

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 ПС 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области

Обучающийся

К. Н. Заболотнев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., В. С. Романов

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

Тольятти 2024

Аннотация

В работе разработан проект реконструкции электрической части понизительной подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области.

Установлено, что данная реконструкция обусловлена увеличением нагрузки отходящих соединений 10 кВ подстанции, а также несоответствием исходной схемы электрических соединений объекта требованиям надёжности согласно нормативным документам.

Кроме того, на данной подстанции проведена модернизация основного силового оборудования распределительных устройств, а также устройств релейной защиты и автоматики.

Разработана рациональная и надёжная система собственных нужд объекта исследования.

Таким образом, на подстанции значительно повышены параметры надёжности, экономичности, безопасности и бесперебойности электроснабжения, а также селективности (избирательности) и быстродействия защиты.

Объём расчётно-пояснительной записки составляет 65 страниц.

Содержание

Введение.....	5
1 Анализ схемы и технического состояния оборудования подстанции.....	8
1.1 Исходная характеристика схемы и оборудования подстанции.....	8
1.2 Обоснование необходимости проведения реконструкции подстанции	13
2 Расчёт электрических нагрузок	176
3 Проверка силовых трансформаторов подстанции.....	21
4 Расчёт токов короткого замыкания	26
5 Выбор и проверка проводников и электрических аппаратов.....	34
5.1 Выбор и проверка проводников	34
5.2 Выбор и проверка электрических аппаратов	39
6 Релейная защита, молниезащита и собственные нужды подстанции	46
6.1 Выбор устройств системы релейной защиты и автоматики.....	46
6.2 Расчёт молниезащиты подстанции.....	51
6.3 Расчёт системы собственных нужд подстанции.....	53
Заключение	59
Список используемой литературы и используемых источников.....	64

Введение

Известно, что реконструкция понизительных трансформаторных подстанций энергосистем Российской Федерации является актуальной задачей, обусловленной необходимостью повышения надёжности и эффективности электроснабжения в условиях возрастающих требований к качеству и устойчивости энергетических сетей.

Определено, что в последние годы энергосистема страны сталкивается с новыми вызовами, связанными с ростом энергопотребления, устареванием значительной части инфраструктуры, а также интеграцией возобновляемых источников энергии.

Данные факторы предполагают модернизацию существующих подстанций, а также реконструкцию схем их электрических соединений (при несоблюдении стандартов и требований основных нормативных документов, особенно, по критериям надёжности).

Таким образом, основные цели реконструкции и модернизации оборудования понизительных трансформаторных подстанций энергосистем РФ направлены на обеспечение бесперебойного и качественного электроснабжения потребителей, увеличения уровня безопасности, минимизацию рисков аварийных отключений и снижение эксплуатационных затрат.

Одной из ключевых задач является замена устаревшего оборудования на современные высокоэффективные аналоги, которые обеспечивают более высокую надёжность и меньшие потери при передаче электроэнергии.

Важным аспектом реконструкции также является пересмотр и модернизация схем электрических соединений подстанций.

Известно, что все схемы подстанции должны быть адаптированы к современным требованиям, обеспечивая более гибкое управление энергетическими потоками мощности, устойчивость к аварийным ситуациям и возможность подключения дополнительных потребителей или источников

электрической энергии.

В связи с этим, реконструкция схем электрических соединений направлена на улучшение управляемости сети, сокращение времени переключений и минимизацию рисков перегрузок и коротких замыканий.

Такой подход требует анализа текущих конфигураций и разработки новых, более эффективных схем, которые учитывают перспективные нагрузки и изменения в структуре сети.

Кроме того, важным элементом реконструкции понизительных трансформаторных подстанций энергосистем Российской Федерации является также интеграция современных систем автоматизации и управления, что позволяет повысить оперативность и точность реагирования на изменения в работе энергосистемы.

Определено, что внедрение цифровых технологий и интеллектуальных систем управления способствует оптимизации процессов мониторинга и управления сетями, что повышает общую эффективность эксплуатации подстанций и всей энергосистемы в целом.

Ещё одной важной задачей является обеспечение экологической безопасности и соблюдение современных экологических стандартов.

В процессе реконструкции учитываются требования по снижению воздействия на окружающую среду, что включает в себя использование оборудования с пониженным уровнем шума, минимизацией электромагнитных излучений и сокращением выбросов вредных веществ.

Таким образом, реконструкция понизительных трансформаторных подстанций, предусматривает конечной целью развитие экономики и общества.

Основной целью работы является разработка проекта реконструкции электрической части понизительной подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области.

Установлено, что данная реконструкция обусловлена увеличением нагрузки отходящих соединений 10 кВ подстанции, а также несоответствием

исходной схемы электрических соединений объекта требованиям надёжности согласно нормативным документам.

Кроме того, на данной подстанции будет проведена модернизация основного силового оборудования распределительных устройств, а также устройств релейной защиты и автоматики.

«Объектом исследования в работе выступает электрическая часть понизительной подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области.

