

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Разработка системы дистанционной оценки технического состояния
высоковольтных масляных выключателей

Обучающийся

В.В. Бриштен

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., Д.А. Кретов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Содержание

Введение.....	3
1 Функционирование маломасляных высоковольтных выключателей в распределительных сетях	8
1.1 Конструкция и особенности работы маломасляных выключателей	8
1.2 Оценка уровня использования маломасляных выключателей в распределительных сетях	12
1.3 Анализ подходов к гашению дуги в масляных выключателях	20
1.4 Аналитический расчет особенностей работы и гашения дуги в высоковольтных выключателях жидкой средой.....	26
2 Подходы к оценке технического состояния высоковольтных выключателей	38
2.1 Методика оценки ресурса выключателя по износу контактов.....	38
2.2 Методика оценки технического состояния по индексу и коэффициенту технического состояния высоковольтного оборудования.....	42
2.3 Методики оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей	45
2.4 Существующие коммерческие решения по оценке технического состояния высоковольтных выключателей	49
3 Система дистанционной оценки технического состояния выключателей ВМТ-110Б.....	56
3.1 Алгоритм работы системы дистанционной оценки технического состояния выключателя ВМТ-110Б	56
3.2 Моделирование алгоритма дистанционной оценки технического состояния выключателя ВМТ-110Б	64
Заключение	69
Список используемой литературы	74

Введение

Степень износа мощностей в электроэнергетической отрасли составляет около 65 %. Наибольший износ приходится на сегмент распределительных сетей, порядка 70%. Вместе с тем, продолжает расти спрос на электрическую энергию. Отечественное коммутационное оборудование подстанций требует модернизации. На фоне ограниченных возможностей в финансировании отрасли, появляется задача оптимизации расходов на капитальные вложения при реконструкции действующих электроустановок.

Большое число оборудования в распределительных сетях относится к высоковольтным выключателям. На подстанциях распределительных сетей могут применяться, в зависимости от схемы распределительного устройства высокого напряжения от двух до пяти выключателей – для распределительных сетей 35 – 100 кВ.

Существенное влияние на функционирование подстанций распределительных сетей оказывают высоковольтные выключатели. Высоковольтные выключатели предназначены для коммутации цепей в различных режимах: нормальном и аварийном. При этом для проведения коммутации может использоваться как ручное управление, так и автоматическое и дистанционное.

В России находятся в эксплуатации около 30000 выключателей, рассчитанных на напряжение 110–750 кВ. Распределение общего количества парка высоковольтных выключателей по классам напряжения составляет 110кВ – 80,5 %; 220 кВ – 15,2 %. Около 50 % установленных выключателей – масляные баковые выключатели 110, 220 кВ; маломасляные выключатели 110, 220 кВ составляют 24,3 %. Число воздушных выключателей составляет 18,6 % общего числа установленных выключателей.

Более 40% от общего числа выключателей, находящихся в эксплуатации, уже отработали свой нормативный ресурс.

При этом в настоящее время наблюдается переход к использованию более современных высоковольтных выключателей с вакуумными дугогасительными камерами и дугогасительными камерами, в которых в качестве дугогасительной среды используется шести фтористая сера SF₆ (элегаз). Большинство научных работ связанных с исследованиями режимов работы коммутационных аппаратов связаны с исследованиями либо вакуумных, либо элегазовых высоковольтных выключателей. Однако, учитывая тот факт, что в распределительных сетях в настоящее время эксплуатируется большое количество маломасляных выключателей, в том числе и на напряжениях 35 кВ и 110 кВ, то выбранная тематика выпускной квалификационной работы актуальна. Также актуальность работы связана с тем, что не на всех подстанциях требуется установка именно современных вакуумных или элегазовых выключателей. В первую очередь это связано со стоимостью покупки и замены высоковольтных выключателей. Подстанции, которые существенно удалены от крупных источников генерации и не питающие высокомоощные нагрузки не требуют высокой отключающей способности от выключателей, поэтому целесообразно, при проведении реконструкций выполнять замену коммутационных аппаратов на тех центрах питания, где ресурс высоковольтных выключателей исчерпан, либо требуется высокая отключающая способность выключателей.

Исходя из этого, необходимо разработать систему контроля технического состояния высоковольтного маломасляного выключателя, которая позволит существенно упростить эксплуатацию данных выключателей, а также позволит снизить затраты предприятий, обслуживающих распределительные подстанции с установленными маломасляными выключателями. Кроме того, предлагаемые технические решения должны обеспечить повышение ресурса работы высоковольтных маломасляных выключателей.

В настоящее время оценку технического состояния высоковольтного оборудования, в том числе, высоковольтных выключателей в большинстве

случае оценивают при проведении периодических осмотров. Такой подход принято характеризовать как реактивный подход в обслуживании оборудования. Также эксплуатационные службы распределительных сетей ведут постоянный контроль коммутационных операций. Данные по коммутационным операциям используются для анализа остаточного ресурса. Для контроля коммутационного ресурса также могут использоваться микропроцессорные блоки релейной защиты и автоматики выключателей, однако данный подход к оценке технического ресурса высоковольтных выключателей также характеризуется как реактивный подход.

Современный подход к оценке технического состояния высоковольтного оборудования принято называть предиктивным. Предиктивный подход характеризуется как подход по определению технического состояния по данным систем мониторинга. Данный подход не требует проведения периодических осмотров оборудования с целью контроля его технического состояния. Визуальный осмотр должен выполняться только в экстренных ситуациях, по данным системы мониторинга.

Кроме того, важной особенностью применения предиктивного подхода является использование моделей оценки текущего и прогнозного технических состояний оборудования, которые могут складываться из статистических методов анализа данных или использования технологий искусственного интеллекта.

Исходя из выбранной тематики и определения актуальности темы необходимо сформулировать цель и задачи выпускной квалификационной работы (магистерской диссертации).

Цель работы – повышение эффективности оценки технического состояния маломасляных выключателей 110 кВ на подстанциях распределительных сетей за счет внедрения технологии дистанционного контроля параметров выключателя, для снижения рисков отказа выключателя в момент коммутации.

В соответствии с указанной целью необходимо решить следующие задачи:

- анализ использования высоковольтных маломасляных выключателей в распределительных сетях;
- исследование особенностей режимов работы высоковольтных выключателей для определения параметров подлежащих контролю системой дистанционной оценки технического состояния;
- анализ существующих подходов в определении технического состояния высоковольтных выключателей;
- разработки и тестирование алгоритма дистанционного контроля технического состояния высоковольтного маломасляного выключателя ВМТ-110Б.

В рамках проводимых исследований рассматривается высоковольтный маломасляный выключатель марки ВМТ-110Б. Данный выключатель используется на подстанциях распределительных сетей с классом напряжения 110 кВ. Несмотря на то, что в настоящее время широкое распространение получили высоковольтные выключатели, в которых в качестве дугогасительной среды используется шести фтористая сера (элегаз) или вакуум, маломасляные выключатели на напряжение 110 кВ широко распространены.

Объектом исследования является высоковольтный маломасляный выключатель напряжением 110 кВ марки ВМТ-110Б.

Предметом исследования является влияние переходных процессов при коммутациях высоковольтного маломасляного выключателя марки ВМТ-110Б на его техническое состояние.

Методы исследования, применяемые в рамках выполнения выпускной квалификационной работы: анализ, синтез, инженерные расчеты, компьютерное моделирование.

Практическая значимость работы заключается в разработке системы дистанционного контроля технического состояния высоковольтного маломасляного выключателя типа ВМТ-110Б.

В основе анализа научных работ лежат материалы всероссийских и международных научно-практических конференций, фундаментальные и прикладные научные статьи, отечественных и зарубежных ученых.

Базовые аспекты функционирования маслонаполненного коммутационного оборудования и его развития опубликованы в работах [2] и [11]. Подходы и методики оценки технического состояния высоковольтного оборудования, изученные при выполнении выпускной квалификационной работы представлены в [6], [13], [25] [19], [12], [16]. Один из современных подходов к оценке технического состояния масляных выключателей представлен в работе [24], где предлагается проведение оценки технического состояния маслонаполненного оборудования выполнять на основе анализа рентгенографических изображений. В работе [15] представлены результаты разработки программного алгоритма для оценки остаточного ресурса высоковольтных коммутационных аппаратов, а в работе [32] представлены результаты исследования по определению и подбору оборудования и разработке алгоритма для раннего определения возникающих дефектов в высоковольтных выключателях. Актуальность исследования дополнительно подкрепляется [18], где официальный разработчик и производитель выключателей серии ВМТ предлагает реализовать технические мероприятия по снижению риска отказа маломасляного выключателя серии ВМТ. Также в работе [7] предлагаются технические мероприятия, которые требуется выполнить в рамках проведения капитального ремонта выключателей серии ВМТ. Основным условием выполнения указанных технических мероприятий это их проведение в заводских условиях. Оценивая дату публикаций [18] и [7] задачи, поставленные в рамках исследования и выполнения выпускной квалификационной работы, имеют высокую актуальность. За рубежом похожие исследования опубликованы в [37], [38] и [39].

1 Функционирование маломасляных высоковольтных выключателей в распределительных сетях

1.1 Конструкция и особенности работы маломасляных выключателей

Высоковольтные масляные выключатели различных типов относятся к группе выключателей, в которых используется жидкая среда для гашения электрической дуги в момент размыкания и расхождения контактов.

В качестве жидких сред для гашения электрической дуги в высоковольтных выключателях, относящихся к группе – выключатели с жидкой средой для гашения дуги, используются следующие виды жидких сред, представлены по уровню использования:

- трансформаторное масло;
- диэлектрическая смесь на основе трансформаторного масла;
- фторорганические синтетические жидкости;
- жидкий элегаз;
- кремний органические жидкие диэлектрики.

Каждый из указанных в перечне используемых как жидкая среда для гашения дуги в высоковольтных выключателях имеет свои преимущества и недостатки.

Основными параметрами, по которым выполняют оценку применимости того или иного жидкого диэлектрика в качестве среды для гашения дуги в дугогасительной камере выключателя являются:

- электрическая прочность жидкого диэлектрика;
- значение диэлектрической постоянной;
- электрическое сопротивление жидкого диэлектрика;
- горючесть жидкого диэлектрика;
- вязкость диэлектрика;
- термическая стабильность;

- химическая стабильность;
- коэффициент заполнения;
- совместимость с материалами из которого изготовлен выключатель;
- стоимость жидкого диэлектрика.

Основным видом жидкой среды для гашения дуги, применяемой в высоковольтных выключателях, является трансформаторное масло и диэлектрические смеси на основе трансформаторного масла.

По сравнению с минеральным трансформаторным маслом современные синтетические жидкие диэлектрики имеют более высокую электрическую прочность, лучше отводят тепло от внутренних частей трансформатора, а также имеют более высокую термическую стабильность, т.е. менее подвержены термическому разложению. Однако не всегда применение синтетических жидких диэлектриков является безопасным. Например, хлорированные углеводороды ароматического ряда, примером которых являются совтол и совол, крайне токсичные жидкости и контакт с ними неблагоприятно сказывается на здоровье человека. Поэтому не смотря на более высокие характеристики как жидкого диэлектрика данные диэлектрики в настоящее время не применяются [3].

Кремнийорганические жидкие диэлектрики или силиконы и силоксаны имеют стабильные параметры, которые не изменяются от температуры и давления, однако их главным недостатком является высокая стоимость. Именно поэтому кремний органические жидкие диэлектрики не получили в настоящее время широкого распространения на Российских заводах по производству высоковольтного оборудования.

Фторорганические жидкие диэлектрики имеют очень хорошие свойства. В частности, они полностью не горючи, дугостойки и могут работать при температуре 200°C и выше. Однако производство фторорганических жидких диэлектриков требует использования специализированных реактивов и сырья поэтому также в настоящее время они не могут даже частично заменить традиционное минеральное трансформаторное масло.

Их группы высоковольтных выключателей с жидкой средой гашения дуги – трансформаторное масло и смесь на основе трансформаторного масла, выделяются две основные конструкции выключателей:

- многообъемные выключатели – баковые выключатели;
- малообъемные выключатели – маломасляные выключатели.

В многообъемных (баковых) выключателях жидкий диэлектрик – трансформаторное масло или смесь на основе трансформаторного масла, используется не только как среда для гашения электрической дуги, но и как главная изоляция выключателя.

В малообъемных (маломасляных) выключателях жидкий диэлектрик – трансформаторное масло или смесь на основе трансформаторного масла, не используется как главная изоляция выключателя, а только для обеспечения гашения дуги в дугогасительной камере или дополнительно для обеспечения изоляции между токоведущими контактами в период нахождения контактов выключателя в разомкнутом состоянии.

Объект исследования относится к группе малообъемных (маломасляных) выключателей с жидкой средой для гашения дуги.

Среди марок выключателей, которые относятся к объекту исследования относятся выключатели марки ВМТ-110Б:

- ВМ – выключатель маломасляный;
- Т – конструктивное исполнение выключателя;
- 110Б – номинальное напряжение выключателя. Для объекта исследования 110 кВ.

Промышленностью выпускаются выключатели марки ВМТ на номинальные напряжения 110 кВ и 220 кВ. В таблице 1 представлены паспортные данные для выключателей марки ВМТ, выпускаемых промышленностью на напряжение 110 кВ, а в таблице 2 представлены данные для выключателей ВМТ выпускаемых на напряжение 220 кВ.

Таблица 1 - Параметры выпускаемых выключателей ВМТ на напряжение 110кВ

Наименование параметра	Единица измерения параметра	Марка выключателя	
		ВМТ-110 Б-40/2000	ВМТ-110 Б-25/1250
Номинальное напряжение	кВ	110	
Наибольшее рабочее напряжение	кВ	126	
Номинальный ток	А	2000	1250
Номинальный ток отключения	кА	40	25
Ток термической стойкости	кА	40	25
Время протекания тока термической стойкости	с	3	
Собственное время отключения выключателя	с	0,035 – 0,005	
Полное время отключения выключателя	с	0,06	
Минимальная бестоковая пауза при АПВ	с	0,3	
Собственное время включения выключателя	с	0,13 – 0,03	
Рабочее давление газа в дугогасительных устройствах приведенное к 20°С	МПа	0,5 – 1,0	

Таблица 2 -Параметры выпускаемых выключателей ВМТ на напряжение 220кВ

Наименование параметра	Единица измерения параметра	Марка выключателя	
		ВМТ-220 Б-40/2000	ВМТ-220 Б-25/1250
Номинальное напряжение	кВ	220	
Наибольшее рабочее напряжение	кВ	252	
Номинальный ток	А	2000	1250
Номинальный ток отключения	кА	40	25
Ток термической стойкости	кА	40	25
Время протекания тока термической стойкости	с	3	
Собственное время отключения выключателя	с	0,035 – 0,005	
Полное время отключения выключателя	с	0,06	
Минимальная бестоковая пауза при АПВ	с	0,3	
Собственное время включения выключателя	с	0,13 – 0,03	
Рабочее давление газа в дугогасительных устройствах приведенное к 20°С	МПа	0,5 – 1,0	

В рамках проводимого исследования отсутствуют данные о применимости маломасляных выключателей марки ВМТ на подстанциях классом напряжения 220 кВ. В рамках исследования рассматриваются только маломасляные выключатели марки ВМТ на класс напряжения 110 кВ, данные

выключатели определены как объект исследования в рамках выполнения выпускной квалификационной работы.

1.2 Оценка уровня использования маломасляных выключателей в распределительных сетях

Для выполнения исследования определению параметров маломасляного выключателя характеризующих его техническое состояние необходимо провести подробный анализ уровня использования масляных выключателей в распределительных сетях класса напряжения 35 – 110 кВ.

Анализ использования масляных выключателей выполним для Самарских распределительных сетей-Жигулевского производственного объединения – Россети-Волга.

На объектах – распределительных подстанциях Самарских распределительных сетей используются различные виды коммутационных аппаратов – высоковольтных выключателей. В рамках проводимого анализа будут рассматриваться высоковольтные выключатели, имеющие масляную дугогасящую среду. Среди указанных выключателей в Самарских распределительных сетях используются выключатели, представленные в таблице 3.

Таблица 3 - Масляные выключатели Самарских распределительных сетей

Марка выключателя	Напряжение выключателя, кВ	Тип выключателя
ВМ-35-630-10	35	Выключатель масляный
ВМД-35-600-6,6	35	Выключатель масляный
ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	110	Выключатель масляный
ВТ-35-630-10	35	Выключатель масляный
ВТ-35-630-12,5	35	Выключатель масляный
ВТД-35-630-12,5	35	Выключатель масляный
МКП-110М-1000-20	110	Выключатель масляный
МКП-110М-630-20	110	Выключатель масляный
МКП-35-1000-25	35	Выключатель масляный
С-35М-630-10	35	Выключатель масляный
С-35М-630-12,5	35	Выключатель масляный

Среди данных, представленных в таблице 3 можно выделить, что в Самарских распределительных сетях используется большое число различных выключателей, отнесенных к группе – масляные выключатели.

Все указанные в таблице 3 масляные выключатели имеют различные периоды ввода в эксплуатацию. Для всех типов масляных выключателей установленный – нормативный, эксплуатационный ресурс составляет 25 лет.

В таблице 4 представлены полные данные по эксплуатируемым масляным выключателям в Самарских распределительных сетях с определением даты ввода в эксплуатацию, срока нахождения в эксплуатации на начало 2024 года. Также в таблице 4 представлены данные по дате проведения капитального ремонта для каждого высоковольтного выключателя из группы – масляные выключатели.

