

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)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль)/специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Реконструкция электрической части подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз»

Обучающийся

Д. О. Сухинин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.п.н., доц. М. Н. Третьякова

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

Тольятти 2023

## Аннотация

«Работа посвящена реконструкции электрической части понизительной подстанции 35/10 кВ» [8] «Зверосовхоз», расположенной в Тобольском районе Тюменской области.

На основании проведённого анализа исходных данных, предложена рациональная схема главных электрических соединений подстанции.

«Выбрано и проверено основное оборудование распределительных устройств напряжением 35 кВ и 10 кВ, а также устройства релейной защиты силовых трансформаторов» [6] подстанции.

Проведена реконструкция схемы релейной защиты подстанции с выбором новых современных микропроцессорных блоков, позволяющих значительно повысить параметры надёжности, селективности и безопасности на объекте.

Установлено, что внедрённые мероприятия на подстанции позволяют значительно повысить технические и экономические показатели на объекте.

Работа представлена расчётно-пояснительной запиской и графической частью, содержащей шесть основных чертежей по основным результатам проведённых исследований.

Расчётно-пояснительная записка имеет объем 66 печатных страниц. Источниками для написания работы являются нормативно-правовые документы, учебные пособия, типовые проекты, а также интернет-ресурсы.

Расчётно-пояснительная записка выполнена в приложении «Microsoft Word», с использованием девяти таблиц и восьми рисунков.

## Содержание

Введение.....	4
1 Анализ исходных данных на выполнение работы.....	7
1.1 Исходная характеристика подстанции.....	7
1.2 Нормы и требования, предъявляемые к реконструкции понизительных подстанций.....	13
1.3 Обоснование мероприятий по реконструкции подстанции .....	18
2 Реконструкция электрической силовой части подстанции .....	22
2.1 Расчёт максимальных значений электрических нагрузок на подстанции .....	22
2.2 Проверка силовых трансформаторов подстанции после реконструкции .....	27
2.3 Выбор и проверка проводников .....	30
2.4 Расчёт токов короткого замыкания .....	34
2.5 Выбор и проверка электрических аппаратов .....	45
3 Реконструкция схемы релейной защиты подстанции .....	52
3.1 Выбор основных типов релейной защиты.....	52
3.2 Расчёт уставок релейной защиты силовых трансформаторов подстанции.....	55
3.3 Расчёт уставок релейной защиты линейных присоединений подстанции .....	58
Заключение .....	61
Список используемых источников.....	65

## Введение

В сегодняшнем прогрессивном мире роль электроэнергетики сложно переоценить. При этом в процессе передаче электрической энергии потребителям основную роль играют трансформаторные подстанции энергосистемы.

Известно, что понизительные трансформаторные подстанции (далее – ПС) энергосистемы играют ключевую роль в электроэнергетике Российской Федерации, так как они выполняют важные функции в процессе передачи и распределения электроэнергии.

Одной из основных функций трансформаторных подстанций энергосистемы является трансформация напряжения с последующей передачи её потребителю. Электроэнергия производится на высоком напряжении для эффективной передачи через линии электропередачи на большие расстояния. Трансформаторные подстанции позволяют снизить это напряжение до уровня, подходящего для последующего распределения в жилых районах, а также в промышленных комплексах. Таким образом, трансформаторные подстанции также выполняют функцию распределения электроэнергии по потребителям различного типа и вида.

Одним из важнейших аспектов применения трансформаторных подстанций энергосистем является возможность регулировать параметры качества электроэнергии, а также управлять её последующим распределением. Кроме того, трансформаторные подстанции могут выполнять роль в непосредственном регулировании нагрузки, а также создания и поддержания баланса мощности в электрической сети и энергосистеме в целом. Для решения поставленной задачи, с одной стороны, применяется электрооборудование, а с другой – рациональные схемы главных электрических соединений.

Некоторые узловые трансформаторные подстанции могут быть задействованы как резервные источники электроэнергии, обеспечивая

надёжное электроснабжение потребителей в случае аварий основного источника питания.

В последние годы в Российской Федерации и в мировой электроэнергетике в целом, активно развивается интеграция возобновляемых источников энергии, таких, как солнечные, ветровые и прочие аналогичные типы. Трансформаторные подстанции энергосистемы играют важную роль в этом процессе, позволяя интегрировать электроэнергию, полученную от различных нетрадиционных источников, в общую электроэнергетическую систему. Таким образом, трансформаторные подстанции энергосистемы играют важнейшую роль в обеспечении электроэнергией потребителей Российской Федерации, обеспечивая надёжное и эффективное электроснабжение населения и промышленности.

«Объектом исследования в данной работе является схема главных электрических соединений нормального режима, а также элементы схемы вторичных цепей (релейной защиты и автоматики) понижающей подстанции ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз»» [10].

Предметом исследования являются параметры и характеристики надёжности схемы главных электрических соединений нормального режима, а также схемы вторичных цепей (релейной защиты и автоматики) понижающей подстанции ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз».

Актуальность исследования обусловлена требованиями нормативных документов, регламентирующих и рекомендуемых проведение всех видов реконструкции и модернизации распределительных устройств понизительных трансформаторных подстанций, с целью повышения их параметров надёжности, бесперебойности электроснабжения, безопасности, селективности, а также пропускной способности [14].

Основной целью работы является реконструкция схемы главных электрических соединений, а также элементов схемы вторичных цепей (релейной защиты и автоматики) понижающей подстанции ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз».

«Данная реконструкция обусловлена, с одной стороны, необходимостью внесения изменений в схему главных электрических соединений» [15] подстанции согласно нормативным требованиям основных документов, а с другой – несоответствием установленного оборудования требованиям надёжности, селективности, экономичности и безопасности вследствие его износа.

В работе, для достижения поставленной цели, необходимо провести решение основных задач:

- провести исходную характеристику объекта проектирования с выявлением проблем и несоответствий требованиям и рекомендациям нормативных документов;
- осуществить разработку технических решений, способных решить данную проблематику на объекте проектирования;
- провести обоснование и реализацию принятых технических решений, способных решить данную проблематику на объекте проектирования;
- проверить принятые технические решения, предложить окончательный вариант для внедрения на объекте исследования.

Таким образом, исходя из основных поставленных в работе задач, установлено, что для разработки качественного проекта реконструкции понизительной подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз», необходимо осуществить выбор и проверку новых схемных решений в силовой части и части релейной защиты и автоматики, с последующим выбором и проверкой оборудования (силовых трансформаторов, электрических проводников и аппаратов, устройств релейной защиты и автоматики).

Решение всех поставленных задач осуществляется в работе на основании принятых расчётных методик с учётом рациональных методов исследований.

# 1 Анализ исходных данных на выполнение работы

## 1.1 Исходная характеристика подстанции

Объектом исследования в данной работе является понизительная подстанция ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз».

Рассматриваемая в работе ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз» расположена в посёлке Прииртышский Тобольского района Тюменской области на Тракторной улице [10].

Данная понизительная подстанция обслуживается и находится на балансе АО «Россети Тюмень».

Она играет важную роль в распределении электроэнергии в энергосистеме Тобольского района.

Территориальное расположение рассматриваемой в работе подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз» на карте местности показано на рисунке 1 [10].



Рисунок 1 – Территориальное расположение рассматриваемой в работе подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз» на карте местности

Как было установлено ранее, данная подстанция является одной из потребительских подстанций Тюменских региональных электрических сетей.

Рассматриваемая в работе понизительная подстанция 35/10 кВ «Зверосовхоз» снабжает электроэнергией население ближайших населенных пунктов (посёлков, сёл, деревень), а также зверосовхоз.

«Согласно исходной схеме электрических соединений, с учётом расположения в энергосистеме, ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» является однострансформаторной подстанцией тупикового типа» [10].

«Питание подстанции ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» осуществляется отпайкой от воздушной линии электропередачи 35 кВ (опора 34, ВЛ-Т205), которая получает питание от районной подстанции ПС-110/35/10 кВ «Тобольская».

Таким образом, установлено, что исходная схема питания подстанции ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» - магистрального типа. Такая схема экономичная, однако пригодна только для обеспечения электроснабжения потребителей III категории надёжности исходя из нормативных требований» [10].

Однако от данной подстанции также получают питание потребители I и II категории, для которых данная схема не допустима [15].

Нормальная «схема главных электрических соединений подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз» до проведения реконструкции представлена на графическом листе 1.

«Рассматриваемая в работе понизительная подстанция переменного напряжения 35/10 кВ «Зверосовхоз» до внедрения мероприятий и рекомендаций по реконструкции, состояла из следующих элементов» [10], описание которых приводится в работе далее по структурной схеме (рисунок 2).



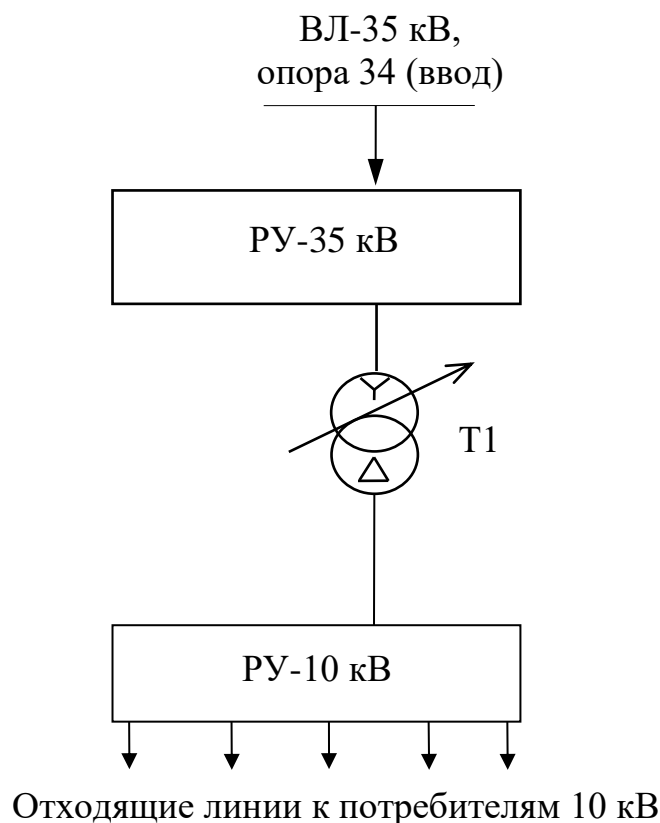


Рисунок 2 – Исходная структурная схема электрических соединений ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз»

Далее, исходя из рисунка 1, проводится детальное описание элементов и составляющих исходной структурной схемы ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз».

«Первым элементом ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» является распределительное устройство высшего напряжения 35 кВ (далее – ОРУ 35 кВ), которое конструктивно выполнено открытым по радиальной схеме электроснабжения без применения ремонтной перемычки.

От сборных шин 35 кВ, которые получают питание отпайкой воздушной линии электропередачи 35 кВ (опора 34, ВЛ-Т205) от районной подстанции ПС-110/35/10 кВ «Тобольская», для питания единственного силового трансформатора ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» применяется одна линия (фидер) 35 кВ. Таким образом, от сборных шин 35 кВ ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз», получает питание одна линия 35 кВ (по числу силовых трансформаторов в схеме).

В схеме ОРУ-35 кВ понизительной подстанции переменного напряжения 35/10 кВ «Зверосовхоз» для питания сборных шин 35 кВ, применяется режим работы без наличия резервирования на стороне 35 кВ подстанции, что также соответствует схеме для питания III категории потребителей согласно нормам и требованиям» [15].