Предметом исследования являются параметры и показатели надёжности, экономичности, безопасности и бесперебойности электроснабжения, а также селективности и быстродействия защиты» [8].

Кроме того, разработке подлежит рациональная и надёжная система собственных нужд объекта исследования.

Таким образом, после практического внедрения указанных мероприятий, на подстанции будут значительно повышены параметры надёжности, экономичности, безопасности и бесперебойности электроснабжения, а также селективности (избирательности) и быстродействия защиты.

1 Анализ схемы и технического состояния оборудования подстанции

1.1 Исходная характеристика схемы и оборудования подстанции

«Как было указано ранее, объектом исследования в данной работе является понизительная подстанция 35/10 кВ «Ялфимово» [17], которую необходимо реконструировать в связи с увеличением нагрузки потребителей, а также несоответствием схемы электрических соединений требованиям нормативных документов.

Для решения поставленной задачи, на первом этапе работы, приводится исходная характеристика схемы и оборудования подстанции.

«Рассматриваемая в работе понизительная подстанция 35/10 кВ «Ялфимово» (далее – ПС-35/10 кВ «Ялфимово») расположена в городском округе Ступино Московской области» [17].

Данная понизительная подстанция является очень важной в регионе, так как обеспечивает электроэнергией многочисленные промышленные и бытовые потребители на напряжении 10 кВ с последующим понижением данного напряжения до уровня 0,38/0,22 кВ через потребительские подстанции 10/0,4 кВ (в работе не рассматриваются).

«Расположение ПС-35/10 кВ «Ялфимово» на карте местности городского округа Ступино Московской области» [17] представлено на рисунке 1.



Рисунок 1 – Расположение ПС-35/10 кВ «Ялфимово» на карте местности городского округа Ступино Московской области

В результате проведения анализа исходных данных, было установлено, что понизительная подстанция 35/10 кВ «Ялфимово» является транзитной подстанцией энергосистемы Московского региона.

Через неё осуществляется транзит на ПС-35/10 кВ «Яганово» с частичным отбором мощности для питания самой подстанции.

Для этой цели на ПС-35/10 кВ «Ялфимово» в распределительном устройстве напряжением 35 кВ есть транзитная воздушная линия «Ялфимово – Яганово» (показана на рисунке 2).

Данная ВЛ-35 кВ – одноцепная и получает питание от секции сборных шин 35 кВ подстанции по радиальной схеме с использованием провода марки АС-95/16.

ПС-35/10 кВ «Ялфимово» получает питание от энергосистемы по одноцепной линии напряжением 35 кВ «Сетовка – Ялфимово» (показана на рисунке 2) [9]. На указанной питающей ВЛ-35 кВ также использован провод марки АС-95/16.

План расположения питающей и транзитной линий на ПС-35/10 кВ «Ялфимово» представлен на рисунке 2.