Таблица 4 - Данные по вводу в эксплуатацию и капитальному ремонту масляных выключателей

Марка выключателя	Дата ввода в эксплуатацию	Срок нахождения в эксплуатации, на 2024 год, лет	Дата проведения капитального ремонта
ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	01.01.1994	30	30.12.2020
ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	01.01.1994	30	30.11.2020
ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	01.01.1995	29	31.07.2019
ВМ-35-600-6,6	01.01.1973	51	31.05.2021
ВМ-35-600-6,6	01.01.1973	51	31.05.2021
ВМ-35-600-6,6	01.01.1973	51	31.05.2021
ВМ-35-600-6,6	01.01.1973	51	31.05.2021
ВМ-35-600-6,6	01.01.1973	51	31.05.2021
С-35М-630-10	01.01.1983	41	30.07.2012
ВТД-35-630-12,5	01.01.1983	41	30.07.2012
С-35М-630-10	01.01.1979	45	29.04.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	29.04.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	29.04.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	29.04.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	29.04.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	29.04.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	29.04.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	29.04.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	29.04.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	30.06.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	29.07.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	30.06.2022

Продолжение таблицы 4

Марка выключателя	Дата ввода в эксплуатацию	Срок нахождения в эксплуатации, на 2024 год, лет	Дата проведения капитального ремонта
МКП-110М-1000-20	01.01.1979	45	30.06.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	30.06.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	30.06.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	29.07.2022
С-35М-630-10	01.01.1979	45	29.07.2022
ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	01.01.1991	33	31.08.2018
ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	01.01.1991	33	30.06.2018
ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	01.01.1991	33	31.08.2018
ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	01.01.1991	33	31.08.2018
ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	01.01.1991	33	31.05.2018
ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	01.01.1991	33	15.05.2018
ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	01.01.1992	32	30.06.2018
С-35М-630-10	01.01.1992	32	30.06.2020
С-35М-630-10	01.01.1992	32	30.06.2020
С-35М-630-10	01.01.1992	32	30.06.2020
С-35М-630-10	01.01.1993	31	31.08.2012
С-35М-630-10	01.01.1993	31	23.07.2020
С-35М-630-10	01.01.1993	31	23.07.2020
С-35М-630-10	01.01.1993	31	23.07.2020
ВМД-35-600-6,6	01.01.1972	52	30.06.2021
ВМ-35-600-6,6	01.01.1972	52	30.06.2021
ВМ-35-600-6,6	01.01.1972	52	30.06.2021
С-35М-630-10	01.01.2003	21	30.06.2021
ВМ-35-600-6,6	01.01.1972	52	30.06.2021
С-35М-630-10	01.01.1991	33	08.07.2022
С-35М-630-12,5	01.01.1993	31	15.07.2022
С-35М-630-12,5	01.01.1991	33	08.07.2022
С-35М-630-10	01.01.1992	32	08.07.2022
С-35М-630-10	01.01.1992	32	08.07.2022
С-35М-630-10	01.01.1992	32	15.07.2022
С-35М-630-10	01.01.1992	32	15.07.2022
ВМ-35-600-6,6 с ПП-67	01.01.2014	10	31.07.2019
МКП-110М-630-20	01.01.1978	46	31.07.2019
МКП-110М-630-20	01.01.1978	46	31.07.2019
МКП-110М-630-20	01.01.1978	46	30.08.2019
ВТ-35-630-12,5	01.01.1984	40	28.06.2019
ВТ-35-630-12,5	01.01.1984	40	31.07.2019
ВМ-35-600-6,6	01.01.1958	66	30.08.2014
ВМ-35-600-6,6	01.01.1958	66	30.09.2014
ВМ-35-600-6,6	01.01.1958	66	30.06.2020
ВМ-35-600-6,6	01.01.1958	66	24.07.2020
С-35М-630-12,5	01.01.1978	46	30.07.2012
ВТ-35-630-12,5	01.01.1978	46	30.06.2013
МКП-35-1000-25	01.01.1972	52	26.07.2021
МКП-35-1000-25	01.01.1972	52	24.06.2021

Продолжение таблицы 4

Марка выключателя	Дата ввода в эксплуатацию	Срок нахождения в эксплуатации, на 2024 год, лет	Дата проведения капитального ремонта
МКП-35-1000-25	01.01.1972	52	26.07.2021
ВМ-35-600-6,6	01.01.1966	58	24.08.2022
С-35М-630-10	01.01.1973	51	26.09.2022
ВМ-35-600-6,6	01.01.1966	58	24.08.2022
ВМ-35-600-6,6	01.01.1966	58	26.09.2022
С-35М-630-10	01.01.1985	39	30.08.2012
ВТ-35-630-12,5	01.01.1989	35	29.06.2018
ВТ-35-630-12,5	01.01.1989	35	30.06.2011
С-35М-630-10	01.01.1989	35	31.08.2017
ВТ-35-630-12,5	01.01.1986	38	08.07.2022
С-35М-630-10	01.01.1972	52	25.08.2020
С-35М-630-10	01.01.1972	52	29.05.2020
С-35М-630-10	01.01.1972	52	31.07.2020
С-35М-630-10	01.01.1972	52	31.07.2020
С-35М-630-10	01.01.1972	52	31.07.2020
С-35М-630-10	01.01.1972	52	25.08.2020
С-35М-630-10	01.01.1972	52	30.06.2020
С-35М-630-10	01.01.1972	52	29.05.2020
С-35М-630-10	01.01.1972	52	29.05.2020
С-35М-630-10	01.01.1980	44	24.09.2021
С-35М-630-10	01.01.1980	44	31.08.2021
С-35М-630-10	01.01.1980	44	24.09.2021
С-35М-630-10	01.01.1986	38	29.06.2018
С-35М-630-10	01.01.1986	38	30.07.2012
С-35М-630-10	01.01.1986	38	30.06.2012
ВТ-35-630-12,5	01.01.1987	37	14.07.2023
ВТ-35-630-12,5	01.01.1987	37	18.08.2023
ВТ-35-630-12,5	01.01.1987	37	18.08.2023
ВТ-35-630-12,5	01.01.1988	36	14.07.2023
ВТ-35-630-12,5	01.01.1988	36	14.07.2023
С-35М-630-10	01.01.1988	36	18.08.2023
ВТ-35-630-12,5	01.01.1987	37	18.08.2023
МКП-110М-630-20	01.01.1978	46	24.07.2020
МКП-110М-630-20	01.01.1978	46	24.07.2020
МКП-110М-630-20	01.01.1978	46	24.07.2020
ВМ-35-600-6,6	01.01.1965	59	23.06.2023
ВМ-35-600-6,6	01.01.1965	59	22.06.2023
ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	01.01.2004	20	28.06.2019
ВМ-35-600-6,6	01.01.1972	52	28.06.2019
С-35М-630-10	01.01.2004	20	31.08.2012
ВМ-35-600-6,6	01.01.1972	52	28.06.2019
ВМ-35-630-10	01.01.1971	53	31.08.2019
ВМ-35-630-10	01.01.1986	38	31.05.2017
С-35М-630-10	01.01.1986	38	30.08.2011
ВМД-35-600-6,6	01.01.1971	53	30.08.2014

Окончание таблицы 4

Марка выключателя	Дата ввода в эксплуатацию	Срок нахождения в эксплуатации, на 2024 год, лет	Дата проведения капитального ремонта
ВМД-35-600-6,6	01.01.1971	53	30.09.2014
ВТ-35-630-10	01.01.1997	27	30.08.2014
ВМД-35-600-6,6	01.01.1971	53	30.09.2014
С-35М-630-12,5	01.01.1983	41	31.08.2021
С-35М-630-12,5	01.01.1983	41	31.08.2021
С-35М-630-12,5	01.01.1983	41	31.08.2021
С-35М-630-10	01.01.1983	41	31.08.2021
ВТ-35-630-12,5	01.01.1991	33	31.08.2021
С-35М-630-12,5	01.01.1983	41	31.08.2021
С-35М-630-12,5	01.01.1983	41	31.08.2021
ВТ-35-630-12,5	01.01.1999	25	30.06.2016
ВТ-35-630-12,5	01.01.1998	26	30.07.2016
ВТ-35-630-12,5	01.01.2005	19	30.06.2016
ВМ-35-630-10	01.01.2005	19	30.06.2016
ВТ-35-630-12,5	01.01.2003	21	30.07.2016
ВТД-35-630-12,5	01.01.2005	19	30.07.2016
С-35М-630-12,5	01.01.1974	50	26.06.2023
С-35М-630-12,5	01.01.1980	44	26.06.2023
ВМ-35-630-10	01.01.1968	56	26.06.2023
ВТ-35-630-12,5	01.01.1978	46	26.06.2023
ВТ-35-630-12,5	01.01.1978	46	26.06.2023
ВМ-35-600-6,6	01.01.1951	73	28.02.2012
ВМД-35-600-6,6	01.01.1970	54	03.06.2015
ВТ-35-630-12,5	01.01.1989	35	31.08.2020
ВТ-35-630-12,5	01.01.1982	42	31.08.2020
ВТ-35-800-12,5	01.01.1977	47	05.05.2023
ВТ-35-630-10	01.01.1979	45	30.06.2016
С-35М-630-10	01.01.1984	40	19.08.2022
С-35М-630-10	01.01.1984	40	05.08.2022
ВТ-35-630-12,5	01.01.1986	38	30.07.2021

Для наглядного представления данных по выключателям относящихся к группе выключателей с жидкой средой для гашения дуги эксплуатируемых в Самарских распределительных сетях выполним статистическую обработку данных таблицы 4 с использованием инструментов обработки данных MS Excel.

Обработка данных выполнялась в MS Excel с использованием следующих функций:

- ГОД – программное определение года ввода выключателя в эксплуатацию из полной даты;
- СЧЁТЕСЛИМН – функция определения количества вхождений каждого условия в набор исходных данных.
- СУММ – функция суммирования каждого вхождения по группе параметров.

Для анализа данных по продолжительности эксплуатации высоковольтных выключателей с жидкой средой гашения дуги использовался базовый год 2024, т.е. срок эксплуатации рассчитывался на начало 2024 года.

В качестве условий для анализа исходного объема данных использовались следующие временные промежутки:

- от 0 до 9 лет эксплуатации;
- от 10 до 19 лет эксплуатации;
- от 20 до 29 лет эксплуатации;
- от 30 до 39 лет эксплуатации;
- от 40 до 49 лет эксплуатации;
- от 50 до 81 года эксплуатации.

По результатам анализа исходного объема данных по продолжительности эксплуатационного срока высоковольтных выключателей с жидкой средой для гашения дуги также определены даты максимального ввода срока эксплуатации и даты минимального срока эксплуатации.

Самый длительной срок эксплуатации выключателей с жидкой средой гашения дуги, эксплуатируемых в Самарских распределительных сетях, датируется 1951 годом. Самый короткий срок эксплуатации датируется выключателем, введенным в 2014 году.

Общие результаты анализа данных выполненного в MS Excel представлены на диаграмме, изображенной на рисунке 1.

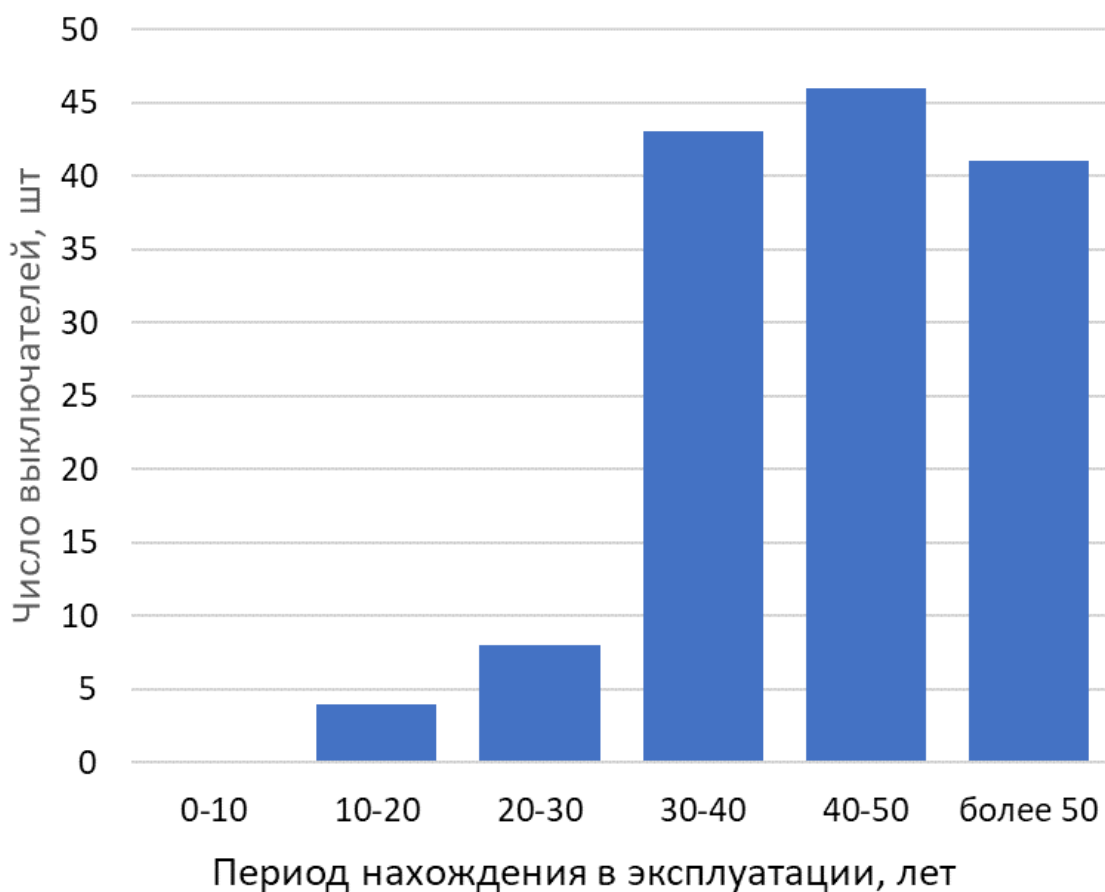


Рисунок 1 - Распределение масляных выключателей по периодам эксплуатации

Как видно по результатам проведенного анализа исходных данных все выключатели преимущественно находятся в эксплуатации более 30 лет. Учитывая, что установленный срок эксплуатации – 25 лет, все выключатели должны были пройти капитальный ремонт. Для контроля состояния выключателей также проводится периодический контроль технического состояния выключателей, особенности которого будут также рассмотрены в рамках выполнения исследования в выпускной квалификационной работе.

Оценивая общую долю выключателей с жидкой средой гашения дуги эксплуатируемых в Самарских распределительных сетях построим диаграмму где среди общего числа выключателей выделим число выключателей с жидкой средой гашения дуги и выключатели рассматриваемые как объект выпускной квалификационной работы – выключатели ВМТ-110Б. Диаграмма представлена на рисунке 2.

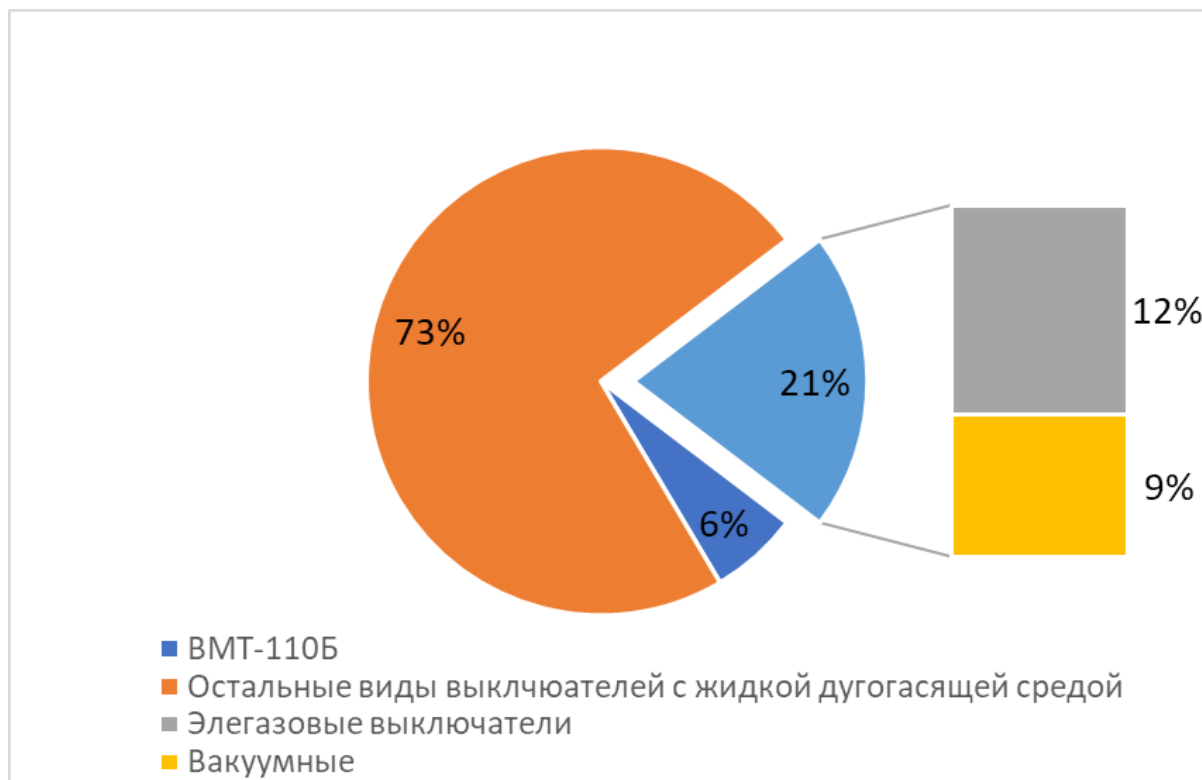


Рисунок 2 - Распределение выключателей Самарских распределительных сетей по виду

Как видно из рисунка 2 в Самарских распределительных сетях в основном эксплуатируются выключатели с жидкой средой гашения дуги – порядка 79%, из них 6% это выключатели марки ВМТ-110Б, а 21% занимают выключатели элегазовые вакуумные. Несмотря на то, что доля выключателей ВМТ-110Б составляет только 6% от общего числа, тематика выпускной квалификационной работы не теряет своей значимости и актуальности, так как исследование, проводимое в рамках выпускной квалификационной работы, может быть впоследствии адаптировано под другой тип выключателей с жидкой средой гашения дуги.

Среди используемых выключателей к объекту исследования относится выключатель марки ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1. Оценка использования выключателей марки ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1 в Самарских распределительных сетях представлена в таблице 5.

Таблица 5 - Применение выключателей ВМТ-110Б на объектах

Наименование объекта	Тип присоединения	Напряжение номинальное, кВ	Марка выключателя
ПС 110 кВ Мусорка	СМВ-110	110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1
ПС 110 кВ Мусорка	ВМ-ВЛ-110-Азот-Мусорка	110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1
ПС 110 кВ Мусорка	ВМ-ВЛ-110-ТЭЦ ВАЗа-Мусорка	110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1
ПС 110 кВ Комсомольская	ВМ-110-Т-1	110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1
ПС 110 кВ Комсомольская	ВМ-110-Т-2	110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1
ПС 110 кВ Комсомольская	ОСВ-110	110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1
ПС 110 кВ Комсомольская	ВМ-ВЛ-110-Азот-Комсомольская	110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1
ПС 110 кВ Комсомольская	ВМ-ВЛ-110-Комсомольская-3	110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1
ПС 110 кВ Комсомольская	ВМ-ВЛ-110-Агрегат	110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1
ПС 110 кВ Комсомольская	ВМ-ВЛ-110-Комсомольская-2	110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1
ПС 110 кВ Лопатино	ВМ-110-Т-2	110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1

Как видно по данным таблицы 5 выключатели марки ВМТ-110Б эксплуатируются в основном только на четырех подстанциях. При этом выключатели ВМТ-110Б устанавливаются как в цепях силовых трансформаторов так и в цепях воздушных линий электропередачи.

В Самарских распределительных сетях не используются выключатели марки ВМТ-110Б на номинальные токи 2000 А, только на ток 1250 А. Отключающая способность у всех выключателей ВМТ-110Б эксплуатируемых в Самарских распределительных сетях 25 кА.

Установлено, что в Самарских распределительных сетях в эксплуатации находится 179 выключателей с классом напряжения 35 – 110 кВ. Из них 149 шт. это выключатели с жидкой дугогасящей средой, из которых 11 шт. это выключатели отнесенные к объекту исследования.

1.3 Анализ подходов к гашению дуги в масляных выключателях

В высоковольтных выключателях с жидкой средой, гашение дуги выполняется за счет ее эффективного охлаждения. Охлаждение дуги происходит в газопаровой смеси, которая образуется в процессе горения дуги с испарением и разложением жидкого диэлектрика.

Особенности образования дуги между контактами выключателя характеризуются током дуги, т.е. при больших токах – свыше 100 А и малых токах – менее 100 А. В независимости от величины тока дуги, она гаснет только в момент перехода напряжения через нуль. При этом если в камере гашения дуги (КГД) после ее гашения сохранились условия для ее обратного загорания, то дуга не гаснет продолжает гореть. Такие условия могут возникнуть при загрязнении жидкой среды продуктами термического разложения как самого жидкого диэлектрика, так и продуктами распада контактов выключателя. Поэтому важным является поддержание жидкого диэлектрика в нормативном состоянии и своевременно выполнять очистку масла (замену масла) в выключателях с жидкой средой гашения дуги.

