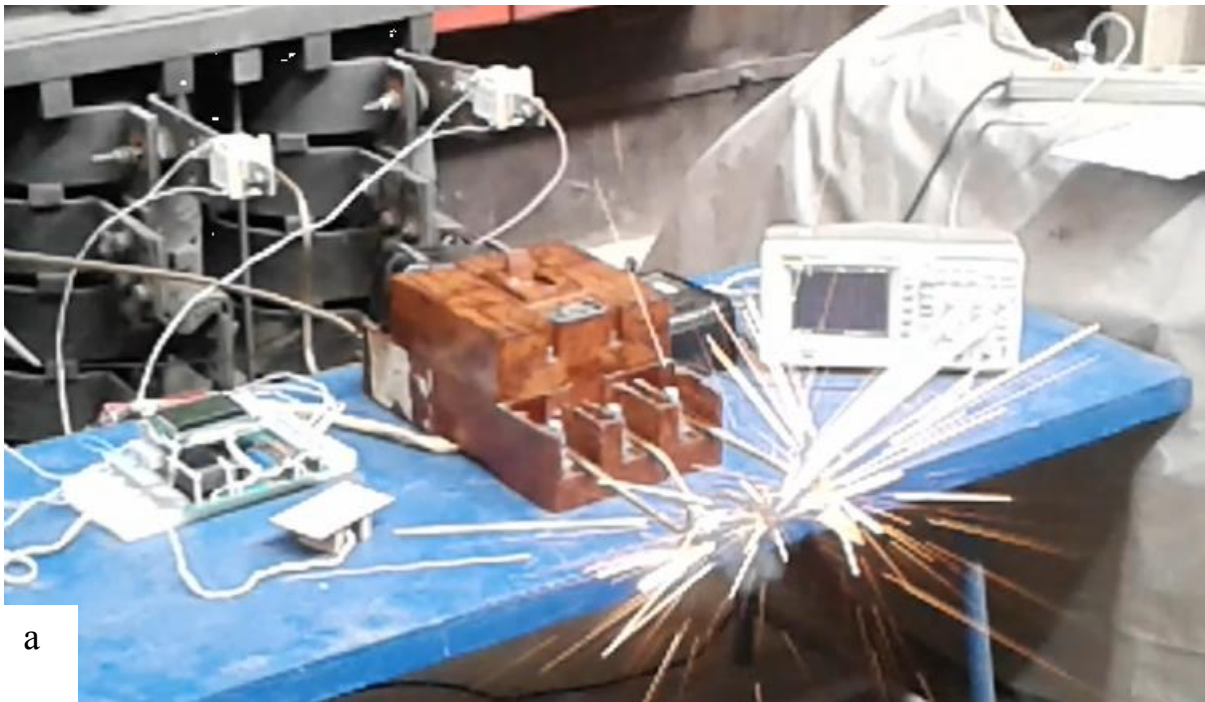
Рисунок 4.4 – Фиксация момента одновременного срабатывания внешней МТЗ типа БЗУ-ТП (с воздействием на независимый расцепитель АВ) и перегорания плавких элементов, создающих цепь к.з. на выходе АВ



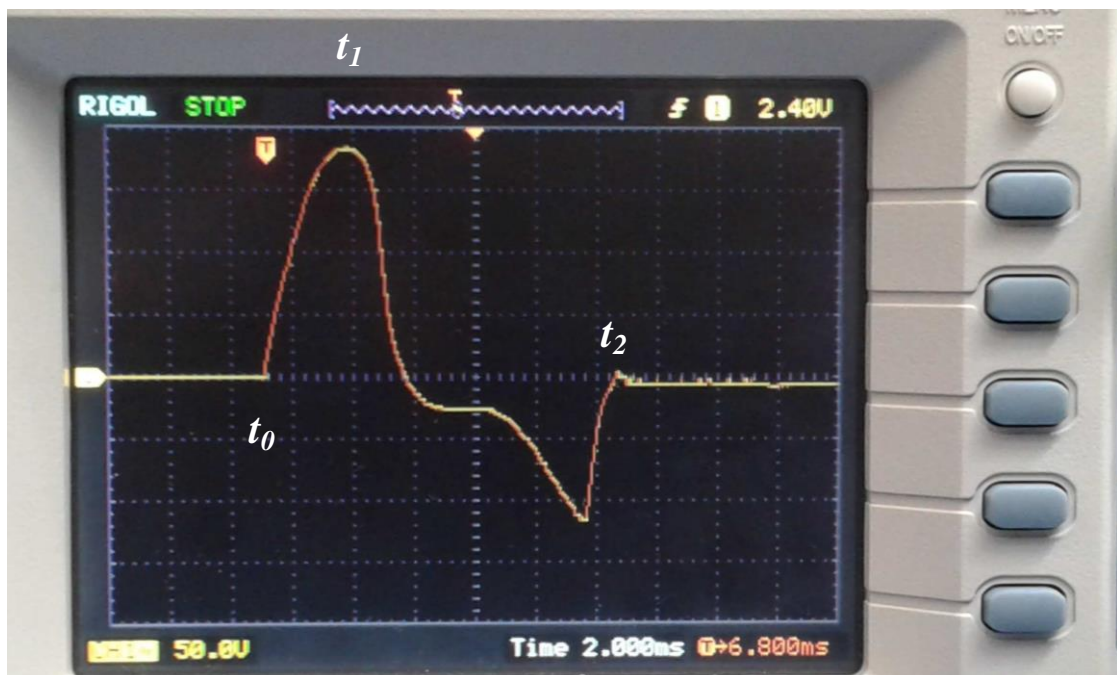
а

б

Рисунок 4.5 – Осциллограммы тока в цепи к.з.: а – уставка БЗУ-ТП – 700 А; $U_n = 2,6$ В; $S_{np} = 2 \times 0,52 \text{ мм}^2$, срабатывание только БЗУ-ТП с отключением АВ;
б – уставка БЗУ-ТП – 750 А; $U_n = 2,6$ В; $S_{np} = 2 \times 0,52 \text{ мм}^2$, срабатывание предохранителя без отключения АВ



а



б

Рисунок 4.6 – Фиксация момента перегорания плавких элементов в цепи трёхфазного к.з. на выходе АВ за время, меньшее продолжительности реагирования на к.з. блока защиты БЗУ-ТП и расцепителей АВ (а) и осциллограмма тока (б) в цепи к.з. (установка БЗУ-ТП – 501 А; $U_n = 25,5$ В; $S_{np} = 3 \times 0,52 \text{ мм}^2$, амплитуда тока 4292 А; срабатывание предохранителя без отключения АВ, продолжительность процесса 0,0059с)

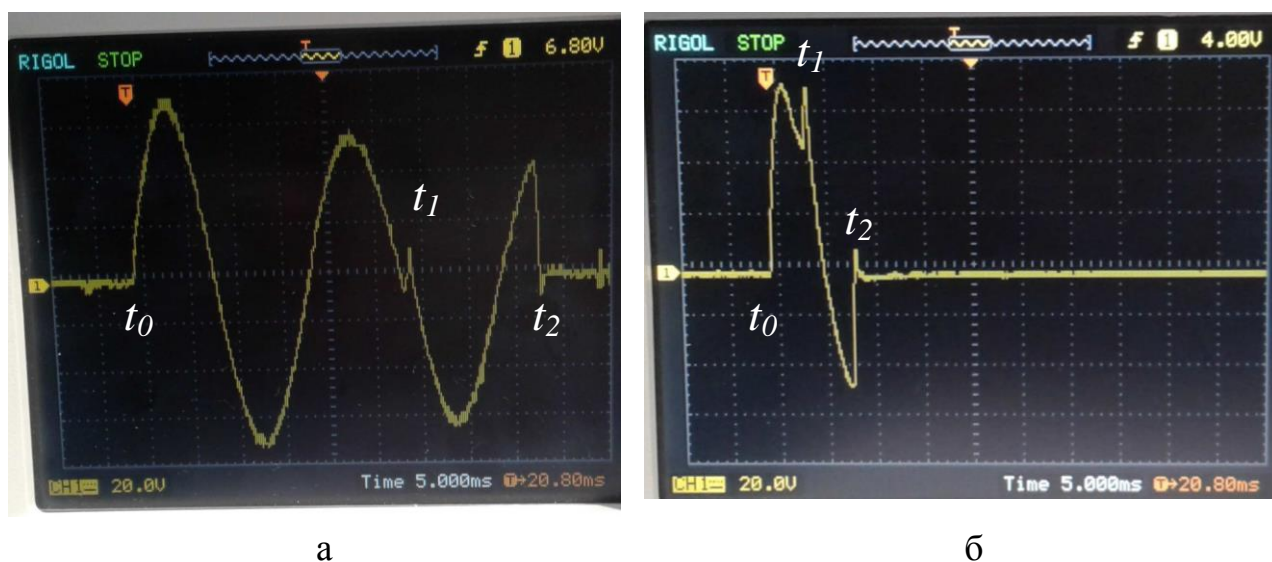


Рисунок 4.7 – Осциллограммы тока в цепи к.з.: а – уставка БЗУ-ТП – 750 А; $U_{л} = 12,6$ В; $S_{np} = 1 \times 0,52 \text{ мм}^2$, срабатывание предохранителя без отключения АВ; б – уставка БЗУ-ТП – 501 А; $U_{л} = 24,0$ В; $S_{np} = 1 \times 0,52 \text{ мм}^2$, срабатывание предохранителя без отключения АВ

В таблице 4.1 параметр Δt – интервал времени между началом к.з. и зафиксированным моментом начала плавления плавкого элемента предохранителя. Вычисление амплитуд токов выполнено по измерению амплитуд сигналов, зафиксированных при осциллографировании (примеры – Рисунок 4.6; Рисунок 4.7) с учётом линейности характеристик применённых датчиков тока типа ДТ-4 (Рисунок 4.8) и паспортного соотношения их номинальных параметров (действующему значению тока в 250 А соответствует действующее выходное напряжение 7,4 В). Некоторый разброс в показателях амплитуды тока к.з. объясняется возможными отклонениями сопротивлений в местах болтовых присоединений плавких элементов к шинам на выходе АВ. При анализе результатов экспериментов учитывалось, что величина тока в цепи к.з. определяется величиной приложенного линейного напряжения (к шинам АВ), а также величиной сопротивления плавкого элемента (регулируется в зависимости от количества параллельно присоединённых плавких элементов). При этом, в соответствии с техническими характеристиками, общее время срабатывания

максимальной токовой защиты БЗУ-ТП составляет 0,07...0,10 с, включая 0,02...0,03 с – время реагирования БЗУ-ТП на ток к. з. и 0,05...0,07 с – собственное время отключения автоматического выключателя АЗ792.

Таблица 4.1 – Повторяющиеся параметры исследуемого объекта, зафиксированные в ходе экспериментов

№ п/п	Напряжение линейное между шинами АВ, В	Ток уставки МГЗ типа БЗУ-ТП, А	Сечение медного плавкого элемента, мм ²	Длительный ток плавления плавкого элемента, А	Объекты, отключившие ток к.з.	Амплитуда тока, А; (действующее значение тока, А)	Продолжительность процесса до: защитного отключения, с
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2,0	501	3x0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП	537; (381)	0,306
2	5,0	501	3x0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП	1012; (718)	0,055
3	10,0	501	3x0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП	1898; (1346)	0,062
4	15,4	501	3x0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП и плавкий элемент	2538	0,049
5	20,1	501	3x0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП и плавкий элемент	3988	0,029 ($\Delta t = 0,014c$)
6	25,5	501	3x0,52	180	Плавкий элемент	4292	0,0059 ($\Delta t = 0,0015c$)
7	2,6	600	2x0,52	120	АВ по команде БЗУ-ТП	631; (448)	0,078
8	2,6	700	2x0,52	120	АВ по команде БЗУ-ТП	637; (452)	0,104
9	2,6	750	2x0,52	120	Плавкий элемент	634; (450)	0,387
10	12,6	750	2x0,52	120	АВ по команде БЗУ-ТП и плавкий элемент	2043; (1449)	0,046
11	12,6	750	1x0,52	60	Плавкий элемент	1645; (1167)	0,041 ($\Delta t = 0,027c$)
12	12,6	501	1x0,52	60	Плавкий элемент	1240; (879)	0,022 ($\Delta t = 0,016c$)
13	24,0	501	1x0,52	60	Плавкий элемент	1786; (1267)	0,0086 ($\Delta t = 0,0045c$)

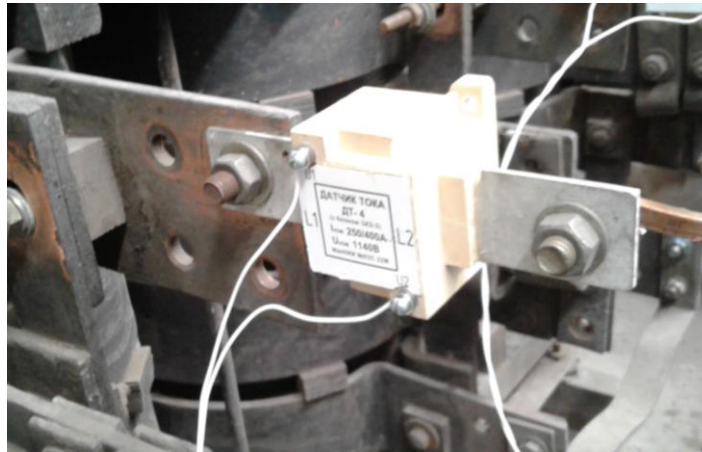


Рисунок 4.8 – Применение датчиков тока типа ДТ-4 в составе стенда для экспериментальных исследований

Нелинейная зависимость времени срабатывания плавкого элемента от соотношения величины тока в защищаемой цепи к току плавления ($\lambda = i_{к.з.} / i_{пл}$) в полной мере выявлена в ходе выполнения экспериментов (сопоставление строк 1 и 6; 9 и 13 таблицы 4.1) и позволяет утверждать, что с увеличением данного соотношения продолжительность срабатывания (перегорания) плавкого элемента будет значительно меньше, чем продолжительность реакции на к.з. максимальной токовой защиты (БЗУ-ТП) и, тем, более, последующего отключения автоматического выключателя. Это подтверждается результатами, представленными в строках 6; 11-13 таблицы 3.1 и на осциллограммах (Рисунки 4.6, 4.7).

Выявленный эффект синхронного срабатывания плавкого элемента и штатной максимальной токовой защиты подтверждает теоретическую возможность повышения коммутационного ресурса автоматического выключателя, при этом, при высоких значениях λ срабатывание плавкого элемента опередит реакцию на ток к.з со стороны максимальной токовой защиты БЗУ-ТП, что не приведёт к отключению под нагрузкой автоматического выключателя, т.е. обеспечит полное сохранение его коммутационного ресурса. Указанные соображения должны быть учтены при выборе предохранителя в процессе практической (в условиях промышленности) реализации устройства

энергетического ограничения в цепи отключения междуфазного тока в присоединении ТП.

Фактором, ограничивающим параметр λ , в данном случае выступает показатель суммарного тока двигателей потребителей технологического участка, включая пусковой ток потребителя максимальной мощности. С увеличением мощности потребителей расчётный параметр λ должен быть уменьшен, что переведёт продолжительность срабатывания плавких элементов во временной диапазон, сопоставимый с продолжительностью срабатывания штатных максимальных токовых защит (БЗУ-ТП) трансформаторной подстанции. Однако, положительный эффект применения данного технического решения очевиден, зафиксирована возможность 2 ÷ 13-кратного сокращения продолжительности отключения к.з. в сравнении с быстродействием штатных устройств защитного отключения и ограничения энергетических показателей процесса.

С целью выявления возможности использования вакуумного контактора в качестве дополнительного устройства ускоренного разрыва цепи коммутации тока междуфазного к.з. была исследована схема (Рисунок 4.3), где в качестве вакуумного контактора КМ2 был применён контактор типа SPVC 1-630 [85] с паспортными параметрами: максимальный ток включения - 30 кА; отключения – 12 кА, время отключения 7 ± 2 мс (Рисунок 4.9).

Первоначально цепь отключения вакуумного контактора была связана с выходом максимальной токовой защиты БЗУ-ТП, что позволяло выявить фактическую продолжительность отключения тока этим контактором и сопоставить её с временными показателями автоматического выключателя А3792, в ходе его срабатывания по команде той же максимальной токовой защиты БЗУ-ТП. Перед началом экспериментов исправность всех компонентов стенда, включая вакуумный контактор SPVC 1 - 630 (позиция 1, Рисунок 4.9), была проверена. Однако после первого опыта коммутации цепи к.з. с током 722 А (действующее значение) зафиксирован отказ вакуумного контактора SPVC 1-630, выразившийся в спекании между собой силовых контактов и их механическом отделении от перемещающегося штока (якоря электромагнита).