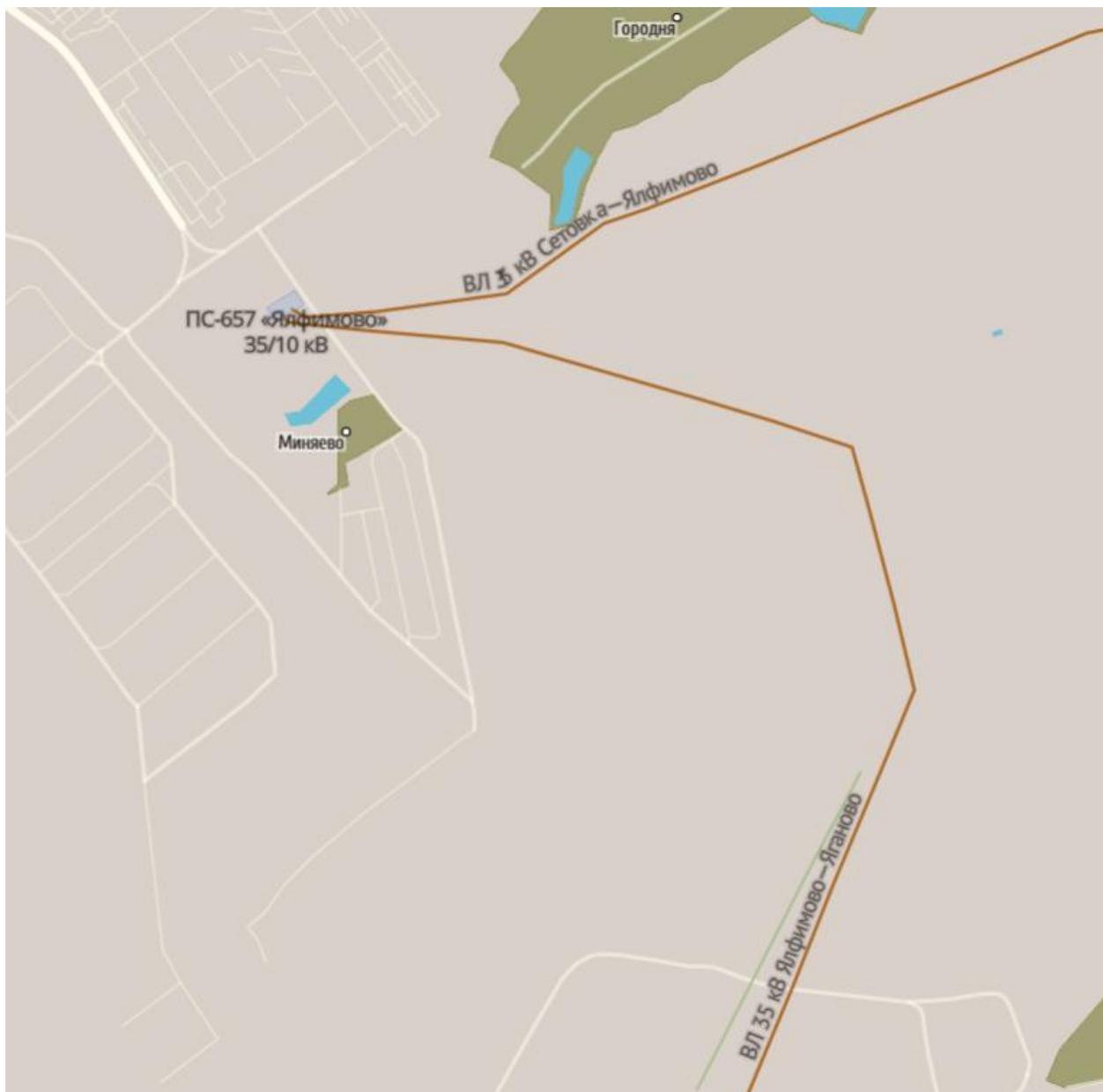


Рисунок 2 – План расположения питающей и транзитной линий на ПС-35/10 кВ «Ялфимово»

На ПС-35/10 кВ «Ялфимово» в исходной схеме электрических соединений, используются следующие схемные решения, описанные далее.

Открытое распределительное устройство 35 кВ (далее – РУ-35 кВ) – служит для приёма электроэнергии от питающей одноцепной линии напряжением 35 кВ «Сетовка – Ялфимово» и последующего его

распределения на силовые трансформаторы подстанции. На РУ-35 кВ подстанции применена схема 35-1 «Блок (линия-трансформатор) с выключателем и разъединителями», что не обеспечивает достаточный и необходимый уровень резервирования и защиты. Таким образом, схему РУ-35 кВ подстанции необходимо реконструировать, применив современные технические решения.

Оба трансформатора марки ТМН-4000/35 в нормальном режиме находятся в работе. Их техническое состояние – после капитального ремонта в 2022 году. Следовательно, в работе их необходимо проверить на допустимую перегрузку вследствие реконструкции схемы РУ-35 кВ и увеличения нагрузки потребителей на подстанции.

«РУ-10 кВ выполнено по схеме 10-9 «Одна рабочая, секционированная выключателем, система шин. Такая схема – надёжная и экономичная, она подходит для снабжения потребителей транзитной подстанции» [5]. Следовательно, схема РУ-10 кВ не нуждается в реконструкции.

Далее проводится характеристика основного оборудования ПС-35/10 кВ «Ялфимово».

Известно, что техническое оснащение подстанции включает высоковольтные вводы, силовые трансформаторы, распределительные устройства и защитное оборудование, каждый элемент которого выполняет важные функции для обеспечения бесперебойности и безопасности электроснабжения.

Техническое состояние оборудования распределительных устройств подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» следующее:

- РУ ВН, 35 кВ: установлены следующие коммутационные и защитные аппараты: «выключатели высокого напряжения марки С – 35/630 (со встроенными трансформаторами тока), разъединители марки РНДЗ-1-35/1000» [17], трансформаторы тока марки ТВ 35-II (встроенные в выключатели), ограничители перенапряжения марки ОПН-35 УХЛ1;

– «РУ НН, 10 кВ: установлены следующие коммутационные и защитные аппараты: выключатели высокого напряжения марки ВМГ-10/630, разъединители марки РВ-10/400, трансформаторы напряжения марки НАМИ-10, трансформаторы тока марки ТПОЛМ-10» [17], ограничители перенапряжения марки ОПН-КР/ТЕЛ-10/12 УХЛ2.

«Также в работе рассматриваются исходные данные потребителей подстанции 35/10 кВ «Ялфимово»» [17] (включая данные о существующей и перспективной нагрузке).

В результате проведения анализа установлено, что к потребителям реконструируемой подстанции относятся промышленные и бытовые объекты, которые имеют различную мощность и категории надёжности.

Однако их нагрузка увеличилась (вследствие ввода в работу новых потребителей как бытового, так и промышленного назначения). С учётом этого, необходимо провести проверку правильности выбора решений.