«В исходной схеме электрических соединений на отходящих линиях в ОРУ-35 кВ понизительной подстанции переменного напряжения 35/10 кВ «Зверосовхоз» установлены следующие основные защитные и коммутационные аппараты (графический лист 1):

- масляные баковые выключатели марки С-35М-630-10 БУ1 – 1 единица (год изготовления – 1975, введён в эксплуатацию на подстанции в 1977 году);
- разъединители марки РЛНДЗ-35/630 (с одним заземляющим ножом на полюс) – 3 единицы (год изготовления – 1976, введены в эксплуатацию на подстанции в 1977 году);
- ограничители перенапряжения ОПН-П-35/40,5/10/680-II УХЛ1 (год изготовления – 2007, год ввода в эксплуатацию на подстанции в 2012 году)» [10].

«На отходящих линиях в РУ-10 кВ понизительной подстанции переменного напряжения 35/10 кВ «Зверосовхоз» установлены следующие защитные и коммутационные аппараты (основное оборудование):

- горшковые масляные выключатели марки ВМГ-10/630 – 5 единиц (год изготовления – 1966, год ввода в эксплуатацию на подстанции – 1967), установлены на вводе (1 единица), на отходящих линиях (4 единицы: 3 единицы – к потребителям, 1 единица – резерв);
- разъединители марки РВЗ-1-10/400 – 11 единиц (год изготовления – 1967, год ввода в эксплуатацию на подстанции – 1967): из них 10 единиц применяется для шунтирования всех выключателей схемы (устанавливаются до и после выключателей), 1 единица – на вводе к ячейке трансформатора напряжения РУ-10 кВ;

- измерительные трансформаторы тока: марки ТПЛ-10 – по 2 единицы во всех пяти присоединениях (вводном и линейных), по схеме неполной звезды (год изготовления – 1992, введены в эксплуатацию на подстанции в 2001 году);
- измерительные трансформаторы напряжения марки НАМИ-10У2 – 1 единица (год изготовления – 1998, год ввода в эксплуатацию на подстанции – 2001);
- ограничители перенапряжения марки ОПН-П1-10/12/102УХЛ (год изготовления – 2009, год ввода в эксплуатацию на подстанции – 2012), включают 2 присоединения (ввод 10 кВ и ТН), по 3 единицы на каждое присоединение» [10].

«Подстанция 35/10 кВ предназначена для электроснабжения коммунально-бытовых и промышленных потребителей, основными из которых являются потребительские трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ, получающие питание от сборных шин РУ-10 кВ подстанции.

Основные потребители подстанции ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» относятся к III категории надёжности, однако в связи с расширением подстанции и подключением новых потребителей I и II категорий надёжности, которые изначально не были учтены в схеме электрических соединений подстанции при её проектировании, необходимо кардинально пересмотреть схему электрических соединений подстанции, с учётом текущих изменений.

Совокупная доля потребителей I и II категорий надёжности подстанции, с учётом подключения новых потребителей, по состоянию на август 2023 г. составляет около 60%.

Следовательно, доля потребителей III категории на подстанции будет составлять около 40%.

Технические данные нагрузки существующих и вновь подключаемых потребителей подстанции ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» Тюменской области Российской Федерации, представлены в данной работе в форме таблицы 1» [10].

Таблица 1 – Технические данные нагрузки ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» с учётом значений действующей фактической и перспективной нагрузки потребителей подстанции

Номер ячейки потребителя	Наименование присоединения	Максимальная активная нагрузка присоединения, Р <sub>м</sub> , кВт
Подключённые потребители (действующая нагрузка)		
1	1Л-10	350
3	2Л-10	420
4	ТСН	25
5	3Л-10	380
Всего по ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» (действующая нагрузка)		1175
Новые потребители (перспективная нагрузка)		
-	4Л-10	300
-	5Л-10	300
-	6Л-10	300
Всего по ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» (перспективная нагрузка)		900
Всего по ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» (действующая и перспективная нагрузка)		2075

«Исходя из данных таблицы 1, установлено, что к ТП-35/10 кВ планируется подключить дополнительно три отходящих линии к потребителям 10 кВ (перспективная нагрузка)» [10]. Она должна быть учтена в работе при планировании и обосновании мероприятий по реконструкции схемы главных электрических соединений подстанции.

Таким образом, в работе приведены основные технические сведения по исходной схеме главных электрических соединений и основному оборудованию, установленному на ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз».

Составлена и описана структурная схема объекта проектирования, описаны её основные составляющие.

Приведены значения максимальных нагрузок потребителей подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз».

На графическом листе 1 представлена описанная в работе исходная схема главных электрических соединений ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз» до внедрения мероприятий по её реконструкции.

## **1.2 Нормы и требования, предъявляемые к реконструкции понизительных подстанций**

Реконструкция понижающих трансформаторных подстанций предусматривает важный этап качественного обновления не только данных объектов реконструкции, но и всего участка электроэнергетической сети, к которому они принадлежат.

Известно, что основной целью реконструкции трансформаторных подстанций энергосистемы является повышение технических параметров и показателей, таких, как надёжность, экономичность, бесперебойность, а также безопасность.

При этом проект реконструкции должен быть согласован со всеми службами, которые принимают в нём участие, а также с управляющей организацией, на балансе которой находится данная подстанция.

Условно проект реконструкции любого энергетического объекта может быть разбит на этапы.

При этом при практическом внедрении мероприятий по реконструкции энергообъектов, рекомендуется

Этапы реконструкции понизительных трансформаторных подстанций (на примере тяговой подстанции 12500/10 кВ переменного тока) представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Этапы реконструкции понизительных трансформаторных подстанций (на примере тяговой подстанции 12500/10 кВ переменного тока)

В конечном итоге, реконструкция понижающей подстанции может включать в себя несколько аспектов, а именно:

- улучшение надежности и безопасности: реконструкция может включать замену устаревшего оборудования, улучшение систем, а также внедрение современных инновационных технологий, чтобы увеличить надежность работы подстанции и обеспечить безопасность персонала;
- повышение эффективности и энергоэффективности: реконструкция подстанции может быть направлена на снижение потерь энергии в

- процессе передачи и распределения электроэнергии. Этот вариант может включать замену устаревших трансформаторов более эффективными марками и моделями с улучшенными параметрами, а также усовершенствованными системами охлаждения;
- увеличение нагрузочной способности: в случае, если существующая подстанция не способна обеспечить требуемую мощность для растущей нагрузки, реконструкция может включать в себя установку дополнительных трансформаторов, коммутационного и защитного оборудования, дополнительных ячеек распределительных устройств, а также других компонентов и составляющих;
  - интеграция возобновляемых источников энергии: реконструкция может быть направлена на адаптацию подстанции для интеграции солнечных, ветровых или других возобновляемых источников электроэнергии в энергосистему;
  - улучшение автоматизации и управления: на современных трансформаторных подстанциях рекомендуется внедрение современных систем автоматизации различного типа на базе современных технологий, а также автоматизированного удаленного мониторинга и управления для более эффективного контроля и оперативного вмешательства при возникновении аварийных ситуаций и нештатных режимов;
  - соблюдение нормативных требований: реконструкция может быть необходима для соответствия новым нормативам, стандартам безопасности, экологическим нормам и другим правилам, которые могли появиться с течением времени;
  - поддержание технической актуальности: реконструкция подстанции может быть проведена с целью обновления технологической базы, чтобы соответствовать требованиям современных электроэнергетических систем. В данном случае, такая реконструкция сходна с модернизацией.

Таким образом, конечная цель реконструкции подстанций энергосистемы будет зависеть от потребностей региональной энергетической системы, бизнес-целей компании и требований к эффективности и надежности.

Известно, что реконструкция трансформаторных подстанций может быть полной или частичной. В первом варианте замене подлежит вся схема (узел оборудования).

Второй случай предусматривает частичную замену схемы либо узла (как правило, части его оборудования).

Оба данных варианта рассматриваются при проведении реконструкции подстанций.

Основные нормы и требования, предъявляемые к реконструкции понизительных подстанций энергосистем Российской Федерации, включают следующие основные аспекты:

- безопасность: работы по реконструкции подстанций должны соответствовать нормам и требованиям по безопасности электротехнических установок [13]. Данный аспект включает в себя обеспечение защиты персонала при выполнении работ на всех уровнях, предотвращение аварий и соблюдение правил по электробезопасности с целью недопущения несчастных случаев;
- соблюдение технических нормативов и стандартов: реконструкция понизительных подстанций должна соответствовать национальным и международным стандартам и нормам для электроэнергетических установок, таким, как стандарты Международной электротехнической комиссии (далее – МЭК), а также национальным нормативам [14];
- требования к оборудованию: при реконструкции трансформаторной подстанции необходимо учесть требования к выбору, установке и испытаниям оборудования, включая трансформаторы, выключатели, предохранители, релейную защиту и другие составляющие [15];



- энергоэффективность: при реконструкции следует уделять пристальное внимание внедрению более эффективных и энергосберегающих технологий и решений, так как это может улучшить общую эффективность работы подстанции и участка энергосистемы в целом [12];
- автоматизация и управление: современная реконструкция подстанции должна включать в себя внедрение современных систем автоматизации, удаленного мониторинга и управления, что поможет повысить контроль над процессами и оперативно реагировать на текущие изменения [14];
- соблюдение экологических норм: мероприятия по реконструкции должны соответствовать нормам и требованиям по охране окружающей среды, включая утилизацию старого оборудования и минимизацию воздействия на природу [12];
- учет специфических условий: в проект реконструкции подстанций должны учитываться климатические, географические и другие специфические условия местоположения подстанции [18];
- проектирование и документация: известно, что реконструкция объектов электроэнергетики требует разработки подробного проекта, включая детальные расчёты и проверки, технические чертежи, схемы, спецификации оборудования и другую необходимую документацию [15];
- соблюдение сроков и бюджета: реконструкция должна выполняться в рамках установленных сроков и бюджета, чтобы минимизировать простои и издержки. Данные аспекты по срокам выполнения работ должны быть чётко прописаны в договоре с учётом сметы и капитальных вложений [15].

Кроме того, при проведении реконструкции понижающих подстанций важно сотрудничать с квалифицированными инженерами и специалистами,

которые имеют опыт работы с электроэнергетическими системами и имеют высокую квалификацию.

Таким образом, в результате проведённого анализа литературы по вопросу норм и требований, которые предъявляются к реконструкции понизительных подстанций энергосистем Российской Федерации, установлено, что реконструкция трансформаторных подстанций энергосистемы является чрезвычайно важной, ответственной и необходимой задачей, сопряжённой со значительными техническими и финансовыми издержками.

### **1.3 Обоснование мероприятий по реконструкции подстанции**

Основываясь на приведённой технической информации, с учётом проведённого анализа литературы по вопросу норм и требований, которые предъявляются к реконструкции понизительных подстанций энергосистем Российской Федерации, в работе проводится аргументированное обоснование целесообразности применения основных мероприятий по реконструкции ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз».