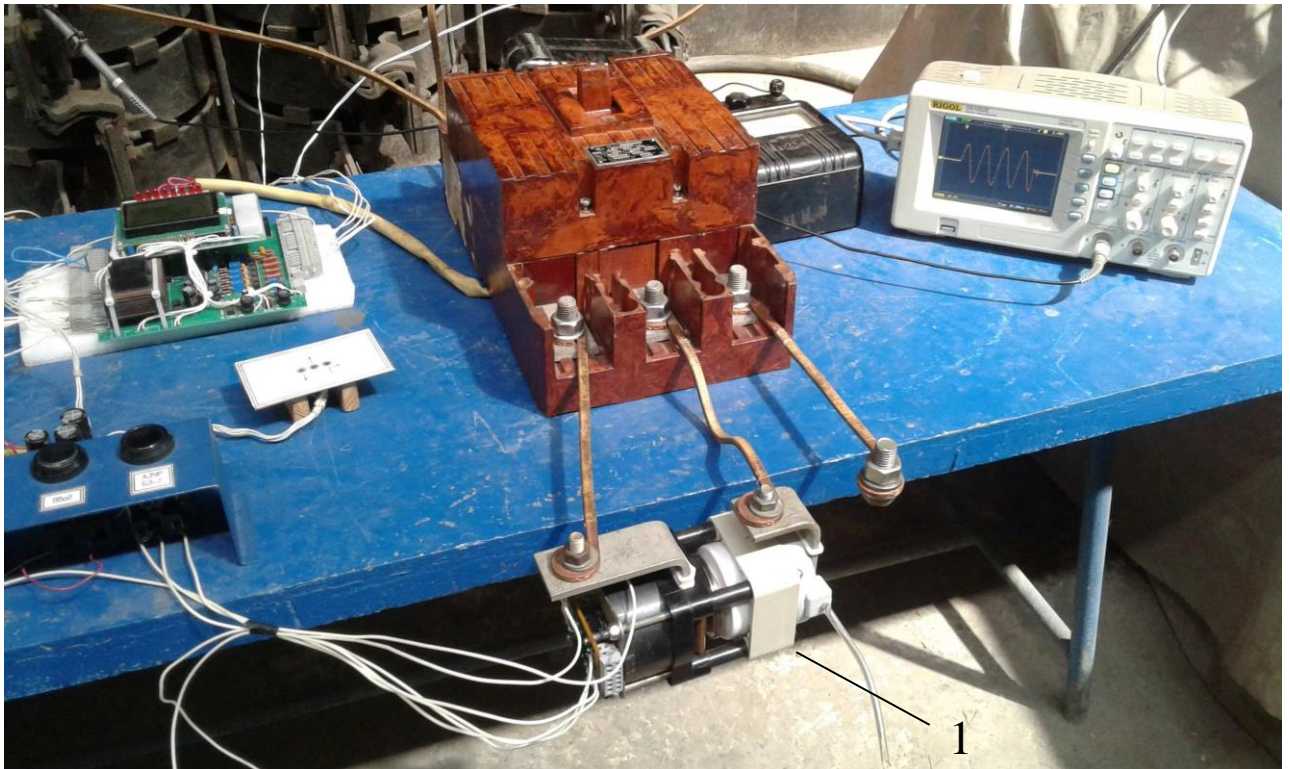


Рисунок 4.9 - Фиксация срабатывания внешней максимальной токовой защиты БЗУ-ТП (с воздействием на независимый расцепитель АВ) при исследовании функциональных свойств вакуумного контактора типа SPVC 1-630 (позиция 1) применительно к его использованию в качестве дополнительного коммутационного элемента отключения цепи к.з.: ток уставки БЗУ-ТП – 501 А, ток цепи к.з (действующее значение) – 722 А

Таким образом, при управлении (включение / отключение) контактором его шток перемещался в штатном режиме, слаботочный блок-контакт также штатно переключался. В то время, как рабочие (силовые) контакты постоянно оставались соединёнными. Это даёт основания считать недостаточным уровень достоверности информации о состоянии силовых контактов данного контактора, формируемой коммутацией его слаботочного блок-контакта, что представляет собой практическую актуальность в контексте эксплуатации вакуумных контакторов. В ходе эксперимента установлено, что защитное отключение цепи короткого замыкания было осуществлено штатными средствами - автоматическим выключателем А3792 по команде, сформированной блоком БЗУ-

ТП (Рисунок 4.10). При этом зафиксированы следующие электрические параметры:

- линейное напряжение, подаваемое на цепь к.з. – 4,5 В;
- амплитуда тока в цепи к.з. – 1018А (Рисунок 3.10)
- действующее значение тока в цепи к.з. – 722 А;
- продолжительность процесса (до защитного отключения – 0,073 с (Рисунок 4.10).

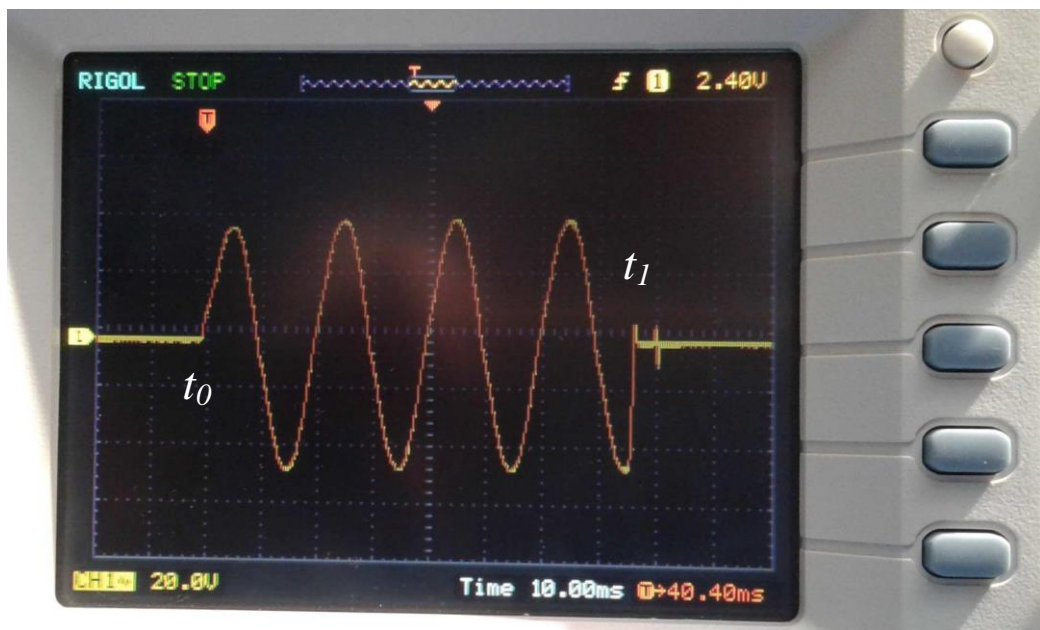


Рисунок 4.10 - Осциллограмма тока в цепи короткого замыкания при исследовании схемы стенда (Рисунок 4.3): уставка БЗУ-ТП – 501 А; $U_n = 4.5$ В; $I_m=1018$ А, срабатывание автоматического выключателя А3792 по команде блока БЗУ-ТП, сопровождаемое «спеканием» силовых контактов вакуумного контактора SPVC1-630 (позиция 1, рисунка 4.9)

В виду выявленного отказа вакуумного контактора, и не выявления фактических параметров его быстродействия, превышающих скорость защитного отключения автоматического выключателя А3792 дальнейшие эксперименты с использованием вакуумного контактора типа SPVC не представляют практической актуальности. При разработке технических решений с

использованием данного контактора представляется рациональным использовать его паспортные технические характеристики.

4.3 Исследование процесса корректировки величины выходного напряжения трансформатора техническими средствами на основе схемы коммутационного устройства ускорения отключения короткого замыкания

С целью получения достоверных данных схемы исследовательского стенда должна совпадать со схемой исследуемого объекта. В этой связи структура исследовательского стенда представляется следующей комбинацией элементов в их функциональной взаимосвязи (Рисунок 4.11). Физическую имитацию трансформатора ТП выполняет трёхфазный трансформатор TV1 (1) напряжения 380/150 В мощностью 10 кВА. Его вторичные обмотки соединены в схему «звезда» через управляемый выпрямитель VC1 (2), собранный на тиристорах T143-500 (выходы выпрямителя соединены между собой) и подключены к цепи нагрузки, состоящей из активных сопротивлений R1; R2; R3 (3).

Контроль параметров фазных напряжений на нагрузке осуществляется вольтметром 4 и цифровым осциллографом 5. Применительно к тиристорам выпрямителя реализуется функция фазового регулирования (изменением угла α отпирания). С этой целью предусмотрен блок импульсно-фазового управления 6, оснащённый индикатором величины угла α отпирания тиристоров. Напряжение трёхфазной сети 380 В подаётся на силовой трансформатор 1 через контактор KM1 (7). Для реализации импульсного регулирования выходного напряжения трансформатора предусмотрен транзистор VT1 (8) в цепи, соединяющей между собой выходы «+» (A) и «-» (B) выпрямителя VC1 (2). Транзистор VT1 (8) отпирается с фиксированной частотой 300 Гц, синхронизированной с частотой сети, с изменяемой продолжительностью пауз в проводимости тока. Импульсы запирающего транзистора VT1 (8) формируются блоком G 300 Hz (9), синхронизированным с сетью посредством трансформатора TV2 (10). Их

длительность задаётся узлом управления скважностью импульсов УУС (11), оснащённым индикатором скважности импульсов. Фотографии элементов стенда представлены на рисунке 4.12.

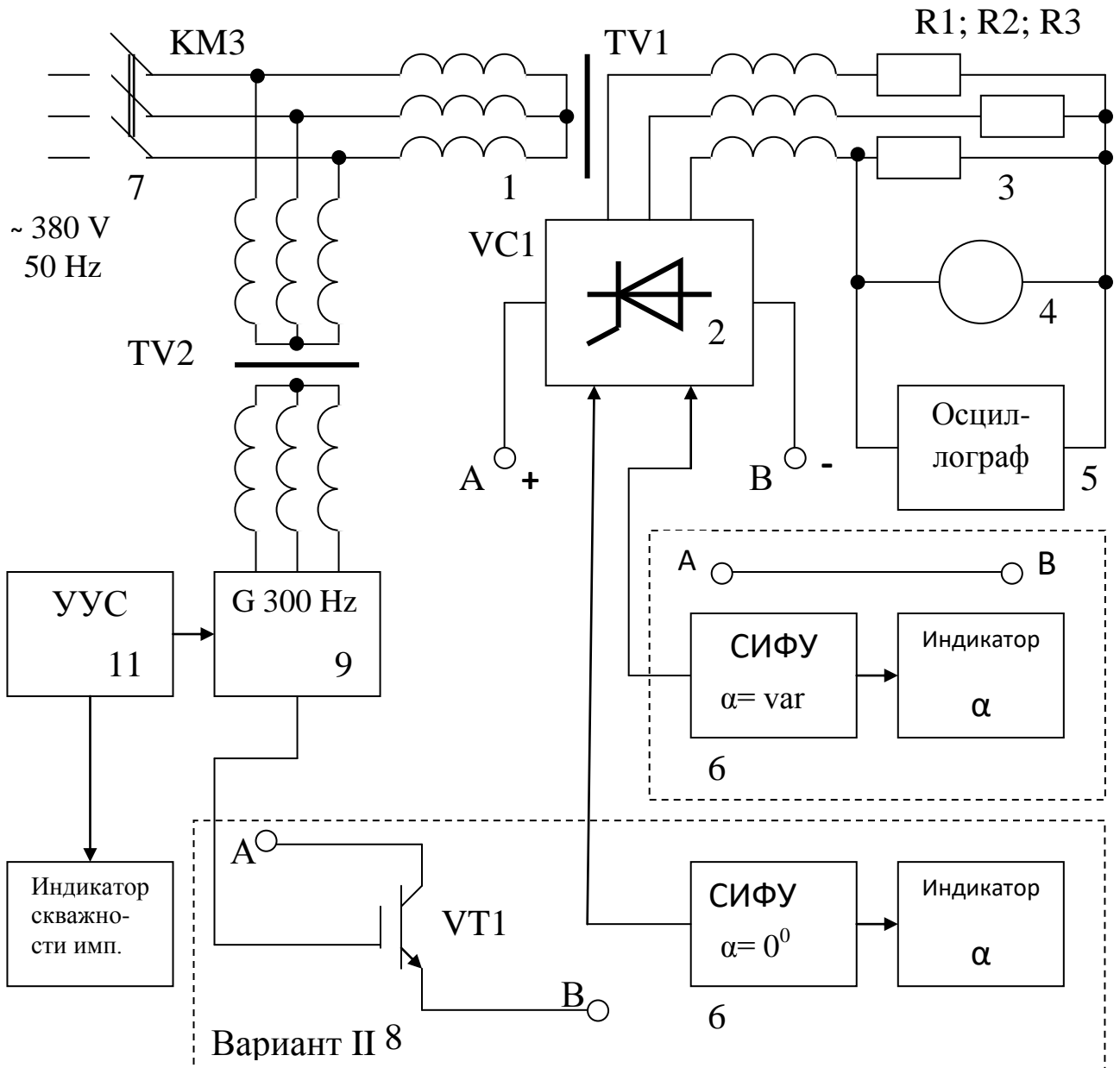


Рисунок 4.11 – Схема стенда для исследования процессов корректировки параметров выходного напряжения трансформатора: СИФУ – система импульсно-фазового управления тиристорами; УУС – устройство управления скважностью импульсов; G 300 Hz – формирователь импульсов частоты 300 Гц

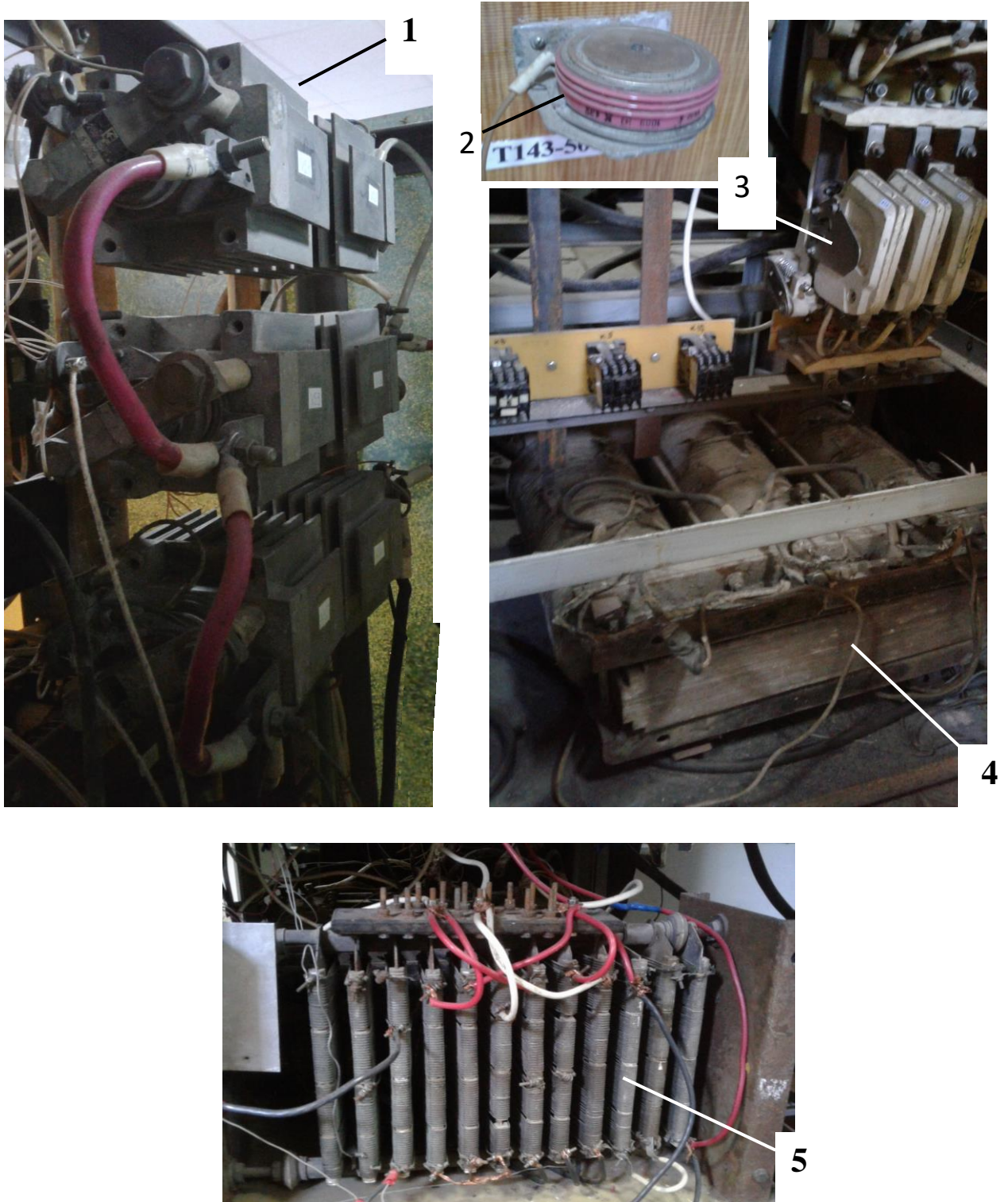


Рисунок 4.12 – Элементы стенда исследования процессов управления корректировкой величины выходного напряжения трансформатора:

1 – тиристорный выпрямитель, 2 – триристор Т143-500 (комплектующий элемент); 3 – контактор (KM1); 4 – трансформатор (TV1); 5 – сборная шина резисторов

Экспериментами исследуются функциональные возможности схемы (Рисунок 2.9) в отношении корректировки величины выходного напряжения трансформатора в диапазоне от 0,95 до 1,05 от номинального значения: при фазовом управлении тиристорами мостового выпрямителя (Рисунок 3.1а; Рисунок 4.11, вариант I); при импульсной коммутации ключевого элемента в цепи нагрузки мостового выпрямителя (Рисунок 3.1б; Рисунок 4.11, вариант II).

В первом случае должен быть установлен диапазон углов α отпирания тиристоров, соответствующий диапазону формируемых напряжений на выходе трансформатора, во втором, - должна быть выявлена закономерность изменения фиксированных продолжительностей импульсов запираания ключа VT1 (Рисунок 4.11) в зависимости от величин формируемых напряжений на выходе трансформатора и фазового соотношения передних фронтов этих импульсов относительно фазных напряжений сети. Результаты представлены на рисунке 4.13, рисунке 4.14 и свидетельствуют о возможности выполнения рассматриваемой функции.