При токе дуги свыше 100 А охлаждение ствола дуги осуществляется за счет процессов конвекции, так как при гашении дуги большого тока повышается давление в газопаровой смеси. Повышение давления кроме увеличения эффективности процесса отвода тепла из ствола дуги, обеспечивает рост электрической прочности промежутка между контактами. С ростом давления повышается электрическая прочность газопаровой смеси по закону Пашена. Таким образом оба этих фактора создают благоприятные условия для восстановления базовой электрической прочности промежутка между контактами выключателя после перехода через нуль.

Основными видами КГД в высоковольтных выключателях с жидкой средой гашения дуги являются:

- камера гашения дуги с поперечным дутьем жидкого диэлектрика;
- камера гашения дуги с продольным дутьем жидкого диэлектрика;

- камеры гашения дуги с комбинированным дутьем жидкого диэлектрика.

Для выключателей напряжением 110 кВ и выше с жидкой средой гашения дуги применяются КГД с большим числом модулей разрыва дуги, среди которых можно выделить:

- модули с большим числом разрывов контактов с одинаковыми условиями гашения дуги;
- модули с большим числом основных и вспомогательных разрывов дуги.

В КГД с автодутьем, в зависимости от их конструктивного исполнения могут быть получены перпендикулярные и коаксиальные потоки парогазовой смеси относительно ствола дуги. Схемы применяемых в высоковольтных выключателях КГД представлены на рисунке 3:

- схема КГД с продольным дутьем (рисунок 3а);
- схема КГД с поперечным дутьем (рисунок 3б);
- схема КГД с комбинированным дутьем (рисунок 3в).

Для рисунка 3 приняты следующие обозначения:

- позиция 1 – неподвижный контакт высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги;
- позиция 2 – подвижный контакт высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги;
- позиция 3 – канал дутья КГД;
- позиция 4 – щель канала КГД;
- позиция 5 – пространство над камерой гашения дуги;
- позиция 6 – воздушная подушка или буферная зона.

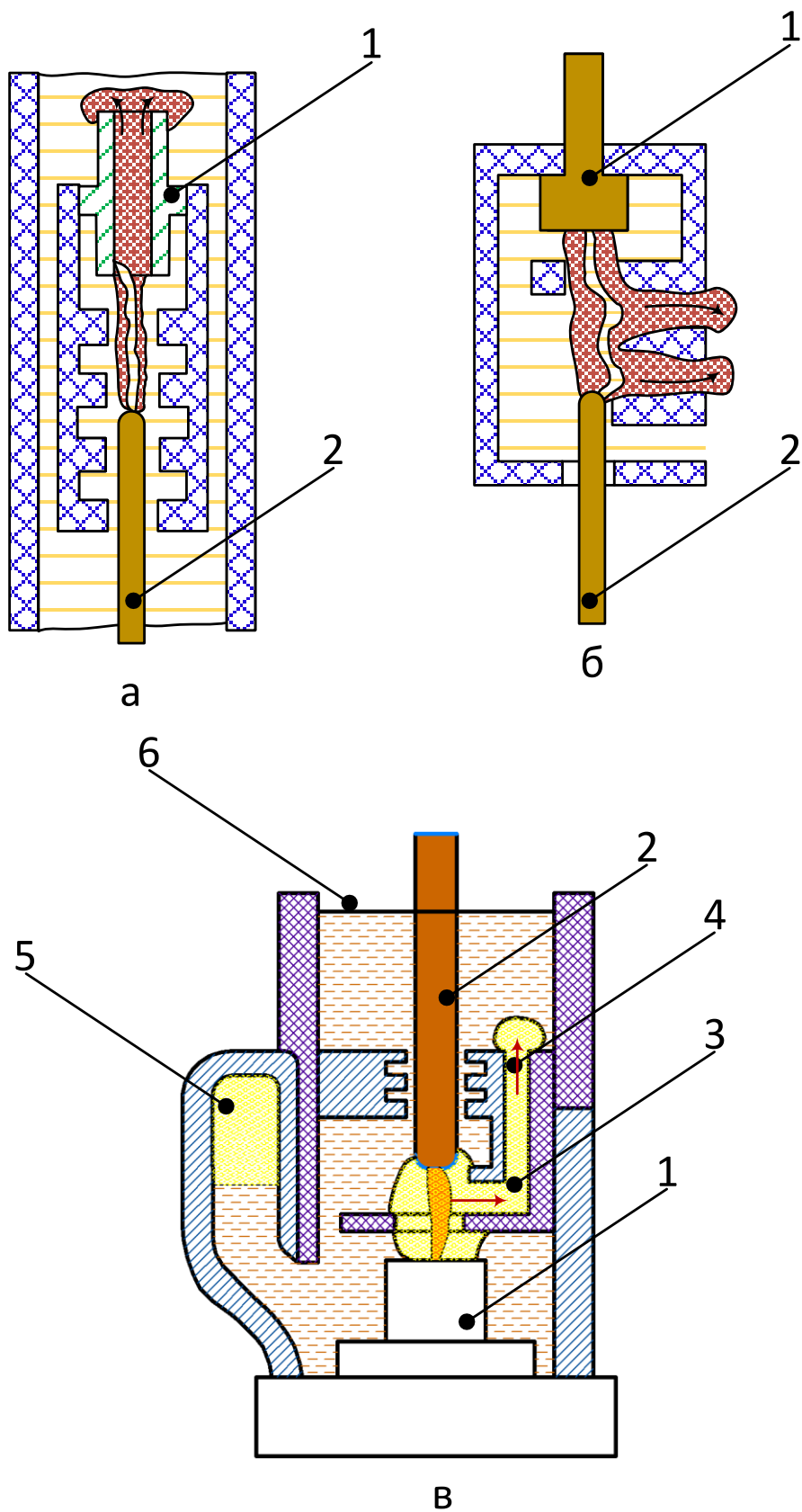


Рисунок 3 - Схемы типовых камер гашения дуги высоковольтных выключателей с жидкой средой

В общем виде процесс гашения дуги, возникающей в момент разведения контактов высоковольтного выключателя можно представить тремя базовыми этапами. Схемы базовых этапов гашения дуги в КГД высоковольтных выключателей с жидкой средой графически представлены на рисунке 4.

Первый этап гашения дуги (рисунок 4 этап 1) – характеризуется началом горения дуги между расходящимися контактами высоковольтного выключателя и началом горения электрической дуги. Начало процесса горения дуги на первом этапе сопровождается образованием газопарового пузыря за счет термического действия дуги.

Второй этап гашения дуги (рисунок 4 этап 2) – характеризуется продолжением горения дуги между контактами высоковольтного выключателя и началом процесса истечения газопаровой смеси из увеличивающейся области газопарового пузыря за пределы камеры гашения дуги высоковольтного выключателя.

Третий этап гашения дуги (рисунок 4 этап 3) – характеризуется восстановлением электрической прочности промежутка между контактами высоковольтного выключателя, а также удалением из камеры гашения дуги горячих газов, возникших после гашения дуги при переходе через нуль. Также на третьем этапе происходит наполнение камеры гашения дуги жидким диэлектриком. После завершения третьего этапа высоковольтный выключатель может быть использован повторно. Однако время протекания трех указанных этапов, особенно этапа восстановления электрической прочности, являются достаточно длительными поэтому выключатели с жидкой средой гашения дуги не могут применяться как быстродействующие, а также в длительных циклах автоматического повторного включения.

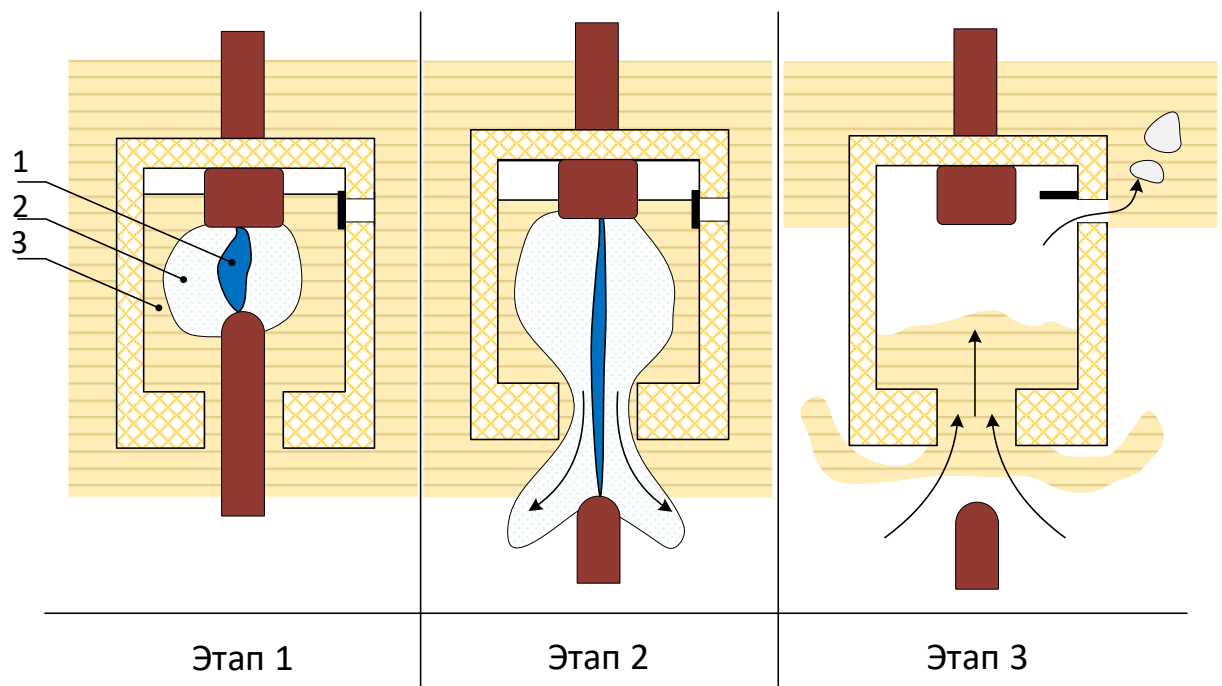


Рисунок 4 - Этапы гашения дуги в КГД высоковольтных выключателей с жидкой средой

На рисунке 4 приняты следующие обозначения:

- позиция 1: дуга;
- позиция 2: пузырь газопаровой смеси;
- позиция 3: жидкий диэлектрик (трансформаторное масло и смесь на основе трансформаторного масла).

Основными циклами и операциями работы высоковольтных выключателей с жидкой средой гашения дуги являются:

- операция отключения (О);
- операция включения (В);
- цикл включение – отключение (В→О) с преднамеренной выдержкой времени между операцией О и операцией В;
- цикл включение – отключение (В→О) без преднамеренной выдержки времени между операцией О и операцией В;
- цикл отключение – включение – отключение (О→В→О) с контролем длительности бестоковой паузы между операциями О→В и В→О;

- цикл отключение – включение ($O \rightarrow B$) с контролем длительности бестоковой паузы между операцией O и B ;
- коммутационный цикл (по ГОСТ 687): $O \rightarrow t_{\text{БТП}} = 0,3 \text{ (с)} \rightarrow B \rightarrow O \rightarrow t_{\text{БТП}} = 180 \text{ (с)} \rightarrow B - O$;
- коммутационный цикл (по ГОСТ 687): $O \rightarrow t_{\text{БТП}} = 0,3 \text{ (с)} \rightarrow B \rightarrow O \rightarrow t_{\text{БТП}} = 20 \text{ (с)} \rightarrow B - O$;
- коммутационный цикл (по ГОСТ 687): $O \rightarrow t_{\text{БТП}} = 180 \text{ (с)} \rightarrow B \rightarrow O \rightarrow t_{\text{БТП}} = 180 \text{ (с)} \rightarrow B - O$.

Выполнение одного из коммутационных циклов проводимых по ГОСТ 687 ограничивает время проведения последующего оперативного включения высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги на уровне $t_{\text{оп}} = 15$ (мин).

Ограничение по времени между длительными циклами обусловлено необходимостью восстановления электрической прочности и охлаждением камеры гашения дуги.

1.4 Аналитический расчет особенностей работы и гашения дуги в высоковольтных выключателях жидкой средой

В рамках предыдущего раздела выпускной квалификационной работы рассмотрены этапы гашения дуги в КГД высоковольтных выключателей с жидкой средой. Первые два этапа гашения дуги в КГД характеризуются связанным комплексом процессов:

- газодинамических;
- термодинамических;
- гидродинамических.

Совокупность указанных процессов обеспечивает эффективность и скорость гашения дуги в КГД высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения. Анализ указанных процессов основывается на расчетах, представленных далее.

Определение мощности дуги в КГД:

$$P_{\text{дуги}} = U_{\text{дуги}} \cdot i_{\text{дуги}} = E_{\text{дуги.ср}} \cdot l_{\text{дуги}} \cdot i_{\text{дуги}} \quad (1)$$

где $U_{\text{дуги}}$ – напряжение на дуге, кВ;

$i_{\text{дуги}}$ – мгновенное значение тока в канале дуги, А;

$E_{\text{дуги.ср}}$ – средняя напряженность электрического поля в канале дуги, кВ/мм;

$l_{\text{дуги}}$ – длина дуги, мм.

Для (1) параметр $i_{\text{дуги}}$ является в расчетах либо током нагрузки выключателя, либо током короткого замыкания.

Для выражения (1) мгновенное значение тока в канале дуги ($i_{\text{дуги}}$), а также значение длины дуги ($l_{\text{дуги}}$) задаются для определенных моментов времени (t) так как они существенно меняются в процессе ее горения и гашения.

Длина дуги для (1) определяется по выражению:

$$l_{\text{дуги.}t} = \int_0^t v_{\text{конт.}t} dt \quad (2)$$

где $v_{\text{конт.}t}$ – скорость расхождения контактов высоковольтного выключателя, м/с [2].

Для случая горения дуги в замкнутом газопаровом пузыре длина дуги для (1) определяется не по (2), а упрощенно по выражению:

$$l_{\text{дуги.}t} = \frac{1}{m_1} \cdot e^{(v_{\text{конт.ср}} \cdot m_1 \cdot t) - 1} \quad (3)$$

где m_1 – коэффициент, учитывающий влияние электродинамических сил на длину дуги, м⁻¹;

$v_{\text{конт.ср}}$ – средняя скорость расхождения контактов выключателя, м/с;
 t – момент времени, для которого определяется длина дуги в КГД выключателя, с.

Для различных выключателей с жидкой средой гашения дуги коэффициент m_1 может принимать различные значения. Для КГД большого объема $m_1 = 0,15 \div 0,25$, для КГД меньшего объема, $m_1 = 0,05 \div 0,15$.

Выражение (1) с учетом горения дуги в замкнутом газопаровом пузыре (3) в КГД выключателя с жидкой средой гашения дуги примет вид:

$$P_{\text{дуги}}(t) = E_{\text{дуги.ср}} \cdot l_{\text{дуги}} \cdot i_{\text{дуги}} = E_{\text{дуги.ср}} \cdot I_{\text{max}} \cdot f(t) \quad (4)$$

где $E_{\text{дуги.ср}} \cdot I_{\text{max}}$ – функция энергии дуги, выделяющейся за время t .

Для оценки давления в КГД высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги на основе выражений (1) - (4) можно использовать выражение:

$$W_{\text{дуги}}(t) = E_{\text{дуги.ср}} \cdot I_{\text{max}} \int_0^t f(t) dt \quad (5)$$

В процессе горения дуги в КГД высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги образуется газопаровой пузырь, химический состав которого, может быть принят согласно [31]. Представлен в таблице 6.

Таблица 6 - Химический состав газа в газопаровом пузыре при гашении дуги

Наименование	Химическая формула	Состав, %
Водород	H_2	60 – 66
Ацетилен	C_2H_2	17 – 20
Метан	CH_4	9 – 15
Гидролитический этилен углерод	$CH_3 - CH_3$	5 – 8

Давление в КГД высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги определяется уравнением газового состояния с учетом выражения (5) [1]:

$$p(t) = \frac{K_{г.о.} \cdot R_{г.} \cdot T_{г.} \cdot W_{дуги}(t)}{V_t} \quad (6)$$

где $K_{г.о.}$ – приведенный массовый коэффициент газообразования;

$R_{г.}$ – газовая постоянная, определяется для каждого из газов представленного в таблице 6, $\frac{Дж}{моль \cdot К}$;

$T_{г.}$ – температура газопаровой смеси в КГД выключателя, К;

V_t – объем газопаровой смеси, $м^3$.

Объем газопаровой смеси в КГД высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги в общем случае определяется по выражению:

$$V_t(t) = V_{конт.}(t) + V_{ист.}(t) + V_{м.и.}(t) + V_{буф}(t) + V_{деф}(t) \quad (7)$$

где $V_{конт.}(t)$ – объем, освобождаемый в результате движения подвижного контакта высоковольтного выключателя, $м^3$;

$V_{ист.}(t)$ – объем масла, истекшего из КГД за время t , $м^3$;

$V_{м.и.}(t)$ – объем испарившегося масла, $м^3$;

$V_{буф}(t)$ – объем буферной полости, $м^3$;

$V_{деф}(t)$ – объем, образующийся за счет упругой деформации, $м^3$.

Для определения объемов в выражении (7) необходимо предварительно определить площадь поперечного сечения контактного стержня:

$$S_{к.с} = \frac{\pi \cdot d_{к.с.}^2}{4} \quad (8)$$

где $d_{к.с.}$ – диаметр контактного стержня высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги, мм.

Также для определения параметров в выражении (7), дополнительно к значению из (8) необходимо определить сечение струи газопаровой смеси:

$$S_{г.с} = \frac{\pi \cdot d_{г.с.}^2}{4} \quad (9)$$

$d_{г.с.}$ – диаметр газовой струи. Определяется в зависимости от конструкции КГД высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги и принимается как наименьшее сечение дутьевой щели, мм.

С учетом выражения (8) объем, освобождаемый в результате движения подвижного контакта высоковольтного выключателя для выражения (7):

$$V_{конт.}(t) = S_{к.с} \cdot \int_0^t v_{конт.t}(t) dt \quad (10)$$

Для выражения (10) скорость движения подвижного контакта определяется на основании механической характеристики $v_{конт.t}(t) = f(t)$ для объекта ВКР представлена в [9].

Объем масла, истекшего из КГД за время t для выражения (7) с учетом значений полученных по выражениям (8) и (9) определяется выражением:

$$V_{\text{ист.}}(t) = (S_{\text{г.с}} - S_{\text{к.с}}) \cdot \int_0^t v_{\text{масла}} dt \quad (11)$$

где $v_{\text{масла}}$ – скорость истечения масла из КГД высоковольтного выключателя, м/с.

Также для выражения (7) объем буферной полости $V_{\text{буф}}(t)$ определяется конструктивными особенностями каждого выключателя используемой КГД, а особенности и подходы к определению объема, образующегося за счет упругой деформации ($V_{\text{деф}}(t)$) представлены в [31].

Расчет давления в КГД высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги выполняют с учетом следующих допущений:

- процесс истечения газопаровой смеси из КГД выключателя принимается как квазистационарный;
- истечение газопаровой смеси в пространство над КГД происходит только в подкритическом или критическом режимах;
- сечение струи принимается постоянной $S_{\text{г.с}} = \text{const.}$

Определение давления в КГД в начальный момент времени истечения смеси выполняется на основании (1) по выражению:

$$p(t_1) = \frac{(K_{\text{г.о.}} \cdot W_{\text{дуги}}(t) - m_{\text{ист.см}}(t)) \cdot R_{\text{г}} \cdot T_{\text{г}}}{V_t} \quad (12)$$

где $m_{\text{ист.см}}$ – масса истекшей газопаровой смеси из КГД высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги, кг.