«Предложены рекомендации по реконструкция электрической части понизительной подстанции «Зверосовхоз» класса напряжения 35/10 кВ, включающие в себя следующие основные этапы:

- модернизацию устаревших электрических аппаратов в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ, которая реализуется путём замены их на современные модели и марки, отличающиеся улучшенными техническими и экономическими характеристиками» [15]. Таким образом будет повышена надёжность и бесперебойность в системе силового оборудования подстанции;
- «реконструкцию схемы электрических соединений подстанции на стороне 35 кВ, предусматривающей установку второго трансформатора на подстанции, так как в связи с изменением

категорийности новых потребителей подстанции, примерно 60% которых относится к I и II категории надёжности, необходим второй источник питания в виде силового трансформатора, а также реконструкция схемы электрических соединений ОРУ-35 кВ и РУ-10 кВ, обусловленных данным фактом. Данные аспекты соответствуют требованиям, которые предъявляются к электрическим схемам для питания объектов I и II категорий надёжности. Кроме того» [15], на объекте проектирования планируется увеличение нагрузки потребителей, что обуславливает её учёт при принятии схемных решений. Таким образом, вся дополнительная нагрузка будет учтена в проекте с учётом условий резервирования и надёжности;

- с учётом участвовавших аварийных отключений и ложных срабатываний релейной защиты (далее – РЗА) на подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз», предложено провести замену их устаревших и некачественных устройств РЗА на новые и современные типы, обладающие более высокой надёжностью, безотказностью и селективностью. Таким образом, будет повышена надёжность и бесперебойность работы системы аварийной защиты оборудования и всей релейной защиты подстанции в целом.

Предложенные мероприятия детально рассматриваются и обосновываются расчётным путём на основании принятых методик в работе далее.

На основании предложенных основных мероприятий по реконструкции ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз», далее в работе проводится аргументированное решение поставленных задач.

Выводы по разделу.

В работе приведены основные технические сведения по исходной схеме главных электрических соединений и основному оборудованию, установленному на ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз».

Составлена и описана структурная схема объекта проектирования, описаны её основные составляющие. Приведены значения максимальных нагрузок потребителей подстанции 35/10 кВ. В результате проведённого анализа литературы по вопросу норм и требований, которые предъявляются к реконструкции понизительных подстанций энергосистем Российской Федерации, установлено, что реконструкция трансформаторных подстанций энергосистемы является чрезвычайно важной, ответственной и необходимой задачей, сопряжённой со значительными техническими и финансовыми издержками.

Основываясь на приведённой технической информации, с учётом проведённого анализа литературы по вопросу норм и требований, которые предъявляются к реконструкции понизительных подстанций энергосистем Российской Федерации, в работе предложены следующие основные мероприятия по реконструкции ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз»:

- «модернизацию устаревших электрических аппаратов в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ, которая реализуется путём замены их на современные модели и марки, отличающиеся улучшенными техническими и экономическими характеристиками» [6]. Таким образом будет повышена надёжность и бесперебойность в системе силового оборудования подстанции;
- «реконструкцию схемы электрических соединений подстанции на стороне 35 кВ, предусматривающей установку второго трансформатора на подстанции, так как в связи с изменением категорийности новых потребителей подстанции, примерно 60% которых относится к I и II категории надёжности, необходим второй источник питания в виде силового трансформатора, а также реконструкция схемы электрических соединений ОРУ-35 кВ и РУ-10 кВ, обусловленных данным фактом. Данные аспекты соответствуют требованиям, которые предъявляются к электрическим схемам для питания объектов I и II категорий надёжности. Кроме того» [15], на

объекте проектирования планируется увеличение нагрузки потребителей, что обуславливает её учёт при принятии схемных решений. Таким образом, вся дополнительная нагрузка будет учтена в проекте с учётом условий резервирования и надёжности;

- с учётом участвовавших аварийных отключений и ложных срабатываний релейной защиты (далее – РЗА) на подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз», предложено провести замену их устаревших и некачественных устройств РЗА на новые и современные типы, обладающие более высокой надёжностью, безотказностью и селективностью. Таким образом, будет повышена надёжность и бесперебойность работы системы аварийной защиты оборудования и всей релейной защиты подстанции в целом.

Далее в работе расчётным путём, с использованием принятых методик и каталогов заводов-изготовителей, необходимо подтвердить предложенные в данном разделе технические решения по реконструкции понизительной подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз».

## **2 Реконструкция электрической силовой части подстанции**

### **2.1 Расчёт максимальных значений электрических нагрузок на подстанции**

Известно, что расчёт максимальных электрических нагрузок подстанций является важной задачей в электроэнергетике. Этот расчёт позволяет определить, какое количество электроэнергии может быть передано через подстанцию без нарушения стабильности работы системы электроснабжения. Основной целью такого расчёта является обеспечение надёжной и безопасной работы не только подстанции, но и всей электроэнергетической инфраструктуры в целом [15].

Задачи расчёта максимальных электрических нагрузок подстанций включают следующие аспекты [9]:

- сбор исходных данных. На первом этапе необходимо собрать информацию о всех потребителях, получающих питание от данной подстанции, и определить их энергопотребление, включая как текущее потребление, так и прогнозируемый рост нагрузок;
- определение характера нагрузок: на данном этапе проводится систематизация собранного материала. Известно, что электрические нагрузки могут быть различными по характеру: активными (потребление активной мощности), «реактивными» (потребление реактивной мощности) и комбинированными (смешанными). Известно, что определение характера нагрузок важно для правильного расчёта;
- непосредственное определение максимальной мощности нагрузки» [9]: с учётом текущих и будущих нагрузок, а также с учётом моментов пикового спроса, необходимо расчётным путём определить максимальную активную и реактивную мощность, которая может быть передана через подстанцию;

– проверочный расчёт допустимых перегрузок: известно, что подстанции могут работать в режиме перегрузки на определённое время, но это должно быть ограничено и контролируемо. Проверочный расчёт должен определить, насколько допустимы перегрузки и как долго они могут продолжаться.

В некоторых случаях дополнительно проводится проверочный расчёт стабильности сети (как правило, в узлах разветвлённой энергосистемы высоких классов напряжения). Известно, что передача слишком больших нагрузок через подстанцию может привести к нестабильности работы всей электрической сети. Расчёт должен учитывать этот аспект и гарантировать стабильную работу системы путём учёта баланса мощностей в энергосистеме, в которую входит подстанция.

Таким образом, основными задачами расчёта максимальных электрических нагрузок подстанций является обеспечение стабильной и надёжной работы электроэнергетической системы, минимизация рисков перегрузок и аварий, а также оптимизация использования энергоресурсов.

Проводится непосредственный расчёт максимальных электрических нагрузок подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз». Также необходимо учесть транзитную нагрузку новых линий 35 кВ, предложенных ранее в качестве мероприятий по реконструкции подстанции.

«Активная расчётная нагрузка одиночных присоединений потребителей электрической части подстанции 35/10 кВ» [9]:

$$P_{пр} = K_з \cdot P_{м.}, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где « $P_{м.}$  – максимальная активная нагрузка присоединений потребителей подстанции 35/10 кВ, кВт» [9];

$K_з$  – «коэффициент загрузки потребителей подстанции 35/10 кВ, о.е.» [9].

«Реактивная расчётная нагрузка потребителей электрической части подстанции 35/10 кВ» [9]:

$$Q_{np} = P_{np} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

где « $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент реактивной мощности» [8].

«Реактивная полная нагрузка одиночных присоединений потребителей электрической части подстанции 35/10 кВ» [9]:

$$S_{np} = \sqrt{P_{np}^2 + Q_{np}^2}. \quad (3)$$

«Расчёт проводится на примере присоединения потребителя 10 кВ «1Л-10» (ячейка РУ-10 кВ СШ-1 ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз»)» [9]:

$$P_{np} = 350 \cdot 1 = 350 \text{ кВт.}$$

$$Q_{np} = 350 \cdot 0,4 = 140 \text{ квар.}$$

$$S_{np} = \sqrt{350^2 + 140^2} \approx 377 \text{ кВА.}$$

«Аналогично проведён расчёт электрических нагрузок остальных присоединений потребителей 10 кВ понизительной подстанции ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» с приведением результатов расчёта в форме результирующей таблицы 2.

При расчёте нагрузок в таблице 2 учитывается схема электрических соединений подстанции, полученная после внедрения мероприятий по реконструкции: разделения нагрузок на две секции сборных шин 10 кВ и установка второго ТСН для нового трансформатора (ввод 2)» [9].

При этом новая (перспективная) нагрузка подключается на 2СШ 10 кВ подстанции. В «таблице 2 результаты расчёта нагрузок для наглядности разделены на секции сборных шин 10 кВ» [9].



Таблица 2 – Результаты расчёта электрических нагрузок ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» после внедрения мероприятий по реконструкции объекта

Наименование присоединения	$P_{пр.}$ , кВт	$Q_{пр.}$ , квар	$S_{пр.}$ , кВА
Подключённые потребители (действующая нагрузка) – 1СШ 10 кВ			
1Л-10	350,0	140,0	377,0
2Л-10	420,0	168,0	452,4
ТСН	25,0	10,0	26,9
3Л-10	380,0	152,0	409,3
Всего по 1СШ 10 кВ	1175,0	470,0	1265,2
Новые потребители (перспективная нагрузка) – 2СШ 10 кВ			
4Л-10	300,0	120,0	323,1
5Л-10	300,0	120,0	323,1
6Л-10	300,0	120,0	323,1
Всего по 2СШ 10 кВ	900,0	360,0	969,3
Всего по ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз»	2075,0	830,0	2234,8

«Значение расчётной активной нагрузки секций сборных шин РУ-10 кВ и всей подстанции 35/10 кВ» [9]:

$$P_{\Sigma} = K_0 \sum_{i=1}^n P_{np}, \quad (4)$$

где  $\sum_{i=1}^n P_{np}$  – «суммарная активная нагрузка всех присоединений подстанции 35/10 кВ» [9].

«Значение расчётной реактивной нагрузки секций сборных шин РУ-10 кВ и всей электрической части подстанции 35/10 кВ» [9]:

$$Q_{\Sigma} = K_0 \sum_{i=1}^n Q_{np}, \quad (5)$$

где  $\sum_{i=1}^n Q_{np}$  – «суммарная реактивная нагрузка подстанции 35/10 кВ» [11].

«Значение расчётной полной нагрузки секций сборных шин 10 кВ подстанции 35/10 кВ» [9]:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}. \quad (6)$$

«Расчёт проводится на примере I секции шин РУ-10 кВ ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» [9]:

$$P_{\Sigma} = 0,9 \cdot 1175 = 1057,5 \text{ кВт},$$

$$Q_{\Sigma} = 0,9 \cdot 470 = 423 \text{ квар},$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{1057,5^2 + 423^2} \approx 1139 \text{ кВА}.$$

«Аналогично в работе проведены расчёты активных, реактивных и полных нагрузок секций сборных шин РУ-10 кВ и всей подстанции, выполненные с учётом значения коэффициента одновременности максимума нагрузки, с приведением полученных результатов в форме таблицы 3» [9].

Таблица 3 – Результаты расчёта нагрузок секций сборных шин РУ-10 кВ и всей подстанции ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» с учётом значения коэффициента одновременности максимума нагрузки

Наименование секции (ТП)	$P_{\Sigma}$ , кВт	$Q_{\Sigma}$ , квар	$S_{\Sigma}$ , кВА
Всего по I секции шин РУ-10 кВ (с учётом значения $K_o$ )	1057,5	423,0	1139,0
Всего по II секции шин РУ-10 кВ (с учётом значения $K_o$ )	810,0	324,0	872,4
Всего по ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» (с учётом значения $K_o$ )	1867,5	747,0	2011,4

«Результаты, полученные при расчёте электрических нагрузок реконструируемой ТП-35/10 кВ Тюменской области Российской Федерации, используются в работе далее для выбора и проверки трансформаторов, проводников и аппаратов» [15].