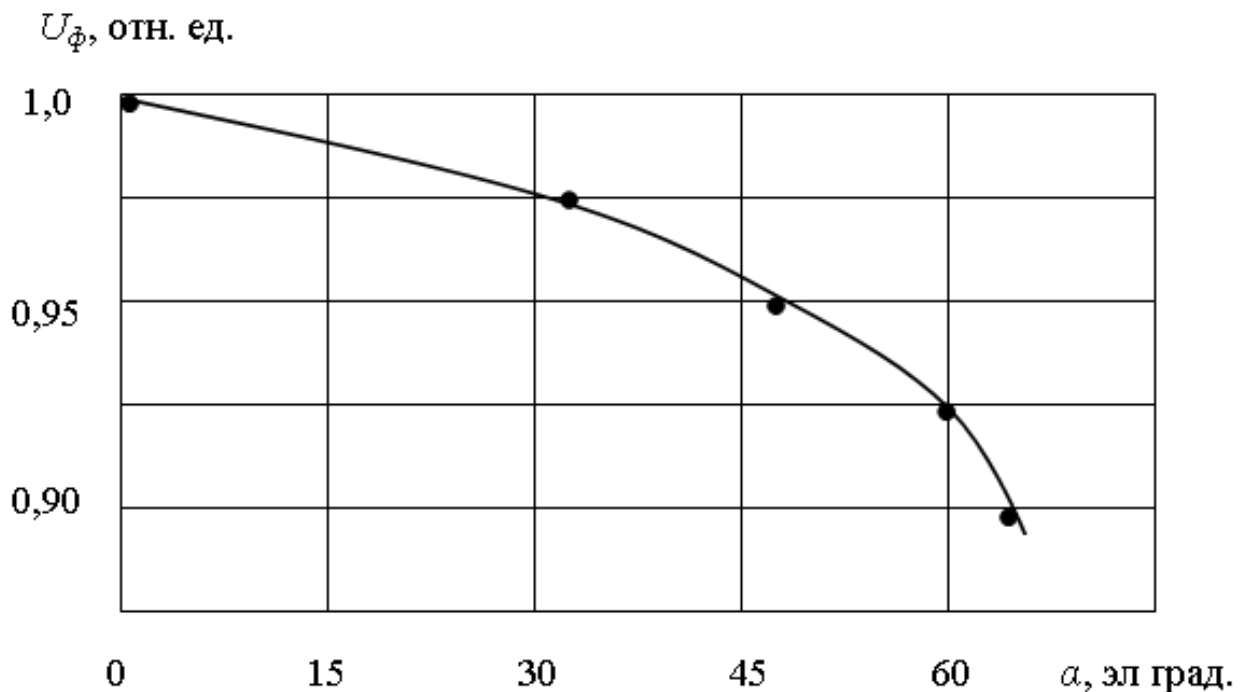


Рисунок 4.13 – Диаграмма соотношения величины угла α отпирания тиристоров выпрямителя (Рисунок 4.11) с величинами фиксированных уровней фазных напряжений на нагрузке трансформатора

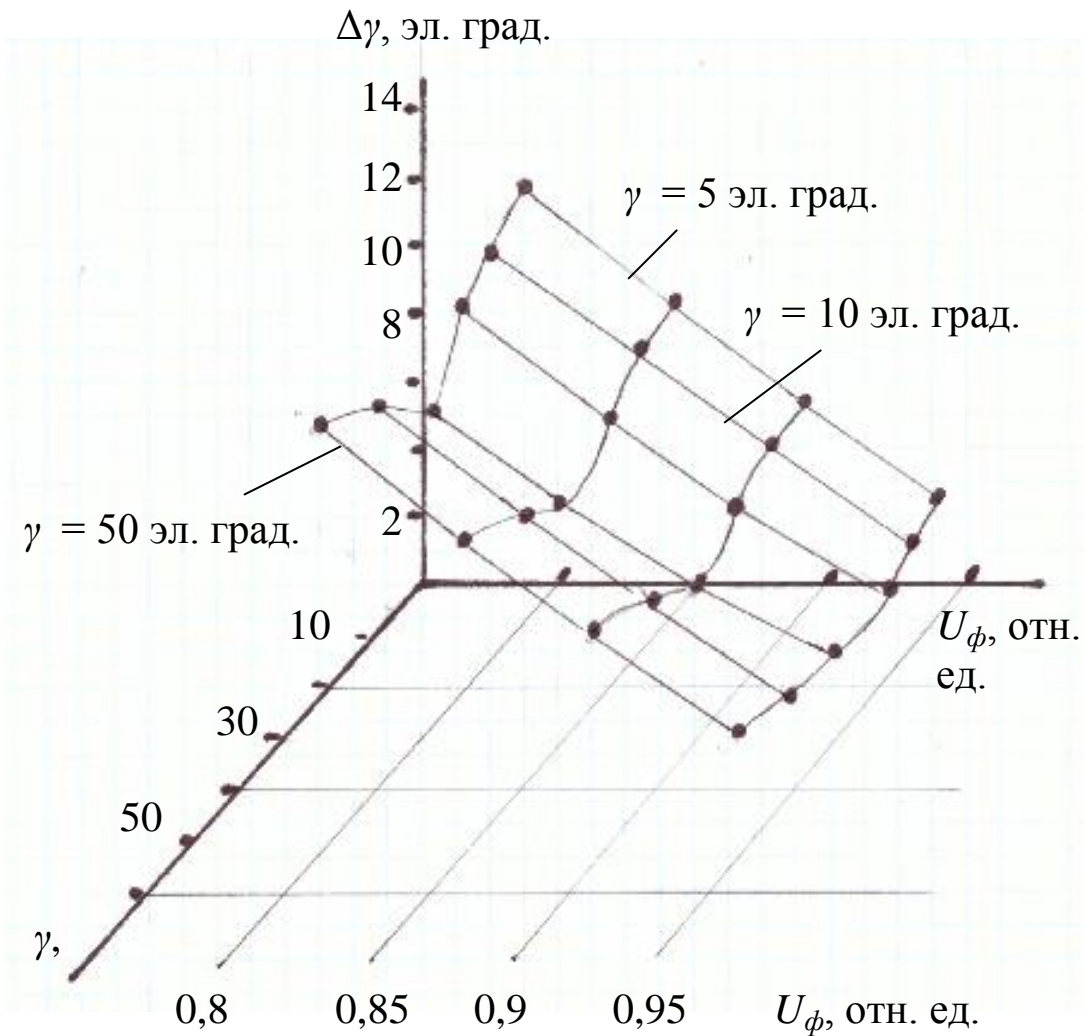


Рисунок 4.14 – Диаграмма зависимости интервалов времени $\Delta\gamma$, отключения проводимости обмоток трансформатора ТП от фазовых параметров γ передних фронтов импульсов частоты 300 Гц применительно к величинам формируемых фиксированных уровней напряжения на нагрузке трёхфазного трансформатора

В ходе экспериментов установлено, что регулирование напряжения фазных обмоток выхода трёхфазного трансформатора изменением величины фазового угла α отпирания тиристорov выпрямителя (Рисунок 3.1а; Рисунок 4.11, вариант II) для диапазона фазных напряжений $0,8U_\phi \leq 1,0U_\phi$ (принимая во внимание: $U_\phi = 1,05U_n$), может быть достигнуто в диапазоне угла α отпирания тиристорov выпрямителя: $64 \text{ эл. град.} \geq \alpha \geq 0 \text{ эл. град.}$ (Рисунок 4.13), что в принципе соответствует параметрам регулирования на трёхфазной нагрузке напряжения

путём изменения углов отпирания трёхфазного тиристорного регулятора напряжения и согласуется теоретическими положениями, изложенными в [86].

Обобщённые результаты экспериментов по регулированию напряжения фазных обмоток выхода трёхфазного трансформатора путём импульсной коммутации (с частотой 300 Гц) схемы соединения в «звезду» фазных обмоток трансформатора (Рисунок 3.1,б; Рисунок 4.11, вариант II) представлены в таблице 3.2 и на рисунке 4.14 [78]. Зафиксированы закономерности изменения продолжительностей $\Delta\gamma$ отключенных состояний полупроводникового ключа VT1, соответствующие заданным величинам формируемых фазных напряжений на выходе трансформатора (TV1), в зависимости от фазового γ соотношения переднего фронта первого импульса отключения и момента начала полуволны соответствующего фазного напряжения.

Таблица 4.2 – Параметры коммутации ключа VT1 (Рисунок 4.11) при импульсной коммутации в процессе регулирования фазных напряжений (U_ϕ) трансформатора TV1

Параметр γ , эл. град.	Действующее значение фазного напряжения (U_ϕ) на активной нагрузке (отн. ед от величины напряжения при металлическом контакте между клеммами «А» и «В» выпрямителя (рис. 4.11))			
	0,8	0,85	0,9	0,95
Параметр, $\Delta\gamma$ эл. градус				
5	12,4	9,3	6,2	3,1
10	12,0	9,0	6,0	3,0
20	11,6	8,7	5,8	2,9
30	8,8	6,6	4,4	2,2
40	11,6	8,7	5,8	2,9
50	12,4	9,3	6,2	3,1

Как видно из таблицы 4.2, величины $\Delta\gamma$ при $\gamma = 10$ эл. град. и при $\gamma = 50$ эл. град. совпадают между собой. Точно так же величины $\Delta\gamma$ при $\gamma = 20$ эл. град. и при $\gamma = 40$ эл. град. совпадают между собой. Это объясняется симметрией синусоиды напряжения сети. Минимальной является величина параметра $\Delta\gamma$ при $\gamma = 30$ эл. град., что обусловлено совпадением второго импульса отключения проводимости обмоток трансформатора (элемента VT1) в полуволне фазного

напряжения с амплитудой этого напряжения. Полученные результаты достаточны для практического применения.

4.4 Выводы по разделу 4

Возможность использования результатов экспериментов для обоснования технических решений в области повышения ресурса АВ шахтной участковой ТП и расширения её функциональности в целом обеспечивается:

1) представительными условиями экспериментов и достоверностью экспериментального материала за счёт:

- применения в составе исследовательского стенда реальных промышленных образцов функциональных компонентов ТП и источников тока, сопоставимого по величине с токами реальных нагрузок и током короткого замыкания электросети участка шахты;

- топологической идентичности исследовательских стендов типовым компонентам электротехнического комплекса участка шахты в их функциональной взаимосвязи;

- выбора параметров элементов экспериментальных стендов по критерию подобия;

- использования цифровых устройств измерения, регистрации и обработки данных, обеспечивающих измерения с достаточным быстродействием и точностью;

- выполнения статистической обработки измеряемых параметров с использованием апробированных методов анализа экспериментальных исследований;

2) достаточностью экспериментальных данных, обеспечиваемой необходимым объёмом выборок значений контролируемых параметров.

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Экспериментальные исследования на лабораторных стендах подтвердили выдвинутые в ходе теоретических исследований предположения о продолжительности выявления и отключения цепи короткого замыкания существующими функциональными узлами ТП, достаточной для образования плазмы коммутационной электрической дуги внутри автоматического выключателя А3792У, способной металлизировать прилегающие диэлектрические элементы.

2. Целесообразность применения коммутационного устройства ускорения отключения к.з., выполненного на основе выпрямителя с подключенным к выходу предохранителем и объединяющего вторичные обмотки трансформатора ТП в трёхфазную схему подтверждена достигнутым быстродействием прекращения протекания тока к.з. Достигнуты повторяющиеся результаты срабатывания данного устройства ранее: выявления процесса к.з. штатными средствами ТП аналогичного назначения; отключения цепи к.з. автоматическим выключателем ТП. С увеличением отношения тока к.з. защищаемой сети к току плавления предохранителя быстродействие срабатывания данного устройства может в 10 и более раз превышать показатели быстродействия срабатывания штатных устройств ТП выявления к.з. и защитного отключения. Таким образом, применение данного устройства позволяет ограничить продолжительность протекания тока к.з. интервалом времени, в течение которого энергетические параметры коммутационной электрической дуги в контактных группах автоматического выключателя А3792 не достаточны для поддержания процесса металлизации прилегающих диэлектрических поверхностей, а также отключить цепь к.з. до срабатывания этого АВ. Этим эффектом обеспечивается возможность применения низковольтного АВ в составе шахтных ТП высокой мощности в сетях линейного напряжения 1140 В. При этом устраняются условия внутреннего пробоя между коммутирующими элементами АВ, что благоприятно отражается на его ресурсе.

3. Установлена возможность применения в составе коммутационного устройства ускорения отключения к.з в силовой цепи ТП однополюсного

вакуумного контактора вместо плавкого предохранителя. Эффективность работы такой схемы может быть обеспечена при условии применения быстродействующего устройства выявления к.з.

4. В результате выявления отказа вакуумного контактора и анализа технического состояния его функциональных узлов доказана некорректность использования информационных сигналов о состоянии контактора, формируемых его слабotoчным блок-контактом, т. к. возможны отказы, при которых положения силового и слабotoчного контактов не будут совпадать.

5. Подтверждена возможность использования коммутационного устройства ускорения отключения к.з. (схемы коммутации плавким предохранителем выхода мостового выпрямителя, объединяющего вторичные фазные обмотки трансформатора ТП в трёхфазную цепь) для корректировки величины выходного напряжения трансформатора ТП в заданном диапазоне величин. Этим обеспечивается возможность стабилизации напряжения подаваемого на электропотребитель в сети с высоким уровнем потерь напряжения (удалённо расположенный АД высокой мощности). При условии выполнения выпрямителя на тиристорах предусматривается их фазовое регулирование, при условии импульсной коммутации цепи нагрузки выпрямителя (на диодах) частота кратковременных импульсов отключения проводимости обмоток трансформатора КТП должна составлять $f_k = bn \cdot f_c$ (где n - число натурального ряда, f_c - частота сети). Установлено, что при этом в форме фазных напряжений трансформатора превалирует 1-я гармоника, что согласуется с условиями эксплуатации АД.

6. Установлены количественные показатели управляющих команд при осуществлении автоматической стабилизации величины напряжения, подводимого к удалённому АД высокой мощности в режиме фазового управления выпрямителем и импульсного управления ключом цепи коммутации узла соединения вторичных обмоток трансформатора ТП в трёхфазную схему.

РАЗДЕЛ 5

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Обоснование условия применения плавкого предохранителя как функционального узла коммутационного устройства ускорения отключения короткого замыкания

Техническое решение (Рисунок 2.9) представляет собой концепцию реализации функции ограничения энергетических параметров коммутационного дугообразования путём управления процессом коммутации силового присоединения ТП в режиме отключения к.з. Вместе с тем, необходимо определить технические возможности и область применения данного решения в условиях эксплуатации шахтных участковых ЭТК большой мощности. Этой цели соответствует анализ конструкции (устройства) и технических характеристик плавких предохранителей для промышленных электросетей.

Функция ограничения энергетических параметров коммутационного дугообразования, соответствующая схеме рисунка 2.9, определяет назначение плавкого предохранителя в качестве «сопутствующего». Однако, последовательное подключение предохранителя к фазам АВ неприемлемо в трёхфазной сети с двигательной нагрузкой, работающей в режиме изолированной нейтрали трансформатора вследствие вероятности неполнофазного режима при срабатывании не всех предохранителей. Техническое решение (Рисунок 2.9) отличается возможностью применения плавкого предохранителя как «сопутствующего» с воздействием одновременно на все фазы сети, что является принципиальным отличием. Поэтому существует возможность реализации такого решения с применением предохранителей серий ПН2; ПП31; ПНБ; ПДС и аналогичных (Рисунок 5.1), отдавая предпочтение быстродействующим типам (содержащим серебряные или аналогичные плавкие вставки с повышенным быстродействием плавления от теплового эффекта, созданного током в защищаемой цепи).

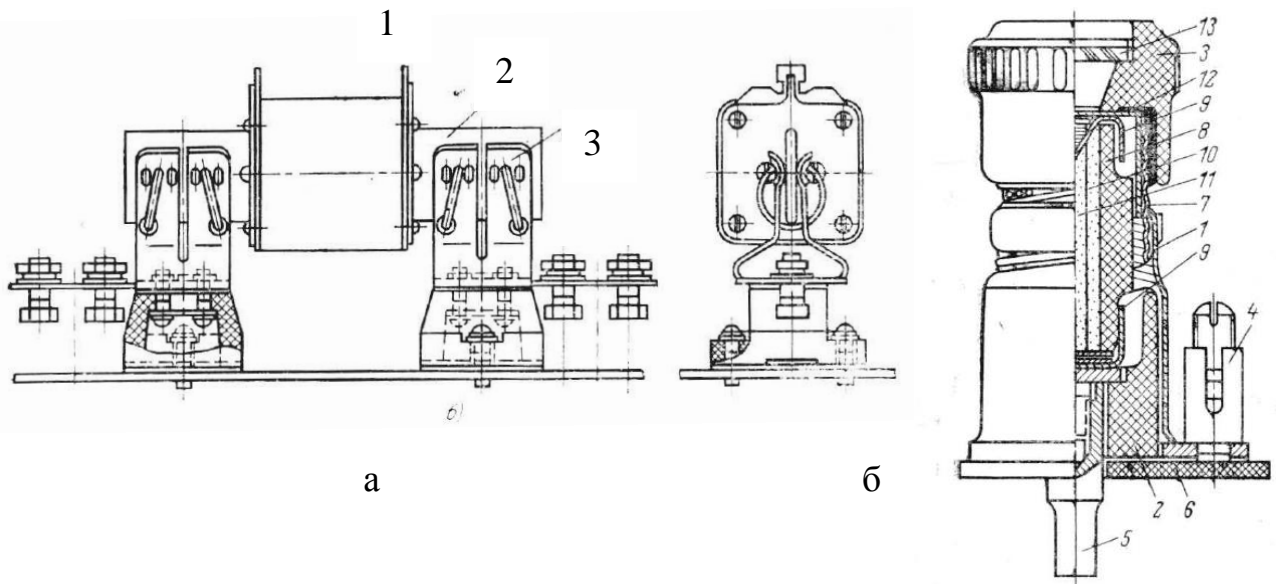


Рисунок 5.1 – Предохранители серий ПН2 (а) и ПДС (б).