Для выражения (12) масса истекшей газопаровой смеси из КГД высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги определяется по выражению:

$$m_{\text{ист.см}}(t) = \int_{t_1}^t S_{\text{г.с}} \cdot \gamma_{\text{г.с}} \cdot v_{\text{г.с}} dt \quad (13)$$

где $\gamma_{\text{г.с}}$ – плотность газопаровой смеси в КГД выключателя, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

$v_{\text{г.с}}$ – скорость истечения газопаровой смеси из КГД высоковольтного выключателя, м/с.

Определение скорости и времени восстановления электрической прочности промежутка между контактами выключателя с жидкой средой гашения дуги выполняется с учетом нескольких характерных моментов времени и соответствующим им значениям напряжения:

- $U_{\text{разр.}}(t)$ – разрядное напряжение, кВ;
- $U_{\text{восст.}}(t)$ – переходное напряжение или напряжение восстановления электрической прочности, кВ.

При рассмотрении процесса восстановления электрической прочности промежутка между контактами высоковольтного выключателя используется в первую очередь изменение значения $U_{\text{разр.}}(t)$. По проведенным в [31] исследованием процесс восстановления электрической прочности промежутка между контактами выключателя может быть представлен следующим образом (рисунок 5):

- интервал времени $0 < t < t_1$ линейное восстановление электрической прочности;
- интервал времени $t < t_2$ характеризуется устойчивым горением дуги $U_{\text{разр.}} = \text{const}$, т.е. не происходит восстановления электрической прочности;
- интервал времени $t > t_2$ линейное увеличение электрической прочности промежутка между размыкающимися контактами высоковольтного выключателя.

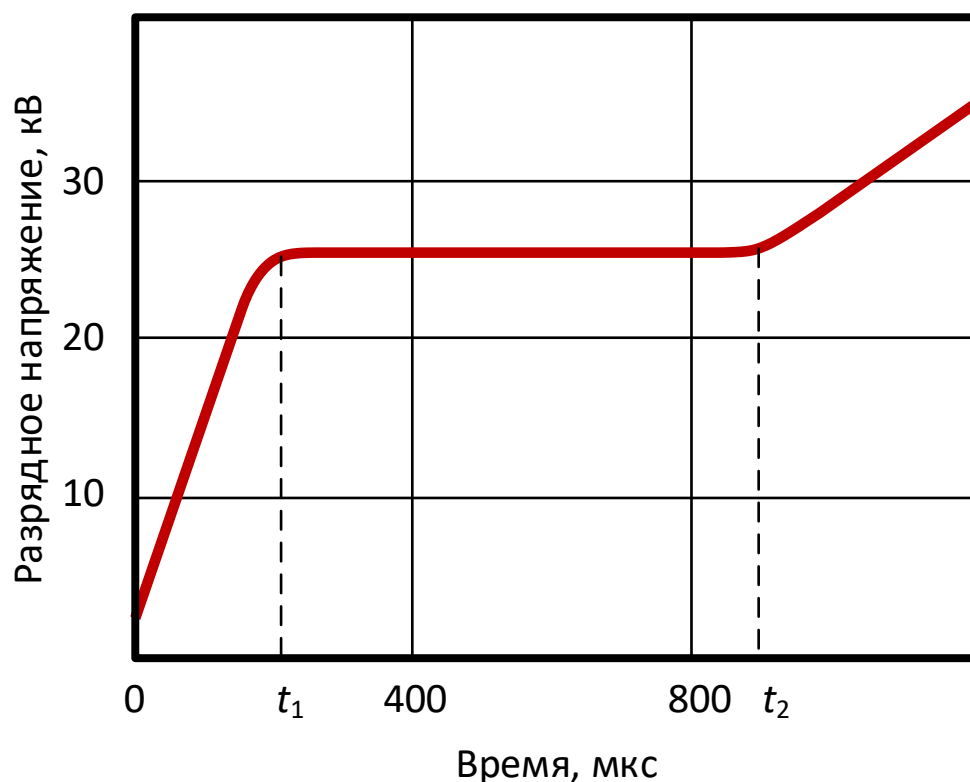


Рисунок 5 - Зависимость восстанавливающийся электрической прочности (увеличение разрядного напряжения)

Как известно из [30], [8], [14] электрическая прочность газопаровой смеси в общем случае подчиняется закону Пашена [5], т.е. зависит от давления и расстояния между контактами выключателя. Учитывая, что при наибольший интерес представляет восстановление электрической прочности при полностью разомкнутых контактах выключателя, то по закону Пашена [5] принимается значение расстояния между контактами $S_{м.к} = const$. Тогда выражение закона Пашена через концентрацию нейтральных частиц оставшихся в КГД после полного размыкания контактов выключателя запишется в виде:

$$n_a = \frac{p_0}{k_B \cdot T_{о.д.}} \quad (14)$$

где p_0 – давление в КГД высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги после полного размыкания контактов и переходе тока через нуль, Па;

k_B – постоянная Больцмана $k_B = 1,380649 \cdot 10^{-23}$, Дж/К;

$T_{o.d.}$ – температура ствола дуги в момент полного размыкания контактов выключателя и при переходе тока через нуль, К.

По концентрации нейтральных частиц (n_a) при различных значениях давления (p_0) в КГД высоковольтного выключателя увеличение разрядного напряжения, т.е. восстановление электрической прочности может быть описано через безразмерную переменную $x(t)$ через соотношение из [3]:

$$U_{\text{разр.}}[x(t)] = A_i[x(t)]^{m_i} \quad (15)$$

где A_i – эмпирический коэффициент, принимающий определенное значение на участке i ;

m_i – эмпирический коэффициент, принимающий определенное значение на участке i .

Для выражения (15) значения эмпирических коэффициентов для различных значений i понижаются по таблице 7, где условия по температуре в КГД определяются относительно предельного значения температуры остаточного ствола дуги в КГД высоковольтного выключателя соответствующее интервалу температур $T_{\text{пр}} \in [1200,3000]$ (К).

Таблица 7 - Значения эмпирических коэффициентов

Значение i	Значение A_i	Значение m_i	Условие по температуре в КГД
1	25	0,67	$T_{o.d.} < T_{\text{пр}}$
2	8,4	0,62	$T_{o.d.} > T_{\text{пр}}$

После размыкания контактов высоковольтного выключателя и при прохождении тока через нуль дуга в КГД гаснет и условие не возникновения обратного загорания дуги записывается в виде:

$$U_{\text{разр.}}(t) > U_{\text{воз.}}(t) \quad (16)$$

где $U_{\text{разр.}}(t)$ – определяется на основании выражения (15), кВ;

$U_{\text{воз.}}(t)$ – величина напряжения возобновления, обратного зажигания дуги, кВ.

Стоит отметить, что напряжение, рассматриваемое в выражениях (15) и (16) это значение напряжений соответствующих электрической прочности промежутков между контактами выключателя. Электрическая прочность для газопаровой смеси называется напряжением, при котором происходит пробой рассматриваемого промежутка, т.е. потеря диэлектрическим промежутком своей электрической прочности. Оценивая процессы горения дуги и не возобновления обратного зажигания дуги в КГД высоковольтного выключателя не рассматриваются ионизационные процессы, происходящие на поверхности электродов, т.е. контактов выключателя. Все указанные факты учитываются в значениях эмпирических коэффициентов (таблица 7) и принципиальном условии (16) – значение напряжения возобновления дуги в котором ($U_{\text{воз.}}(t)$) уже учитывает в своем значении все указанные факторы.

С учетом выше сказанного время гашения дуги в КГД высоковольтного выключателя с жидкой средой определяется на основании кусочно-линейной аппроксимации функции $p_0(t, I)$ для требуемого факта установления момента погасания дуги в КГД и выполнения условия (16) для максимально достижимого в КГД значения электрической прочности промежутка между контактами выключателя $U_{\text{разр.}}(t) = U_{\text{макс.разр.}}|_{t=t_{\text{max}}}$:

$$U_{\text{макс.разр.}} = A_i \left[\frac{p_n (1 + \alpha_p \cdot I_{\text{д}}^n \cdot t_{\text{д}} \cdot v_{\text{конт.т}} \cdot t_{\text{д}})}{k_{\text{В}}(n_{\text{а}}, l_{\text{п}})_0 \cdot T_{\text{д.макс}}} \right]^{m_i} \quad (17)$$

где $T_{\text{д.макс}}$ – остаточная температура ствола дуги в КГД высоковольтного выключателя в характерный момент времени $t = t_{\text{max}}$, К.

По выражению (17) возможно определить время гашения дуги в КГД высоковольтного выключателя, при этом время гашения дуги t_d является функцией от тока дуги, т.е. $t_d = f(I_d)$ (рисунок 6).

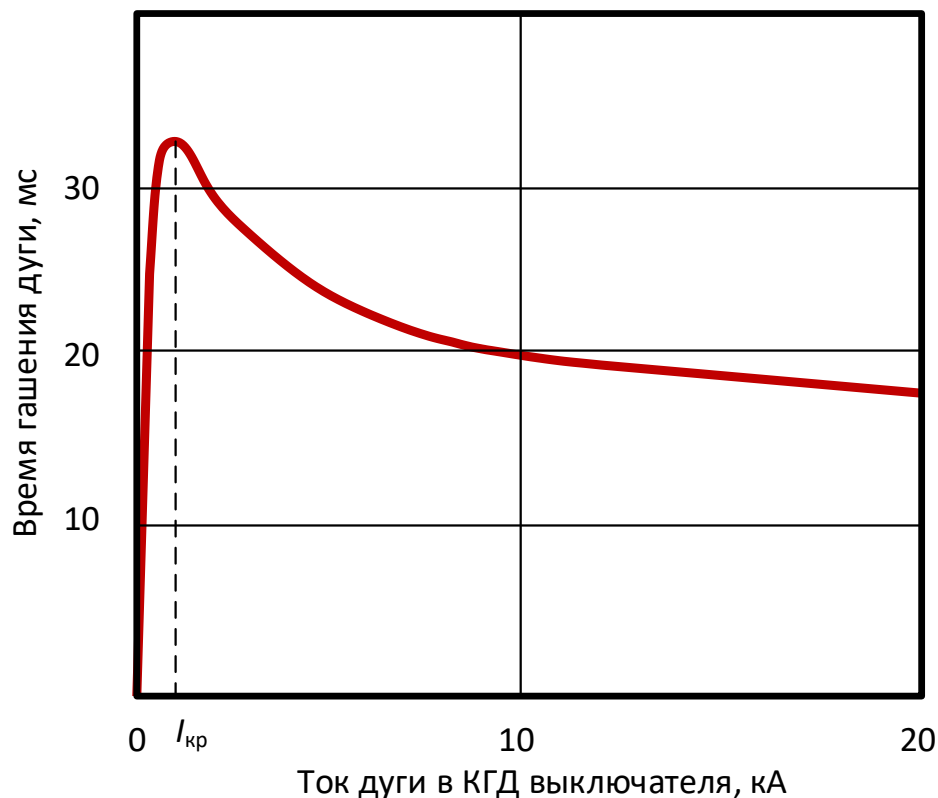


Рисунок 6 - Зависимость времени гашения дуги от тока отключения для выключателя с жидкой средой гашения дуги

Для рисунка 6 критическое значение тока ($I_{кр}$) изменяется для различных видов высоковольтных выключателей с жидкой средой гашения дуги. Зависимость 6 представлена для маломасляного выключателя.

Выводы по разделу.

Установлено, что в Самарских распределительных сетях большая часть эксплуатируемых в настоящее время высоковольтных выключателей на напряжение 35 – 110 кВ являются выключателями с жидкой средой гашения дуги.

Получено значение численного состава оборудования – высоковольтных выключателей с жидкой средой гашения дуги равное 142 шт. Из всего парка

эксплуатируемых выключателей с жидкой средой гашения дуги 11 шт. относятся к выключателям серии ВМТ, определенных как объект исследования.

В результате проведенного анализа исходного набора данных по высоковольтным выключателям Самарских распределительных сетей установлено, что только четыре выключателя из 142-х эксплуатируются сроком до 20 лет. Все остальные выключатели с жидкой средой гашения дуги существенно превысили свой эксплуатационный ресурс равный 25 годам.

В рамках проведенного исследования по составу коммутационного оборудования Самарских распределительных сетей предложено использовать дополнительные технические средства по оценки текущего и прогнозного технического состояния высоковольтных выключателей серии ВМТ для снижения риска внезапного отказа выключателя.

Исследованы различные конструкции камер гашения дуги, используемые в высоковольтных выключателях с жидкой средой.

Определены аналитические зависимости позволяющие определять базовые параметры функционирования высоковольтных выключателей с жидкой средой гашения дуги. К таким параметрам отнесено давление внутри камеры гашения дуги, а также время восстановления электрической прочности промежутка между контактами выключателя после размыкания.

Результаты первого раздела выпускной квалификационной работы позволили достичь решения первой задачи выпускной квалификационной работы согласно перечню задач, определенных во введении. Полученные результаты необходимо использовать для решения следующих задач и достижения цели выпускной квалификационной работы.

2 Подходы к оценке технического состояния высоковольтных выключателей

2.1 Методика оценки ресурса выключателя по износу контактов

Как было определено в разделе 1 выпускной квалификационной работы большое значение на техническое состояние, а значит и на ресурс высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги является сам процесс горения и гашения дуги.

При проведении коммутационных операций или циклов в КГД выключателя возникает электрическая дуга, которая вызывает термическое разложение жидкого диэлектрика – трансформаторного масла или смеси на основе трансформаторного масла. Продуктами термического разложения трансформаторного масла в КГД высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги являются:

- водород (H_2);
- метан (CH_4);
- этан (C_2H_6);
- этилен (C_2H_4);
- ацетилен (C_2H_2);
- двуокись углерода (CO_2);
- монооксид углерода (CO);
- гидролитический этилен углерод ($CH_3 - CH_3$).

Кроме указанных продуктов разложения трансформаторного масла в КГД высоковольтного выключателя присутствуют ионизированный газ и главным образом, пары материала контактов выключателя.

Все указанные примеси негативно сказываются на процессе гашения дуги, увеличивая время гашения. В исследовании [33] указывается, что после 15 операций типа О совершенных выключателем время горения дуги начинает существенно возрастать., что снижает эффективность работы выключателя в

электрических сетях и может вызвать аварийную ситуацию, вызванную отказом выключателя, т.е. то есть при подаче сигнала на отключение и размыкании контактов выключателя условие (16) не выполнится и произойдет обратное перекрытие дуги.

Кроме того, образующиеся в результате горения дуги пары металлов контактов выключателя увеличивают вязкость масла и снижают эффективность гашения дуги при низких температурах окружающего воздуха. Графическая зависимость относительной вязкости масла от содержания в нем осадка представлена на рисунке 7.

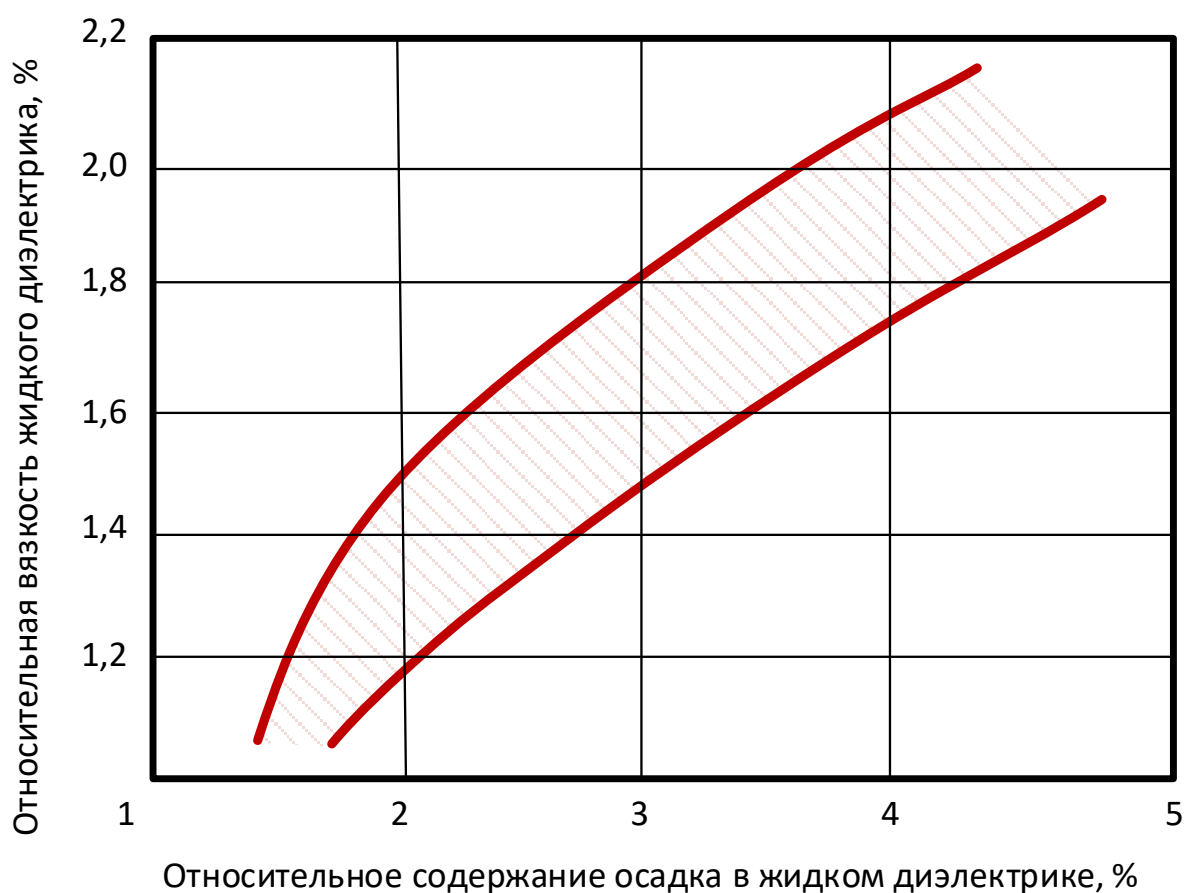


Рисунок 7 - Зависимость вязкости жидкого диэлектрика от концентрации осадка

Увеличение времени горения дуги в зависимости от относительной концентрации осадка в жидком диэлектрике для высоковольтных выключателей представлена на рисунке 8.