Исходные данные потребителей реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные потребителей реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово»

Наименование присоединения	Нагрузка проектная (исходная), $P_{м1}$, кВт	Нагрузка перспективная (фактическая), $P_{м2}$, кВт	Категория надёжности потребителей
СШ1-10 кВ			
Насосная станция-1	950	1100	1
Городня-1	650	700	2,3
Промышленные потребители-1	800	900	1,2
Всего по СШ1-10 кВ	2400	2700	1,2,3
СШ2-10 кВ			
Насосная станция-2	950	1100	1
Городня-2	650	700	2,3
Промышленные потребители-2	800	900	1,2
Всего по СШ2-10 кВ	2400	2700	1,2,3
Всего нагрузки ТП-35/10 кВ «Ялфимово» (вводные шины 35 кВ)	4800	5400	1,2,3

Таким образом, в результате проведения анализа потребителей реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», установлено, что от каждой секции сборных шин РУ-10 кВ подстанции получают питание по три присоединения потребителей.

От первой секции сборных шин 10 кВ подстанции получают питание:

- насосная станция-1;
- городня-1;
- промышленные потребители-1.

От второй секции сборных шин 10 кВ подстанции получают питание:

- насосная станция-2;
- городня-2;
- промышленные потребители-2.

Установлено, что суммарное увеличение нагрузки потребителей подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» составило 600 кВт (нагрузка повысилась с 4800 кВт до 5400 кВт). С учётом данного факта, необходимо провести проверку всех основных технических решений на подстанции.

1.2 Обоснование необходимости проведения реконструкции подстанции

Исходя из проведённого «анализа схемы и оборудования на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» установлено, что исходная схема с одной питающей и одной транзитной линией не соответствует требованиям нормативных документов» [5] и схемам, которые рекомендуются к применению на транзитных подстанциях (в виду полного отсутствия резервирования). Таким образом, в схеме РУ-35 кВ подстанции необходимо устранить данный существенный недостаток.

Для решения поставленной задачи рекомендуется в «РУ-35 кВ применить рекомендуемую схему 35-9 «Одна рабочая, секционированная выключателем, система шин».

Данная схема предусматривает одну систему шин, разделённую на две равноценные рабочие секции с использованием разъединителей и выключателей.

Основное преимущество этой схемной конструкции заключается в обеспечении высокой надёжности электроснабжения при относительной простоте устройства и управления.

Одним из ключевых достоинств схемы является её простота в эксплуатации и управлении.

Разделение системы шин на секции позволяет легко проводить переключения и обслуживать оборудование, что существенно сокращает время простоя и помогает избежать аварийных ситуаций.

В случае необходимости ремонта или обслуживания отдельных элементов системы можно отключить одну из секций, не прерывая работу всей подстанции.

Такая конфигурация обеспечивает высокую гибкость управления энергоснабжением и снижает риски потерь электроэнергии.

Таким образом, данная схема – надёжная и экономичная, она в полной мере подходит для обеспечения электроснабжения потребителей данной транзитной подстанции.

В связи с тем, что подавляющее большинство потребителей, которые питаются от подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», относятся к 1 и 2 категориям надёжности, рекомендуется на всех ступенях трансформации применять два ввода.

Исходя из этого, необходимо ввести в эксплуатацию вторую питающую линию 35 кВ, а также вторую транзитную линию 35 кВ.

При этом, с целью экономии средств, данные линии предлагается сделать из одноцепных двухцепными, сменив на них траверсы (без замены опор).

Следовательно, такое мероприятие даст также экономический эффект от внедрения.

Кроме того, во всех РУ необходимо провести модернизацию электрических аппаратов, заменив устаревшие модификации на новые современного типа.

Установлено, что суммарное увеличение нагрузки потребителей подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» составило 600 кВт (нагрузка повысилась с 4800 кВт до 5400 кВт).

С учётом данного факта, необходимо провести проверку всех основных технических решений на подстанции.

Таким образом, при решении приведённых поставленных задач, в схеме электрических соединений подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» будут значительно повышены условия надёжности, секционирования и резервирования, а также экономичности.

Все предложения необходимо подтвердить расчётным путём в работе далее.

Выводы по разделу 1:

В работе проведён анализ исходной схемы и оборудования на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», в результате чего было установлено следующее:

- так как существующая схема не удовлетворяет требованиям надёжности для транзитных подстанций (в виду полного отсутствия резервирования), для модернизации схемы электрических соединений распределительного устройства (РУ) на 35 кВ на подстанции требуется провести реконструкцию. В рамках данного проекта рекомендуется внедрить схему 35-9, которая предполагает использование одной рабочей системы шин, разделённой на секции посредством выключателя;
- в связи с тем, что подавляющее большинство потребителей, которые питаются от подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», относятся к 1 и 2 категориям надёжности, рекомендуется на всех ступенях трансформации, а также на источниках питания и транзита, применять

два независимых ввода. Исходя из этого, необходимо ввести в эксплуатацию вторую питающую линию 35 кВ, а также вторую транзитную линию 35 кВ. При этом, с целью экономии средств, данные линии предлагается сделать из одноцепных двухцепными, сменив на них траверсы (без замены опор);

- рекомендовано во всех РУ провести модернизацию электрических аппаратов, заменив устаревшие модификации на новые современного типа;
- в связи со значительным увеличением мощности нагрузки подстанции (на 600 кВт), необходимо провести проверку всех основных технических решений на подстанции.