Позиции рисунка 5.1а: 1 – вставка; 2 – ножевые контакты; 3 – входящие губки.

Позиции рис. 5.1б: 1 – корпус; 2 – основание; 3 – головка; 4, 5 – выводы;

6 – изолятор; 7 – соединение; 8 – корпус плавкой вставки; 9 – контакты;

10- плавкий элемент; 11 – наполнитель; 12 – мастика; 13 – стекло индикатора

Следует отметить, что способ использования таких предохранителей (при одиночной их установке ножевыми контактами 2 во входящих губках 3 (Рисунок 5.1) косвенно ограничивает область их применения в силовых электрических цепях высоких мощностей. Это объясняется появлением участков повышенной потери напряжения и, соответственно, тепловой перегрузки соединений вышеуказанных элементов. Поэтому область применения плавкого предохранителя ограничивается, обычно, сетями номинального тока 600 А (предохранители ПН2; ПДС; ПП57 и т.п.), но не более 1000 А для отдельных типов предохранителей (например, ПР2; ПП31).

Отмеченные ограничения позволяют сделать вывод о потенциальной возможности соединения нескольких предохранителей в параллельный модуль. Такое применение [87] имеет следующие характерные особенности. В частности, с увеличением числа параллельно соединённых предохранителей значение

интеграла плавления плавких вставок увеличивается пропорционально квадрату числа предохранителей в модуле. В такой же пропорции увеличивается и интеграл горения дуги (параметр теплового действия тока, протекающего через предохранитель в течение горения внутренней дуги) в предохранителе.

Из [87] следует, что использование модульной конструкции из параллельно соединённых предохранителей либо параллельных плавких вставок в одном корпусе не ухудшает защитных характеристик такого способа, и модульное исполнение может быть принято в качестве рабочей версии устройства ограничения энергетических параметров коммутационного дугообразования в цепи коммутации присоединения в режиме к.з. при условии размещения в шахтной участковой ТП. Процессы в предохранителе описываются уравнением тока в его цепи. Начальное условие:

$$L \frac{di}{dt} + iR + U_m (1 - e^{-at}) f(t) + kit = U_m f(t). \quad (5.1)$$

$$i|_{t=0} = i_{пл} \quad (5.2)$$

свидетельствует о том, что к моменту зарождения электрической дуги ток в цепи достиг значения $I_{пл}$. При подстановке значения $I_{пл}$ в начальное условие следует учитывать его знак. Для переменного тока $f(t) = \sin(\omega t + \psi)$, и решение уравнения тока имеет вид:

$$i = (I_{пл} - U_m \sqrt{\frac{2}{Lk}} (p \sin \phi + q \cos \phi)) \exp\left(-\frac{R}{L}t - \frac{k}{2L}t^2\right) + U_m \sqrt{\frac{2}{Lk}} (u \sin(\omega t + \phi) + u \cos(\omega t + \phi)) \exp(-at), \quad (5.3)$$

где введены обозначения, представленные совокупностью выражений (5.4):

$$\left\{ \begin{array}{l} u + jv = \frac{\int_0^z \exp z^2 dz}{\exp z^2}; \\ p + jq = \frac{\int_0^N \exp z^2 dz}{\exp N^2}; \\ z = r(\cos \eta + j \sin \eta); \\ r^2 = \frac{k}{2L} \left(t + \frac{R}{k} - \frac{aL}{k} \right)^2 \\ \operatorname{tg} \eta = \frac{\omega \frac{L}{k}}{t + R/k - aL/k}; \end{array} \right. \quad (5.4)$$

где $N=z$ при $t=0$.

Угол η находится в первой или во второй четверти в зависимости от знака $\operatorname{tg} \eta$.

Поскольку быстродействие срабатывания определяется отношением тока в силовой цепи предохранителя к его номинальному току, а в общем случае – представляют функциональную зависимость времени срабатывания от величины тока в цепи предохранителя, эти данные относятся к паспортным и представляются графиками для каждого типа предохранителей. Типовые графики изображены в Приложении Б. Эти данные служат основой для последующего вычисления свойств быстродействия устройства по рисунку 2.9 применительно к процессу к.з. на шинах трансформатора ТП конкретного типа (соответствующей мощности, параметров напряжения).

5.2 Разработка устройства управления коммутационным процессом в цепи отключения короткого замыкания на выходе ТП

На базе концептуальной схемы (Рисунок 2.9) могут быть разработаны отдельные варианты. В частности, эта схема по своим габаритам не зависит от мощности нагрузки и может быть применена непосредственно в составе

участковой ТП. Однако остается проблемной задача охлаждения силового полупроводникового мостового выпрямителя в условиях его размещения в рудничном взрывобезопасном корпусе. Кроме этого, срабатывание плавкого предохранителя в момент возникновения короткого замыкания в мощной электрической сети линейного напряжения 1140 В будет сопровождаться значительным тепловыделением (перегорание плавкой вставки) и может стать дополнительным фактором создания предпосылок взрыва метановоздушной смеси внутри оболочки трансформаторной подстанции [88].

Тем не менее, фактор плавления (перегорания) плавкого предохранителя внутри рудничной взрывозащищённой оболочки ТП не может быть определён в качестве сдерживающего, поскольку в процессе отключения междуфазного к.з. отходящего присоединения в не меньшей степени создаётся тепловой энергетический поток в трёх полюсах АВ РУНН ТП мощным дугообразованием при размыкании его силовых контактов.

Таким образом, проблемным вопросом промышленной реализации концептуальной схемы является сложность и громоздкость устройства охлаждения силовых вентилях выпрямителя. Данный выпрямитель предусмотрен с целью применения единственного плавкого предохранителя в общей цепи вторичной трёхфазной обмотки трансформатора ТП и гарантированного, в связи с этим, быстродействующего разъединения токопроводящей цепи в процессе отключения к.з.

Альтернативным решением, исключающим необходимость применения силового выпрямителя (Рисунок 2.9) может стать схема с использованием трёх предохранителей, соединённых в «звезду» и подключённых к выводам фазных вторичных обмоток трансформатора ТП. В самом неблагоприятном случае аварийного состояния (двухфазное к.з. в силовом присоединении ТП) перегорают два предохранителя из трёх, что полностью разъединяет трёхфазную вторичную обмотку трансформатора и создаёт эффект токоограничения цепи защитного отключения к.з. Однако, не следует исключать вероятность отказа одного из предохранителей, что спровоцирует эффект неполнофазного электропитания.

Применение данного технического решения должно быть дополнено защитой трёхфазной электроустановки от неполнофазного электропитания. Соответствующая схема представлена на рисунке 5.2. Её действие основано на выделении на резисторе R1 переменной составляющей выпрямленного напряжения, формируемого на выходе выпрямителя VD1-VD6 (Рисунок 5.3).

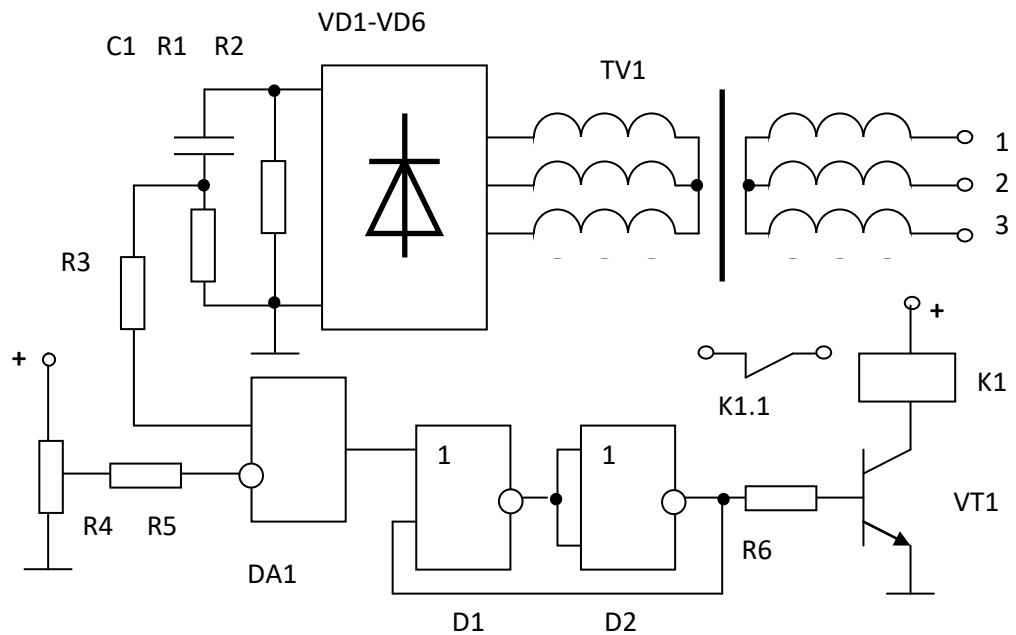


Рисунок 5.2- Схема устройства выявления неполнофазного режима ТП

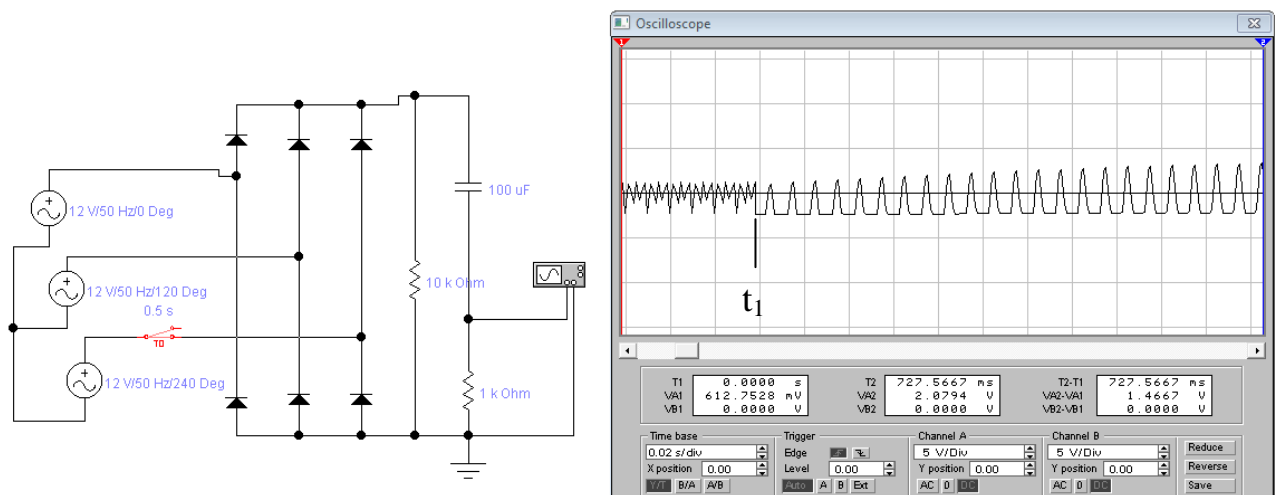


Рисунок 5.3 - Моделирование процесса выявления начала (момент t_1) неполнофазного режима в трёхфазной электросети: расчетная схема модели устройства и диаграммы напряжений на резисторе измерительного органа

При симметрии фазных напряжений. Подаваемых на входы 1; 2; 3 трансформатора TV1 переменная составляющая выходного напряжения выпрямителя будет находиться в пределах 5% его амплитуды. При исчезновении фазы на любом из входов данного трансформатора в форме выходного напряжения выпрямителя будет периодически появляться импульс высокой амплитуды. Его фиксация может быть обеспечена компаратором, отстроенным от напряжений малого уровня потенциометром R4.

Таким образом, неполнофазный режим электропитания идентифицируется компаратором DA1 в форме его выходного напряжения положительной полярности и фиксируется триггерной ячейкой на элементах «ИЛИ-НЕ» D1, D2 с последующим включением исполнительного реле K1 и размыканием его контактом K1.1 цепи нулевого расцепителя автоматического выключателя ТП

Представленная выше концепция может быть реализована и на основе применения быстродействующих силовых коммутационных узлов многоразового применения. В отношении их применения к необходимым и достаточным условиям реализации защитной функции следует отнести:

- соответствие коммутационной способности исполнительного устройства разрыва схемы «звезда» реальным параметрам коммутируемого тока к.з.;
- непревышение продолжительностью срабатывания исполнительного устройства величины времени разрыва силовой цепи контактами АВ участковой ТП;
- приоритет недопущения открытого дуго- искрообразования в силовой цепи исполнительного устройства в процессе разрыва схемы «звезда» трансформатора при реагировании на процесс короткого замыкания в его силовом присоединении.

Очевидно, что перечисленные условия в своей совокупности представляют собой техническое противоречие, решение которого требует разработки схемы принудительного ускоренного отключения силового устройства бездуговой коммутации. «Звезда» вторичных обмоток трансформатора может быть, в частности, разорвана отключением двух контакторов, расположенных между началами трёх фазных вторичных обмоток трансформатора ТП (Рисунок 5.4).

Обзор технических средств в области силовой коммутации мощных присоединений [85] позволил сделать вывод о принципиальной возможности использования однополюсных вакуумных контакторов (в частности, типа SPVC или аналогичных) в сетях линейного напряжения 660 В и 1140 В [89].

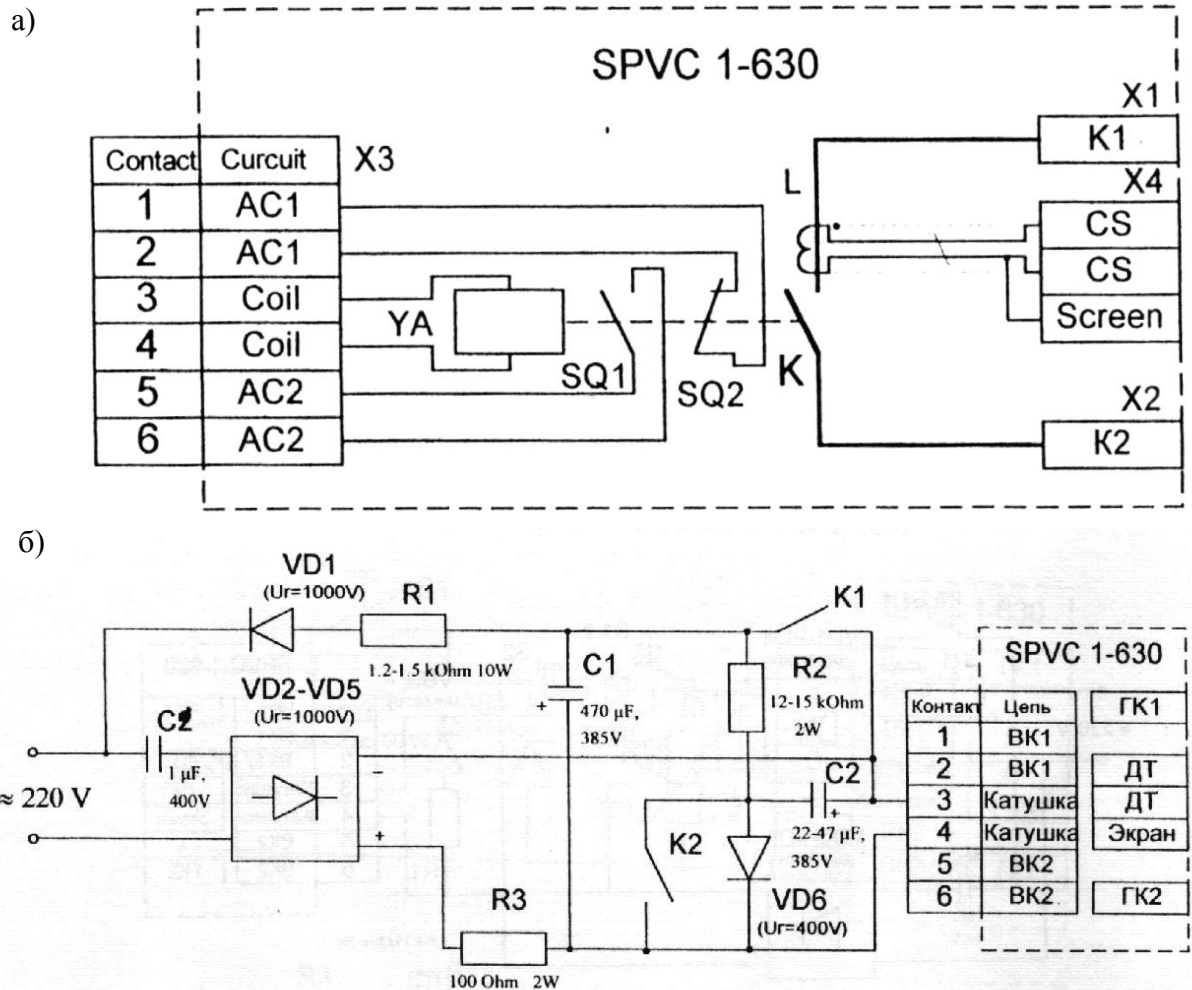


Рисунок 5.4 - Схема контактора SPVC 1-630 – а и вариант схемы управления данным контактором – б

Техническая характеристика данного контактора определяет величину максимального коммутируемого тока в 30 кА и время размыкания контактов 7 ± 2 мс. Указанные параметры согласуются с величинами аварийных токов шахтных участков электросетей высокой мощности и сопоставимы с параметрами быстрогодействия применяемых, в т.ч., микропроцессорных устройств максимальной токовой защиты [81, 90, 91]. Преимуществом является то, что

процесс разрыва аварийной силовой цепи происходит в вакуумной камере и не провоцирует взрыв метановоздушной смеси внутри рудничной оболочки ТП.