## 2.2 Проверка силовых трансформаторов подстанции после реконструкции

«Далее в работе необходимо проверить силовые трансформаторы подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз» на допустимую нагрузку в нормальном режиме, с учётом допустимой перегрузки в послеаварийном режиме работы, когда на подстанции остаётся один силовой трансформатор» [15], обеспечивающий питание потребителей 1 и 2 категорий надёжности.

Данная проверка обусловлена внедрением в исходную схему главных электрических соединений двух силовых трансформаторов, а также новой перспективной нагрузки в виде отходящих линий к потребителям 10 кВ (таблицы 2,3).

Данный факт обуславливает изменение расчётной нагрузки всей подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз».

Как было указано ранее, на подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз» в исходной схеме электрических соединений установлен один силовой трансформатор номинальной марки ТМН-1800/35.

Предполагается выбор и проверка силовых трансформаторов подстанции 35/10 кВ в нормальном и послеаварийном режимах работы по методике [9].

«Расчётная мощность силового трансформатора для установки на подстанции» [8]:

$$S_{\text{ном.т.р.}} = 0,7 \cdot S_{\text{max.ПС}}, \text{MVA}, \quad (7)$$

где « $S_{\text{max.ПС}}$  – максимальное значение полной расчетной нагрузки трансформаторной подстанции» (таблица 2)» [12].

«По условию (7) для силовых трансформаторов, установленных на понижающей подстанции 35/10 кВ» [8]:

$$S_{ном.т.р} = 0,7 \cdot 2011,4 \approx 1408 \text{ кВА.}$$

«При проверке проводится сравнение номинальной мощности силового трансформатора и полученного значения расчётной мощности трансформатора ПС-35/10 кВ» [8]:

$$S_{ном.т.} \geq S_{ном.т.р}, \text{ МВА,} \quad (8)$$

«Предварительные условия проверки силовых трансформаторов, выбранных для установки на ПС-35/10 кВ в результате реконструкции, выполняются» [8]:

$$S_{ном.т.} = 1800 \text{ кВА} \geq S_{ном.т.р} = 1408 \text{ кВА.}$$

Далее проводится проверочный расчёт силовых трансформаторов подстанции 35/10 кВ на допустимую перегрузку (аварийную перегрузку) в послеаварийном режиме работы.

«При этом коэффициент загрузки трансформатора в нормальном режиме на подстанции переменного напряжения 35/10 кВ «Зверосовхоз» не должен превышать значения 0,7» [15]:

$$K_{з.н} = \frac{0,5 \cdot S_{ПС}}{S_{ном.т.}} \leq 0,7. \quad (9)$$

«Коэффициент загрузки трансформатора подстанции переменного напряжения 35/10 кВ в послеаварийном режиме не должен превышать значения 1,4» [15]:

$$K_{з.н} = \frac{S_{ПС}}{S_{ном.т}} \leq 1,4. \quad (10)$$

Таким образом, нормативная загрузка силовых трансформаторов в нормальном режиме работы, установленных на ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз», соответствует нормативным данным:

$$K_{з.н} = \frac{0,5 \cdot 2011,4}{1800} = 0,56 \leq 0,7.$$

«В послеаварийном режиме один силовой трансформатор подстанции принимает на себя нагрузку всей подстанции с учётом отключения потребителей III категории надёжности.

На подстанции на потребители III категории надёжности приходится примерно 40% всех потребителей (с учётом новой перспективной нагрузки подстанции)» [15].

Таким образом, перегрузка силовых трансформаторов, установленных на ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз», в послеаварийном режиме работы, не превышает предельно допустимых нормативных данных, следовательно, марка и тип трансформаторов выбраны правильно:

$$K_{з.н} = \frac{2011,4}{1800} = 1,12 \leq 1,4.$$

«Таким образом, в результате проведения соответствующих расчётов по выбору и проверке силовых трансформаторов на подстанции установлено, что условия всех требуемых проверок соблюдается, следовательно, силовые трансформаторы марки ТМН-1800/35, предложенные для установки на подстанции переменного напряжения 35/10 кВ после проведения реконструкции, подходят для установки на данном объекте с учётом подключения дополнительной перспективной нагрузки» [15].

## 2.3 Выбор и проверка проводников

Выбор и проверка проводников на подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз» являются важным шагом для обеспечения безопасной и эффективной работы как самой подстанции, так и электроэнергетической системы в целом.

Основной задачей выбора и проверки проводников на подстанции является эффективная передача электроэнергии с минимальными значениями потерь. При выборе и проверке проводников на подстанции необходимо провести выбор и обоснование следующих технических решений:

- выбор типа проводников в зависимости от схемы подстанции, величины максимальной нагрузки, условий монтажа и эксплуатации и других факторов. Варианты выбора могут включать алюминиевые или медные проводники, а также различные типы проводников (воздушные, кабельные линии, шинные конструкции);
- выбор сечения проводников, которое рассчитывается и проверяется по условиям максимальной нагрузки с учётом резервирования питания (для потребителей 1 и 2 категорий надёжности);
- проверочный тепловой расчет проводников для подтверждения их работоспособности во всех режимах без перегрева. Это также особенно важно для предотвращения возможных пожаров;
- проверка по механической прочности: особенно важна для проводов воздушных линий электропередачи, так как они подвергаются воздействию ветра, снега и других климатических факторов.
- прочие специфические проверки (проверка на динамическую устойчивость шин к токам короткого замыкания, проверка минимального сечения кабельных линий и другие аналогичные проверки).

Таким образом, выбор и проверка проводников на подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз» является важным заданием.

В работе для установки на подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз», проводится непосредственный выбор и проверка следующих проводников:

- питающей сети 35 кВ – для питания силовых трансформаторов подстанции от энергосистемы;
- питающей сети 10 кВ – для обеспечения питания потребителей подстанции.

Во всех перечисленных случаях принимаются к установке на подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз» проводники воздушных линий электропередачи марки АС (неизолированный алюминиевый провод со стальной жилой). Данный тип проводников является классическим вариантом проводов, применяемых на воздушных линиях электропередачи.

«Выбор сечения проводников напряжением выше 1 кВ по экономической плотности тока» [11]:

$$F_{э} = \frac{I_{p.}}{j_{э}}, \quad (11)$$

где « $j_{э}$  – экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>» [10].

«Значение максимального тока ПАВ режима» [11]:

$$I_{p.\max} = 1,4 \cdot \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.}} = 1,4 \cdot I_{p.} \quad (12)$$

где « $S_p$  – расчётная полная нагрузка воздушной линии, кВА;

$I_p$  – расчётный ток нормального режима;

$U_{ном.}$  – номинальное напряжение, кВ» [10].

«Проверка выбранного сечения» [11]:

$$I_{дон} \geq I_{p.}, \quad (13)$$

где « $I_{дон}$  – предельно – допустимое справочное значение тока

выбранного проводника линии, А» [11].

«Проверка в послеаварийном режиме работы» [11]:

$$I_{доп} \geq I_{p.max}, \quad (14)$$

«где  $I_{p.max}$  – максимальный ток послеаварийного режима, А» [6].

«Проверка сечения по механической прочности» [11]:

$$F_{ст} \geq F_{мин}, \text{ мм}^2. \quad (15)$$

«Ток нормального режима питающей ВЛ-35 кВ для питания каждого трансформатора ПС-35/10 кВ» [11]:

$$I_p = \frac{1800}{\sqrt{3} \cdot 35} \approx 29,7 \text{ А.}$$

«Расчётное сечение питающей ВЛ-35 кВ по условию экономической плотности тока» [11]:

$$F_э = \frac{29,7}{1,1} = 27,0 \text{ мм}^2.$$

«Исходя из полученных результатов расчёта, для питания силового трансформатора подстанции на стороне 35 кВ с учётом его максимальной нагрузки, принимается минимально допустимое сечение по климатическим условиям для питающей линии напряжением 35 кВ с выполнением проводом марки АС-50/8. Допустимый ток длительного режима для данного сечения провода вне помещений равен 210 А» [15].



«Максимальный расчётный ток ПАВ режима питающей ВЛ-35 кВ для питания каждого трансформатора подстанции 35/10 кВ с учётом резервирования в схеме» [11]:

$$I_p = 1,4 \frac{1800}{\sqrt{3} \cdot 35} \approx 41,6 \text{ А.}$$

«Проверка провода по току нормального режима выполняется» [11]:

$$210 \text{ А} \geq 29,7 \text{ А.}$$

«Проверка провода по максимальному току ПАВ режима также выполняется» [11]:

$$210 \text{ А} \geq 41,6 \text{ А.}$$

«Проверка выбранного сечения провода питающей ВЛ-35 кВ понизительной подстанции 35/10 кВ по механической прочности по гололёду и ветру также выполняется» [11]:

$$50 \text{ мм}^2 = 50 \text{ мм}^2.$$

«Условия проверок выполняются, следовательно, данный провод марки АС-50/8 полностью удовлетворяет всем условиям выбора и проверки и подходит в качестве провода для питающей линии 35 кВ к трансформаторам подстанции 35/10 кВ после её реконструкции» [11].

«Аналогично выбраны остальные проводники распределительной сети напряжением 10 кВ подстанции (таблица 4)» [11].

Таблица 4 – Результаты выбора и проверки сечения воздушных линий питающей (35 кВ) и распределительной (10 кВ) сетей подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз» после реконструкции

Наименование линии электрической сети подстанции	$I_p$ , А	$I_{p,max}$ , А	$F_{ст}$ , мм <sup>2</sup>	Марка провода	$I_{доп}$ , А
Питающая сеть подстанции 35 кВ					
ВЛ-35 кВ-1Т	29,7	41,6	50	АС-50/8	210
ВЛ-35 кВ-2Т	29,7	41,6	50	АС-50/8	210
Питающая сеть подстанции 10 кВ					
1Л-10	21,7	30,5	35	АС-35/6,2	175
2Л-10	26,1	36,6	35	АС-35/6,2	175
3Л-10	23,6	33,1	35	АС-35/6,2	175
4Л-10	18,7	26,1	35	АС-35/6,2	175
5Л-10	18,7	26,1	35	АС-35/6,2	175
6Л-10	18,7	26,1	35	АС-35/6,2	175

«Все выбранные проводники на ПС-35/10 кВ соответствуют требуемым условиям выбора и проверок как в нормальном, так и в послеаварийном режиме работы» [11].

Таким образом, они могут быть рекомендованы для непосредственной установки на объекте проектирования (в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ подстанции).

Они показаны в графической части работы.

## 2.4 Расчёт токов короткого замыкания

Известно, что расчёт токов короткого замыкания на понизительных трансформаторных подстанциях является важной частью проектирования электроэнергетических систем.

Главной целью этого расчёта является обеспечение безопасной и надёжной работы электрооборудования и электрических сетей, минимизация повреждений в случае короткого замыкания, а также определение параметров релейной защиты и автоматики срабатывания защитных устройств.