Таким образом, при решении приведённых поставленных задач, в «схеме электрических соединений подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» будут значительно повышены условия безопасности, надёжности, экономичности, бесперебойности электроснабжения, селективности защиты и экологичности» согласно [12].

2 Расчёт электрических нагрузок

Расчёт электрических нагрузок на понизительной трансформаторной подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» в Московской области является фундаментальной основой для проведения её реконструкции.

В связи с ростом потребительской нагрузки, питающейся от этой подстанции на номинальном напряжении 10 кВ, возникает необходимость проверки всех выбранных технических решений на подстанции.

При этом увеличение нагрузок затрагивает не только РУ-10 кВ, но также приводит к изменению параметров нагрузочной способности силовых трансформаторов и питающих линий на напряжении 35 кВ, а также к пересмотру расчётов токов короткого замыкания и выбору необходимого оборудования.

Необходимость проведения этого расчёта продиктована задачей обеспечения надёжного и безопасного электроснабжения, а также оптимизацией энергозатрат и повышением устойчивости энергосистемы Московской области на долгосрочную перспективу.

Точный расчёт позволяет не только избежать потенциальных аварийных ситуаций, но и значительно сократить эксплуатационные расходы, обеспечивая стабильное развитие региона в условиях возрастающих требований к качеству и надёжности электроснабжения. Также известно, что существенные неточности и погрешности в этих расчётах могут привести к перегрузкам, с которыми существующее оборудование не справится, что неизбежно вызовет частые аварийные отключения, ухудшение качества поставляемой электроэнергии и рост эксплуатационных расходов.

Кроме того, расчёт нагрузок является важным инструментом для оптимизации работы подстанции с точки зрения её энергоэффективности.

Следовательно, увеличение нагрузки на понизительной подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» требует комплексного анализа, который позволит принять правильные технические решения, включая необходимость

модернизации устаревшего оборудования как в распределительных устройствах, так и в их ячейках. Для выполнения этого расчёта используется метод коэффициента спроса по соответствующей методике [10], что обеспечивает точность и обоснованность всех последующих решений по модернизации и адаптации подстанции к новым условиям эксплуатации.

«Максимальная расчётная активная нагрузка для каждого присоединения подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» с учётом соответствующего коэффициента спроса, кВт, вычисляется так» [7]:

$$P_p = P_n \cdot K_c, \quad (1)$$

где « P_n – номинальная (паспортная) активная нагрузка, кВт;

K_c – значение коэффициента спроса» [7].

«Максимальная расчётная полная нагрузка для каждого присоединения подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» с учётом соответствующих коэффициентов спроса и мощности, кВА, вычисляется так» [7]:

$$S_p = \frac{P_p}{\cos \varphi}. \quad (2)$$

где $\cos \varphi$ - «коэффициент активной мощности, о.е.» [7].

Соответственно, максимальная расчётная реактивная нагрузка для каждого присоединения подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» с учётом соответствующего коэффициента спроса, квар, вычисляется так:

$$Q_p = \sqrt{S_p^2 - P_p^2}. \quad (3)$$

Максимальная групповые расчётные нагрузки секций сборных шин и всей подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» (соответственно, активная, реактивная

и полная) определяются как полная сумма соответствующих нагрузок присоединений, питающихся от них:

$$P_{P.\Sigma} = \sum P_P. \quad (4)$$

$$Q_{P.\Sigma} = \sum Q_P. \quad (5)$$

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

При этом значение расчётного тока на всех звеньях цепи подстанции вычисляется по известной формуле [7]:

$$I_{p.} = \frac{S_{P.}}{\sqrt{3} \cdot U_{н.}}, \quad (7)$$

где $U_{н.}$ – номинальное напряжение ступени трансформации подстанции, на которой определяется расчётное значение тока, кВ.

«На примере первого присоединения напряжением 10 кВ (Насосная станция-1) подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» по приведённым условиям (1) – (3) и (7)» [7]:

$$P_p = 1100 \cdot 1 = 1100 \text{ кВт},$$

$$S_p = \frac{1100}{0,94} = 1170,2 \text{ кВА},$$

$$Q_p = \sqrt{1170,2^2 - 1100^2} = 399,2 \text{ квар},$$

$$I_{p.} = \frac{1170,2}{\sqrt{3} \cdot 10} = 67,6 \text{ А}.$$

В таблице 2 представлены данные расчёта электрических нагрузок на понизительной трансформаторной подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», расположенной в Московской области.