Заявленный параметр быстродействия схемы определяется тем, что отключение (обесточивание) катушки контактора происходит не вследствие её контактной коммутации, а в результате встречного разряда предварительно заряженного конденсатора С2 (Рисунок 5.4б). Коммутация конденсатора может быть выполнена быстродействующей полупроводниковой схемой устройства максимальной токовой защиты, связанного непосредственно с датчиком тока L (Рисунок 5.4а), встроенного непосредственно в корпус контактора.

Конструкция самого контактора SPVC-1-630 позволяет реализовать функцию ускоренного выявления процесса короткого замыкания в защищаемой сети. Данный эффект достигается за счёт применения в составе указанного контактора катушки Роговского в качестве датчика тока, поскольку она, будучи установленной на шине токопровода, формирует на выходе напряжение, пропорциональное по величине скорости нарастания тока в указанной шине:

$$u(t) = \left(\frac{L}{N} \right) \frac{di(t)}{dt} \quad , \quad (5.5)$$

где L – индуктивность катушки; N – количество витков катушки.

Это позволяет построить схему устройства выявления к.з. на базе компаратора DA1 (Рисунок 5.5), сопоставляющего величину импульса напряжения на выходе катушки Роговского с уставкой, формируемой потенциометром R1 [92, 93].

Кратковременный импульс, снимаемый с выхода компаратора DA1, запоминается как сигнал о к.з. триггерной схемой на элементах «ИЛИ-НЕ» D1 и D2, что в дальнейшем обрабатывается отпиранием ключевого транзистора VT1 и срабатыванием оптрона VD1-VD2. Учитывая конфигурацию схемы управления контактором (Рисунок 5.4), фотодиод оптрона VD2 следует подключить параллельно кнопке «Стоп» K2 в цепь разряда коммутационного конденсатора.

Таким образом, обеспечивается мгновенная реакция схемы на процесс короткого замыкания.

Представляется рациональным сопоставить технические возможности данной схемы токоограничения и схемы индуктивного ограничителя тока. Компьютерные модели данных схем представлены на рисунке 5.6 [92, 94]. При моделировании введены допущения, что активное и индуктивное сопротивления источника питания соответствуют параметрам трансформатора подстанции ТСВП-1000-6/1.2; отходящий кабель марки ЭВБВ 3x95 длиной 200 м; точка короткого замыкания находится в 10 м от трансформаторной подстанции; сопротивление нагрузки соответствует активным и индуктивным параметрам двигателя мощностью 250 кВт. При этом учитывается время срабатывания защиты типа БКС-3МК – 5 мс, задержка на отключение встречной индуктивности в цепи токоограничения – 10 мс. Кроме этого, вводится допущение, что в течение 20 мс с момента возникновения к.з. силовая цепь аварийного присоединения остается не разомкнутой силовыми контактами АВ ТП.

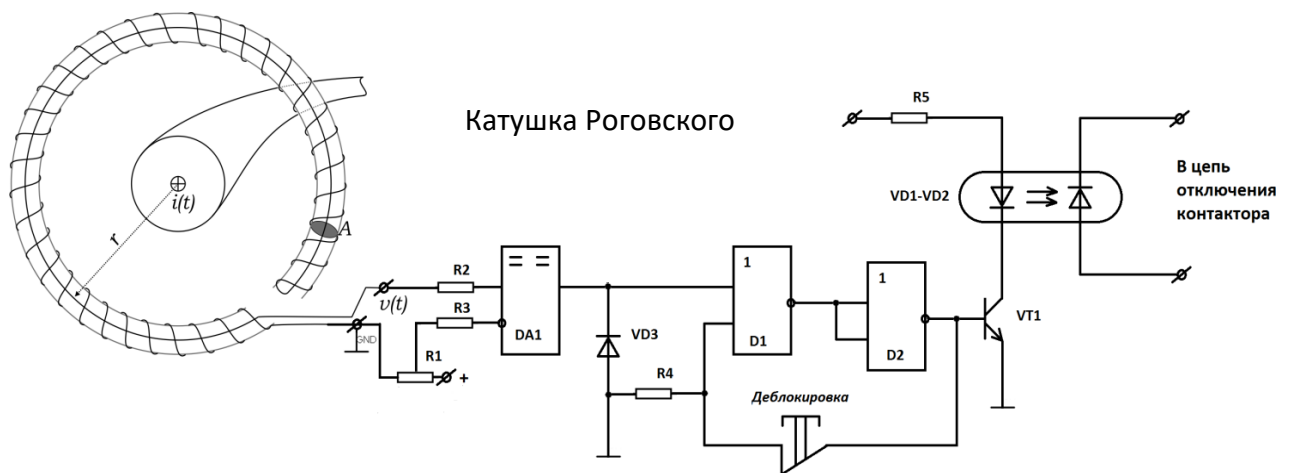


Рисунок 5.5 – Схема устройства выявления к.з. на основе применения датчика тока «Катушка Роговского»

Сопоставление диаграмм фазных токов (Рисунок 5.7) подтверждает наличие инерционности схемы дроссельного токоограничения, наличие тока высокой величины в сети аварийного присоединения после его срабатывания. При этом

выявленные недостатки отсутствуют в схеме токоограничения на основе контакторной коммутации звезды трёхфазной обмотки трансформатора ТП.

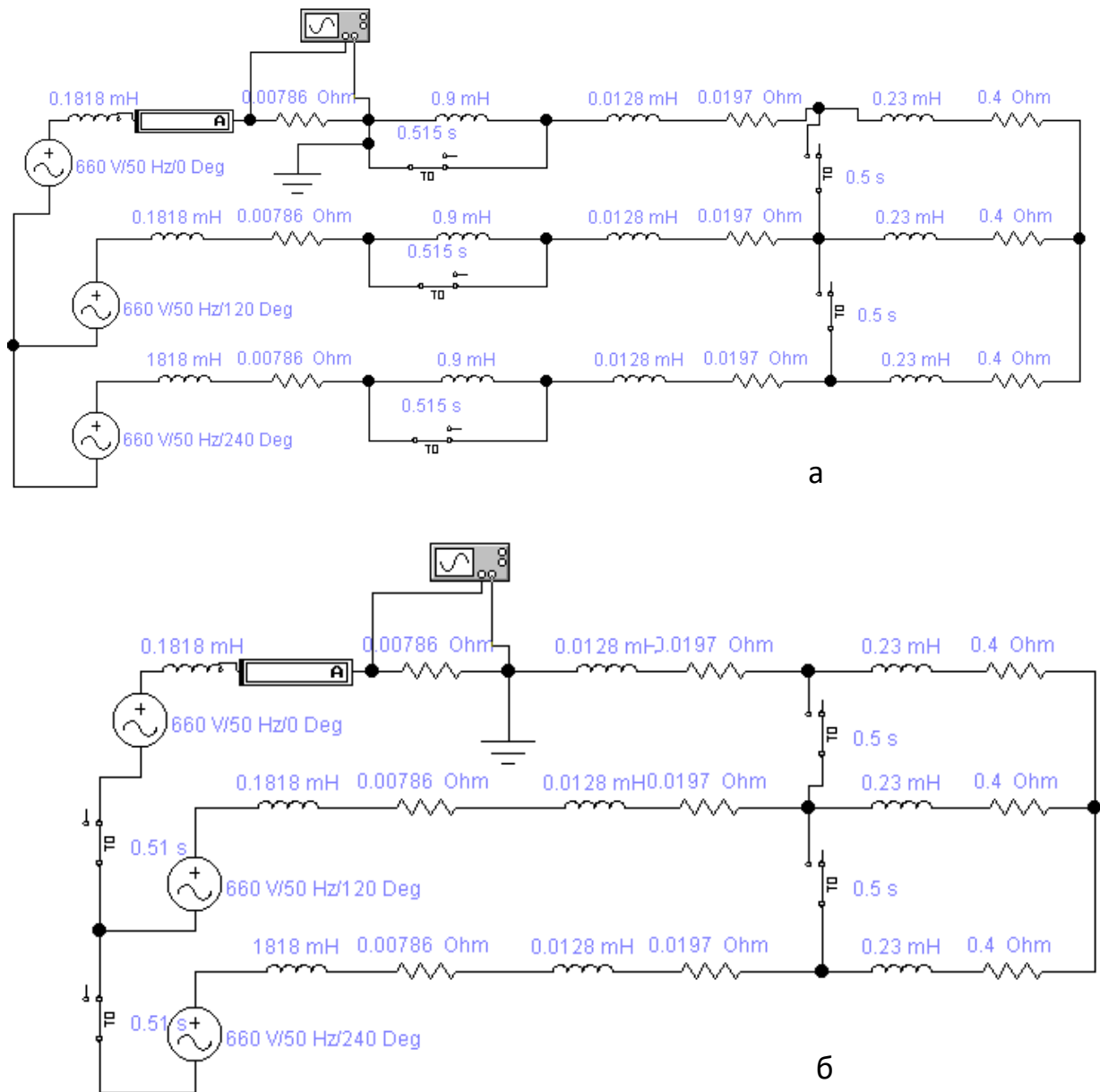


Рисунок 5.6 -. Компьютерные модели схем с токоограничителями по рисунку 1.21 – а и рисунку 2.2 – б

Продолжительность существования аварийного режима будет сопоставима с соответствующим временным параметром при применении дроссельного токоограничителя. Однако после срабатывания контакторного узла разъединения трёхфазной схемы вторичной обмотки трансформатора питания электрической

сети в ней полностью прекращается электрический ток, что существенно снижает тепловую нагрузку в силовых контактных соединениях АВ ТП.

Таким образом, обоснованная концепция ограничения энергетических параметров коммутационного дугообразования в цепи защитного отключения междуфазного к.з. автоматическим выключателем ТП может быть реализована устройствами с достаточно высоким быстродействием как разового (плавкие предохранители), так и многократного (вакуумные контакторы) применения.

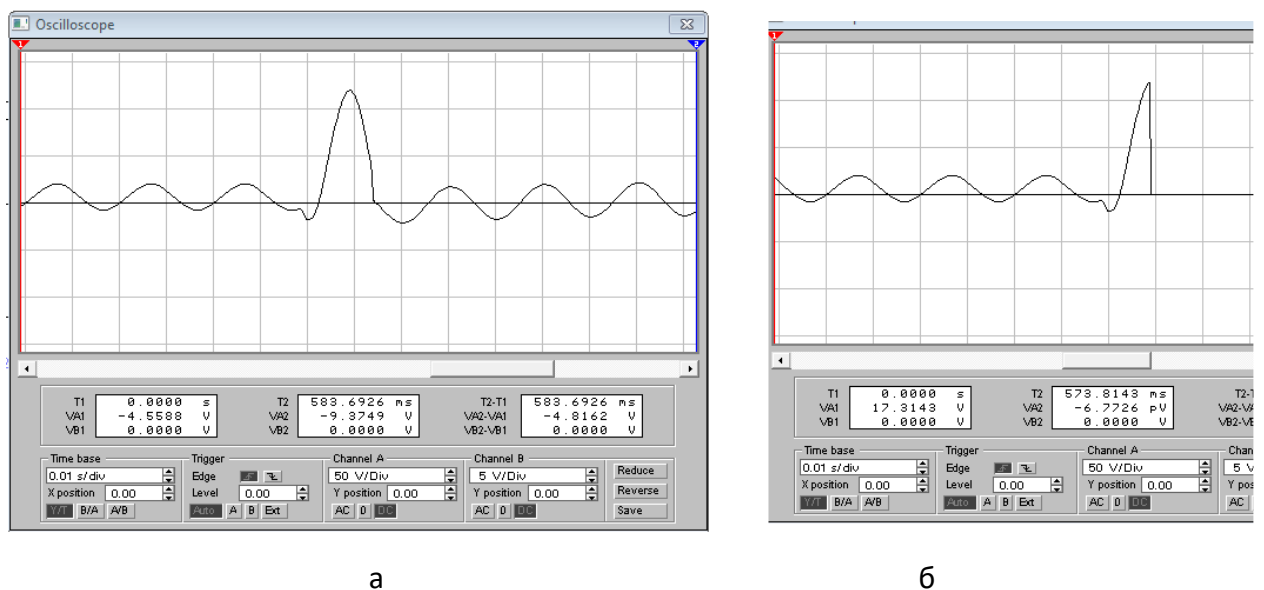


Рисунок 5.7 - Диаграммы моделирования формы токов вторичной фазной обмотки трансформатора подстанции ТСВП-1000-6/1,2, снятые с шунта фазной шины при дроссельном – *а* и контакторном – *б* способах токоограничения. Допущения – сечение жилы отходящего кабеля – 95 мм², точка короткого замыкания в 10 м от выхода ТП

При необходимости корректность применения вариантов разработанных устройств обеспечивается применением дополнительных технических решений, в частности, защит от неполнофазного электропитания.

Расчёт надёжности (Приложение В) вариантов устройств по схеме (Рисунок 2.9) и по схемам (Рисунки 5.4, 5.5), выполненный по методикам и исходным данным [95-97] позволяет сделать вывод о сопоставимости параметров наработки на отказ, интенсивности отказов данных схем, что делает возможным применение

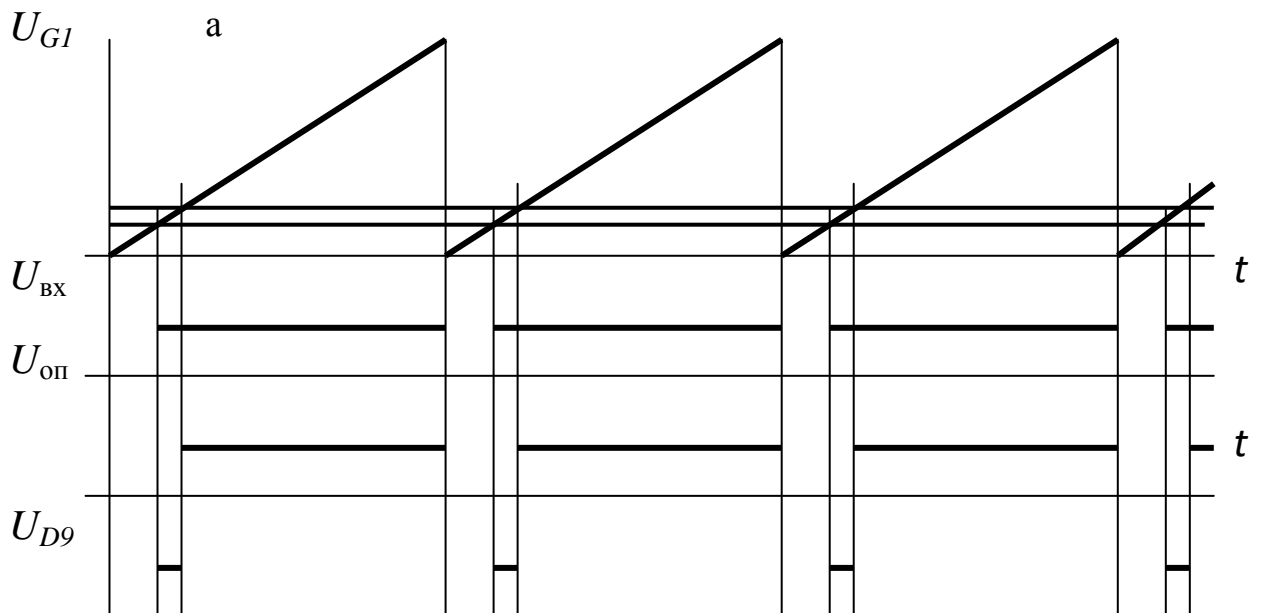
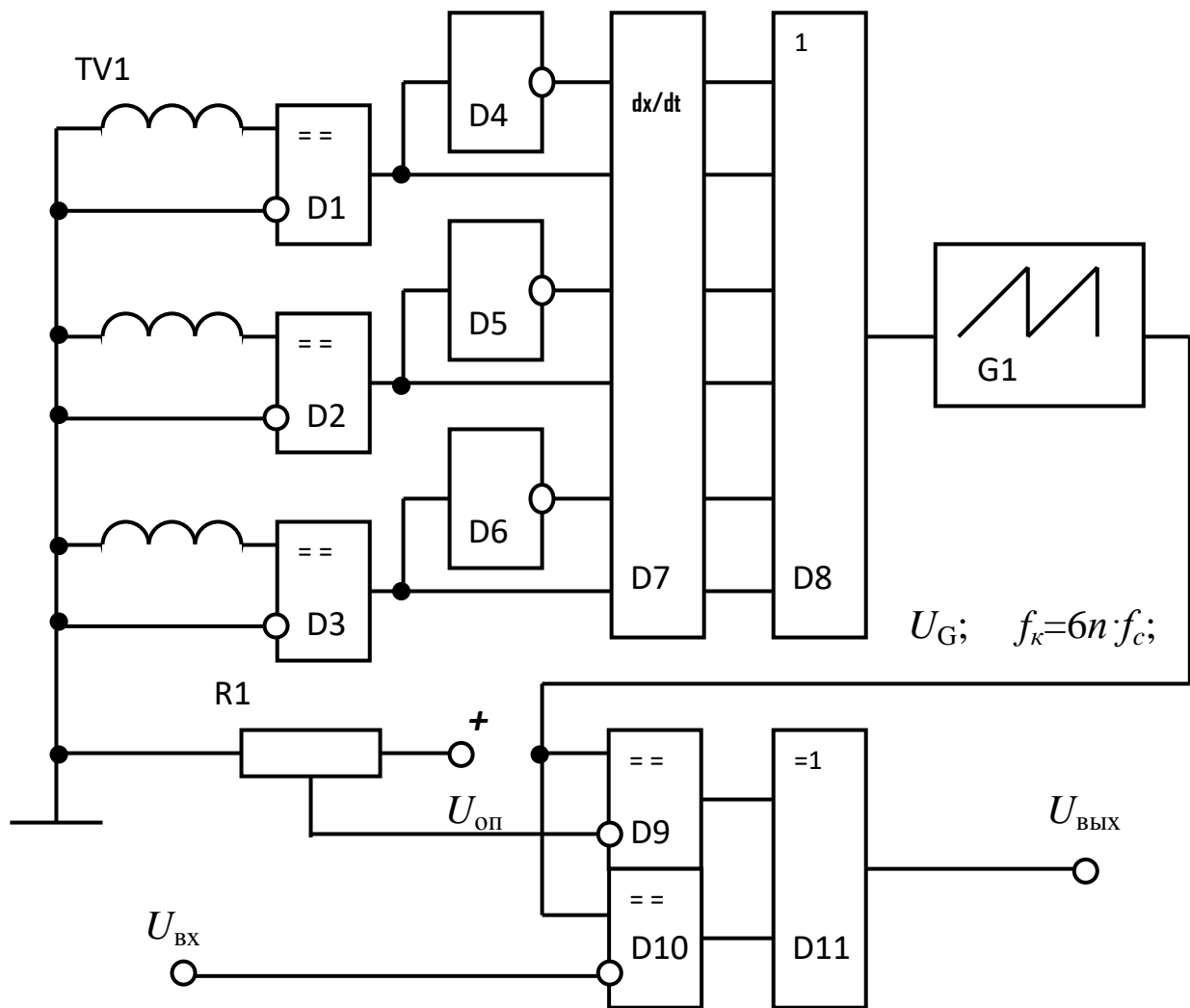
каждой из них в зависимости от специфики конструкции и эксплуатации базового электрогенерирующего устройства в сети напряжения выше 1000 В с мощными электропотребителями и их коммутацией низковольтным АВ типа АЗ792.