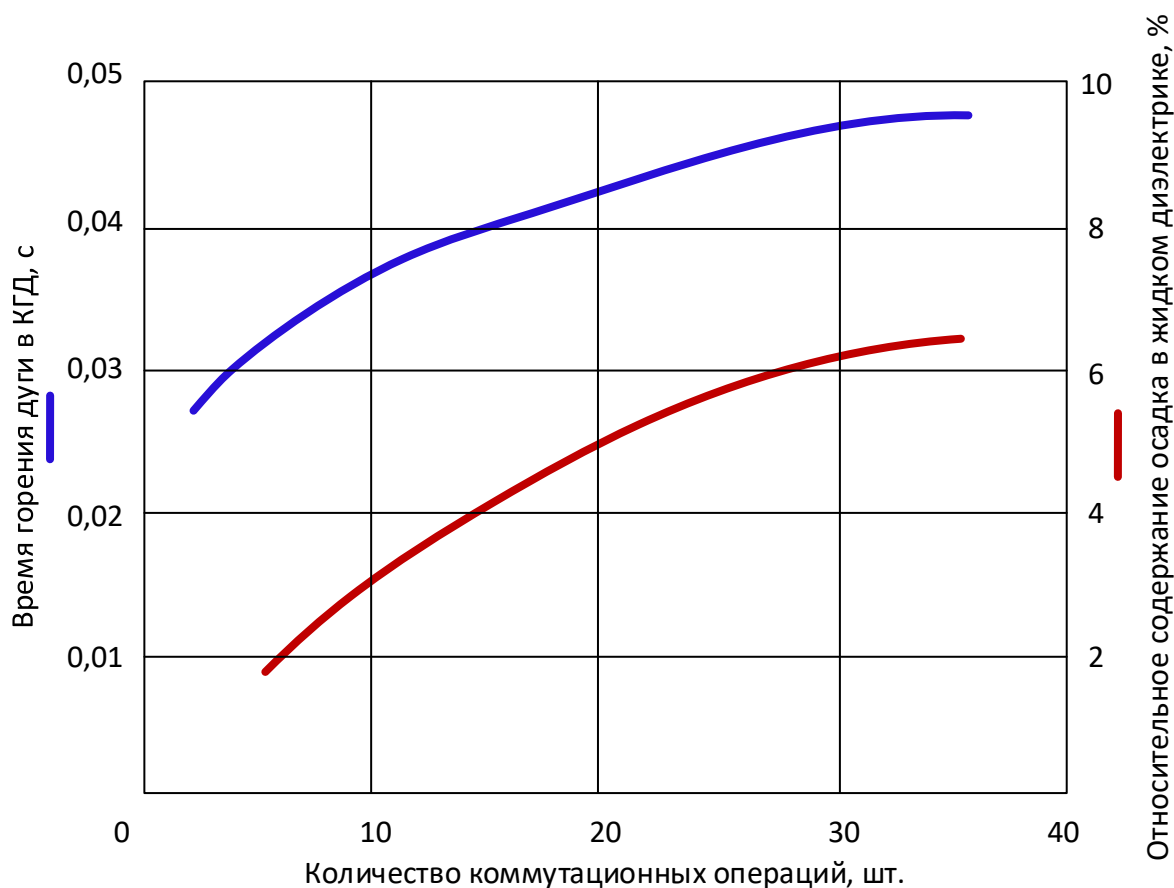


Рисунок 8 - Время горения дуги в КГД выключателя и относительное содержание примесей в жидком диэлектрике в зависимости от числа коммутационных операций

Примеси в жидком диэлектрике появляющиеся в результате горения дуги и разложения контактов контактной группы высоковольтных выключателей с жидкой средой гашения дуги также оказывают серьезное влияние на сопротивление жидкого диэлектрика. Нормальным, считается сопротивление на уровне $R_{из.норм} = 10000$ (МОм). Зависимость снижения сопротивления жидкого диэлектрика от числа коммутационных операций показана на рисунке 9.

Учитывая, что наибольшее снижение параметров жидкого диэлектрика и соответственно ресурса высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги и как следствие снижение уровня его технического состояния достигается по представленным зависимостям из-за повышения концентрации

металлов от разложения под действие дуги контактов, то необходимо и важно, оценивать изменение массы контактов выключателя.

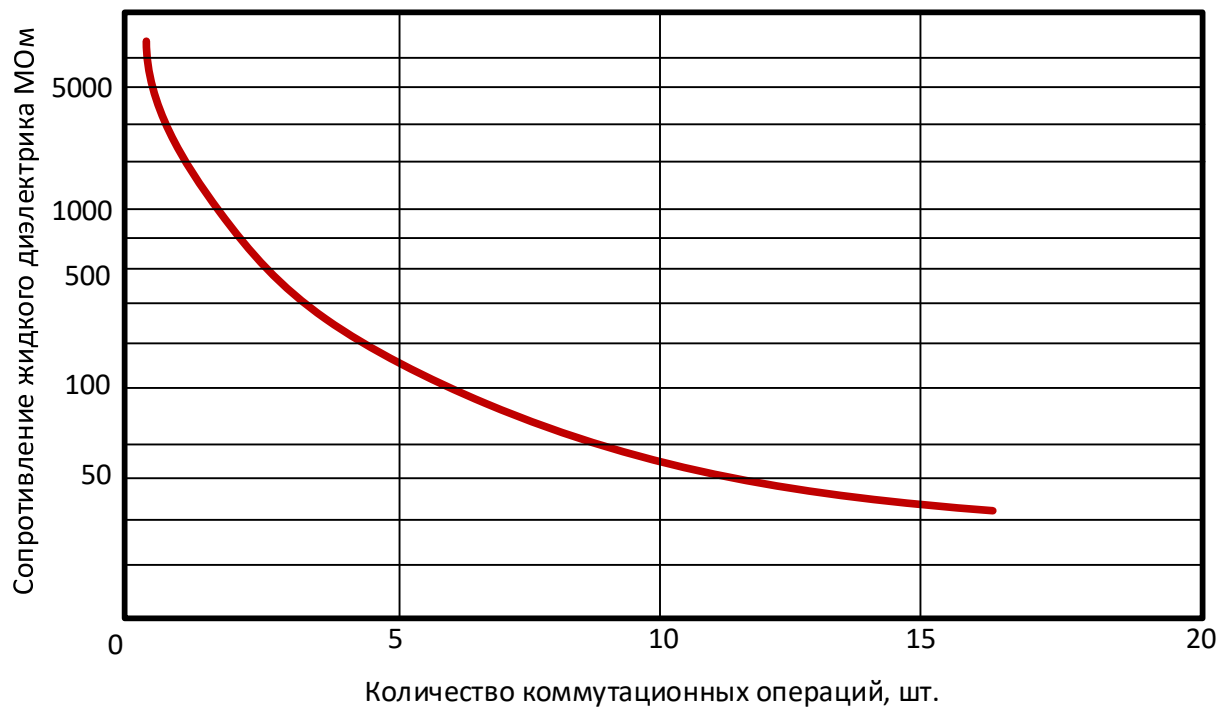


Рисунок 9 - Зависимость сопротивления жидкого диэлектрика от числа коммутационных операций

Уменьшение массы контакта выключателя может быть определена выражением:

$$\Delta m_{\text{конт.}} = K_{\text{Э}} \cdot t_{\text{д}} \cdot I_{\text{откл.}}^{\alpha} \quad (18)$$

где $K_{\text{Э}}$ – коэффициент, определяемый материалом контакта выключателя;

$t_{\text{д}}$ – длительность горения дуги, с;

$I_{\text{откл.}}$ – величина тока, который отключил выключатель, кА;

α – коэффициент, зависящий от материала контакта выключателя.

Для выражения (18) значения постоянных коэффициентов в значимости от материалов контактов представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Значения коэффициентов для выражения (18)

Материал контактов	Обозначение материала контактов	Постоянные коэффициенты	
		α	K_{Σ}
Медь-Вольфрам	W-Cu	1,58	2,15
Медь	Cu	1,8	0,274

Оценка технического состояния в данном подходе позволяет не только контролировать износ контактов высоковольтного выключателя, но и по значениям, полученным по выражению (18) определять уровень примесей в жидком диэлектрике, а следовательно, контролировать сопротивление жидкого диэлектрика, вязкость жидкого диэлектрика и время гашения дуги.

Данный метод может быть реализован для удаленного контроля технического состояния с использованием средств измерения тока, проходящего через выключатель. При этом время горения и гашения дуги в КГД высоковольтного выключателя оценивается по осциллограмме записанной для момента коммутации устройством мониторинга.

2.2 Методика оценки технического состояния по индексу и коэффициенту технического состояния высоковольтного оборудования

В рамках приказа Министерства Энергетики Российской Федерации [21] параметром, определяющим техническое состояние оборудования распределительных сетей является индекс технического состояния.

Индекс технического состояния рассчитывается для функциональных узлов оборудования распределительных сетей и для всего оборудования в целом [21].

Для определения индекса технического состояния для обобщенного узла распределительной сети используется выражение:

$$I_{Тс.у} = \frac{100 \cdot \sum_{i=1}^n KB_i \cdot ОГП_i}{4} \quad (19)$$

где KB_i – весовой коэффициент для i -й группы параметров, определяется по [21];

$ОГП_i$ – балльная оценка i -й группы параметров определяемая по методике изложенной в [21];

n – количество групп параметров для обобщенного узла распределительной сети.

Для определения индекса технического состояния единицы технологического оборудования используется выражение:

$$И_{ТС} = \sum_{i=1}^n KBУ_i \cdot ИТСУ_i \quad (20)$$

где $KBУ_i$ – весовой коэффициент для i -го функционального узла оборудования, определяется по [21];

$ИТСУ_i$ – индекс технического состояния i -го функционального узла оборудования, определяется по [21];

n – число функциональных узлов, влияющих на итоговый индекс технического состояния, определяется конкретным видом оборудования.

Также для оценки технического состояния может применяться коэффициент текущего технического состояния.

$$K_{ТТС} = 1 - \sum_{i=1}^n K_{ТТС.У.i} \quad (21)$$

где $K_{ТТС.У.i}$ – коэффициент текущего технического состояния i -го узла оборудования;

n – количество узлов оборудования, оказывающих влияние на техническое состояния.

Стоит отметить, что в отличие от индекса технического состояния ($I_{ТС}$), коэффициент текущего технического состояния ($K_{ТТС}$) определяется при техническом диагностировании или ремонте оборудования. И после проведения ремонта значение $K_{ТТС} = 1$. Сравнительные графики изменения индекса технического состояния и коэффициента текущего технического состояния показаны на рисунке 10.

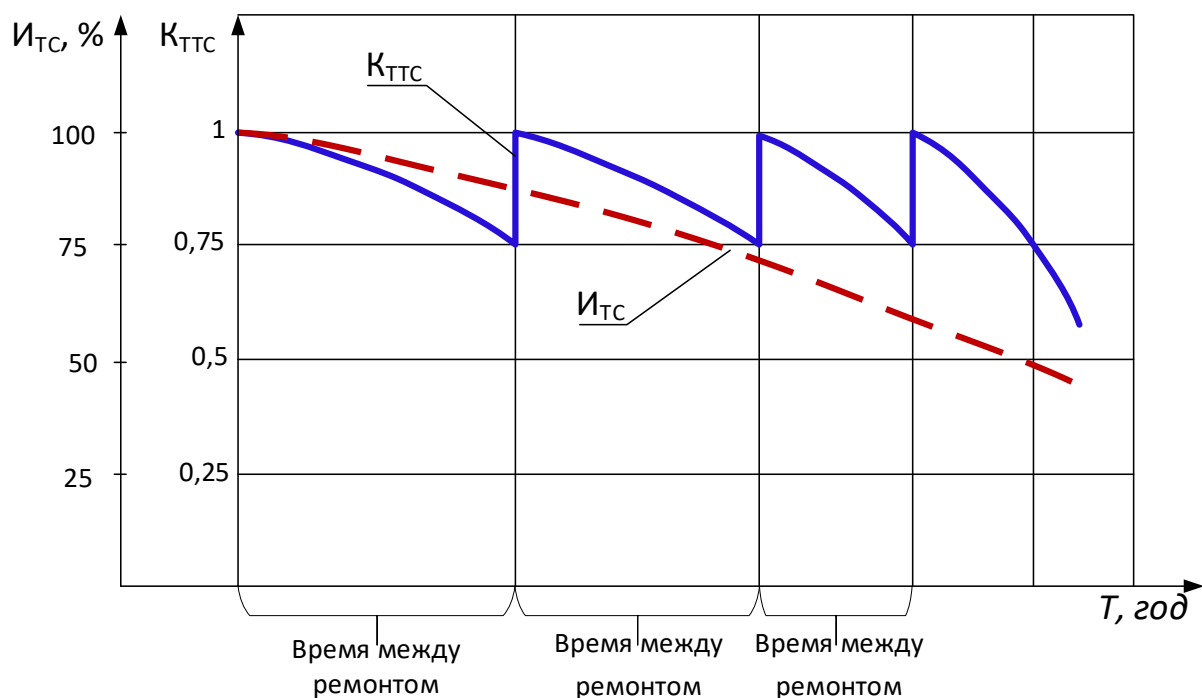


Рисунок 10 - Связь индекса технического состояния и коэффициента текущего технического состояния

Для определения весовых коэффициентов, согласно [21], рекомендуется использование метода Саати – метод парных сравнений [20]. Такой метод позволяет определить значения весовых коэффициентов для различных функциональных узлов опираясь на мнения нескольких специалистов-экспертов. Применение в данном методе мнений нескольких экспертов позволяет снизить вероятность субъективного распределения значений весовых коэффициентов.

2.3 Методики оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей

В процессе эксплуатации высоковольтных выключателей необходимо вести непрерывный контроль коммутационного ресурса. Существует несколько различных методик позволяющих выполнять оценку коммутационного ресурса. Все методики основаны на статистическом анализе и имеют различные уровни достоверности оценки. Все рассматриваемы в рамках выпускной квалификационной работы методики представлены в таблице 9

Таблица 9 - Методики оценки коммутационного ресурса

Номер метода	Источник	Краткое наименование
1	[10]	ГОСТ 687-78 Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В
2	[34]	Методические указания по определению расхода коммутационных ресурса выключателей при эксплуатации (НИЦ ВВА)
3	[17]	Метод Неклепаева Б.Н. и Востросаблина А.А.

Метод 1 (таблица 9) позволяет выполнять оценку коммутационного ресурса не всех выключателей с классом напряжения выше 1000 В. Данный метод не позволяет оценивать расход коммутационного ресурса воздушных выключателей серии ВВН и ВВБ. В основе метода лежит оценка коммутационного ресурса выключателя на основе округления значений отключаемых выключателем токов. Округление токов выполняется по правилам с учетом номинального тока выключателя $I_{НОМ}$ указанного в паспорте:

- $0,3I_{НОМ}$, группа $i = 1$;
- $0,6I_{НОМ}$, группа $i = 2$;
- $1,0I_{НОМ}$, группа $i = 3$.

Полученные округленные значения отключаемых токов используются в выражении, определяющем вклад каждого отключения в общий коммутационный ресурс выключателя:

$$n_i = \frac{K_{зф.i}}{K_{доп.i}} \quad (22)$$

где $K_{зф.i}$ – количество зафиксированных коммутаций выключателем тока i -й группы, шт;

$K_{доп.i}$ – определенное паспортом выключателя количество коммутаций тока i -й группы, шт.

Расход коммутационного ресурса ($\Delta P_{расх.КР}$) высоковольтного выключателя на основе значений, полученных по выражению (22) определяется:

$$\Delta P_{расх.КР}^{(1)} = \sum_{i=1}^3 n_i \quad (23)$$

С учетом значения полученного в (23) остаточный коммутационный ресурс выключателя ($P_{ост.КР}$) определяется по выражению:

$$P_{ост.КР}^{(1)} = 1 - \Delta P_{расх.КР}^{(1)} \quad (24)$$

Полученное по (24) значение используется для определения необходимости:

- ремонта выключателя;
- обслуживания выключателя;
- замены выключателя.

Метод 2 (таблица 9). Данный метод по оценке коммутационного ресурса высоковольтного выключателя схож с методом 1 (таблица 9) в части использования паспортных данных выключателя. Для использования метода 2 необходимо, чтобы в паспорте высоковольтного выключателя были заданы графические зависимости коммутационного ресурса в зависимости от тока, коммутируемого выключателем. Также эти зависимости могут быть заданы не графической характеристикой, а рядом характерных коммутируемых выключателем токов, для которых указаны расходы коммутационного ресурса. В любом из случаев задания характеристик, связывающих коммутируемый ток и расход коммутационного ресурса, все значения коммутируемого тока должны аппроксимироваться относительно паспортной зависимости. Существенным отличием метода 2 от метода 1 является то, что в данном случае значения коммутируемых токов не округляются до границ групп i , а используется реальное значение коммутируемого тока. Определение расхода коммутационного ресурса определяется для каждого коммутируемого значения тока по выражению:

$$\Delta P_{\text{расх.КР.}i}^{(2)} = \frac{1}{K_{\text{доп.}i}} \quad (25)$$

где $K_{\text{доп.}i}$ – допустимое число коммутаций тока i -го значения по заводской характеристике снижения коммутационного ресурса, шт.

Для метода 2 расход коммутационного ресурса определяется выражением:

$$P_{\text{ост.КР}}^{(2)} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{\text{расх.КР.}i}^{(2)} \quad (26)$$

где n – общее число зафиксированных коммутаций выключателем, шт.

Метод 3 (таблица 9). Данный метод, в отличие от метода 1 и метода 2, более специфичен в части видов высоковольтных выключателей. Данный

метод также как и методы 1 и 2 использует паспортные данные выключателя. Однако, в отличие от методов 1 и 2 он не использует характеристики расхода коммутационного ресурса для различных значений коммутируемого тока. Стоит отметить, что большинство современных выключателей не имеют в своих паспортах характеристик расхода коммутационного ресурса, поэтому для них не могут применяться методы 1 и 2. В этой части, метод 3 является более подходящим. Однако, для использования данного метода должны быть заранее определены значения постоянных коэффициентов: A и B используемые в выражении для определения гарантированного числа коммутаций токов короткого замыкания выключателем:

$$\text{ГЧК}_i = A + \frac{B \cdot I_{\text{откл.ном}}}{I_{\text{откл.}i}} \quad (27)$$

где A, B – постоянные коэффициенты определяемые типом выключателя;

$I_{\text{откл.ном}}$ – паспортное значение тока отключения выключателя, кА;

$I_{\text{откл.}i}$ – значение i -го тока короткого замыкания, коммутируемого выключателем, кА.

Стоит отметить, что гарантированное число отключений, определяемое по выражению (27) рассчитывается только для токов короткого замыкания и не учитывают общий гарантированный коммутационный ресурс выключателя. Значение коммутируемого тока короткого замыкания для выключателя может быть задано по данным эксплуатационной организации в результате расчета моделей электрических режимов энергосистемы. Значение полученное по (27) не учитывает общий коммутационный ресурс, расход которого определяется выражением:

$$\Delta P_{\text{расх.КР}}^{(3)} = \sum_{i=1}^n \frac{I_{\text{К.В.}i} \cdot n_i}{A \cdot I_{\text{К.В.}i} + B} \quad (28)$$

где n – общее число коммутаций, совершенных выключателем за рассматриваемый период, шт.;

$I_{к.в.i}$ – значение тока, коммутируемого высоковольтным выключателем в результате i -й коммутации, кА;

n_i – общее число коммутаций i -го тока, шт.

На основании значения, полученного в выражении (28) определяется остаточный ресурс высоковольтного выключателя по выражению:

$$P_{\text{ост.КР}}^{(3)} = 1 - \Delta P_{\text{расх.КР}}^{(3)} \quad (29)$$

Рассмотренные методы оценки коммутационного ресурса являются не единственными, однако данные методы являются наиболее подходящими для оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей [4].

2.4 Существующие коммерческие решения по оценке технического состояния высоковольтных выключателей

Оценка технического состояния коммутационного оборудования – высоковольтных выключателей с любой средой гашения дуги является актуальным как было показано во введении к выпускной квалификационной работе. Исходя из этого на рынке систем мониторинга представлены готовые программно-технические комплексы для работы с высоковольтными выключателями. В рамках анализа существующих готовых коммерческих решений по оценке технического состояния высоковольтных выключателей не рассматриваются решения зарубежных производителей, так как их доступность на рынке не может быть официально оценена, также зарубежные коммерческие продукты в основном интегрированы в работу со своим оборудованием, что также увеличивает затраты на их приобретение и последующую эксплуатацию. Кроме того, любой программный и технический

продукт требует поддержки производителя с поставкой обновлений и гарантийным обслуживанием, что в настоящее время не реализуемо на территории Российской Федерации, поэтому в рамках выпускной квалификационной работы рассматриваются только отечественные производители готовых коммерческих продуктов для высоковольтных выключателей.