Таблица 2 – Результаты расчёта электрических нагрузок на понизительной трансформаторной подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области

Наименование присоединения	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , А
СШ1-10 кВ				
Насосная станция-1	1100	399,2	1170,2	67,6
Городня-1	700	254,1	744,7	43,0
Промышленные потребители-1	900	326,5	957,4	55,3
Всего по СШ1-10 кВ	2700	979,8	2872,3	165,8
СШ2-10 кВ				
Насосная станция-2	1100	399,2	1170,2	67,6
Городня-2	700	254,1	744,7	43,0
Промышленные потребители-2	900	326,5	957,4	55,3
Всего по СШ2-10 кВ	2700	979,8	2872,3	165,8
Всего нагрузки ТП-35/10 кВ «Ялфимово» (вводные шины 35 кВ)	5400	1959,6	5744,6	94,8

Результаты расчёта электрических нагрузок используются далее.

Выводы по разделу 2:

Основываясь на полученных результатах расчёта установлено, что суммарная полная нагрузка первой и второй секций сборных шин напряжением 10 кВ составила по 2872,3 кВА, а расчётный ток – по 165,8 А.

Суммарная полная нагрузка всей реконструируемой подстанции равна 5744,6 кВА.

Расчётный ток на вводе 35 кВ равен 94,8 А.

Полученные результаты используются в работе далее при проверке всех технических решений на объекте реконструкции.

3 Проверка силовых трансформаторов подстанции

Проверка силовых трансформаторов на подстанции ПС-35/10 кВ «Ялфимово» в Московской области на соответствие обновлённым нагрузкам после реконструкции является ключевым этапом. Она направлена на гарантирование надёжности и стабильности электроснабжения в связи с модернизацией схемы электрических соединений РУ-35 кВ, а также подтверждает эффективность выполненных мероприятий по обновлению оборудования.

Установлено, что силовые трансформаторы занимают центральное место в процессе преобразования и распределения электроэнергии между различными уровнями напряжения, и их соответствие расчётным нагрузкам играет решающую роль в поддержании надёжности всей энергосистемы.

Недооценка или неправильная оценка нагрузочной способности этих электрических машин может привести к серьёзным последствиям, включая их преждевременный выход из строя, снижение общей надёжности сети и рост эксплуатационных затрат.

Поэтому проведение требуемых проверок позволяет выявить возможные несоответствия между проектными характеристиками трансформаторов и реальными условиями их эксплуатации, что даёт возможность своевременно принять корректирующие меры для предотвращения сбоев в работе подстанции.

Однако в случае обнаружения несоответствий и невыполнений проверок, могут потребоваться такие меры, как замена трансформаторов на более мощные аналоги или перераспределение нагрузки, включая потенциальное отключение потребителей третьей категории надёжности.

Перечисленные меры направлены на предотвращение перегрузок и обеспечение долговременной стабильности работы подстанции и энергосистемы региона.

Проверка силовых трансформаторов на подстанции ПС-35/10 кВ «Ялфимово» требует комплексного подхода, который учитывает не только текущие эксплуатационные требования, но и возможные будущие изменения в энергопотреблении.

Такой подход позволяет подготовить подстанцию к будущим вызовам, связанным с увеличением нагрузок, и избежать проблем, которые могут возникнуть в результате этих изменений.

Таким образом, проверка силовых трансформаторов на соответствие новым нагрузкам после реконструкции обеспечивает не только надёжность и устойчивость электроснабжения, но и подтверждает успешность и обоснованность проведённых реконструкционных мероприятий, гарантируя, таким образом, долгосрочную стабильность и надёжность работы всей подстанции.

«Непосредственная проверка мощности понизительных трансформаторов для установки на реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» проводится по «максимальной нагрузке подстанции»:

$$S_{\text{ном.т.р}} \geq \frac{S_{\text{м.ПС}}}{N \cdot K_3}, \quad (8)$$

где « $S_{\text{м.ПС}}$ – максимальное значение полной нагрузки подстанции (принимается равной расчётной нагрузке подстанции на вводе 35 кВ» [4], рассчитанной в работе ранее);

K_3 – нормативный коэффициент загрузки трансформаторов подстанции (с учётом состояния трансформаторов после капитального ремонта, проведённого в 2022 году, принимается значение $K_3 = 0,75$)» [4].

Для условий данной реконструируемой подстанции с учётом суммарной полной нагрузки:

$$S_{\text{ном.т.р}} \geq \frac{5744,6}{2 \cdot 0,75} = 3829,7 \text{ кВА.}$$

Для подстанции предусматривается установка двух силовых трансформаторов стандартной мощности, которая составляет 4000 кВА (4 МВА) в соответствии с ближайшим подходящим значением.

Данному условию полностью соответствуют два силовых трансформатора марки ТМН-4000/35 с классами напряжений 35/10 кВ, которые были установлены на подстанции ранее [19].

Повторная проверка по номинальной мощности выполняется:

$$4000 \text{ кВА} \geq 3829,7 \text{ кВА.}$$

Следовательно, оба силовые трансформатора марки ТМН-4000/35 предварительно проходят проверку.