5.3 Разработка устройства управления скважностью коммутации вторичной обмотки трансформатора ТП

Процесс автоматического управления стабилизацией напряжения питания удалённого электропотребителя высокой мощности предполагает использование, как вариант, устройства импульсной коммутации обмоток трансформатора ТП. В соответствующей схеме (Рисунок 3.1б) ключ VT1 с частотой $f_k = \omega n f_c$ коммутирует цепь соединения в «звезду» вторичных фазных обмоток трансформатора ТП. Регулирование величины напряжения на его выходе осуществляется изменением продолжительности пауз между включениями элемента VT1, т.е., за счёт изменения скважности импульсов управления этим ключевым элементом в соответствии с управляющими воздействиями узла автоматического управления (структура приведена на рисунке 3.2).

Принцип управления продолжительностью пауз между включениями ключа VT1 (Рисунок 3.1,б) поясняется на примере схемы (Рисунок 5.8), которая формирует импульсы $U_{вых}$ заданной длительности, следующие с частотой $f_k = \omega n f_c = 300 \text{ Гц}$. Тактовые импульсы указанной частоты f_k привязаны к фазным напряжениям сети. Это исключает возможное фазовое смещение управляющих импульсов, поступающих на ключ VT1, что характерно для применения автономных задающих генераторов в случае, если отношение их частоты к частоте сети не является строго целым числом натурального ряда.

Для формирования тактовых импульсов обмотки согласующего трансформатора подключены к компараторам D1-D3, с выходов которых, а также с выходов инверторов D4-D6 снимаются прямоугольные импульсы, соответствующие положительным и отрицательным полуволнам фазных напряжений сети.



б

Рисунок 5.8 – Схема устройства управления скважностью импульсов отпирания ключа VT1 (Рисунок. 3.1б) (а) и диаграмма напряжений его структурных элементов (б)

Дифференцирующий узел dx/dt (D7) выделяет передние фронты указанных прямоугольных импульсов, которые объединяются логическим элементом 6 ИЛИ (D8) в общую последовательность тактовых сигналов частоты $f_k = 6nf_c$ при $n = 1$.

Поступая на формирователь пилообразного напряжения G1, тактовые сигналы приводят к формированию импульсов U_{G1} (Рисунок 5.8) с линейно нарастающими передними фронтами. Эти пилообразные импульсы сравниваются в компараторах D9 и D10, соответственно, с опорным (неизменным по величине) и входным (изменяемым в результате работы узла автоматического управления) напряжениями U_{on} и U_{ex} . Формируемые в этом случае выходные напряжения компараторов (U_{D9} и U_{D10}), поступая на вход элемента «Исключающее ИЛИ» D11, приводят к формированию на его выходе импульсов $U_{вых}$ на интервалах несовпадения потенциалов выходов компараторов D9 и D10. Эти импульсы представляют собой команды на запирающие ключа VT1 (Рисунок 3.1б), следуют с частотой $f_k = 6f_c$. Их длительностью управляет напряжение U_{ex} . Данный объект представлен схемой (Рисунок 5.8а) и может быть реализован на любой элементной базе.

5.4 Выводы по разделу 5

1. Анализ функциональных возможностей плавких предохранителей промышленных электросетей подтверждает возможность технической реализации коммутационного устройства ускорения отключения к.з. во внешнем присоединении ТП, схема которого представлена мостовым выпрямителем, нагруженным плавким предохранителем и объединяющим вторичные обмотки трансформатора ТП в трёхфазную схему. В случае эксплуатации в электрических сетях высоких мощностей предохранитель в цепи нагрузки мостового выпрямителя может быть представлен группой параллельно включенных предохранителей.

2. При отсутствии возможности применения силовых полупроводниковых приборов схема коммутационного устройства ускорения отключения к.з. в присоединении КТП может быть представлена тремя плавкими предохранителями, объединяющими вторичные обмотки трансформатора ТП в схему «звезда». При этом обязательно выявление неполнофазного режима работы трансформатора ТП (схема устройства разработана).

3. С целью адаптации вакуумного контактора к использованию в схеме управляемой коммутации цепи отключения к.з. разработано устройство выявления тока к.з. на основе использования встроенного датчика тока контактора, реагирующее на скорость нарастания тока на основе использования встроенного в контактор датчика тока.

4. Доказана возможность использования схемы коммутационного устройства ускорения отключения к.з. во внешнем присоединении ТП для реализации функции корректировки выходного напряжения трансформатора ТП (в диапазоне от 0,95 до 1,05 номинального значения) и разработана схема импульсного управления полупроводниковым ключевым элементом цепи нагрузки мостового выпрямителя, адаптированная к промышленному применению совместно с устройством автоматического управления.

5. Разработанная схема ускорения коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП при отключении к.з. во внешнем присоединении защищена патентом Украины на изобретение. Результаты диссертационного исследования приняты Государственным учреждением «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищённого и рудничного электрооборудования» (ГУ «НИИВЭ») к использованию в профильных научно-исследовательских работах, внедрены в учебный процесс в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специфика эксплуатации электрооборудования участка шахты выявила критичность конструкции автоматического выключателя трансформаторной подстанции к процессу отключения к.з. в сети напряжения 1140 В. Ограничение энергетических параметров коммутационной дуги в АВ на уровне, недостаточном для металлизации элементов его конструкции позволит обеспечить эффективную, безаварийную эксплуатацию низковольтных автоматических выключателей в составе шахтных участковых трансформаторных подстанций в сетях напряжения 1140 В, исключить необходимость разработки, изготовления и применения специальных силовых высоковольтных коммутационных аппаратов, что имеет важное народно-хозяйственное значение.

Проблемным вопросом эксплуатации потребителей, удалённых от ТП, является недостаточный уровень напряжения из-за значительных его потерь в кабельной сети. В связи с этим и с учётом меняющихся режимов работы АД и уровней нагрузки актуально создание САУ стабилизацией напряжения питания потребителя, удалённого от ТП, на уровне, близком к номинальному.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности эксплуатации шахтных участковых электротехнических комплексов на основе обоснования и реализации методов, алгоритмов и структуры технических устройств управления коммутационными процессами в цепи трансформатора ТП участка при отключении к.з. и стабилизации напряжения питания потребителя в сети, создающей значительные по величине потери напряжения.

Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Получила дальнейшее развитие математическая модель коммутационного плазмообразования в процессе горения сильноточной электрической дуги, отличающаяся наличием функциональной зависимости сечения плазмы от продолжительности плазмообразования, учётом

продолжительности нагрева поверхностей плазмообразующих силовых контактов АВ и параметров расширения ствола плазмы дуги в придиафрагменных областях.

2. Выявлены элементы конструкции автоматического выключателя типа А3792, применяемого в шахтной участковой электрической сети напряжения 1140 В, создающие эффект диафрагмирования коммутационной электрической дуги и металлизации поверхности его функциональных узлов и деталей корпуса. Установлено, что продолжительность защитной функции автоматического выключателя и применяемых в ТП дополнительных средств максимальной токовой защиты позволяет энергетическим параметрам коммутационного дугообразования достичь установившихся (высоких) величин.

3. Обоснован принцип ограничения энергетических параметров дугообразования при отключении к.з. в сети напряжения 1140 В низковольтным АВ, который основан на применении управляемой коммутации выходных цепей выпрямителя, объединяющего вторичные обмотки трансформатора ТП в трёхфазную схему. Изобретение защищено патентом Украины.

4. Установлено, что быстродействие обесточивания цепи к.з. при использовании предохранителя в схеме коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП может быть увеличено в 10 и более раз по сравнению со скоростью срабатывания применяемых в ТП средств защиты. Это создаёт эффект опережающего отключения по отношению к срабатыванию АВ ТП, либо синхронного с ним отключения. Сокращение времени дугообразования препятствует созданию энергетического импульса, достаточного для плазмообразования и металлизации прилегающих поверхностей.

5. Обоснован способ стабилизации напряжения питания электропотребителя в сети, создающей значительные по величине потери напряжения, который состоит в автоматическом управлении коммутацией вторичных обмоток трансформатора ТП, разработан алгоритм и обосновано применение одноконтурной системы автоматического управления процессом на основе сопоставления с заданным параметром разности фактического напряжения трансформатора ТП и вычисленных потерь напряжения в сети, определена

структура исполнительного коммутационного устройства и принципы формирования управляющей функции в вариантах фазового и импульсного воздействия на коммутационный процесс, установлена функциональная связь величины выходного напряжения трансформатора ТП и параметров управления коммутационным процессом в вариантах фазового и импульсного управления коммутатором.

6. Установлено, что критерию идентичности форм фазных напряжений выхода трансформатора ТП при импульсной коммутации соответствует отношение частоты импульсов коммутации к частоте сети: $6n$ (где n – число натурального ряда). Условием противодействия влиянию обратных ЭДС АД потребителей на параметры коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП является подключение полупроводниковых коммутаторов к обмоткам трансформатора со стороны, противоположной подключению силовых присоединений асинхронных двигателей потребителей.

7. Результаты диссертационного исследования приняты ГУ «НИИВЭ» (г. Донецк) к использованию в профильных научно-исследовательских работах, внедрены в учебный процесс в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВ	– автоматический выключатель;
АД	– асинхронный двигатель;
АЗ	– аппарат защиты;
АЗУ	- аппарат защиты от утечек тока на землю
ГК	– гибкий кабель;
ГОУВПО	- государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
ГУ	- государственное учреждение
УШ	– участок шахты;
ЭДС	– электродвижущая сила;
ЭТК	– электротехнический комплекс;
КА	– коммутационный аппарат;
к.з.	– короткое замыкание
КМ	– контактор магнитный;
МК	– магистральный кабель;
МП	– магнитный пускатель;
МТЗ	- максимальная токовая защита
ПЧ	- преобразователь частоты
РП	– распределительный пункт;
РУВН	- распределительное устройство высшего напряжения
РУНН	- распределительное устройство низшего напряжения
САУ	- система автоматического управления
СИФУ	- система импульсно-фазового управления
ТП	– трансформаторная подстанция
ТРН	- тиристорный регулятор напряжения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Півняк, Г.Г. Системи ефективного енергозабезпечення вугільних шахт. Національний гірничий університет / Г.Г. Півняк [и др.] ; За ред. Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: НГУ, 2004. – 206 с. : іл.
2. Вареник, Е.А. Новая серия взрывозащищённых трансформаторных подстанций ТВПШ / Е.А. Вареник, В.Е. Налбатов, А.В. Савицкий и др. // Уголь Украины. – 2016. – №4-5. – С. 33-39.
3. Справочник энергетика угольной шахты : в 2 т. : Т. 2. / Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н и др.; под общ. ред. Ванеева Б.Н. – 2-е изд., доп. и перераб. – Донецк, ООО «Юго-Восток Ltd.», 2001. – 440 с. : ил.
4. Дзюбан, В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения / В.С. Дзюбан. – Москва: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.
5. Руководство по ревизии, наладке и испытанию подземных электроустановок шахт: [справочник] : утверждено Главным управлением по эксплуатации, ремонту энергомеханического оборудования и связи Минуглепрома СССР 18.02.88 / М-во угольной пром-сти СССР и др. ; сост.: В.А. Чумаков, М.С. Глухов, Э.Р. Осипов и др. ; под ред.: В.В. Дегтярева, Л.В. Седакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1989. – 613с. : ил.
6. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Затв. 25.07.2006 № 258: видання офіційне / Держ. інспек.з нагляду за режимами споживання електричної і теплової енергії (Держенергонагляд). – Харків : Індустрія, 2007. – 272с.
7. Вареник, Е.А. Взрывобезопасная комплектная трансформаторная подстанция ТВПШ-630,6-069/0,4-20 / Е.А. Вареник, В.Е. Налбатов, В.Н. Савицкий и др. //Взрывозащищённое электрооборудование: сб. научн. тр. ГУ «НИИВЭ». – Донецк: ООО «Восток.Пресс Плюс», 2016. – С.27-33.
8. Трансформатор-комплектные устройства распределения и управления: [Электронный ресурс] // Becker Mining Systems GmbH. – Режим доступа: <https://www.becker-mining.com/ru/products.-> Загл. с экрана.

9. Взрывозащищённое электросиловое оборудование Hansen Electric для объектов горно-рудной промышленности. Трансформаторная подстанция типа TN6 (модификации TN6/1000-P28.1, TN6/1250-P28.1, TN6/1400-P28.1, TN6/1500-P28.1, TN6/1600-P28.1, TN6/1750-P28.1, TN6/2000-P28.1, TN6/2200-P28.1, TN6/1000-P36.1, TN6/1250-P36.1, TN6/1400-P36 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://b2b-postavki.ru/predstavitel/hansen-electric-spol-s-ro.html#prod>. – Загл. с экрана.

10. Berryann, R.J. Evolution of Longwall Mining and Control Systems in the United States [Electronic resource] / R.J. Berryann, J.A. Voelker // Mine Safety and Health Administration, Division of Electric Safety. – Triadelphia, West Virginia, 2005. – Mode of access: <https://www.msha.gov/s&hinfo/techrpt/electrical/lwcntrl.pdf>. – Title from the screen.

11. Groh, H. Explosion protection: electrical apparatus and systems for chemical plants, oil and gas industry, coal mining / H. Groh. – Amsterdam; London: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 524 p.

12. Маренич, К.Н. Асинхронный электропривод горных машин с тиристорными коммутаторами: монография / К.Н. Маренич. - Донецк, ДонГТУ, 1997. – 64 с.

13. Преобразователь частоты взрывозащищенный типа ПЧВ-250 У5 для подземных подъёмных машин [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://ukrniive.com.ua/ru/research/electricdrive/pchv.htm> .- Загл. с экрана.

14. Красовский, А.Б. Основы электропривода: учебн. пособие / А.Б. Красовский. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.- 405 с.

15. Савицкий, В.Н. Комплексное устройство управления высокопроизводительными угледобывающими комплексами КУУВ-500/500 / В.Н. Савицкий, С.Н. Окорочков, И.И. Иващик // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго–Восток, Лтд», 2011. – С. 93–99.

16. Saccomanno, F. Electric Power Systems: analysis and Control / F. Saccomanno. – Wiley-IEEE Press, 2003. – 744 p.

17. Meier, A.V. Electric Power Systems: A Conceptual Introduction / A.V. Meier. – Wiley-IEEE Press, 2006. – 328 p.
18. Справочник энергетика угольной шахты : в 2 т. : Т. 1. / В.С. Дзюбан, И.Г. Ширнин, Б.Н. Ванеев и др.; под общ. ред. Б.Н. Ванеева. – 2-е изд., доп. и перераб. – Донецк, ООО «Юго-Восток Ltd.», 2001.– 447 с.
19. Сычѳв, Л.И. Шахтные гибкие кабели / Л.И. Сычев, Л.З. Реут – Москва : Недра, 1971. – 64 с.
20. Правила безпеки у вугільних шахтах: НПАОП 10.0-1.01-10: затверджено наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010 N 62 / Держ. ком. України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду. – Київ, 2010. – 430с. – (Нормативно-правовий акт з охорони праці).
21. Демченко, О.А. Обоснование мер предотвращения взрывов при эксплуатации гибких силовых кабелей на угольных шахтах: дис. ...канд. техн. наук: 05.26.01 / Демченко Олег Александрович. – Макеевка, 2011. – 194 с.
22. Колосюк, В.П. Электробезопасность в горной промышленности: монография / В.П. Колосюк, Ю.В. Товстик; Под ред. В.П. Колосюка. – Донецк, Ноулидж (донецкое отделение), 2014. – 475 с.
23. Василець, С.В. Математичне моделювання перехідних процесів в багатомашинних шахтних електротехнічних комплексах: дис. ...канд. техн. наук: 05.09.03 / Василець Святослав Володимирович. – Донецьк, 2010. – 194 с.
24. Выключатели автоматические А3790: техническое описание и инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс] // АО «Контактор»: завод электротехнической промышленности. – Москва, 2017. – Режим доступа: https://www.kontaktor.ru/upload/iblock/adl/A3790_TO.pdf. – Загл. с экрана.
25. Маренич, О.К. Элементы конструкции автоматического выключателя А37ХХ как фактор возникновения его потенциально опасного состояния [Электронный ресурс] / О.К. Маренич, И.В. Ковалѳва // Вестник Донецкого национального технического университета.– Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып 4(14).