Основные задачи расчёта токов короткого замыкания включают [3]:

- определение максимальных токов короткого замыкания (далее – КЗ):  
известно, что расчёт токов короткого замыкания позволяет

определить максимальные значения токов, которые могут протекать в системе в случае короткого замыкания (как правило, в максимальном режиме работы системы). Это помогает выбрать и проверить соответствующее электрооборудование, а также электрические сети и уставки максимальной защиты;

- выбор и настройка устройств защиты: расчёт токов КЗ помогает определить параметры и настройки защитных реле, которые воздействуют на привод выключателей, отключающие, в свою очередь, повреждённый участок сети при коротком замыкании и предотвратить, таким образом, распространение и развитие повреждений;
- согласование защиты: результаты расчёта токов короткого замыкания также позволяет произвести координацию (согласование) между различными уровнями защиты в электроэнергетической системе. Это означает, что защитные устройства должны срабатывать в определенной последовательности, чтобы быстро изолировать только тот участок системы, где произошло короткое замыкание, минимизируя негативное влияние на другие участки (селективность релейной защиты);
- оценка механической устойчивости: величина тока короткого замыкания влияет на механическую устойчивость оборудования подстанции и энергосистемы в целом. Расчёт механической устойчивости к токам КЗ позволяет гарантировать безопасность, надёжность и долговечность оборудования;
- оценка термической устойчивости: токи КЗ оказывают существенное влияние на температурные характеристики оборудования и сетей подстанции, приводя к выходу из строя изоляции и токоведущих частей вследствие резкого увеличения температуры в системе.
- определение влияния на соседние элементы энергосистемы: токи короткого замыкания на подстанции могут влиять на соседние

элементы энергосистемы, вызывая падение напряжения, увеличение токов и появление высших гармоник. Расчёт данного влияния позволяет оценить, какие дополнительные меры могут потребоваться для обеспечения нормальной работы энергосистемы.

Расчёт токов короткого замыкания включает в себя анализ электрических параметров системы (напряжение, сопротивления, мощности, а в энергосистеме, состоящих из разветвлённых линий высокого напряжения – индуктивности и емкости), выбор типа КЗ (асимметричные или симметричные виды КЗ), выбор методов расчёта (расчётный, графический, метод упорядоченных диаграмм и другие), а также использование математических моделей для описания поведения подстанции и «энергосистемы в случае короткого замыкания и определение результатов, которые затем используются при выборе и проверке основного оборудования и настройке параметров релейной защиты и автоматики» [7].

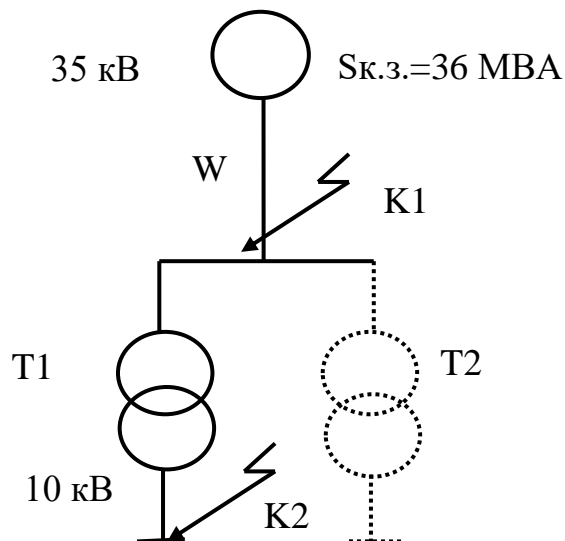
Расчёт токов КЗ на ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз» в работе проводится при использовании расчётного метода, в относительных единицах при приведении к базисным условиям.

При этом в энергосистеме предполагается наличие максимального режима работы при возникновении трёхфазного тока КЗ (симметричный вариант).

В таком режиме токи КЗ максимальны.

На первом этапе необходимо составить расчётную схему и «схему замещения электрической сети подстанции» [7].

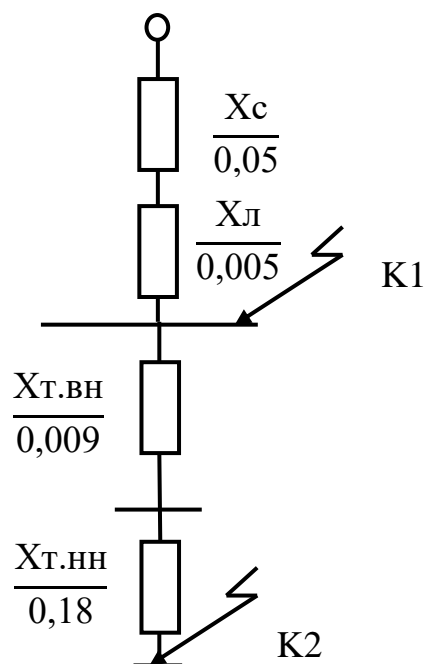
«Исходная расчётная схема для расчёта токов КЗ на ПС-35/10 кВ представлена на рисунке 4» [7].



«Рисунок 4 – Исходная упрощённая схема для расчёта токов КЗ в максимальном режиме на ТП-35/10 кВ (Т2 – отключён, питание Т1 – по одной линии 35 кВ без резервирования)» [7]

Схема замещения представляет собой разновидность принципиальной схемы, в которой все основные элементы замещаются сопротивлениями, индуктивностями и ёмкостями. Влияние последних двух на параметры схемы минимальны, поэтому их значениями можно пренебречь» [10].

«Исходная схема замещения для расчёта токов короткого замыкания на ТП-35/10 кВ в максимальном режиме с учётом приведённых выше технических условий, представлена на рисунке 5» [7].



«Рисунок 5 – Исходная схема замещения для расчёта токов КЗ на ТП-35/10 кВ «Зверсовхоз» в максимальном режиме» [12]

«В исходной схеме для расчёта токов КЗ необходимо учесть все основные элементы, которые влияют на результаты расчёта своими индуктивными сопротивлениями, которые необходимо учитывать в данных схемах в первую очередь» [3].

«В качестве основной базисной ступени для расчёта в работе выбирается ступень высшего напряжения – 35 кВ» [3].

Вторая ступень трансформации (10 кВ) – не основная, при расчёте токов КЗ полученный результат на ней необходимо умножить на коэффициент трансформации трансформатора подстанции.

«Базисная мощность принимается равной номинальной мощности силового трансформатора ТП-35/10 кВ, оставшегося в работе в послеаварийном режиме (при этом второй трансформатор подстанции отключён, что отображено в расчётной схеме и схеме замещения, а также учтено при расчётах далее)» [3]:

$$S_{\sigma} = 1800 \text{ кВА} = 1,8 \text{ МВА}.$$

«Базисное напряжение схемы определяется с учётом номинального напряжения» [3]:

$$U_{\bar{o}} = 1,05 \cdot U_{ном}, \text{кВ.} \quad (16)$$

«Таким образом, базисные напряжения для двух ступеней трансформации схемы (35 кВ и 10 кВ)» [3]:

$$U_{\bar{o},1} = 1,05 \cdot 35 = 36,75 \text{кВ.}$$

$$U_{\bar{o},2} = 1,05 \cdot 10 = 10,5 \text{кВ.}$$

«Базисный ток» [3]:

$$I_{\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3}U_{\bar{o}}}. \quad (17)$$

«Базисный ток для двух ступеней трансформации схемы (35 кВ и 10 кВ)» [4]:

$$I_{\bar{o}1} = \frac{1,8}{\sqrt{3} \cdot 36,75} \approx 0,03 \text{кА.}$$

$$I_{\bar{o}2} = \frac{1,8}{\sqrt{3} \cdot 10,5} \approx 0,1 \text{кА.}$$

«Далее проводится расчёт параметров схемы замещения ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» в именованных единицах.

Определяются сопротивления питающей линии, трансформаторов подстанции со стороны 35 кВ и 10 кВ, с учётом обобщённого сопротивления энергосистемы.

Сопротивление энергосистемы в схеме замещения определяется по известной формуле» [7]:

$$X_c = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{кз}}, \quad (18)$$

«где  $S_{кз}$  - «мощность трёхфазного КЗ на шинах энергосистемы» [12].

«Численное значение обобщённого индуктивного сопротивления системы с учётом мощности КЗ на шинах энергосистемы при приведении к базисным условиям» [7]:

$$X_c = \frac{1,8}{36} = 0,05 \text{ Ом.}$$

«Сопротивление питающей ВЛ-35 кВ ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» с учётом её длины, в относительных единицах, при приведении к базисным условиям» [7]:

$$X_l = X_0 \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{cp.cm}^2}, \quad (19)$$

«где  $x_0$  - удельное сопротивление ВЛ, Ом/км [7];

$L$  - суммарная длина ВЛ, км» [7].

$$X_l = 0,4 \cdot 6,5 \cdot \frac{1,8}{36,75^2} = 0,005 \text{ Ом.}$$

«Далее проводится расчёт индуктивных сопротивлений силового трансформатора ТП-35/10 кВ с учётом паспортных данных, в относительных единицах, при приведении к базисным условиям» [7].



«Для обмотки ВН (35 кВ) трансформатора, оставшегося в работе на ТП-35/10 кВ» [3]:

$$X_{m.вн} = \frac{0,125 \cdot U_{квн\%} S_{\sigma}}{100 \cdot S_{н.т.}} \quad (20)$$

«Для трансформатора подстанции (1800 кВА) с учётом приведения к базисным условиям схемы» [3]:

$$X_{m.вн} = \frac{0,125 \cdot 7,5 \cdot 1,8}{100 \cdot 1,8} = 0,009 \text{ Ом.}$$

«Для обмотки НН (10 кВ) трансформатора, оставшегося в работе на ТП-35/10 кВ» [3]:

$$X_{m.нн} = \frac{1,75 \cdot U_{квн\%} S_{\sigma}}{100 \cdot S_{н.т.}} \quad (21)$$

«Для трансформатора подстанции (1800 кВА) с учётом приведения к базисным условиям схемы» [3]:

$$X_{m.нн} = \frac{1,75 \cdot 10,5 \cdot 1,8}{100 \cdot 1,8} = 0,18 \text{ Ом.}$$

«Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах, определяется так» [7]:

$$I'' = \frac{E''}{x_{рез}} \cdot I_6. \quad (22)$$

«Далее, исходя из определённых ранее индуктивных сопротивлений всех основных элементов схемы замещения, определяются результирующие (эквивалентные) сопротивления к каждой точке КЗ» [7].

«Проводится преобразование исходной схемы замещения с целью расчёта токов КЗ в точке К1 (рисунок 6)» [7].

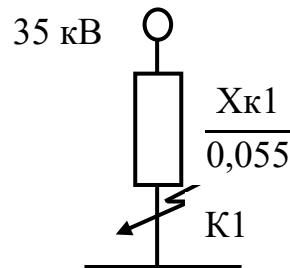


Рисунок 6 –«Схема замещения, преобразованная для расчёта токов КЗ в расчётной точке К1» [7]

«Результирующее сопротивление к точке К1 в именованных расчётных единицах» [7]:

$$X_{к1} = X_c + X_l. \quad (23)$$

«В числовых значениях» [7]:

$$X_{к1} = 0,05 + 0,005 = 0,055 \text{ Ом.}$$

«Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчётной точке К1, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах» [7]:

$$I''_{\kappa 1} = \frac{1}{0,055} \cdot 0,03 \approx 0,55 \text{ кА.}$$

«Схема замещения для расчета тока трёхфазного короткого замыкания в расчётной точке К2 представлена на рисунке 7» [7].

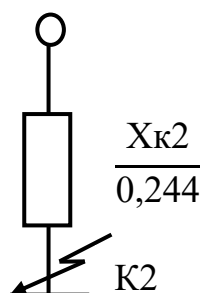


Рисунок 7 – «Схема замещения, преобразованная для расчёта токов КЗ в расчётной точке К2» [7]

«Проводится расчёт результирующих сопротивлений и токов КЗ в расчётной точке К2.