Кроме того известно, что выбор мощности трансформаторов непосредственно связан с вопросами безопасности.

При работе трансформаторов в условиях перегрузки возрастает вероятность перегрева, что может вызвать аварийные ситуации, включая возгорания и повреждения инфраструктуры.

С учётом этих факторов проверка мощности трансформаторов требует проведения тщательного анализа всех возможных нагрузочных режимов для обеспечения стабильной и безопасной работы подстанции.

Ключевую роль в этом процессе играет оценка перегрузочной способности трансформаторов, особенно в контексте эффективности их системы охлаждения.

В условиях повышенных нагрузок эффективность охлаждения становится критически важным фактором, способным предотвратить перегрев и избежать серьёзных повреждений оборудования.

Таким образом, проверка системы охлаждения трансформаторов позволяет не только подтвердить их соответствие заданным нагрузкам, но и гарантировать безопасную и надёжную эксплуатацию оборудования в долгосрочной перспективе.

Такой подход обеспечивает защиту как самой подстанции, так и её обслуживающего персонала, минимизируя риски аварий и обеспечивая стабильность энергоснабжения.

«Учитывая приведённые сведения, а также систему охлаждения трансформаторов и тот факт, что в 2022 году они прошли капитальный ремонт, проводится проверка системы охлаждения трансформаторов на перегрузочную способность, соответственно, в нормальном и послеаварийном режимах работы ПС-35/10кВ «Ялфимово» [4]:

$$K_{з.н} = \frac{0,5 \cdot S_{м.ПС}}{S_{ном.т}} \leq 0,75, \quad (9)$$

$$K_{з.п} = \frac{S_{м.ПС}}{S_{ном.т}} \leq 1,5. \quad (10)$$

«Проверки силовых трансформаторов ПС-35/10 кВ на перегрузку выполняются» [4]:

$$K_{з.н} = \frac{0,5 \cdot 5744,6}{4000} = 0,72 \leq 0,75.$$

$$K_{з.п} = \frac{5744,6}{4000} = 1,44 \leq 1,5.$$

Таким образом, трансформаторы модели ТМН-4000/35 отвечают всем требованиям по нагрузочной способности системы охлаждения, подтверждая их соответствие для использования на объекте.

Это свидетельствует о возможности дальнейшей эксплуатации оборудования без замены или выполнения капитального ремонта.

Выводы по разделу 3:

Анализ подтвердил, что трансформаторы ТМН-4000/35, эксплуатируемые на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», соответствуют всем требованиям по проверке охлаждающей системы на устойчивость к нагрузкам и перегрузкам. Данное соответствие обеспечивается модернизацией схемы РУ-35 кВ, изменениями в режимах работы подстанции и ростом нагрузки на потребителей с напряжением 10 кВ.

На основании полученных данных установлено, что замена данных трансформаторов в условиях реконструкции объекта не требуется.

Установлено также, что в послеаварийном режиме работы один трансформатор, оставшийся в работе, будет питать всю нагрузку подстанции без ущерба для своей системы охлаждения, обеспечивая надёжным питанием потребителей 1 и 2 категорий надёжности (с учётом отключения потребителей 3 категории).

4 Расчёт токов короткого замыкания

Расчёт токов короткого замыкания (КЗ) является критически важным этапом, обеспечивающим проверку термической и динамической устойчивости основного оборудования реконструируемой электрической сети подстанции ПС-35/10 кВ «Ялфимово» в Московской области. Особое внимание уделяется проводникам, включая кабельные линии, а также устройствам защиты и коммутации, которые играют ключевую роль в надёжной работе распределительных устройств всех классов напряжения.

Одной из важнейших задач расчёта токов короткого замыкания является оптимальная настройка релейной защиты. «Такая задача не менее значима, поскольку от неё зависит способность устройств релейной защиты оперативно и точно отключать повреждённые участки сети, предотвращая дальнейшее развитие аварийных ситуаций и минимизируя возможные повреждения оборудования. Таким образом, расчёт токов КЗ напрямую способствует обеспечению безопасности и стабильности работы всей энергосистемы» [15].

Процесс вычисления токов короткого замыкания состоит из ряда важных шагов. Сначала проводится сбор и анализ исходных данных, относящихся к реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» и электрической сети Московской области в целом. В эти данные входят параметры номинального напряжения, мощности трансформаторов, длины и сечения кабелей, а также характеристики источников питания. На основе собранной информации составляется эквивалентная схема замещения, которая становится основой для последующих вычислений.

Далее выполняется расчёт характеристик элементов эквивалентной схемы, включая активные и реактивные сопротивления линий, трансформаторов и прочих компонентов. Эти данные необходимы для определения эквивалентного сопротивления сети в месте короткого замыкания, что позволяет провести точный расчёт токов КЗ.