- С. 47-52. – Режим доступа: <http://vestnik.donntu.org/dl/2018/04/kovalyova.pdf> . – Загл. с экрана.
26. Соболев, В.В. Закономерности изменения энергии химической связи в поле точечного заряда / В.В. Соболев // Доповіді НАН України. – 2010. – №4. – С. 88-95.
27. Русанов, В.Д. Синтез окислов азота в неравновесных плазменных системах // Химия плазмы. / В.Д. Русанов, А.А. Фридман, Г.В. Шолин; под ред. Б.М. Смирнова – Москва: Атомиздат, 1978. – Вып. 5 – С. 222-241.
28. Ковалёва, И.В. Анализ факторов воздействия при дугообразованиях в контексте моделирования коммутационных переходных процессов в силовой цепи электротехнического комплекса участка шахты / И. В. Ковалёва, В. В. Соболев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – С.198-205. – (Сер. обчислювальна техніка та автоматизація; вип. 19(171)).
29. Горячев, С.В. Экспериментальное исследование прикатодной области сильноточечных электрических дуг: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.08 / Горячев Сергей Викторович. – Москва, 2010. –178 с.
30. Жуков, М.Ф. Динамика паров металла в пристеночных слоях плазмы / М.Ф. Жуков и др. // ДАН СССР. – 1981. – №6. – Т.260. – С 13 – 54.
31. Стенин, В.В. Особенности эрозии термоэмиссионного катода / ТВТ.- Москва: Наука, 1985. – Т.23. – С858-862.
32. Кирсанов, А.В. Оптимизация эксплуатации электрических аппаратов в энергетических системах, оборудованных средствами телемеханики: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Кирсанов Алексей Валерьевич. – Москва, 2005. –133 с.
33. Воронин, А.А. Повышение эффективности контактно-дугогасительных систем сильноточечных коммутационных аппаратов с удлиняющейся дугой: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Воронин Александр Анатольевич. – Самара, 2009. – 178 с.

34. Березина, Г.П. Импульсная плазмохимия CO_x , NO_x , SO_x . / Г.П. Березина, И.Н. Онищенко, В.С. Ус // Прикладная физика – 2002. – №2. – С. 34–44.
35. Риман, Я.С. Защита шахтных участков сетей от токов короткого замыкания / Я.С.Риман. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Недра, 1985. – 88 с.: ил.
36. Справочник по электроустановкам угольных предприятий / В.В. Дегтярев, В.И. Серов, Г.Ю. Цепелинский; под ред. В.В. Дегтярева. – Москва: Недра, 1988. – 727 с.
37. Маренич, О.К. Анализ технических возможностей применения средств токоограничения в электросетях участка шахты [Электронный ресурс] / О.К. Маренич, И.В. Ковалёва // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: сб. науч. тр. XVII Междун. науч-техн. конф. аспирантов и студентов, г. Донецк, 24-25 мая 2017 г. - Донецк, ДонНТУ.– 2017.– С. 153-155.– Реж. доступа: <http://ea.donntu.org:8080/jspui/handle/123456789/32070>. – Загл. с экрана.
38. А.с. 913516 СССР, МПК H02H09/02. Токоограничивающее устройство / В.А. Машкин, Л.С. Беспалов, В.Г. Савельев (СССР). – № 3000759/24-07; заявл. 25.07.1980; опубл. 15.03.1982, Бюл. № 10.
39. Жуйков, П.К. Об ограничении токов короткого замыкания в цепях электроснабжения / П.К. Жуйков // Форум гірників: матеріали міжнарод. конф., г. Днепропетровск, 11-13 окт. 2007. – Днепропетровск: НГУ, 2007. – С. 203 – 206.
40. Взрывозащищённые асинхронные двигатели: выбор, эксплуатация и ремонт / В.В. Каика, Т.В. Швецова, А.И. Аниканов и др.; под общ. ред. В.В. Каики. – Донецк: Юго-Восток, 2010. – 360 с.
41. Сидоренко, И.Т. Проектирование электроснабжения горных предприятий / И.Т. Сидоренко, К.Н. Маренич, И.В. Ковалёва. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2016. – 155 с.
42. Савицкий, В.Н. Взрывозащищённое устройство плавного пуска КУВПП-250 М УХЛ5 [Электронный ресурс] / В.Н. Савицкий, В.Л. Митрохин. – Режим доступа: <http://ukrniive.com.ua/ru/article/soft-start.htm>. – Загл. с экрана.

43. Аппарат управления пуском электропривода горной машины АПМ УХЛ5, Т5. Техническое задание : утв. М-вом угол. пром-сти СССР 19.07.1990. – Москва, 1990. – 90 с.

44. Маренич, К.М. Питання стійкості систем «тиристорний комутаційний апарат – асинхронний мотор» під час фазового регулювання напруги / К.М. Маренич // Теорія та моделі пристроїв вимірювальної і перетворювальної техніки: зб. наук. пр.; АН України; ін-т електродинаміки. – Київ, 1993. – С. 35-39.

45. Маренич, К.Н. Способы предупреждения неустойчивых состояний асинхронного тиристорного электропривода горной машины / К. Н. Маренич // Известия вузов. Горный журнал. – 1994. – №3. – С.126-129.

46. Красовский, А.Б. Основы электропривода: учебное пособие / А.Б. Красовский. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 405 с.

47. Сажин, Р.А. Автоматизация технологических процессов горного производства / Р.А. Сажин.- Пермь, Изд-во ПГТУ, 2009.- 197 с.

48. Опарин, В.Н. Мировой опыт автоматизации горных работ на подземных рудниках / В.Н. Опарин, Е.П. Русин, А.П. Тапсиев и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 98 с.

49. Шевырёв, Ю.В. Автоматизация горных машин и установок / Ю.В. Шевырёв, Н.Ю. Шевырёва, О.М. Соснин. – Москва: Изд-во МИСиС, 2019. – 320 с.

50. Шахтный подъём: научно-производственное издание / В.Р. Бежок, В.И. Дворников, И.Г. Манец, В.А. Пристром: под общ. ред. Б.А. Грядущий, В.А. Корсун. – 2-е изд., перераб и доп. – Донецк: Юго-Восток, 2007. – 624 с.: ил.

51. Стадник, Н.И. Справочник по автоматизации шахтного конвейерного транспорта / Н. И. Стадник, В.Г. Ильюшенко, С.И. Егоров и др.- Київ: Техника, 1992.- 438 с.

52. Ostroj-Hansen+Reinders, spol. Sr.o. Система APD-1. Инструкция по обслуживанию. № 4. Наименование NO 55117-00.1 [Электронный ресурс]. – 2002.- 31 с. – Режим доступа: <http://www.onr.cz>. – Загл. с экрана

53. Руководство по ревизии, наладке и испытанию шахтных подъёмных установок: нормативное производственно-практическое издание: утверждено

Министерством угольной промышленности Украины 06.08.2009 / В.Р. Бежок, В.Г. Калинин, В.Д. Коноплянов, В.М. Курченко / под общ. ред. В.А. Корсуна. – Изд. 3-е, перераб. и доп. - Донецк : Донеччина, 2009. – 672 с. : ил.

54. Борисенко, В.Ф. Электромеханические системы транспортных механизмов / В.Ф. Борисенко, А.А. Чепак, В.А. Сидоров и др ; под общ. ред. В.Ф. Борисенко. - Донецк, ДонГТУ, 2007.- 332 с.

55. Ляшенко, Н.И. Некоторые результаты эксплуатации аппарата АПМ управления пуском электропривода ленточного конвейера / Н.И. Ляшенко, А.В. Панасенко, В.Н. Зеленецкий // Уголь Украины. – 1997. – № 12. – С. 35-37.

56. Электрическая дуга, процесс горения и гашения. Плазма электрической дуги и процессы в ней [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studme.org/121779/tehnika/elektricheskaya_duga_protssess_goreniya_gasheniya_plazma_elektricheskoy_dugi_protssessy . – Загл. с экрана.

57. Воронин, А.В. Повышение эффективности контактно-дугогасительных систем сильноточных коммутационных аппаратов с удлиняющейся дугой: автореф. дис. канд техн. наук. 05.09.01 / Воронин Александр Анатольевич. – Самара, 2009. – 19 с.

58. Бершадский, И.А. Развитие научных основ и методов создания искробезопасного электрооборудования для повышения безопасности труда горнорабочих: дис. ... докт. техн. наук. 05.26.01 /Бершадский Илья Адольфович. – Донецк, 2014. – С. 55-101.

59. Гладков, А.Ю. Использование методов расчётной оценки искробезопасности для источников питания с опережающим отключением / А.Ю. Гладков, И.А. Бершадский, В.В. Якимишина //Безопасность труда в промышленности. – 2019. – №2. – С. 3-9.

60. Mayer, O. Ober die Theorie des Lightbogens und seiner Loschung / O. Mayer. – ETZ, 1943. – № 64.

61. Schmitz, H. Analysis of the cathodic region of atmospheric pressure discharges / H. Schmitz, K-U Riemann // Phys. – 2002. – № 35. – P. 17- 27.

62. Ильин, А.С. Математическое моделирование термодинамических процессов гашения дуги в потоке элегаза (SF_6) в электрических аппаратах: автореф. дис. канд техн. наук. 05.09.01; 05.14.12 / Ильин Александр Сергеевич. – Екатеринбург, 2012. – 30 с.

63. Elkalashy, N.I. modeling and detection of high impedance arcing fault in medium voltage networks: Doctoral Dissernanion. / Elkalashy N.I. - Helsinki: 2007. – 77 p.- (Helsinki University of Technology).

64. Ghezzi, L. Modeling and Simulation of Low Voltage Arcs [Электронный ресурс] / L. Ghezzi, A. Balestrero. – 2010. – Режим доступа: http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:ddf219d8-5572-45c5-9249aacbb68683cd/Modeling_and_Simulation_of_Low_Voltage_Arcs.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

65. Брижанский, С.М. К теории вольт-амперной характеристики столба стационарного дугового разряда высокого давления / С.М. Брижанский // Журнал технической физики. - 1965.- Вып.10.- С.35.

66. Залесский, А.М. Основы теории электрических аппаратов / А.М. Залесский.- Москва: Высшая школа, 1974.- 184 с.

67. Лелёвкин, В.М. Численное моделирование характеристик открытой диафрагмированной электрической дуги [Электронный ресурс] / В.М. Лелёвкин, В.Ф. Семёнов // Вестник КРСУ. – Бишкек, 2002.- №22. – Режим доступа: <https://www.krsu.edu.kg/vestnik/2002/v2/a10.html>

68. Энгельшт, В.С. Теория столба электрической дуги / В.С.Энгельшт, В.Ц. Гурович, Г.А. Десятков и др. // Низкотемпературная плазма. – Новосибирск: Наука СО, 1990. – Т.1. – 376 с.

69. Тропина, А.А. Численный анализ характеристик электрической дуги в турбулентном потоке газа / А.А. Тропина, В.Е. Костюк //Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: ХАИ, 2006.- №9 (35).- С. 157 – 161.

70. Брон, О.Б. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов / О.Б. Брон, Л.К. Сушков. – Ленинград: Энергия, 1975. – 211 с.

71. Андерсон, Дж. Явления переноса в термодинамической плазме / Дж. Андерсон. – Москва: Энергия, 1972.- 151 с.
72. Cundall, C.M. Electrode vapour jets in spark discharges – Spectrochimica Acta / C.M. Cundall, J.D. Craggs. – 1955. – Vol. 7.- P. 149 -164.
73. Маренич, О.К. Повышение эффективности автоматической защиты от коротких замыканий средствами управляемой коммутации силовых цепей источника питания / О.К. Маренич // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта, Донецк: ДОНИЖТ, 2019. – Вып. 55. – С. 11-19.
74. Пат. 102285 (UA), МПК (2013.01) H02H 3/00. Тривфазний трансформатор напруги / К.М. Маренич, І.В. Ковальова, О.К. Маренич. – № 2011 09048; заявл. 19.07.2011; опубл. 25.06.2013, Бюл. №12.
75. Ковалёва, И.В. Токоограничение цепи защитного отключения как инновационное решение в области повышения ресурса шахтной участковой трансформаторной подстанции [Электронный ресурс] / И.В. Ковалёва, О.К. Маренич // Вестник Донецкого национального технического университета.- Донецк: ДОННТУ, 2019.- Вып. 2(16). – С. 95-101. – Режим доступа: <http://vestnik.donntu.org/dl/2019/03/kovaleva.pdf>. – Загл. с экрана.
76. Дубинка, Е.С. Новые технические решения в области повышения ресурса и безопасности эксплуатации электрооборудования технологического комплекса участка шахты / Е.С. Дубинка, О.К. Маренич // Актуальные эколого-политологические аспекты современности : научно-практическая конференция (в рамках междунар. науч.-практ. форума "Россия в 21 веке: глобальные вызовы, риски и решения", г. Донецк, 28 февр. - 4 апр. 2019 г.) : сб. науч. тр. конф. – Донецк: ДОННТУ, 2019. – С 51-53.
77. Колосюк, В.П. Импульсное питание электроустановок: энергосбережение и безопасность / В.П. Колосюк, А.В. Колосюк, В.В. Дорофиеенко. – Донецк: «ВИК», 2002. – 259 с.
78. Маренич, О.К. Автоматическое управление коммутацией обмоток трансформатора как способ стабилизации напряжения питания удалённого

электропотребителя шахтного технологического участка [Электронный ресурс] / О.К. Маренич, И.В. Ковалёва // Информатика и кибернетика: Сборник научных трудов.- Донецк: ДОННТУ, 2019.- Вып. 3(17). – С. 7-14.- Режим доступа: http://infcyb.donntu.org/IC_17.pdf. – Загл. с экрана.

79. Круг, К.А. Основы электротехники. Т.2. Теория переменных токов / К.А. Круг.- Москва ; Ленинград: Госэнергоиздат, 1946.- 637 с.

80. Маренич, О.К. Применение средств дополнительного автоматического разрыва цепи тока короткого замыкания как средство повышения ресурса автоматического выключателя шахтной участковой трансформаторной подстанции. Постановка и результаты эксперимента [Электронный ресурс] / О.К. Маренич, Е.В. Золотарёв // Вестник Донецкого национального технического университета.- Донецк: ДонНТУ, 2019. – Вып. 3(17). – С. 69-77. – Режим доступа: <http://vestnik.donntu.org/dl/2019/03/marenich.pdf> .- Загл. с экрана.

81. Блок защиты и управления трансформаторной подстанции БЗУ-ТП. Техническое описание и инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс] .– 2016. – Режим доступа: <http://itep.com.ua/ru/catalogue/systems/bzu-tp/> . – Загл. с экрана.

82. Ивоботенко, Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б.А. Ивоботенко. – Москва: Энергия, 1975. – 184 с.

83. Тимошенко, Г.М. Теория инженерного эксперимента : учеб. пособ. / Г.М. Тимошенко, П.Ф.Зима.- Донецк, ДПИ, 1984. – 60 с.

84. Гришин, В.К. Статистические методы анализа и планирования эксперимента / В.К. Гришин. – Москва: Изд-во Московского ун-та, 1975. – 128 с.

85. Контактёр однофазный вакуумный серии SPVC. Техническое описание: Контактёр серии SPVC, завод «Таврида», Севастополь: [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.masters.donntu.org/2008/fema/tarassenko/library/5.htm> - Загл. с экрана.

86. Климаш, В.С. Регулировочные свойства, энергетические показатели и моделирование в среде Matlab выпрямителей и регуляторов переменного

напряжения: учеб. пособие / В.С. Климаш .- Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ»; 2015. – 114 с.

87. Намитоков, К.К. и др. Плавкие предохранители / К.К. Намитоков, Р.С. Хмельницкий, К.Н. Аникеева.- Москва: Энергия, 1979, 176 с.

88. Колосюк, В.П. Повышение взрывопожаробезопасности шахтных систем электроснабжения / В.П. Колосюк, П.К. Жуйков // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго–Восток, Лтд», 2008. – С. 99–116.

89. Маренич, О.К. Контактор SPVC как комбинированная система автоматического подавления энергетического потока цепи короткого замыкания /О.К. Маренич // Севергеозкотех-2018: XIX междунар. молодёжная науч. конф., 21-23 марта 2018 г.: материалы конф. – Ухта, УГТУ, 2019. –Ч1. – С 53-55.

90. Фролкин, В.Г. Быстродействующая защита шахтных участковых сетей / В.Г. Фролкин. – Москва: Недра, 1986. – 125 с.

91. Техническая характеристика блока токовой защиты БКЗ-3МК. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://itep.com.ua/ru/catalogue/defence/bkz-3_mk. – Загл. с экрана.

92. Ковалёва, И.В. Техническая реализация токоограничения цепи короткого замыкания в контексте применения вакуумных коммутаторов [Электронный ресурс] / И.В. Ковалёва, О.К. Маренич // Вестник Донецкого национального технического университета.- Донецк: ДонНТУ, 2018.– Вып. 1(11). – С. 34-40. – Режим доступа : <http://vestnik.donntu.org/dl/2018/01/kovaleva.pdf>. - Загл. с экрана.

93. Маренич, О.К. Токоограничение цепи защитного отключения как инновационное решение расширения области применения низковольтных автоматических выключателей / О.К. Маренич, И.В. Ковалёва // Наука, техника, инновации: IX междунар. науч.- практ. конф., 25 апр. 2019 г., материалы конф.- Усинск, УФ УГТУ, 2019. – 5с.