Результирующее сопротивление к точке К2 в именованных расчётных единицах» [7]:

$$X_{\kappa 2} = X_c + X_l + X_{т.вн} + X_{т.лн}. \quad (24)$$

$$X_{\kappa 2} = 0,05 + 0,005 + 0,009 + 0,18 = 0,244 \text{ Ом.}$$

«Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчётной точке К2, при приведении к базисным условиям, в именованных единицах, определяется с учётом того, что точка К2 в схеме замещения находится не на основной ступени» [7]:

$$I''_{\kappa 2} = \frac{E}{X_{\kappa 2}} \cdot I_{б2} \cdot K_m. \quad (25)$$

$$I''_{\kappa 2} = \frac{1}{0,244} \cdot 0,1 \cdot \frac{36,75}{10,5} \approx 1,43 \text{ кА.}$$

Ударный ток является аperiodической составляющей тока короткого замыкания. Он определяет мгновенное её значение, по которому проверяется оборудование подстанции [7].

«Значение ударного тока в расчётных точках схемы» [7]

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I''_K, \text{ кА}, \quad (26)$$

где  $k_{уд}$  – «ударный коэффициент» [7].

«Для расчётных точек схемы К1 и К2, значение ударных токов в именованных единицах» [7]:

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot 1,6 \cdot 0,55 = 1,24 \text{ кА}.$$

$$i_{уд2} = \sqrt{2} \cdot 1,4 \cdot 1,43 = 2,83 \text{ кА}.$$

«Все полученные в работе результаты расчёта токов короткого замыкания, а также величины ударных токов, на шинах 35 кВ и 10 кВ в максимальном режиме работы реконструируемой ТП-35/10 кВ, представлены в таблице 5» [7].

Таблица 5 – Результаты расчёта токов короткого замыкания, а также величины ударных токов, на шинах 35 кВ и 10 кВ в максимальном режиме работы реконструируемой ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз»

Параметр	Единица измерения	Расчётная точка КЗ	
		Точка К1 (35 кВ)	Точка К2 (10 кВ)
$I_K$	кА	0,55	1,43
$i_{уд}$	кА	1,24	2,83

«Полученные результаты расчета токов короткого замыкания и ударных токов на шинах 35 кВ и 10 кВ в максимальном режиме работы ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз», полученные в данной работе, будут использоваться для проверки выбранного нового оборудования распределительных устройств подстанции» [7].

## 2.5 Выбор и проверка электрических аппаратов

«Известно, что выбор и проверка электрических аппаратов для трансформаторной подстанции – это важнейший этап проектирования, который» [19] направлен на обеспечение надежной и безопасной работы не только самой подстанции, но и всей энергосистемы в целом.

Ранее в работе предложены следующие «основные мероприятия по реконструкции схемы главных электрических соединений и модернизацию основного силового оборудования ПС-35/10 кВ» [6] «Зверосовхоз», которые обуславливают выбор и проверку новых электрических аппаратов схемы главных электрических соединений объекта проектирования:

- с целью улучшения параметров надёжности схемы энергетического узла Тобольского района Тюменской области, предлагается провести «модернизацию устаревших электрических аппаратов в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ, которая реализуется путём замены их на современные модели и марки, отличающиеся улучшенными техническими и экономическими характеристиками» [19]. Таким образом будет повышена надёжность и бесперебойность в системе силового оборудования «подстанции, а также долговечность оборудования;
- с учётом предложенной реконструкции схемы электрических соединений подстанции на стороне 35 кВ, предусматривающей установку второго трансформатора на подстанции, а также реконструкция схемы электрических соединений ОРУ-35 кВ и РУ-10 кВ, обусловленных данным фактом» [19], необходимо ввести в эксплуатацию новые электрические аппараты в схеме главных соединений объекта проектирования.

Известно, что наиболее важным высоковольтным электрическим аппаратом на подстанциях переменного напряжения энергосистем является высоковольтный выключатель.

Поэтому в первую очередь проводится их выбор и проверки.

«Выбор выключателей высокого напряжения производится, исходя из следующих условий:

– по номинальному напряжению» [18]:

$$U_{уст} \leq U_n. \quad (27)$$

где « $U_{уст}$ ,  $U_{ном}$  – соответственно напряжения установки и номинальное напряжение выключателя (параметр завода-изготовителя)» [18];

– «по рабочему току» [18]:

$$I_{раб.макс} \leq I_n. \quad (28)$$

где « $I_{раб.макс}$ ,  $I_n$  – соответственно, максимальный рабочий ток ПАВ режима электроустановки и номинальное значение тока выключателя (параметр завода-изготовителя)» [18];

– «проверка выключателя на симметричный ток отключения» [18]:

$$I_{п\tau} \leq I_{откн}. \quad (29)$$

где « $I_{п\tau}$  – значение периодической составляющей тока короткого замыкания в момент начала расхождения дугогасительных контактов» [18];

« $I_{откн.н}$  – номинальный ток отключения выключателя, кА» [18];

– «проверка выключателя на отключение асимметричного тока» [7]:

$$(\sqrt{2} \cdot I_{п\tau} + i_{a\tau}) \leq \sqrt{2} \cdot I_{откн.н} (1 + \beta_n), \quad (30)$$

где « $i_{a\tau}$  – значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания в момент расхождения контактов;

$\beta_n$  – номинальное значение относительного содержания апериодической составляющей в отключаемом токе КЗ;

$\tau$  – наименьшее время от начала короткого замыкания до момента расхождения дугогасительных контактов, определяется так» [7]:

$$t = t_{з.мин} + t_{с.в}, \quad (31)$$

где « $t_{з.мин}$  – минимальное время действия релейной защиты, с;

$t_{с.в}$  – собственное время отключения выключателя, с» [7];

– «на электродинамическую устойчивость выбранный выключатель проверяется по значению предельного сквозного тока КЗ» [18]:

$$i_y \leq i_{нр.с}, \quad (32)$$

где « $i_{нр.с}$  – действующее значение предельного сквозного тока КЗ;

$i_y$  – ударный ток короткого замыкания в цепи выключателя» [18];

– «проверка выключателя на термическую стойкость по значению теплового импульса» [18]:

$$B_k \leq I_T^2 t_T, \quad (33)$$

где « $B_k$  – тепловой импульс по расчёту,  $A^2 \cdot c$ ;

$I_T$  – предельный ток термической устойчивости,  $A^2 \cdot c$ ;

$t_T$  – длительность протекания тока устойчивости, с» [18].

«При этом тепловой импульс с учётом токов короткого замыкания и отключения цепи» [18]:

$$B_k = I_k^2 (t_{отк} + T_a). \quad (34)$$

«По условиям (27) – (34) осуществляется выбор и проверка электрических аппаратов для установки на ПС-35/10 кВ» [10] «Зверосовхоз».

Выбору подлежат выключатели и разъединители основной силовой цепи схемы главных электрических соединений подстанции. Они являются основным коммутационным и защитным оборудованием, создавая блоки «выключатель – разъединитель».

«Результаты выбора и проверки выключателей высокого напряжения для установки в РУ 35 кВ ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз», представлены в работе в форме таблицы 6» [18].

Таблица 6 – Результаты выбора и проверки высоковольтных выключателей для установки в РУ-35 кВ ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» в результате внедрения мероприятий по модернизации оборудования и реконструкции схемы главных электрических соединений подстанции

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
Выключатели ВР35НСМ-20/1600 УХЛ1	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 35 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 35 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 41,6 \text{ А.}$	$I_{ном} = 1600 \text{ А.}$
	$I_{п.т} \leq I_{отк.ном.}$	$I_{п.т} = 0,55 \text{ кА.}$	$I_{отк.ном} = 20 \text{ кА.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 1,24 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 52 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$I_T^2 \cdot t_T = 0,55^2 \cdot 3 =$ $= 0,91 \text{ кА}^2\text{с.}$	$B_K = 20^2 \cdot 3 =$ $= 1200 \text{ кА}^2\text{с.}$

«Для всех присоединений выбраны выключатели ВР35НСМ-20/1600 УХЛ1.

Все выбранные выключатели для установки на вводных, секционном и транзитных соединениях в РУ 35 кВ ПС-35/10 кВ, удовлетворяют всем требуемым условиям выбора и проверки» [18].

Таким образом, они могут быть рекомендованы к установке и дальнейшей эксплуатации на объекте исследования.

«Аналогично выбраны новые выключатели для установки в РУ 10 кВ ПС-35/10 кВ (таблица 7)» [18].



Таблица 7 – Результаты выбора и проверки высоковольтных выключателей для установки в РУ-10 кВ ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» в результате внедрения мероприятий по модернизации оборудования и реконструкции схемы главных электрических соединений подстанции

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
Выключатели вакуумные ВРС-10-20/1000 УХЛ1	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 145,7 \text{ А.}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А.}$
	$I_{н.т} \leq I_{отк.ном.}$	$I_{н.т} = 1,43 \text{ кА.}$	$I_{отк.ном} = 20 \text{ кА.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 2,83 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 31,5 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$I_T^2 \cdot t_T = 1,43^2 \cdot 3 = 6,13 \text{ кА}^2\text{с.}$	$B_K = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2\text{с.}$

«Все выбранные выключатели РУ-10 кВ подстанции удовлетворяют требуемым условиям» [18].

Следовательно, они могут быть рекомендованы к установке в результате реконструкции подстанции и модернизации её оборудования.

Далее проводится выбор и проверка разъединителей 35 кВ.

«Результаты выбора и проверки новых разъединителей для установки в РУ-35 кВ ПС-35/10 кВ, представлены в таблице 8» [18].

Таблица 8 – Результаты выбора и проверки высоковольтных разъединителей для установки в РУ-35 кВ ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» в результате внедрения мероприятий по модернизации оборудования и реконструкции схемы главных электрических соединений подстанции

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
Разъединители РГП.1А-III-35/1000 УХЛ1	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 35 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 35 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 41,6 \text{ А.}$	$I_{ном} = 1600 \text{ А.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_{дин.} = 31,5 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$B_K = 31,5^2 \cdot 3 = 2977 \text{ кА}^2\text{с.}$

«Аналогично выбраны разъединители для установки в РУ-10 кВ подстанции.

Результаты выбора разъединителей для установки в РУ 10 кВ ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» в результате внедрения мероприятий по модернизации оборудования подстанции, представлены в таблице 9» [18].

Таблица 9 – Результаты выбора и проверки высоковольтных разъединителей для установки в РУ-10 кВ ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» в результате внедрения мероприятий по модернизации оборудования и реконструкции схемы главных электрических соединений подстанции

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
Разъединители РВ-10/630УХЛ2	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 145,7 \text{ А.}$	$I_{ном} = 630 \text{ А.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 2,83 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 31,5 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$I_T^2 \cdot t_T = 1,43^2 \cdot 3 = 6,13 \text{ кА}^2 \text{ с.}$	$B_K = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \text{ с.}$

«Окончательно для установки в РУ 10 кВ ТП-35/10 кВ «Зверосовхоз» выбираются новые разъединители марки РВ-10/630УХЛ2, удовлетворяющие всем требованиям выбора и проверок.

Также для установки в схеме главных электрических соединений силовой сети на реконструируемой ТП-35/10 кВ, выбираются ограничители перенапряжения следующих типов и марок:

- для установки в РУ 35 кВ – ОПН типа ОПН-П-35/40,5/10/680-П УХЛ1;
- для установки в РУ 10 кВ – ОПН типа ОПН-П1-10/12/102 УХЛ» [19].