2.4.1 Контроль технического состояния выключателей с выводом их из работы

Для проведения периодического контроля технического состояния эксплуатируемых высоковольтных выключателей требуется выполнения различных тестирований. Такой подход к обслуживанию оборудования занимает привилегированное место из всех возможных подходов. Он получил распространение из-за нормативных актов, которые в большинстве своем были разработаны в конце 20 века, когда уровень развития цифровых технологий не был достаточно высоким. Такой подход в зарубежной и отечественной научной литературе получил название предупредительное техническое облуживание (англ. *PM*) [35]. Усовершенствование метода предупредительного технического облуживания (англ. *PM*) привело к появлению метода профилактического облуживания (англ. *PdM*) – профилактическое облуживание оборудования [35]. Однако, эти подходы требуют вывода оборудования из работы и проведение специализированных тестирований с целью определения возможных дефектов.

Для реализации таких подходов на российские производители оборудования для диагностики выпускают два типа приборов которые схожи по своим характеристикам:

- прибор контроля высоковольтных выключателей ПКВ/М7 [22];
- прибор контроля высоковольтных выключателей ПКВ/УЗ [23].

Приборы ПКВ/М7 и ПКВ/УЗ предназначены для контроля параметров высоковольтных выключателей с любой из применяемых сред гашения

электрической дуги. Сравнение характеристик приборов ПКВ/М7 и ПКВ/УЗ представлены в таблице 10.

Таблица 10 - Сравнение параметров

Параметры	Единица измерения	Наличие функции, да/нет	
		Прибор ПКВ/М7	Прибор ПКВ/УЗ
Собственное время включения выключателя	мс	да	да
Полный ход выключателя	мм	да	да
Перелет	мм	да	да
Отскок	мм	да	да
Максимальный ход вибраций контактов выключателя	мм	да	да
Максимальное время вибрации контакта	мс	да	да
Максимальная разность хода контактов	мм	да	да
Максимальная разновременность хода контактов	мс	да	да
Полный угол поворота	град.	да	да
Максимальная скорость	м/с	да	да
Скорость при замыкании	м/с	да	да
Длительность коммутационного импульса	мс	да	да
Время отработки коммутации приводом	мс	да	да
Возможность управления с персонального компьютера	-	да	да
Передача данных на персональный компьютер с построением диаграмм в поставляемом программном обеспечении	-	да	да

По данным таблицы 10 можно сделать вывод и том что рассматриваемые приборы идентичны по своему функционалу. Различия приборов можно отметить только визуально.

2.4.2 Системы дистанционной оценки технического состояния высоковольтных выключателей

На российском рынке ведущим производителем систем мониторинга высоковольтного электрооборудования является компания «Димрус», г. Пермь. В номенклатуре выпускаемых систем мониторинга компании «Димрус» присутствует ряд систем мониторинга высоковольтных выключателей: СВМ [27], BDM/Т [26], Т-Monitor [29], IDR-10 [28]. Системы, выпускаемые компанией «Димрус» выполняют мониторинг состояния

коммутационного оборудования класса напряжения 6-10 кВ. В номенклатуре производимой продукции компании «Димрус» отсутствуют прямые аналоги разрабатываемой в рамках выпускной квалификационной работы системы. Основные функции систем компании «Димрус» представлены в таблице 11.

Проведенный анализ систем, производимых компанией «Димрус» результаты которого представлены в таблице 11 позволил определить, что среди номенклатуры производимой продукции у компании «Димрус» отсутствует прямой аналог разрабатываемой в рамках выполнения ВКР системы.

Таблица 11 - Функции систем производства «Димрус»

Наименование контролируемого параметра	Модели систем мониторинга			
	СВМ	ВDM/Т	Т-Monitor	IDR-10
Напряжение контролируемых выключателей, кВ	6-10	6-10	0,4	6-10
Контроль коммутационного ресурса	нет	да	да	нет
Контроль температуры контактов	да	да	да	нет
Контроль параметров выключателя	да	да	да	нет
Контроль частичных разрядов	да	нет	нет	да

Все рассмотренные в таблице 11 системы не позволяют оценивать техническое состояние высоковольтных выключателей с жидкой средой гашения дуги напряжением 110 кВ, которые рассматриваются как объект исследования.

Выводы по разделу.

Рассмотрен метод оценки технического состояния высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги, основанный на контроле изменения массы контактов выключателя. Оценка технического состояния в данном подходе позволяет не только контролировать износ контактов высоковольтного выключателя, но и определять уровень примесей в жидком диэлектрике, а следовательно, контролировать сопротивление жидкого диэлектрика, вязкость жидкого диэлектрика и время гашения дуги. Данный метод может быть реализован для удаленного контроля технического

состояния с использованием средств измерения тока, проходящего через выключатель. При этом время горения и гашения дуги в КГД высоковольтного выключателя оценивается по осциллограмме записанной для момента коммутации устройством мониторинга.

Для группы методов контроля индекса и коэффициента технического состояния высоковольтного выключателя установлено, что индекс технического состояния позволяет определить только общий износ выключателя или конкретного узла в рамках его жизненного цикла. Индекс технического состояния не позволяет контролировать и оценивать состояние высоковольтного выключателя в режиме реального времени. Методика оценки коэффициента текущего технического состояния позволяет определять износ оборудования или отдельных его узлов в периоде цикла между ремонтами оборудования. После каждого ремонта оборудования коэффициент принимает значение равное 1. Применение методики, основанной на определении коэффициента технического состояния, требует создания экспертной системы и не может быть выполнено в рамках выполнения выпускной квалификационной работы.

Проанализированы методы позволяющие определить расход коммутационного ресурса высоковольтного выключателя. Проанализировано три базовых метода, которые позволяют с различной степенью достоверности оценить необходимость вывода выключателя в ремонт, проведение обслуживания или замены выключателя.

Анализ методов расчета остаточного коммутационного ресурса позволил установить, что все методы используют только значения коммутируемых токов. Все рассмотренные методы должны применяться с учетом конкретного типа высоковольтного выключателя. Отсутствуют универсальные методы оценки коммутационного ресурса выключателя. Наиболее универсальный метод – метод Неклепаева Б.Н.-Востросаблина А.А. не требует наличия в паспорте выключателя специализированных характеристик, описывающих коммутационный ресурс в зависимости от

коммутируемых токов, однако требует уточнения постоянных коэффициентов, характеризующих типа выключателя. Определение этих постоянных коэффициентов требует проведения дополнительных исследований, в том числе, с проведением натурных испытаний высоковольтного выключателя серии ВМТ. Исходя из этого, данный метод не может быть принят в качестве базового для разработки системы дистанционной оценки технического состояния объекта выпускной квалификационной работы.

Проанализированы представленные на рынке Российской Федерации коммерческие системы оценки технического состояния высоковольтных выключателей.

Установлено, что на рынке, в настоящее время представлены два схожих по характеристикам прибора: ПКВ/М7 и ПКВ/У3. Рассмотренные приборы позволяют проводить оценку параметров высоковольтных выключателей любого типа и класса напряжения. Они позволяют оценивать полное техническое состояние выключателя. Однако особенностью данных приборов является проведение тестирования только отключенного, т.е. выведенного из работы выключателя. Поэтому приборы ПКВ/М7 и ПКВ/У3 не могут являться прямыми аналогами разрабатываемой в рамках выпускной квалификационной системы дистанционной оценки технического состояния.

Проведенный анализ рынка доступных систем мониторинга высоковольтных выключателей позволил определить, что на рынке присутствует компания «Димрус», которая занимается производством систем мониторинга и диагностики энергетического оборудования.

Анализ номенклатуры производимой компанией «Димрус» продукции позволил определить 4 системы, которые могут быть использованы для коммутационного оборудования.

Анализ характеристик систем, производимых компанией «Димрус» размещенных в электронном каталоге, позволил установить, что в

номенклатуре производимой продукции отсутствуют прямые аналоги разрабатываемой в рамках выпускной квалификационной работы системы.

Все системы, производимые компанией «Димрус» не позволяют вести дистанционную оценку технического состояния высоковольтных выключателей класса напряжения 110 кВ с жидкой средой гашения дуги.

Системы компании «Димрус» позволяют оценивать параметры работы выключателей максимальным классом напряжения 6-10 кВ, при этом объект исследования является выключателем класса напряжения 110 кВ.

Проведенный анализ рынка систем оценки технического состояния позволил дополнительно подтвердить высокую актуальность проводимого в рамках выпускной квалификационной работы исследования.

3 Система дистанционной оценки технического состояния выключателей ВМТ-110Б

В рамках третьего раздела выпускной квалификационной работы представлены результаты разработки системы дистанционной оценки технического состояния высоковольтных выключателей серии ВМТ для использования в Самарских распределительных сетях.

3.1 Алгоритм работы системы дистанционной оценки технического состояния выключателя ВМТ-110Б

Как определено в разделе 2 выпускной квалификационной работы, основным параметром, характеризующим изменение технического состояния высоковольтного выключателя является уровень и число коммутируемых токов. Для выключателя, исследуемого в выпускной квалификационной работе в паспорте представлены графики зависимости числа коммутаций для различных значений коммутируемых токов. Однако, графическая зависимость не может быть использована в работе автоматизированной системы дистанционного контроля технического состояния. Поэтому паспортную зависимость коммутируемого тока необходимо обработать средствами MS Excel:

- определим максимально достоверные, характерные точки на графической зависимости из паспорта выключателя.;
- полученные значения занесем в таблицу MS Excel;
- построим диаграмму по определенным точкам;
- для построенной диаграммы выберем вид тренда, имеющего наибольшее значение достоверности аппроксимации - R^2 . Чем ближе значение R^2 к единице тем достовернее линия тренда описывает построенную диаграмму.

По представленной методике определено, что максимальное значение достоверности аппроксимации имеет степенная функция тренда. При этом достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9503$. Для данного уравнения степенного тренда в MS Excel определяем уравнение тренда. Диаграмма, построенная по данным паспорта выключателя серии ВМТ в MS Excel со степенной линией тренда и полученным уравнением линии тренда с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,9503$ показана на рисунке 11.

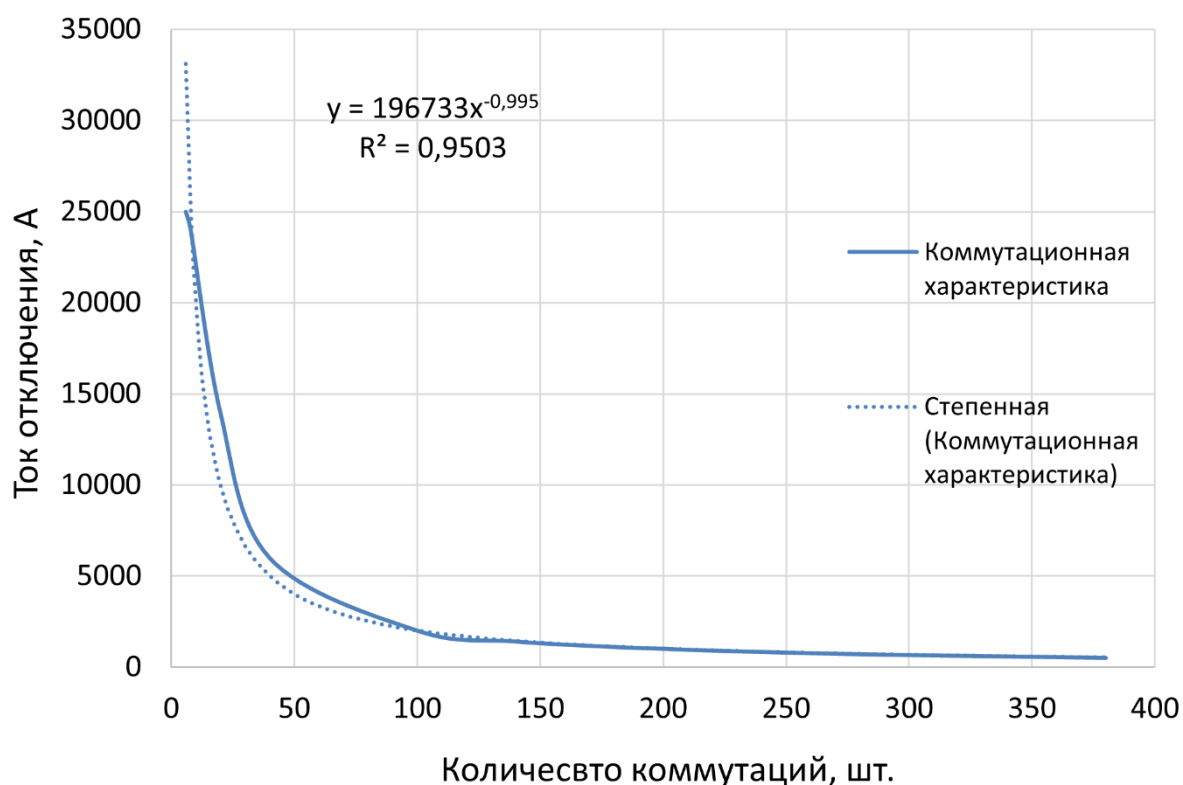


Рисунок 11 - Коммутационная характеристика выключателя серии ВМТ

Для определения снижения коммутационного ресурса выключателя типа ВМТ с номинальным током отключения 25 кВ может быть использована функция, полученная на основании аппроксимации паспортной характеристики:

$$I_{\text{откл.}i} = 196733 \cdot n_i^{-0.995} \quad (30)$$

где $I_{\text{откл.}i}$ — значение отключаемого тока на i -й операции, А;

n_i – допустимое число отключений i -го тока, шт.

Для проверки достоверности полученной функции (30) необходимо построить по ней диаграмму также средствами MS Excel. Диаграмма, построенная по функции (30) представлена на рисунке 12.

Для контроля достоверности смоделированной коммутационной характеристики выключателя ВМТ-110Б было выполнено сравнение характерных точек, полученных по паспортной коммутационной характеристике с расчетными точками по выражению (30). Сравнение значений представлено в таблице 12.

Таблица 12 - Сравнение паспортной и смоделированной коммутационной характеристики

Паспортная коммутационная характеристика		Смоделированная коммутационная характеристика	$\Delta K T_i$, %
Число коммутаций, шт.	Коммутируемый ток ($K T_{\text{пасп.}i}$), А	Коммутируемый ток ($K T_{\text{мод.}i}$), А	
380	500	518	3,6
280	700	703	0,42
220	900	894	0,66
200	1000	984	1,6
180	1100	1093	0,63
140	1400	1405	0,35
100	2000	1967	1,65
40	6000	5897	1,71
20	14000	13588	2,94
8	24000	24592	2,46
6	25000	25212	0,84

Сравнение значений паспортной и смоделированной коммутационных характеристик для характерных точек выполнено по выражению:

$$\Delta K T_i = \left| 1 - \frac{K T_{\text{мод.}i}}{K T_{\text{пасп.}i}} \right| \cdot 100 \quad (31)$$

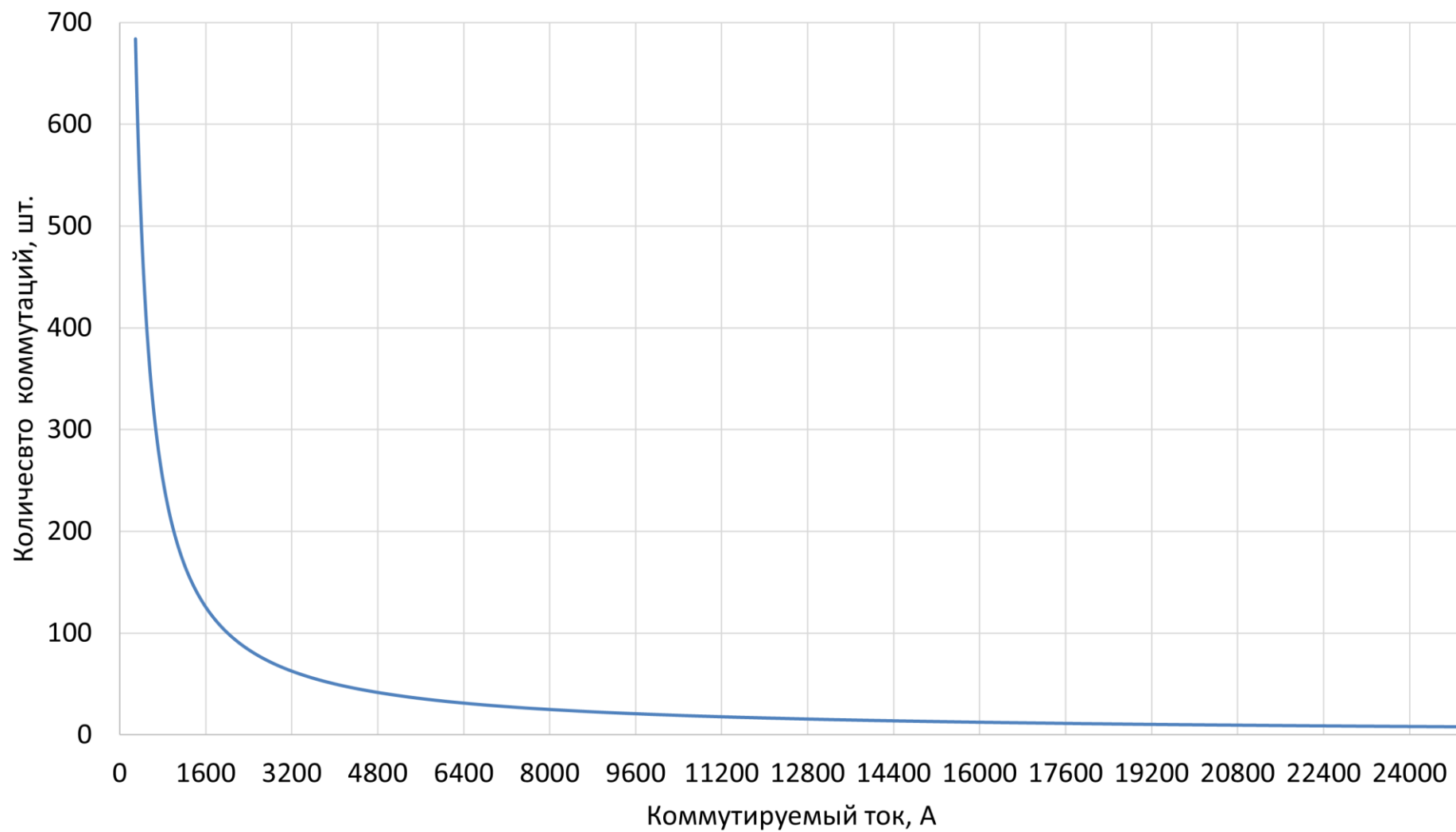


Рисунок 12 – Смоделированная коммутационная характеристика выключателя серии ВМТ

По результатам таблицы 12 получено, что отклонение значений смоделированной и паспортной коммутационных характеристик, для большинства значений не превышает 3%, что является высоким показателем точности смоделированной характеристики. Следовательно, полученная зависимость (рисунок 12) может быть использована для оценки остаточного коммутационного ресурса.

Для оценки коммутационного ресурса, при наличие достоверной коммутационной функции может быть использован метод 2 рассмотренный в разделе 2 выпускной квалификационной работы. Метод 2 представлен выражениями (25) и (26).

Для составления алгоритма работы системы по выражениям (25) и (26), для дистанционной оценки технического состояния выключателя сери ВМТ с током отключения 25 кА необходимо преобразовать полученную коммутационную функцию (30) относительно числа коммутаций:

$$n_i = \frac{0.995 \sqrt{196733}}{I_{\text{откл.}i}} \quad (32)$$

Тогда подставив преобразованное выражение (32) в (25) получим:

$$\Delta P_{\text{расх.КР.}i}^{(2)} = \frac{1}{\frac{0.995 \sqrt{196733}}{I_{\text{откл.}i}}} \quad (33)$$

Значение расхода коммутационного ресурса полученное по (33) необходимо определять для каждой коммутации выключателя. Определение остаточного ресурса в результате каждой коммутации определяется путем дополнения результирующего значения остаточного ресурса определяемого по (26).