94. Маренич, О.К. Автоматическое токоограничение процесса отключения цепи короткого замыкания – инновационное решение в области эксплуатации

электротехнических комплексов / О.К. Маренич, И.В. Ковалёва // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: XIX междунар. науч.-техн. конф., 21-23 мая 2019 г.,: материалы конф. – Донецк, ДонНТУ, 2019. – С.152-158. – Режим доступа: <https://issuu.com/studtv.donntu/docs/e1b20b07ebc98c>. – Загл. с экрана.

95. Килибаева, Ж.К. Анализ отказов и надёжности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем [Электронный ресурс] / Ж.К. Килибаева // Молодой Учёный №8(67), июнь 1 – 2014. – Режим доступа: <http://moluch.ru/archive/67/11484/>. – Загл. с экрана.

96. Интенсивности отказов элементов радиоэлектронной аппаратуры [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <http://helpiks.org/2-110704.html>. – Загл. с экрана.

97. Боровиков, С.М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств / Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д.- Минск: БГУИР, 2010. - 68 с.

Приложение А

Копии документов о внедрении результатов исследований



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: doneta.info@mail.ru

27.11.19 № 29-15/16

На № _____

Диссертационный совет Д 01.024.04
при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Мареняч Ольги Константиновны на тему: «Обоснование методов, алгоритмов и структуры технических устройств управления коммутационными процессами электротехнического комплекса участка шахты», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Результаты диссертационных исследований Мареняч О.К., а именно: принципы построения устройств ускорения отключения коротких замыканий на основе управления коммутационными процессами в цепи вторичных обмоток трансформатора комплектной подстанции участка шахты; алгоритмы работы, принципы построения схем устройств автоматического управления процессом стабилизации напряжения питания удалённого электропотребителя высокой мощности при обеспечении защиты от таковых перегрузок асинхронных электроприводов технологических установок шахты внедрены в учебный процесс при чтении курса лекций по дисциплине «Автоматическая защита электрооборудования шахт от аварийных и опасных состояний» для студентов направления подготовки 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» (магистерская программа «Автоматизация технологических процессов и производств в горно-металлургической отрасли»), что отражено в учебной программе и конспекте лекций указанной дисциплины.

Проректор по научно-педагогической работе
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
докт. техн. наук, профессор

А.Б. Бирюков

Начальник учебного отдела
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
канд. техн. наук, доцент

Б.В. Гавриленко

Декан факультета компьютерных информационных
технологий и автоматизации
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
канд. техн. наук, профессор

В.В. Турупалов



ГУ «НИИВЭ»

Государственное учреждение
 "Научно-исследовательский,
 проектно-конструкторский и технологический
 институт взрывозащищенного
 и рудничного электрооборудования"

ДНР
 83052 г. Донецк
 ул. 50-й Гвардейской дивизии, 17

ИЮЛ - 00217159
 Р/с - 25315017022083
 Центральный Республиканский Банк
 Донецкой Народной Республики
 Отделение № 0001/73
 Код банка - 400019

Тел.: (062) 382-93-53
 Факс: (062) 382-93-52
 Моб.: (071) 328-83-68
 e-mail: niivz@niivz.ru

№ 1/354 от 22.11.2019
 на Ваш _____ от _____

Проректору по научной работе
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный
 технический университет»
 д.т.н., профессору С.В. Борщевскому

Уважаемый Сергей Васильевич!

На Ваш № 01-563/27 от 21.11. 2019 г. сообщаем, что результаты диссертационного исследования аспиранта Маренич Ольги Константиновны «Обоснование методов, алгоритмов и структуры технических устройств управления коммутационными процессами электротехнического комплекса участка шахты» рассмотрены в нашем институте и признаны актуальными. Подтверждаем целесообразность их использования в НИР, проводимых ГУ «НИИВЭ» при проектировании шахтных силовых коммутационных аппаратов и трансформаторных подстанций перспективных серий. В частности, научный и практический интерес представляют:

- техническое решение в области быстродействующего управления коммутационным процессом в силовой цепи трансформатора комплектной подстанции, обеспечивающее ограничение энергетических параметров дугообразования в автоматическом выключателе при отключении коротких замыканий в сети напряжения 1140 В;

- техническое решение в области минимизации потерь напряжения при электронитании удалённого асинхронного двигателя повышенной мощности на основе применения системы автоматического управления коммутационными процессами в силовой схеме трансформатора подстанции при подключении отпаек повышающего напряжения.

Теоретические разработки указанной проблематики приняты нашим институтом к использованию в профильных НИР.

Директор ГУ «НИИВЭ», к.т.н.  Е.А. Варсник

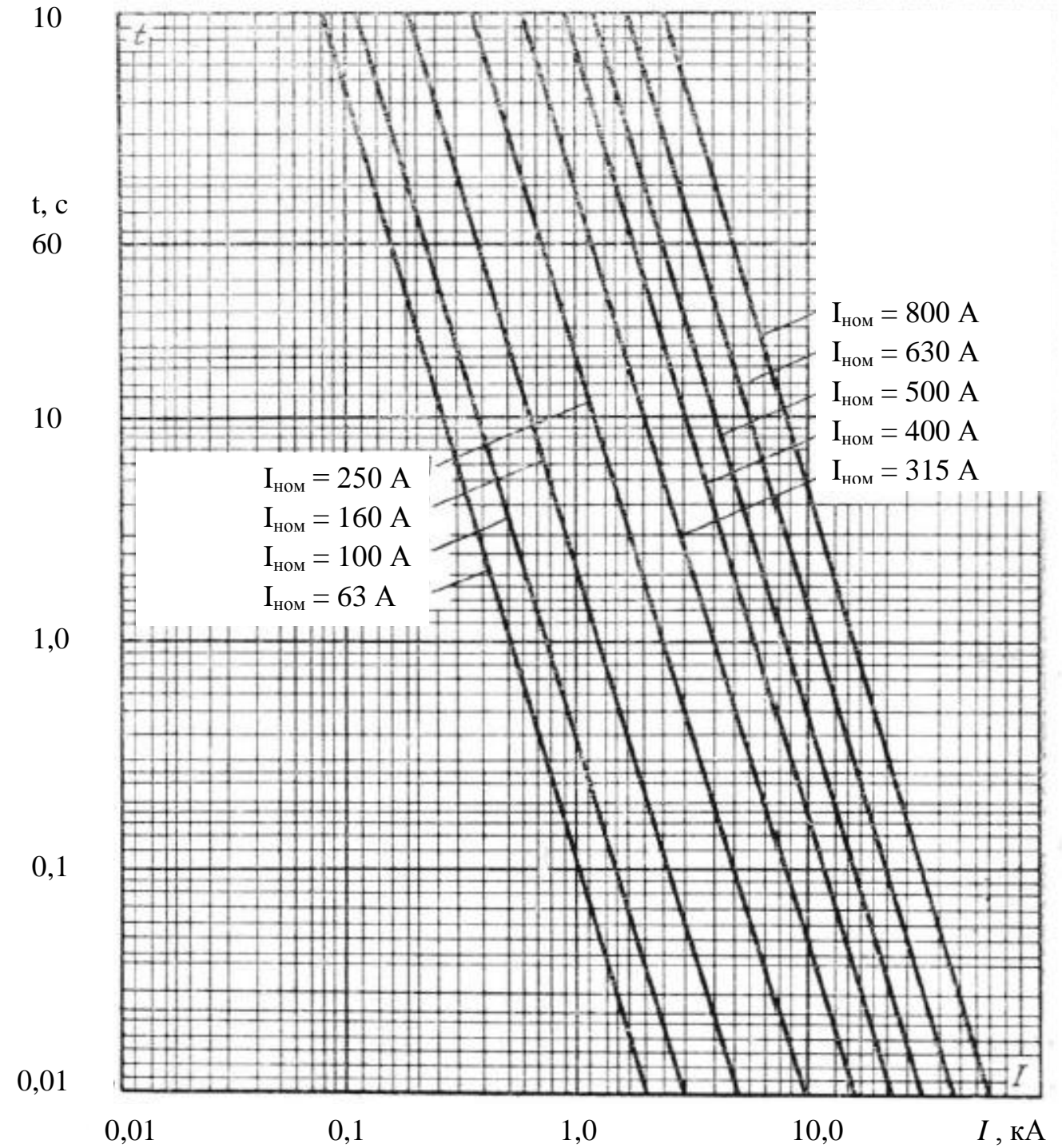


ГУ «НИИВЭ»

Приложение Б

Время-токовые характеристики предохранителей серии ПП157
на номинальное напряжение 660 В

t, мин. (полное время срабатывания)



Приложение В

Расчёт надёжности вариантов устройств управляемой коммутации силовой цепи трансформатора КТП

Расчёт надёжности вариантов устройств управляемой коммутации силовой цепи трансформатора КТП в процессе отключения тока к.з осуществляется по методике [95; 96; 97] в соответствии с которой распределение случайных отказов λ для всех элементов, применяемых в разработанном устройстве, подчиняется экспоненциальному закону. Для них интенсивность отказов можно принять постоянной, не изменяющейся во времени. Интенсивность отказа каждого элемента в отдельности существенно зависит от его фактической загрузки в конкретном устройстве.

При разработке устройства элементы схемы выбраны с некоторым запасом по току, напряжению, мощности. Температура внутри взрывозащищённой оболочки в отсеке, где располагаются элементы, не должна превышать 60°C .

С учётом этого, при вычислении общей интенсивности отказов элементов вводятся поправочные коэффициенты a и $a1$, учитывающие реальную загрузку элемента, его температуру, а также критичность схемы к изменению параметров элементов.

Все результаты вычислений представлены в таблице В.1. Предполагается что в соответствии с критериями надёжности все элементы соединены последовательно. Общая интенсивность отказов устройств (λ_p):

- полупроводниково-резистивная схема с предохранителем (Рисунок 2.9):

$$\lambda_p = 13,795 * 10^{-6} \text{ час}^{-1};$$

- полупроводниково-контакторная схема (Рисунок 5.5; Рисунок 5.6):

$$\lambda_p = 19,862 * 10^{-6} \text{ час}^{-1}.$$

Применительно к полупроводниково-контакторной схеме учитывается также наличия блока электропитания узла максимальной токовой защиты (Рисунок В.1).

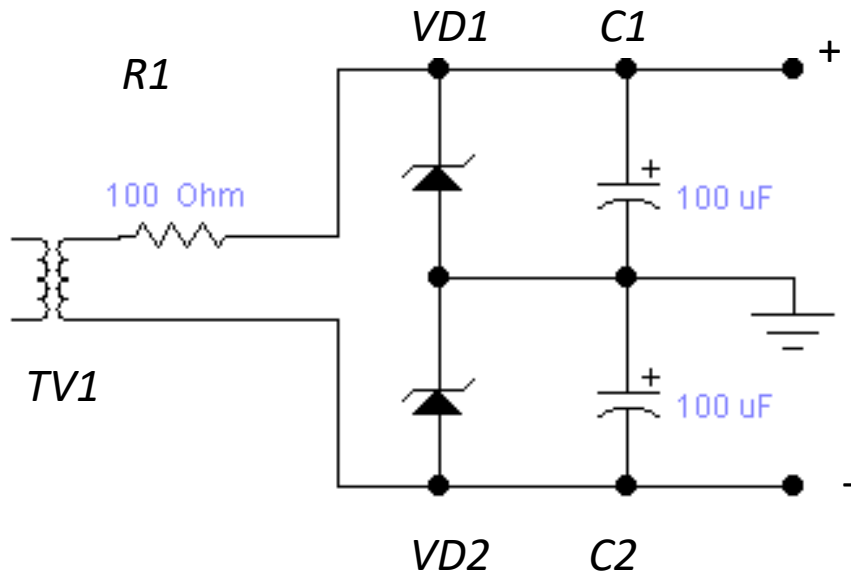


Рисунок В.1 – Схема блока питания узла максимальной токовой защиты полупроводниково-контакторного устройства ограничения энергетических параметров коммутационного дугообразования

Наработка на отказ устройства ($T_p = 1/\lambda_p$):

- полупроводниково-резистивная схема с предохранителем (Рисунок 2.20):

$$T_p = 72490 \text{ час};$$

- полупроводниково-контакторная схема (Рисунок 5.4, Рисунок 5.5):

$$T_p = 50347,3 \text{ час};$$

Вероятность безотказной работы устройства на 1000 час. $P(10^3) = e^{-\lambda_p 1000}$:

- полупроводниково-резистивная схема с предохранителем (рис.2.18):

$$P(10^3) = 0,9863;$$

- полупроводниково-контакторная схема (Рисунок 5.4, Рисунок 5.5):

$$P(10^3) = 0,98033.$$

Таблица В.1 - Параметры надёжности устройств реализации результатов исследований

№ п/п	Наименование элемента и его тип	Количество, шт.	Номинальный (контролируемый) параметр	Коэффициент нагрузки	Поправочный коэффициент «а»	Поправочный коэффициент «а1»	Интенсивность отказов	
							Табличная (одного элемента) $\lambda_p 10^{-6}, \text{час}^{-1}$	Расчётная (всех элементов) $\lambda_p 10^{-6}, \text{час}^{-1}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<p>Схема ограничения энергетических параметров цепи отключения к.з. на основе применения группы из соединённых параллельно 4-х плавких предохранителей в цепи нагрузки выпрямителя, соединяющего обмотки трансформатора КТП в трёхфазную схему</p>								
1	Диод Д253-2000	6	$I_n=2750 \text{ A}$ $U_{обр}=2400\text{В}$ $T_{max.} \leq 60^0 \text{ C}$	0,42 0,95	1,6	1,4	1,5	11,97
2	Предохранитель ППНИ-39/630А	4	$I_n = 630\text{A}$	1,0	1,0	1,0	0,4	1,600
3	Провода соединительные	15	-	-	1,0	1,0	0,015	0,225
Общая расчётная интенсивность отказов								13,795
<p>Схема ограничения энергетических параметров цепи отключения к.з на основе применения вакуумного контактора с узлом МТЗ в цепи нагрузки выпрямителя, соединяющего обмотки трансформатора КТП в трёхфазную схему</p>								
1	Диод Д253-2000	6	$I_n=2750 \text{ A}$ $U_{обр}=2400\text{В}$ $T_{max.} \leq 60^0 \text{ C}$	0,42 0,95	1,6	1,4	1,5	11,97
2	Контактор SPVC1-630	1	$I_n=630 \text{ A}$	0,9	1,0	1,0	0,25	0,25
<p>Схема управления контактором</p>								
3	Диод КД243Ж	1	$U_{обр}=1000\text{В}$	0,4	1,0	1,4	0,45	0,630
4	Диод Д246А	1	$U_{обр}= 400 \text{ В}$	0,8	0,9	1,4	0,4	0,504
5	Диодный мост QL30А	1	$U_{обр}=1000\text{В}$	0,4	1,0	1,4	0,2	0,280
6	Трансформатор 660/220/25 В	1	$P_n= 100 \text{ Вт}$	0,5	2,0	1,0	0,16	0,320
7	Конденсатор К-50-6	2	$U_n= 400 \text{ В}$	0,5	1,3	3,0	0,1	0,780
8	Резистор ПЭВ	1	$P_n= 10 \text{ Вт}$	0,5	1,0	1,0	0,01	0,010
9	Резистор МЛТ	2	$P_n= 2 \text{ Вт}$	0,5	1,2	1,0	0,02	0,048
10	Конденсатор МБМ	1	$U_n= 400 \text{ В}$	0,5	0,8	0,9	0,1	0,072
11	Кнопка размыкающая	1	$I_n=2,0 \text{ А}$	0,25	1,0	1,0	0,07	0,07

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
12	Кнопка замыкающая	1	$I_H=2,0 \text{ A}$	0,25	1,0	1,0	0,07	0,07
Узел максимальной токовой защиты (блок питания)								
13	Диодный мост КВРС-W	1	$U_{обр}=50\text{В}$ $I_H=5,0 \text{ A}$	0,5	1,0	1,0	0,2	0,200
14	Конденсатор К-50-6	2	$U_H= 50 \text{ В}$	0,5	1,3	1,0	0,1	0,260
15	Стабилитрон Д814Г	2	$U_{см}=12,6 \text{ В}$	1	1,0	1,0	0,35	0,700
16	Резистор МЛТ	1	$P_H= 2 \text{ Вт}$	0,8	1,2	1	0,02	0,024
Узел максимальной токовой защиты (функциональная схема)								
17	Датчик тока (катушка Роговского)	1	$t_{уз.} \leq 80^0 \text{ C}$	0,5	1,0	1,0	0,02	0,02
18	Кнопка размыкающая	1	$I_H=2,0 \text{ A}$	0,25	1,0	1,0	0,07	0,07
19	Потенциометр СПЗ-9	1	$P_H= 0,5 \text{ Вт}$	0,7	0,8	1,0	1,7	1,360
20	Микросхема К140УД708	1	$U_H= \pm 12,6 \text{ В}$	1,0	1,0	1,0	0,45	0,450
21	Микросхема К561ЛА5	1	$U_H= 15 \text{ В}$	1,0	1,0	1,0	0,45	0,450
22	Транзистор КТ315В	1	$U_{кэ} = 30 \text{ В}$ $I_k=0,1 \text{ A}$	0,4	0,9	1	0,29	0,261
23	Диод КД522	2	$U_{обр} = 20 \text{ В}$	0,2	1,0	1,0	0,07	0,140
24	Оптрон ТО125-12,5-4	1	$I_H=12,5 \text{ A}$ $U_{обр}=400\text{В}$	0,5	1,0	1,0	0,22	0,220
25	Резистор МЛТ	4	$P_H= 0,5 \text{ Вт}$	0,2	1,1	1	0,02	0,088
26	Соединения пайкой	48					0,01	0,48
27	Разъём	2	$I_H=2,0 \text{ A}$	0,3	1,0	1,0	0,06	0,120
28	Провода соединительные	31	-	-	1,0	1,0	0,01 5	0,465
Общая расчётная интенсивность отказов								19,862