Ограничители перенапряжения устанавливаются в комплекте с вакуумными выключателями, выбранными в работе ранее, с целью защиты от внутренних перенапряжений, возникающих при их коммутации. Также ОПН комплектуются трансформаторы тока и вводы воздушных линий электропередачи в схеме подстанции.

Исходя из полученных результатов, можно утверждать, что все новые электрические аппараты являются надёжными и могут быть применены на подстанции.

Они показаны в графической части работы.

Выводы по разделу.

«В результате выполнения работы, в связи с мероприятиями по реконструкции схемы электрических соединений подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз», обусловленными вводом в эксплуатацию двух силовых трансформаторов» [18], а также необходимости частичной модернизации оборудования РУ-35 кВ и РУ-10 кВ в связи с его износом, проведены соответствующие расчёты и приняты технические решения:

- рассчитаны максимальные электрические нагрузки подстанции с учётом ввода в эксплуатацию двух трансформаторов и нового распределения электроэнергии внутри РУ-10 кВ, а также РУ-35 кВ;
- с учётом необходимости реконструкции схемы электрических соединений на объекте проектирования, проверены силовые трансформаторы подстанции по условиям допустимой нагрузки нормального режима, а также максимальной допустимой перегрузки послеаварийного режима;
- выбраны и проверены проводники питающих линий 35 кВ, а также на отходящих линиях к потребителям 10 кВ;
- рассчитаны «токи короткого замыкания максимального режима, а также ударные токи КЗ;
- в связи с реконструкцией схемы электрических соединений подстанции, с учётом необходимости модернизации силового оборудования, в РУ-35 кВ» [14] на вводных присоединениях выбрано и проверено следующее новое современное основное оборудование: выключатели высокого напряжения вакуумного типа марки ВР35НСМ-20/1600 УХЛ1, разъединители РГП.1А-III-35/1000 УХЛ1, ограничители перенапряжения ОПН-П-35/40,5/10/680-II УХЛ1;
- в РУ-10 кВ подстанции выбраны и проверены следующие современные аппараты: выключатели высокого напряжения вакуумного типа марки ВРС-10-20/1000 УХЛ1, разъединители РВ-10/630УХЛ2, ограничители перенапряжения ОПН-П1-10/12/102 УХЛ.

### **3 Реконструкция схемы релейной защиты подстанции**

#### **3.1 Выбор основных типов релейной защиты**

Как было указано в работе ранее, с учётом участвовавших аварийных отключений и ложных срабатываний релейной защиты (далее – РЗА) в оборудовании и силовых трансформаторах подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз», предложено провести замену их устаревших и некачественных устройств РЗА на новые и современные типы, обладающие более высокой надёжностью, безотказностью и селективностью.

Предлагается применить новые типы защит трансформаторов, а также вводных, линейных и секционных присоединений, и выбрать современные микропроцессорные блоки РЗА для выполнения данной функции.

Согласно [1], на районных силовых трансформаторах систем электроснабжения, должны быть предусмотрены следующие виды защит:

- «дифференциальная защита (ДЗ) – является высокочувствительной РЗА трансформатора от всех видов короткого замыкания» [1] и прочих повреждений, рекомендуется применение продольной ДЗ на микропроцессорной основе;
- максимальная токовая защита (МТЗ) – является основной защитой силового трансформатора от внутренних и внешних коротких замыканий, рекомендуется установка двух комплектов МТЗ (на стороне ВН и на стороне НН трансформатора);
- защита от перегрузки (ЗП) – защищает силовой трансформатор от токов перегрузки, работает на сигнал;
- газовая защита – единственный вид РЗА, реагирующий на внутренние короткие замыкания и явление «пожара стали» в трансформаторе;
- защита от однофазных КЗ на землю (ЗОЗ) – защищает силовой трансформатор от коротких замыканий на землю.

Согласно [1], на районных подстанциях во вводных, линейных и секционных присоединениях систем электроснабжения, должны быть предусмотрены следующие виды защит:

- дифференциальная защита линий (ДЗЛ) – является основной РЗиА линий и «присоединений от внешних токов короткого замыкания, образует двухступенчатую защиту (вместе с МТЗ), устанавливается на всех присоединениях (вводных, линейных и секционных);
- максимальная токовая защита (МТЗ) – является основной защитой линий и присоединений от внутренних и внешних коротких замыканий» [1], является вместе с ДЗЛ основной двухступенчатой защитой, перекрывая «мёртвую зону» ДЗЛ;
- защита от однофазных КЗ на землю (ЗОЗ) – защищает линии и присоединения от коротких замыканий на землю.

Помимо релейной защиты, в схеме подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз» необходимо предусмотреть также устройства автоматики и сигнализацию.

Из устройств автоматики для отходящих и питающих воздушных линий предусматривается автоматическое повторное включение (далее – АПВ), а для секционных присоединений – устройство автоматического включения резерва (далее – АВР).

Все принятые в работе дополнительные виды РЗиА при их внедрении способны значительно повысить надёжность релейной защиты, её быстродействие, селективность (избирательность), что в конечном итоге позволит значительно снизить риск аварий в схеме главных электрических соединений всей подстанции.

Для реализации всех перечисленных функций, предлагается принять блок релейной защиты марки БЭ 2104 (производитель – АО «Чебоксарский электроаппаратный завод») [2]. Такие блоки РЗиА марки БЭ 2104 имеют ряд существенных преимуществ:

- высокая надёжность: блоки релейной защиты марки БЭ 2104 разрабатываются с учетом высокой степени надёжности для

обеспечения защиты силовых трансформаторов и линий от коротких замыканий, перегрузок и других аварийных режимов;

- быстродействие реакция: блоки РЗиА марки БЭ 2104 способны быстро обнаруживать и реагировать на повреждения в электрических цепях силовых трансформаторов и линий, что позволяет предотвратить их повреждения оборудования и обеспечить безопасность работы всей энергосистемы;
- простота и удобство монтажа, ремонта и эксплуатации, доступный интерфейс, что упрощает их установку и обслуживание.

Внешний вид и конструктивное выполнение микропроцессорных блоков РЗиА марки БЭ 2104 представлены на рисунке 8.



«Рисунок 8 – Внешний вид и конструктивное выполнение микропроцессорных блоков РЗиА марки» [2] БЭ 2104

Таким образом, выбор микропроцессорных блоков РЗиА марки БЭ 2104, для непосредственного применения на подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз» в результате проведения реконструкции её релейной защиты и автоматики, обоснован.

### 3.2 Расчёт уставок релейной защиты силовых трансформаторов подстанции

«Далее в работе необходимо провести непосредственный расчёт уставок релейной защиты силовых трансформаторов» [16], установленных на ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз».

Рабочие токи и токи максимального режима силовых трансформаторов ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз» рассчитаны в работе ранее.

«В качестве защиты трансформаторов подстанции 35/10 кВ от межфазных КЗ, используется продольная дифференциальная токовая защита с абсолютной селективностью» [16].

«Ток срабатывания этой защиты определяется путём отстройки от тока небаланса» [16]:

$$I_{с.з} \geq K_n \cdot (I_{раб.макс.НН} - I_{раб.макс.ВН}), \quad (35)$$

где  $I_{раб.макс.НН}$ ,  $I_{раб.макс.ВН}$  – «соответственно максимальный рабочий ток на сторонах НН и ВН силового трансформатора с учётом коэффициента запаса» [16];

$K_n$  – коэффициент надёжности» [16].

«Коэффициент чувствительности дифференциальной токовой защиты должен удовлетворять условию» [16]:

$$K_{\text{ч}} = \frac{K_{\text{сх}}^{(\kappa)}}{K_{\text{сх}}^{(3)}} \cdot \frac{I_{\text{к.нач.мин}}}{I_{\text{с.з}}} \geq 1,5. \quad (36)$$

«Ток срабатывания продольной дифференциальной токовой защиты трансформатора подстанции 35/10 кВ» [16]:

$$I_{c.з} \geq 1,3 \cdot (1347,2 - 232,7) = 1448,9 \text{ A.}$$

«Коэффициент чувствительности продольной дифференциальной токовой защиты трансформаторов подстанции 35/10 кВ удовлетворяет требованиям» [16]:

$$K_{\psi} = \frac{1}{1} \cdot \frac{2437}{1448,9} = 1,68 > 1,5.$$

«Для микропроцессорных блоков защит, защита от перегрузки отстраивается от максимального рабочего тока на стороне ВН силового трансформатора» [16]:

$$I_{c.з} \geq K_n \cdot I_{\text{раб.макс.ВН}}, \quad (37)$$

где  $K_n$  – «коэффициент надёжности» [16].

«Ток срабатывания защиты от перегрузки трансформатора подстанции 35/10 кВ» [16]:

$$I_{c.з} \geq 1,05 \cdot 232,7 \approx 244,3 \text{ A.}$$

«Ток срабатывания МТЗ силового трансформатора должен удовлетворять условию» [16]:

$$I_{c.з} \geq K_{\text{отс}} \cdot K_{\text{сзн}} \cdot I_{\text{раб.макс}}, \quad (38)$$

где  $K_{\text{отс}}$  – «коэффициент отстройки» [13];

$K_{\text{сзн}}$  – «коэффициент самозапуска» [13].

«Коэффициент чувствительности МТЗ определяется по формуле» [16]:



$$K_q = \frac{K_{cx}^{(k)}}{K_{cx}^{(3)}} \cdot \frac{I_{к.мин}^{(k)}}{I_{с.з}} \geq 1,2, \quad (39)$$

«где  $I_{к мин}^{(k)}$  - минимальный ток при КЗ в конце защищенной линии;

$K_{cx}^{(3)}$  - коэффициент схемы соединения ТТ и реле;

$K_{cx}^{(k)}$  - коэффициент схемы соединения ТТ и реле при КЗ;

$I_{с.з}$  - ток срабатывания защиты» [16].

«Для комплекта МТЗ силового трансформатора на стороне ВН (35 кВ) значение тока срабатывания защиты» [16]:

$$I_{с.з} \geq 1,1 \cdot 1,6 \cdot 232,7 = 409,6 \text{ A.}$$

«Коэффициент чувствительности МТЗ трансформаторов подстанции на стороне ВН удовлетворяет требованиям» [16]:

$$K_q = \frac{1}{1} \cdot \frac{2437}{409,6} \approx 5,95 > 1,2.$$

«Аналогично проводится расчёт уставки тока срабатывания комплекта МТЗ силового трансформатора на стороне НН (10 кВ)» [16]:

$$I_{с.з} \geq 1,1 \cdot 1,6 \cdot 1347,2 = 2371 \text{ A.}$$

«Коэффициент чувствительности МТЗ трансформатора на стороне НН удовлетворяет требованиям» [16]:

$$K_q = \frac{1}{1} \cdot \frac{3268}{2371} = 1,38 > 1,2.$$

«В качестве газовой защиты силовых трансформаторов, установленных на подстанции 35/10 кВ, в работе используются усовершенствованные газовые реле типа РГТ-80 (производитель – ООО «ЕССО-Технолоджи», г. Чебоксары), которые зарекомендовали себя с положительной стороны и характеризуются высокой надёжностью и быстродействием» [2].

Такие газовые реле имеют современный функционал с несколькими поплавками, которые резервируют друг друга и повышают надёжность защиты. Чувствительная мембрана обеспечивает практически безотказную работу газового реле.

«Принимается в работе для ЗОЗ трансформаторов подстанции  $I_{с.з} = 5$  А,  $t_{с.з} = 0$  с (без выдержки времени)» [16].