Разработанную методику дистанционной автоматизированной оценки коммутационного ресурса, для моделирования, необходимо отобразить в виде алгоритма. Алгоритм автоматизированной дистанционной оценки коммутационного ресурса выключателя серии ВМТ-110Б представлен на рисунке 13.

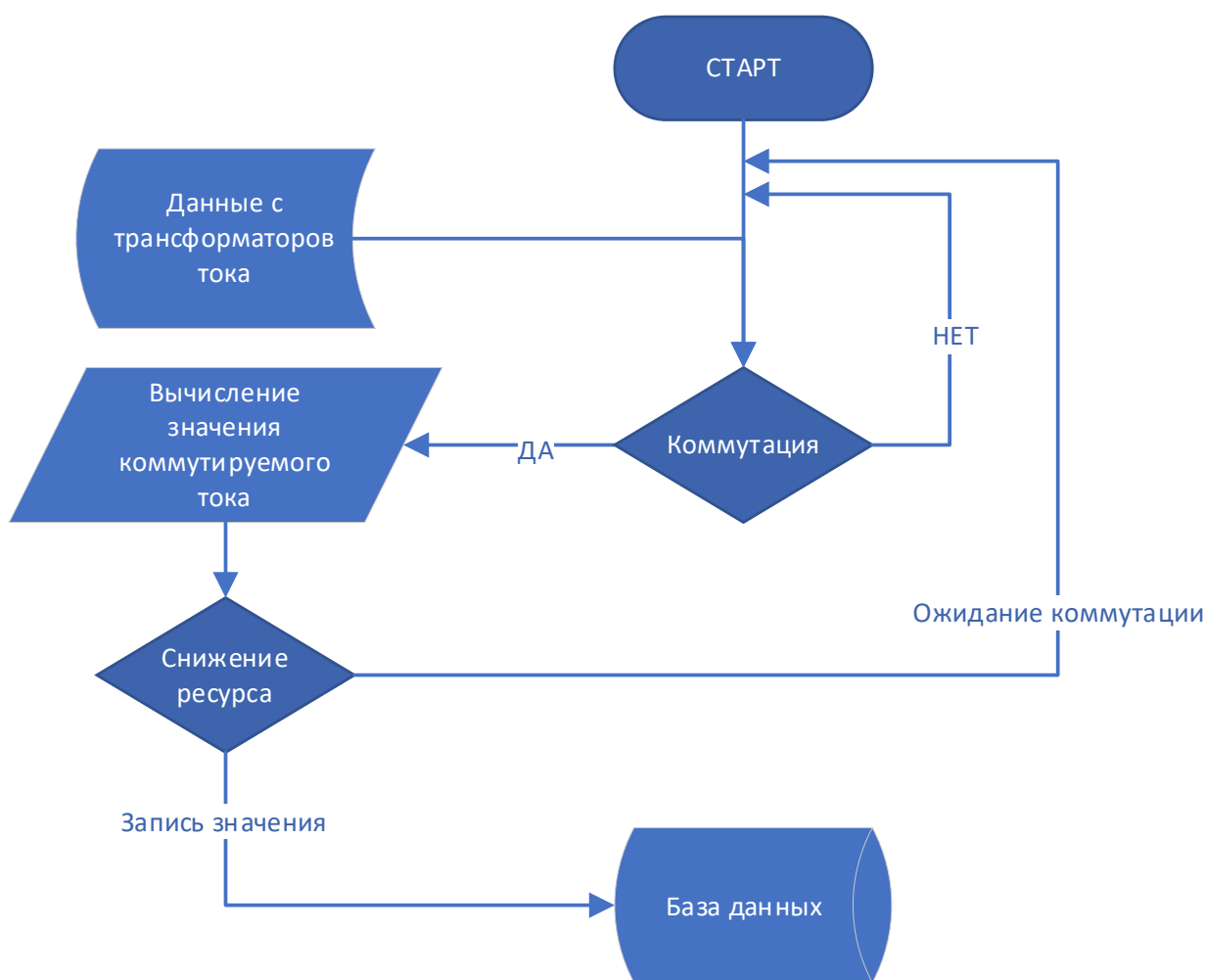


Рисунок 13 - Алгоритм автоматизации дистанционного контроля коммутационного ресурса

Кроме автоматизированного контроля коммутационного ресурса система дистанционной оценки технического состояния должна обеспечивать контроль давления в куполе выключателя ВМТ. Этот показатель является важным для выключателей серии ВМТ. От уровня давления зависит коммутационная способность выключателя серии ВМТ.

Снижение давления в куполе выключателя ВМТ может быть вызвано утечкой газа, которая в свою очередь вызвана отсутствием масла в дополнительных резервуарах колпака выключателя.

Повышение давления, особенно в зимнее время, свидетельствует от попадания влаги или грязи в выпускной клапан, а также может свидетельствовать о деформации резиновых уплотнителей.

Алгоритм автоматизированного дистанционного контроля избыточного давления представлен на рисунке 14.

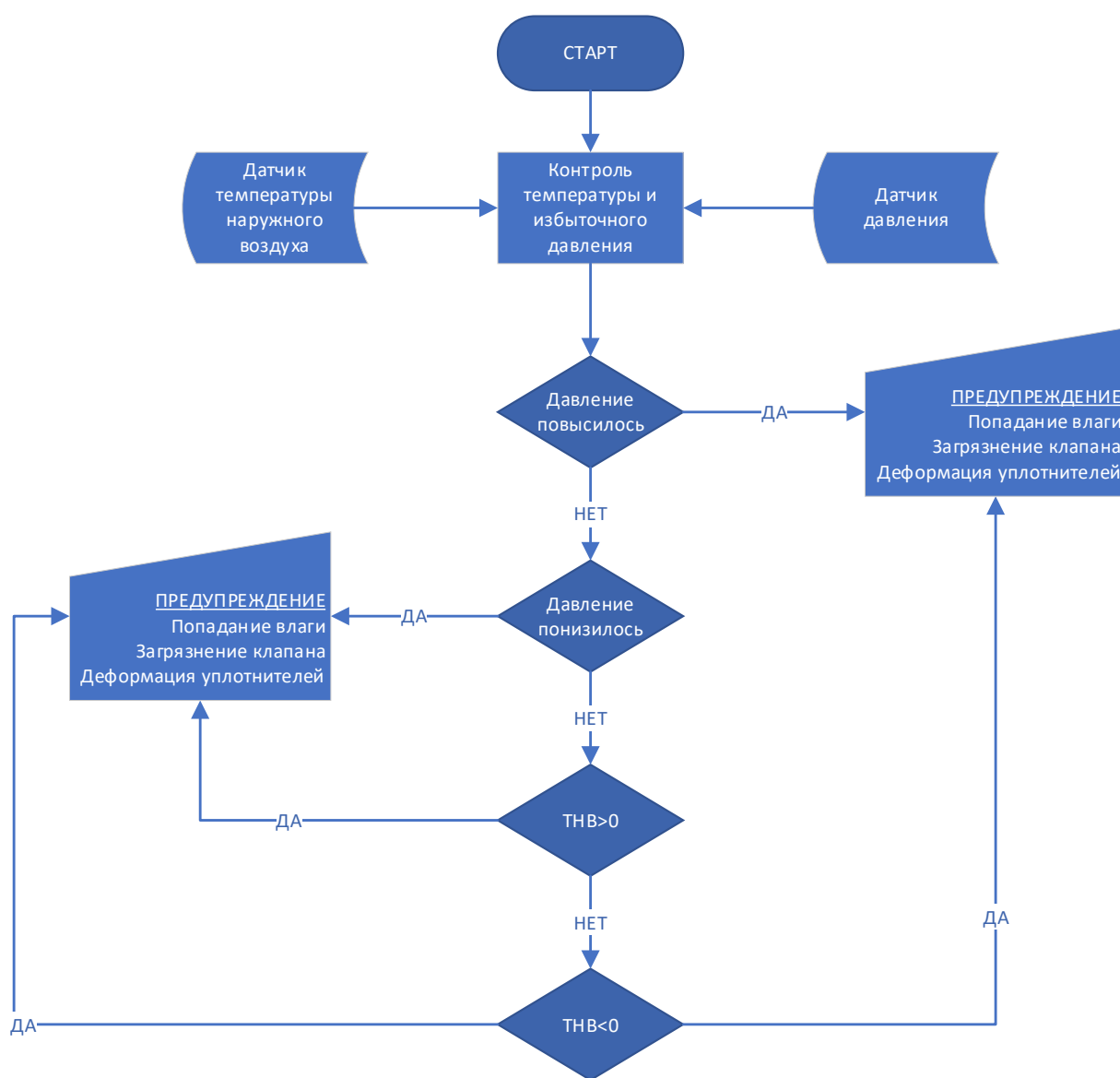


Рисунок 14 -Алгоритм автоматизированного дистанционного контроля избыточного давления

Запуск представленных на рисунках 13 и 14 алгоритмов происходит ТОЛЬКО:

- при изменении контролируемого давления;
- при совершении коммутации.

Во всех остальных случаях ведется непрерывный мониторинг параметров:

- температура наружного воздуха (ТНВ);
- ток, протекающий через выключатель;
- избыточное давление в куполе выключателя.

Все контролируемые параметры отображаются в окне системы дистанционной оценки технического состояния высоковольтного выключателя на диспетчерском пульте (рисунок 15).

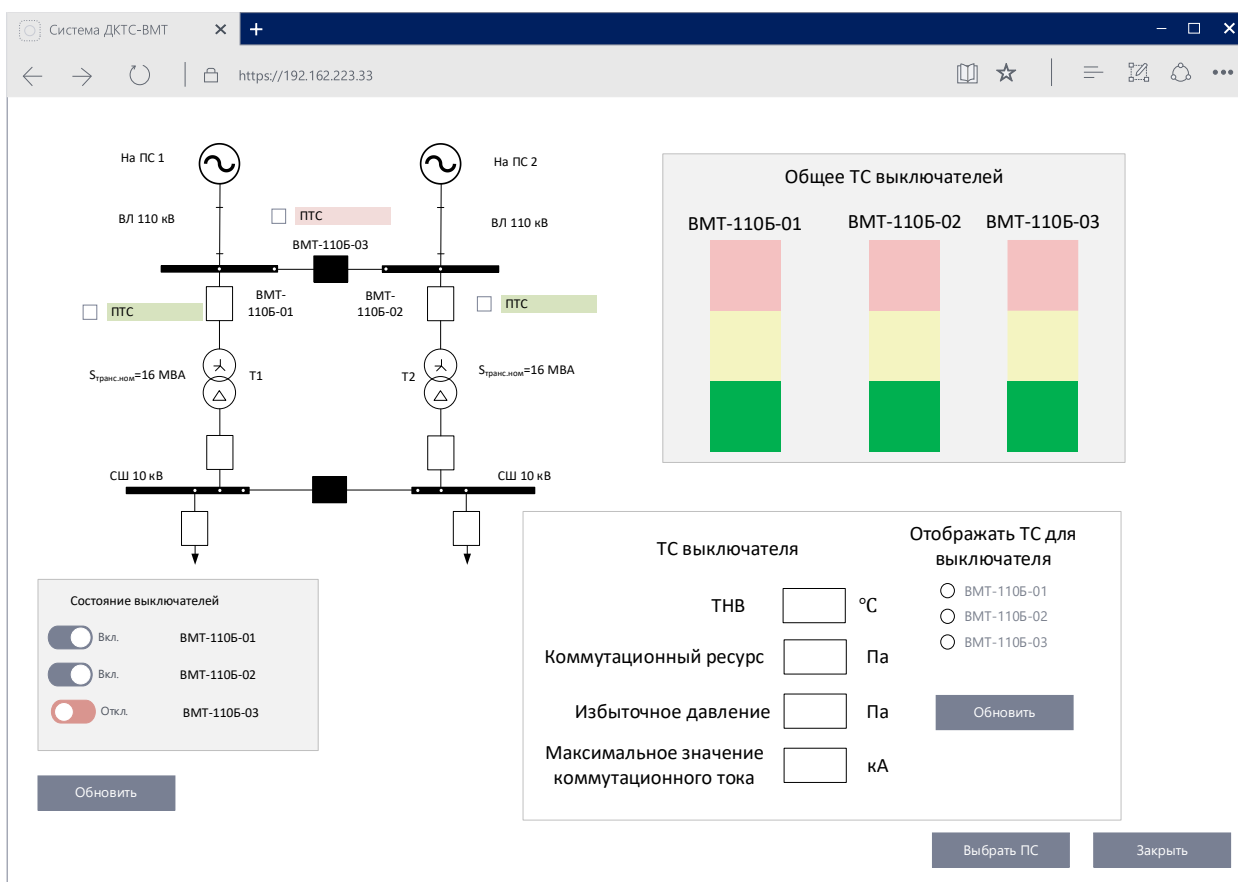


Рисунок 15 - Окно разработанной системы дистанционной оценки технического состояния выключателей серии ВМТ

На рисунке 15 показана концепция интерфейса системы дистанционной оценки технического состояния выключателей серии ВМТ.

В окне системы (рисунке 15) отображается однолинейная схема подстанции, на которой установлены выключатели серии ВМТ. Показано их состояние: включен или отключен. Для обновления данных о состоянии выключателей используется кнопка «Обновить», расположенная под группой переключателей «Состояние выключателя».

В правом верхнем углу окна, показано общее техническое состояние выключателей серии ВМТ, установленных на подстанции. Общее техническое состояние определяется по шкале «светофор», где красный цвет говорит о неудовлетворительном состоянии выключателя, желтый цвет о состоянии, требующем внимания и зеленый цвет об удовлетворительном состоянии.

Также в окне системы демонстрируются параметры, используемые для оценки технического состояния выключателей серии ВМТ. Параметры представлены согласно разработанным алгоритмам (рисунки 13 и 14). Для переключения отображаемых параметров для разных выключателей используются группа переключателей «Отображать ТС для выключателя».

В правой нижней части окна расположены группы кнопок:

- «Выбрать ПС» - для перехода в окно контроля технического состояния выключателей следующей подстанции;
- «Закрыть» - для закрытия окна контроля технического состояния выключателей серии ВМТ.

3.2 Моделирование алгоритма дистанционной оценки технического состояния выключателя ВМТ-110Б

Для моделирования разработанного алгоритма системы дистанционной оценки технического состояния выключателя серии ВМТ, в рамках выпускной квалификационной работы, использован программный комплекс MATLAB\Simulink.

Для разработки алгоритма системы дистанционной оценки технического состояния выключателей серии ВМТ используем стандартные блоки библиотеки Simulink.

Модель алгоритма системы дистанционной оценки технического состояния выключателя серии ВМТ представлена на рисунке 16.

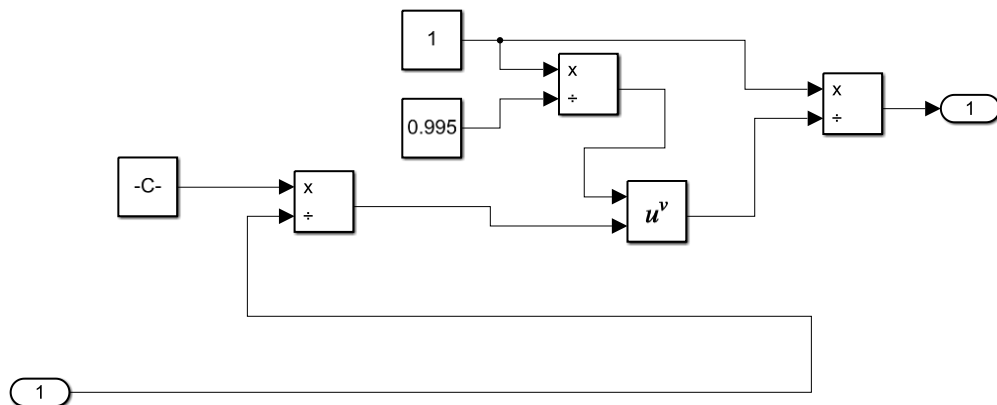


Рисунок 16 - Модель алгоритма контроля остаточного ресурса

Для тестирования модели алгоритма разработана тестовая схема в MATLAB/Simulink представленная на рисунке 17.

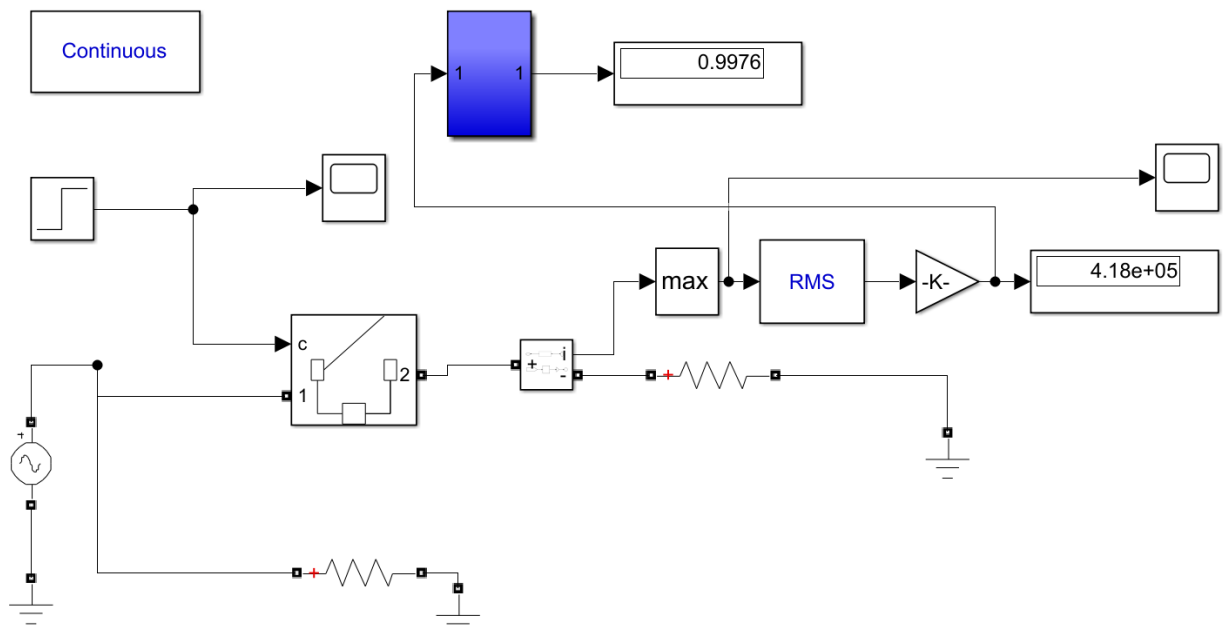


Рисунок 17 - Тестовая модель

Для моделирования выключателя использовался блок «Braker» из библиотеки Simulink. Управление выключателем выполнял блок «Step».

Модельное время установлено на уровне 10 с. Коммутация (включение) выключателя производилась в момент модельного времени 9 с. После этого данные полученные из блока системы дистанционной диагностики, с изменением коммутационного ресурса отображались в блоке «Display». Значение измеренного тока также фиксировалось с помощью блока «Display».

Для тестирования разработанной модели использовались значения мощности (активной мощности), которые задавались в блок «RLC-Series Load». Для тестирования использовалось 33 варианта различной мощности. Для каждого смоделированного варианта с мощностью нагрузки записывались данные тока и изменения коммутационного ресурса. Результаты компьютерного тестирования представлены в таблице 13.

Таблица 13 - Результаты компьютерного эксперимента

$P_{\text{нагр},i}$, кВт	$I_{\text{откл},i}$, А	$\Delta P_{\text{расх.КР},i}^{(2)}$, о.е	$P_{\text{ост.КР}}^{(3)}$, о.е.
100	0,428	0	1
500	2,153	1,14E-119	1
900	3,857	9,19E-112	1
1300	5,496	1,19E-78	1
1700	7,285	1,61E-59	1
2100	8,996	2,46E-48	1
2500	10,7	9,83E-41	1
2900	12,48	4,97E-35	1
3300	14,13	4,79E-31	1
3700	15,93	1,30E-27	1
4100	17,57	4,16E-25	1
4500	19,26	5,85E-23	1
5000	21,41	9,89E-21	1
6000	25,88	2,84E-17	1
7000	29,97	5,14E-15	1
8000	34,27	3,19E-13	1
9000	38,57	7,88E-12	1
10000	43,12	1,17E-10	1
11000	47,13	8,17E-10	0,999999999
12000	51,75	5,29E-09	0,999999995
13000	56,06	2,29E-08	0,999999977
14000	59,93	7,13E-08	0,999999929
15000	64,04	2,05E-07	0,999999795

Продолжение таблицы 13

$P_{\text{нагр},i}$, кВт	$I_{\text{откл},i}$, А	$\Delta P_{\text{расх.КР},i}^{(2)}$, о.е	$P_{\text{ост.КР}}^{(3)}$, о.е.
16000	68,45	5,58E-07	0,999999442
17000	72,58	1,26E-06	0,999998744
18000	77,44	2,95E-06	0,999997053
30000	127,9	4,49E-04	0,9995509
40000	171,4	3,18E-03	0,996825
80000	345,2	5,70E-02	0,943
120000	517,4	1,48E-01	0,852
4000000	1,70E+04	9,44E-01	0,056
10000000	4,30E+04	9,77E-01	0,0227
100000000	4,18E+05	9,98E-01	0,0024

По результатам тестирования разработанного алгоритма системы дистанционной оценки технического состояния получено, что при низких значениях тока коммутации выключатель практически не снижает свой коммутационный ресурс. Этот факт качественно и количественно коррелируется с паспортной коммутационной характеристикой.

Для высоких значений коммутируемых токов, выше 5000 А, происходит резкое снижение коммутационного ресурса выключателя. Коммутация тока 418 кВ полностью истрачивает коммутационный ресурс выключателя. Стоит отметить, что для выключателя допустимым током отключения является ток 25 кА, т.е., другими словами, выключатель не рассчитан на отключение токов выше 25 кА. Отключение тока 17 кА, по данным таблицы 13 также резко снижает коммутационный ресурс выключателя. Стоит отметить, что несмотря на то, что выключатель рассчитан на отключение тока такого уровня, это не может благоприятно сказаться на его техническом состоянии. Также при моделировании не учитывалось время действия тока на контакты выключателя так как использовалось действующее амплитудное значение. В реальных условиях, действия пиков ударного тока короткого замыкания гораздо ниже 1 с, поэтому требуется проведение тестирования разработанного алгоритма на реальных условиях отключения токов короткого замыкания и токов нагрузки выключателя серии ВМТ.

Выводы по разделу.

Разработан алгоритм дистанционной оценки технического состояния высоковольтного выключателя серии ВМТ на напряжение 110 кВ по расходу коммутационного ресурса при операциях включения и отключения выключателя.

Разработан алгоритм позволяющий вести дистанционный контроль избыточного давления в куполе выключателя серии ВМТ. Алгоритм позволяет выдавать предупреждения и предлагать возможные варианты возникших в выключателе ВМТ повреждений.

Разработана концепция программного продукта позволяющего вести дистанционную оценку и проводить контроль технического состояния высоковольтного выключателя серии ВМТ.

Для тестирования разработанного алгоритма дистанционной оценки технического состояния высоковольтного выключателя серии ВМТ на напряжение 110 кВ по расходу коммутационного ресурса при операциях включения и отключения выключателя создана компьютерная модель алгоритма в программном комплексе MATLAB/Simulink.

Разработана тестовая однофазная модель для верификации результатов работы алгоритма дистанционной оценки технического состояния высоковольтного выключателя серии ВМТ на напряжение 110 кВ по расходу коммутационного ресурса.

По результатам тестирования установлено, что при коммутации токов выше 5000 А, происходит резкое снижение коммутационного ресурса выключателя. Коммутация тока 418 кВ полностью истрачивает коммутационный ресурс выключателя. Отключение тока 17 кА, наиболее близкого по значению к номинальному току отключения выключателя ВМТ также резко снижает коммутационный ресурс.

Заключение

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы выполнены исследования, результаты которых, использованы для разработки системы дистанционной оценки технического состояния высоковольтных выключателей серии ВМТ на напряжение 110 кВ.

В рамках выполнения первой задачи выпускной квалификационной работы получены следующие результаты.

Установлено, что в Самарских распределительных сетях большая часть эксплуатируемых в настоящее время высоковольтных выключателей на напряжение 35 – 110 кВ являются выключателями с жидкой средой гашения дуги.

Получено значение численного состава оборудования – высоковольтных выключателей с жидкой средой гашения дуги равное 142 шт. Из всего парка эксплуатируемых выключателей с жидкой средой гашения дуги 11 шт. относятся к выключателям серии ВМТ, определенных как объект исследования.

В результате проведенного анализа исходного набора данных по высоковольтным выключателям Самарских распределительных сетей установлено, что только четыре выключателя из 142-х эксплуатируются сроком до 20 лет. Все остальные выключатели с жидкой средой гашения дуги существенно превысили свой эксплуатационный ресурс равный 25 годам.

В рамках проведенного исследования по составу коммутационного оборудования Самарских распределительных сетей предложено использовать дополнительные технические средства по оценки текущего и прогнозного технического состояния высоковольтных выключателей серии ВМТ для снижения риска внезапного отказа выключателя.

Исследованы различные конструкции камер гашения дуги, используемые в высоковольтных выключателях с жидкой средой.

Определены аналитические зависимости позволяющие определять базовые параметры функционирования высоковольтных выключателей с жидкой средой гашения дуги. К таким параметрам отнесено давление внутри камеры гашения дуги, а также время восстановления электрической прочности промежутка между контактами выключателя после размыкания.

Результаты первого раздела выпускной квалификационной работы позволили достичь решения первой задачи выпускной квалификационной работы согласно перечню задач, определенных во введении. Полученные результаты необходимо использовать для решения следующих задач и достижения цели выпускной квалификационной работы.

В рамках решения второй задачи выпускной квалификационной работы рассмотрен метод оценки технического состояния высоковольтного выключателя с жидкой средой гашения дуги, основанный на контроле изменения массы контактов выключателя. Оценка технического состояния в данном подходе позволяет не только контролировать износ контактов высоковольтного выключателя, но и определять уровень примесей в жидком диэлектрике, а следовательно, контролировать сопротивление жидкого диэлектрика, вязкость жидкого диэлектрика и время гашения дуги. Данный метод может быть реализован для удаленного контроля технического состояния с использованием средств измерения тока, проходящего через выключатель. При этом время горения и гашения дуги в КГД высоковольтного выключателя оценивается по осциллограмме записанной для момента коммутации устройством мониторинга.

Для группы методов контроля индекса и коэффициента технического состояния высоковольтного выключателя установлено, что индекс технического состояния позволяет определить только общий износ выключателя или конкретного узла в рамках его жизненного цикла. Индекс технического состояния не позволяет контролировать и оценивать состояние высоковольтного выключателя в режиме реального времени. Методика оценки коэффициента текущего технического состояния позволяет определять

износ оборудования или отдельных его узлов в периоде цикла между ремонтами оборудования. После каждого ремонта оборудования коэффициент принимает значение равное 1. Применение методики, основанной на определении коэффициента технического состояния, требует создания экспертной системы [36] и не может быть выполнено в рамках выполнения выпускной квалификационной работы.

Проанализированы методы позволяющие определить расход коммутационного ресурса высоковольтного выключателя. Проанализировано три базовых метода, которые позволяют с различной степенью достоверности оценить необходимость вывода выключателя в ремонт, проведение обслуживания или замены выключателя.

Анализ методов расчета остаточного коммутационного ресурса позволил установить, что все методы используют только значения коммутируемых токов. Все рассмотренные методы должны применяться с учетом конкретного типа высоковольтного выключателя. Отсутствуют универсальные методы оценки коммутационного ресурса выключателя. Наиболее универсальный метод – метод Неклепаева Б.Н.-Востросаблина А.А. не требует наличия в паспорте выключателя специализированных характеристик, описывающих коммутационный ресурс в зависимости от коммутируемых токов, однако требует уточнения постоянных коэффициентов, характеризующих типа выключателя. Определение этих постоянных коэффициентов требует проведения дополнительных исследований, в том числе, с проведением натурных испытаний высоковольтного выключателя серии ВМТ. Исходя из этого, данный метод не может быть принят в качестве базового для разработки системы дистанционной оценки технического состояния объекта выпускной квалификационной работы.

Проанализированы представленные на рынке Российской Федерации коммерческие системы оценки технического состояния высоковольтных выключателей.

Установлено, что на рынке, в настоящее время представлены два схожих по характеристикам прибора: ПКВ/М7 и ПКВ/У3. Рассмотренные приборы позволяют проводить оценку параметров высоковольтных выключателей любого типа и класса напряжения. Они позволяют оценивать полное техническое состояние выключателя. Однако особенностью данных приборов является проведение тестирования только отключенного, т.е. выведенного из работы выключателя. Поэтому приборы ПКВ/М7 и ПКВ/У3 не могут являться прямыми аналогами разрабатываемой в рамках выпускной квалификационной системы дистанционной оценки технического состояния.

Проведенный анализ рынка доступных систем мониторинга высоковольтных выключателей позволил определить, что на рынке присутствует компания «Димрус», которая занимается производством систем мониторинга и диагностики энергетического оборудования.

Анализ номенклатуры производимой компанией «Димрус» продукции позволил определить 4 системы, которые могут быть использованы для коммутационного оборудования.

Анализ характеристик систем, производимых компанией «Димрус» размещенных в электронном каталоге, позволил установить, что в номенклатуре производимой продукции отсутствуют прямые аналоги разрабатываемой в рамках выпускной квалификационной работы системы.

Все системы, производимые компанией «Димрус» не позволяют вести дистанционную оценку технического состояния высоковольтных выключателей класса напряжения 110 кВ с жидкой средой гашения дуги.

Системы компании «Димрус» позволяют оценивать параметры работы выключателей максимальным классом напряжения 6-10 кВ, при этом объект исследования является выключателем класса напряжения 110 кВ.

Проведенный анализ рынка систем оценки технического состояния позволил дополнительно подтвердить высокую актуальность проводимого в рамках выпускной квалификационной работы исследования.

Разработан алгоритм дистанционной оценки технического состояния высоковольтного выключателя серии ВМТ на напряжение 110 кВ по расходу коммутационного ресурса при операциях включения и отключения выключателя.

Разработан алгоритм позволяющий вести дистанционный контроль избыточного давления в куполе выключателя серии ВМТ. Алгоритм позволяет выдавать предупреждения и предлагать возможные варианты возникших в выключателе ВМТ повреждений.

Разработана концепция программного продукта позволяющего вести дистанционную оценку и проводить контроль технического состояния высоковольтного выключателя серии ВМТ.

Для тестирования разработанного алгоритма дистанционной оценки технического состояния высоковольтного выключателя серии ВМТ на напряжение 110 кВ по расходу коммутационного ресурса при операциях включения и отключения выключателя создана компьютерная модель алгоритма в программном комплексе MATLAB/Simulink.

Разработана тестовая однофазная модель для верификации результатов работы алгоритма дистанционной оценки технического состояния высоковольтного выключателя серии ВМТ на напряжение 110 кВ по расходу коммутационного ресурса.

По результатам тестирования установлено, что при коммутации токов выше 5000 А, происходит резкое снижение коммутационного ресурса выключателя. Коммутация тока 418 кВ полностью истрачивает коммутационный ресурс выключателя. Отключение тока 17 кА, наиболее близкого по значению к номинальному току отключения выключателя ВМТ также резко снижает коммутационный ресурс.

Список используемой литературы

1. Александров В.В., Борисов В.В., Каплан Г.С. Проектирование электрических аппаратов. Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. 448 с.
2. Александров Г.Н., Афанасьев А.И., Борисов В.В., Каплан Г.С., Кузнецов В.Е., Лунин В.П., Моисеев М.Б., Тонконогов Е.Н., Филиппов Ю.А., Ярмаркин М.К. Электрические аппараты высокого напряжения. 2-е изд. СПб.: СПбГТУ, 2000. 503 с.
3. Александров Г.Н., Борисов В.В., Иванов В.Л. Теория электрических аппаратов. М.: Высшая школа, 1985. 312 с.
4. Андреев Д.А., Назарычев И.А. Анализ методов оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей // Вестник ИГЭУ. 2008. № 2. С. 1-16.
5. Борисоглебский П.В., Дмоховская Л.Ф., Ларионов П.В., Пинталь Ю.С., Разевиг Д.В., Рябкова Е.Я. Техника высоких напряжений. Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1963. 472 с.
6. Бригер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
7. Буткевич В.Ф., Колесникова В.А. К вопросу об эксплуатации выключателей типа ВМТ // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, Т. 46, № 1, 2018. С. 120-125.
8. Важов В.Ф., Лавринович В.А. Техника высоких напряжений: учебник. М.: ИНФРА-М, 2023. 262 с.
9. Выключатель маломасляный серии ВМТ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИБКЖ.674143.001 ТО. Екатеринбург: Внешторгиздат, 1993. 58 с.
10. ГОСТ 687-78 Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. 67 с.

11. Гусев С.А. Очерки по истории развития выключателей переменного тока. М.: ООО «Радугапринт», 2022. 356 с.
12. Департаментом науки и техники РАО «ЕЭС России». Объем и нормы испытаний электрооборудования: РД 34.45-51.300– 97. М. 2004. 153 с.
13. Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник. М.: Машиностроение, 2003. 657 с.
14. Лавров Ю.А., Петрова Н.Ф. Техника высоких напряжений : учебное пособие. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2020. 204 с.
15. Минкина И.С., Романов А.А. Алгоритм оценки остаточного ресурса выключателя // Электрические станции. 2004. № 12. С. 58-64.
16. Михеев Г.М. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования. М.: Издательский дом Додэка XXI, 2008. 304 с.
17. Неклепаев Б.Н., Востросаблин А.А. Механическая и коммутационная износостойкость выключателей // Промышленная энергетика. 1992. № 8. С. 14-16.
18. О предупреждении отказов и повышении надежности работы маломасляных выключателей серии ВМТ // Официальный сайт производителя высоковольтного оборудования АО "Уралэлектротяжмаш". 2014. URL: <https://www.uetm.ru/directrequest/files/default/get-file?name=dd7c8f93d710bde276254daf902af002.pdf> (дата обращения: 15.01.2024).
19. ОАО "ФСК ЕЭС". Концепция диагностики электротехнического оборудования подстанций и линий электропередачи электрических сетей. М. 2004. 188 с.
20. Орлов А.И. Искусственный интеллект: статистические методы анализа данных: учебник. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. 843 с.
21. Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики. М.: Приказ Минэнерго РФ.
22. Прибор контроля высоковольтных выключателей ПКВ/МЗ [Электронный ресурс] // Специализированное конструкторское бюро

электротехнического приборостроения: [сайт]. [2024]. URL: <https://skbpribor.ru/instrument/pkv-m7/> (дата обращения: 11.03.2024).

23. Прибор контроля высоковольтных выключателей ПКВ/У3.0 [Электронный ресурс] // Официальный сайт производителя диагностического оборудования "ПЕРГАМ": [сайт]. [2024]. URL: https://www.pergam.ru/catalog/electrical_equipment/electrical_diagnosis/diagnostika-vikluchateley/pkvu30.htm (дата обращения: 11.03.2024).

24. Володин А.С., Дарьян Л.А., Озеров О.В., Образцов Р.М. Программное обеспечение для обработки рентгеновских изображений, 2018615762, май 16, 2018.

25. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого. М.: Энергоатомиздат, 1992. 240 с.

26. Система BDM/T – беспроводной датчик для контроля температуры [Электронный ресурс] // Диагностические решения в энергетике DIMRUS: [сайт]. [2024]. URL: <https://dimrus.ru/bdmt.html> (дата обращения: 03.03.2024).

27. Система CBM – система диагностического мониторинга ячеек КРУ с вакуумными выключателями [Электронный ресурс] // Диагностические решения в энергетике DIMRUS: [сайт]. [2024]. URL: <https://dimrus.ru/cbm.html> (дата обращения: 03.03.2024).

28. Система IDR-10 – реле контроля состояния изоляции КРУ, генераторов, высоковольтных электродвигателей и кабельных линий [Электронный ресурс] // Диагностические решения в энергетике DIMRUS: [сайт]. [2024]. URL: <https://dimrus.ru/idr10.html> (дата обращения: 03.03.2024).

29. Система T-Monitor – контроль температурных режимов электротехнического оборудования [Электронный ресурс] // Диагностические решения в энергетике DIMRUS: [сайт]. [2024]. URL: <https://dimrus.ru/tmonitor.html> (дата обращения: 03.03.2024).

30. Солдатов В.А. Техника высоких напряжений : учебное пособие. пос. Караваево: КГСХА. 88 с.
31. Флершейм Ч.Х. Теория и конструкции выключателей. Ленинград: Энергоиздат, 1982. 496 с.
32. Чернышев Н.А., Ракевич А.Л. Аппаратура и метод раннего обнаружения дефектов в механизмах высоковольтных выключателей // Электрические станции. 2004. № 11. С. 61-65.
33. Шлейфман И.Л. Коммутационный ресурс масляных выключателей // Электрические станции, № 5, 1991. С. 76-78.
34. Шлейфман ИЛ, редактор. Методические указания по определению расхода коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации. М.: СПО ОГРЭС, 1992. 18 с.
35. Heiden P., Prierer J., Beverungen D. Predictive Maintenance on the Energy Distribution Grid—Design and Evaluation of a Digital Industrial Platform in the Context of a Smart Service System // IEEE TRANSACTIONS ON ENGINEERING MANAGEMENT, No. 71, 2024. pp. 3641-3655.
36. Hoffmann M.W., Wildermuth S., Gitzel R., Boyaci A., Gebhardt J., Kaul H., Amihai I., Forg B., Suriyah M., Leibfried T., et.al. Integration of Novel Sensors and Machine Learning for Predictive Maintenance in Medium Voltage Switchgear to Enable the Energy and Mobility Revolutions // Sensors, No. 7, 2020. pp. 1-7.
37. Hong L., Cao C., Liu Q. The 2nd International Conference on Information Science and Engineering // Real-time temperature monitoring system for High Voltage Switchgear based on infrared wireless transmission. Hangzhou. 2010. pp. 2265-2268.
38. Uzelac N., Gariboldi N., Heinrich C., Westerlund P., McCahey C. 25th International Conference on Electricity Distribution // Overview of Non-Intrusive Methods for Switchgear Condition Assessment prepared by CIGRE/CIRED A3.32 Working Group. Madrid. 2019. pp. 1-5.

39. Wei W., Hong-jie S., Lin Y., Tao J., Da-wei W., Shu N., Wen-biao T.
Online Monitoring of High Voltage Switchgear Installation // The Journal of
Engineering. 2018. Vol. 4. pp. 24-26.