«В работе для защиты силовых трансформаторов принимаются все защиты мгновенного действия (ДЗ, МТЗ, ЗОЗ), работающие на «отключение». Защита от перегрузки выполняется с действием на сигнал» [16], информируя оператора (диспетчера) о явлении перегрузки в цепи трансформатора и необходимости разгрузки системы.

«Уставки РЗиА силовых трансформаторов подстанции 35/10 кВ показаны на графическом листе 6» [16].

### **3.3 Расчёт уставок релейной защиты линейных присоединений подстанции**

Далее в работе необходимо провести непосредственный расчёт уставок релейной защиты линейных присоединений (вводных, секционных и линейных), установленных на ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз».

Рабочие токи и токи максимального режима присоединений ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз» рассчитаны в работе ранее.

«Ток срабатывания ДЗЛ» [16]:

$$I_{с.з} \geq K_o \cdot I_{к.макс} + I_{раб.макс}, \quad (40)$$

где  $K_o$  – «коэффициент отстройки ДЗЛ» [16].

«Коэффициент чувствительности ДЗЛ» [16]:

$$K_u = \frac{K_{cx}^{(\kappa)}}{K_{cx}^{(3)}} \cdot \frac{I_{к.нач.мин}}{I_{с.з}} \geq 1,5. \quad (41)$$

«Для питающей воздушной линии 35 кВ к трансформатору, токовая уставка ДЗЛ» [16]:

$$I_{с.з} \geq 1,1 \cdot 800 + 232,7 = 1112,7 \text{ А.}$$

$$K_u = \frac{1}{1} \cdot \frac{2801}{1112,7} = 2,52 \geq 1,5.$$

«Выражение для выбора уставок МТЗ линий можно записать так» [16]:

$$I_{с.з} \geq K_{отс} \cdot K_{сзн} \cdot I_{раб.макс}. \quad (42)$$

«Коэффициент чувствительности МТЗ» [16]:

$$K_u = \frac{K_{cx}^{(\kappa)}}{K_{cx}^{(3)}} \cdot \frac{I_{к.мин}}{I_{с.з}} \geq 1,2, \quad (43)$$

«Для питающей линии 35 кВ к трансформатору, уставка МТЗ» [16]:

$$I_{с.з} \geq 1,3 \cdot 1,5 \cdot 232,7 = 453,8 \text{ А.}$$

«Коэффициент чувствительности МТЗ питающей линии 35 кВ» [16]:

$$K_q = \frac{1}{1} \cdot \frac{800}{453,8} = 1,76 \geq 1,2.$$

«Принимается в работе для ЗОЗ всех линий подстанции  $I_{c.з} = 5 \text{ А}$ ,  $t_{c.з} = 0$  с (без выдержки времени)» [16].

«Для устройств автоматики принимаются следующие уставки времени срабатывания согласно рекомендациям:

- для АПВ на линиях –  $t_{c.з} = 1$  с;
- для АВР на секционном соединении –  $t_{c.з} = 2$  с» [16].

«Результаты выбора уставок питающих, секционных и отходящих линий 35 кВ, а также и питающих линий 10 кВ подстанции 35/10 кВ представлены на графическом листе 6» [16].

Выводы по разделу.

Проведена реконструкция релейной защиты силовых трансформаторов и линий (вводных, секционных и отходящих) подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз».

Вместо устаревших и неэффективных устройств релейной защиты, предложены новые типы защит силовых трансформаторов подстанции и выбраны «современные микропроцессорные блоки РЗиА марки БЭ 2104 (производитель – АО «Чебоксарский электроаппаратный завод») для» [16] выполнения данной функции.

Показаны преимущества данной модели по сравнению с аналогичными разработками.

Осуществлён расчёт «уставок релейной защиты силовых трансформаторов» [16] и линейных присоединений подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз».

## Заключение

В работе проведена реконструкция схемы главных электрических соединений, а также элементов схемы вторичных цепей (релейной защиты и автоматики) понижающей подстанции ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз».

В работе приведены основные технические сведения по исходной схеме главных электрических соединений и основному оборудованию, установленному на ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз».

Составлена и описана структурная схема объекта проектирования, описаны её основные составляющие.

Приведены значения максимальных нагрузок потребителей подстанции 35/10 кВ. В результате проведённого анализа литературы по вопросу норм и требований, которые предъявляются к реконструкции понизительных подстанций энергосистем Российской Федерации, установлено, что реконструкция трансформаторных подстанций энергосистемы является чрезвычайно важной, ответственной и необходимой задачей, сопряжённой со значительными техническими и финансовыми издержками.

Основываясь на приведённой технической информации, с учётом проведённого анализа литературы по вопросу норм и требований, которые предъявляются к реконструкции понизительных подстанций энергосистем Российской Федерации, в работе предложены следующие основные мероприятия по реконструкции ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз»:

- «модернизацию устаревших электрических аппаратов в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ, которая реализуется путём замены их на современные модели и марки, отличающиеся улучшенными техническими и экономическими характеристиками» [6]. Таким образом будет повышена надёжность и бесперебойность в системе силового оборудования подстанции;
- «реконструкцию схемы электрических соединений подстанции на стороне 35 кВ, предусматривающей установку второго

трансформатора на подстанции, так как в связи с изменением категоричности новых потребителей подстанции, примерно 60% которых относится к I и II категории надёжности, необходим второй источник питания в виде силового трансформатора, а также реконструкция схемы электрических соединений ОРУ-35 кВ и РУ-10 кВ, обусловленных данным фактом. Данные аспекты соответствуют требованиям, которые предъявляются к электрическим схемам для питания объектов I и II категорий надёжности. Кроме того» [16], на объекте проектирования планируется увеличение нагрузки потребителей, что обуславливает её учёт при принятии схемных решений. Таким образом, вся дополнительная нагрузка будет учтена в проекте с учётом условий резервирования и надёжности;

- с учётом участвовавших аварийных отключений и ложных срабатываний релейной защиты (далее – РЗА) на подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз», предложено провести замену их устаревших и некачественных устройств РЗА на новые и современные типы, обладающие более высокой надёжностью, безотказностью и селективностью. Таким образом, будет повышена надёжность и бесперебойность работы системы аварийной защиты оборудования и всей релейной защиты подстанции в целом.

«В результате выполнения работы, в связи с мероприятиями по реконструкции схемы электрических соединений подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз», обусловленными вводом в эксплуатацию двух силовых трансформаторов» [10], а также необходимости частичной модернизации оборудования РУ-35 кВ и РУ-10 кВ в связи с его износом, проведены соответствующие расчёты и приняты технические решения:

- рассчитаны максимальные электрические нагрузки подстанции с учётом ввода в эксплуатацию двух трансформаторов и нового распределения электроэнергии внутри РУ-10 кВ, а также РУ-35 кВ;

- с учётом необходимости реконструкции схемы электрических соединений на объекте проектирования, проверены силовые трансформаторы подстанции по условиям допустимой нагрузки нормального режима, а также максимальной допустимой перегрузки послеаварийного режима;
- выбраны и проверены проводники питающих линий 35 кВ, а также на отходящих линиях к потребителям 10 кВ;
- рассчитаны «токи короткого замыкания максимального режима, а также ударные токи КЗ»;
- в связи с реконструкцией схемы электрических соединений подстанции, с учётом необходимости модернизации силового оборудования, в РУ-35 кВ» [14] на вводных присоединениях выбрано и проверено следующее новое современное основное оборудование: выключатели высокого напряжения вакуумного типа марки ВР35НСМ-20/1600 УХЛ1, разъединители РГП.1А-III-35/1000 УХЛ1, ограничители перенапряжения ОПН-П-35/40,5/10/680-II УХЛ1;
- в РУ-10 кВ подстанции выбраны и проверены следующие современные аппараты: выключатели высокого напряжения вакуумного типа марки ВРС-10-20/1000 УХЛ1, разъединители РВ-10/630УХЛ2, ограничители перенапряжения марки ОПН-П1-10/12/102 УХЛ.

Проведена реконструкция релейной защиты силовых трансформаторов и линий (вводных, секционных и отходящих) подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз».

Вместо устаревших и неэффективных устройств релейной защиты, предложены новые типы защит силовых трансформаторов подстанции и выбраны «современные микропроцессорные блоки РЗиА марки БЭ 2104 (производитель – АО «Чебоксарский электроаппаратный завод») для» [16] выполнения данной функции.

Показаны преимущества данной модели по сравнению с аналогичными разработками.

Осуществлён расчёт «уставок релейной защиты силовых трансформаторов» [16] и линейных присоединений подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз».

Таким образом, в результате выполнения работы, на основе технических расчётов и теоретических выкладок, подтверждены все предлагаемые технические решения и мероприятия по реконструкции подстанции 35/10 кВ «Зверосовхоз».

Установлено, что предложенные в работе мероприятия по реконструкции ПС-35/10 кВ «Зверосовхоз» позволят повысить надёжность, безопасность, экономичность и бесперебойность работы схемы главных электрических соединений данной подстанции.



## Список используемых источников

1. Андреев В.А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 2017. 256 с.
2. Блок защиты трансформаторов БЭ 2104 [Электронный ресурс]: URL: <https://www.cheaz.ru/products/rps/panels-protection/complete-sets/bk-uzg/be-2104.html> (дата обращения: 26.11.2023).
3. ГОСТ 28249-93 Короткие замыкания в электроустановках. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.gostrf.com/normadata/1/4294845/4294845729.pdf> (дата обращения: 21.11.2023).
4. ГОСТ 29322-2014. «Напряжения стандартные» [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115397> (дата обращения: 26.11.2023).
5. ГОСТ 32144-2013. «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 26.11.2023).
6. ГОСТ Р 59279-2020 «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств от 35 до 750 кВ подстанций». [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200177281> (дата обращения: 26.11.2023).
7. Ерошенко С.А. Расчет токов коротких замыканий в энергосистемах: учебное пособие / С. А. Ерошенко. УрФУ им. Б.Н. Ельцина. Екатеринбург: Изд. УрФу, 2019. 104 с.
8. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Академия. 2021. 400 с.
9. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.

10. Линия: ПС 35/10 кВ «Зверосовхоз» (533524512). [Электронный ресурс]: URL: <https://www.openstreetmap.org/way/533524512> (дата обращения: 26.11.2023).

11. Немировский А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций. М.: Инфра-Инженерия, 2020. 174 с.

12. Никитенко Г.В., Коноплев Е.В. Электрооборудование, электротехнологии и электроснабжение сельского хозяйства. Курсовое проектирование: учебное пособие для СПО. 3-е издание, стереотипное. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 312 с.

13. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (Приказ от 15 декабря 2020 г. № 903н / Приказ от 29 апреля 2022 г. № 279н). Изд-во Мини-Тайп, 2023. 216 с.

14. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Изд-во ДЕАН, 2022. 192 с.

15. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. Изд-во ЦентрМаг, 2022. 584 с.

16. Релейная защита и автоматика силовых масляных трансформаторов [Электронный ресурс]: URL: <https://electricalschool.info/relay/1947-relejjnaja-zashhita-i-avtomatika.html> (дата обращения: 17.11.2023).

17. Сибикин Ю.Д. Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования промышленных предприятий и установок. Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 464 с.

18. Сибикин Ю.Д. Пособие к курсовому и дипломному проектированию электроснабжения промышленных, сельскохозяйственных и городских объектов. Учебное пособие. М.: Форум, Инфра-М, 2023. 383 с.

19. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий. Учебное пособие. М.: Форум, Инфра-М, 2022. 406 с.

20. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования промышленных предприятий и установок. Изд-во Директ-Медиа, 2020. 463 с.