«На завершающем этапе проводятся расчёты токов короткого замыкания для различных типов замыканий, включая трёхфазные и двухфазные замыкания. Также определяется ударный ток трёхфазного КЗ в начальный момент времени. Указанные расчёты позволяют сделать выводы о корректности выбора и настройки защитных устройств, а также об устойчивости оборудования подстанции» [13].

Расчёт токов короткого замыкания является важным элементом реконструкции подстанции 35/10 кВ «Ялфимово». Его выполнение позволяет правильно подобрать параметры защитных устройств, проверить устойчивость работы оборудования и повысить надёжность всей электрической системы.

На рисунке 3 представлена схема, используемая для расчёта токов КЗ. Она предоставляет наглядное отображение структуры сети, что способствует точному проведению расчётов и играет значительную роль в успешной реализации модернизации подстанции.

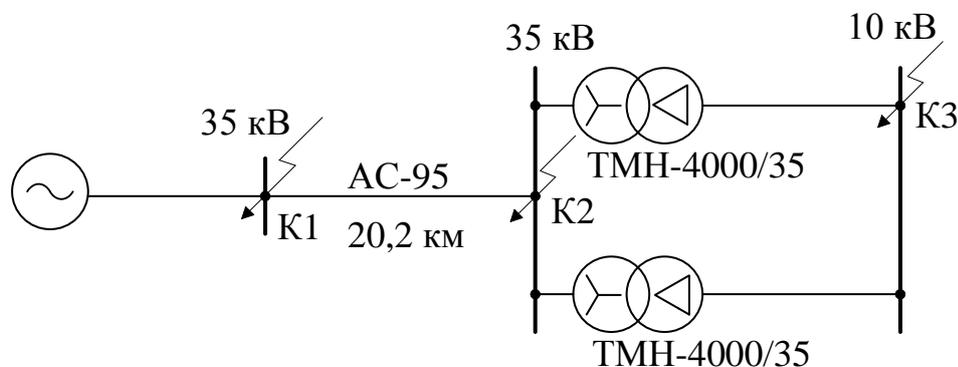


Рисунок 3 – Исходная расчётная схема для определения токов КЗ на реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово»

На первом этапе необходимо собрать исходные данные о реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» и электрической сети Московской области в целом.

Установлено, что основными составляющими, влияющими на результаты расчёта токов КЗ после реконструкции подстанции, являются:

- параметры энергосистемы;

- питающие линии напряжением 35 кВ – 2 единицы;
- трансформаторы марки ТМН-4000/35 – 2 единицы.

Для вычисления токов короткого замыкания на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», проходящей реконструкцию, создаётся эквивалентная схема замещения электрической сети. Подробное описание данной схемы приведено в работе и дополнено иллюстрацией на рисунке 4.

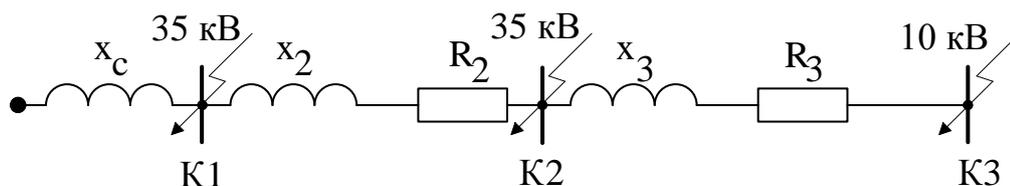


Рисунок 4 – Эквивалентная схема замещения для определения токов КЗ на реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово»

«Расчет токов трехфазного КЗ выполняется в именованных единицах, принимаются в качестве базисного напряжения на выводах трансформаторов в максимальном режиме устройства РПН:

- $U_{п.1} = 38,5 \text{ кВ}$ [14];
- $U_{п.2} = 10,5 \text{ кВ}$.

Ток КЗ на шинах энергосистемы в точке К1 взят по данным энергосистемы и составляет 1,5 кА в максимальном режиме.

В работе необходимо «провести расчёт токов КЗ на выводах силового трансформатора в сети 35 кВ (точка К2) и на выводах трансформатора в точке К3 (сеть напряжением 10 кВ).

«Сопротивление энергосистемы:

$$X_c = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot I_{к.макс}^{(3)}}. \quad (11)$$

С учётом токов КЗ на шинах 35 кВ в точке К1 в максимальном режиме:

$$X_c = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 1,5} = 13,47 \text{ Ом.}$$

Сопrotивления питающей линии электропередачи напряжением 35 кВ и суммарной длиной $L=20,2$ км, выполненной проводом АС-95 с удельными параметрами $r_{y\partial} = 0,37$ Ом/км, $x_{y\partial} = 0,385$ Ом/км:

$$R_2 = r_{y\partial} \cdot L, \quad (12)$$

$$X_2 = x_{y\partial} \cdot L, \quad (13)$$

где $x_{y\partial}$ – удельное индуктивное сопротивление ВЛ, Ом/км;

$r_{y\partial}$ – удельное активное сопротивление ВЛ, Ом/км;

L – суммарная длина ВЛ, км» [14].

Для реконструируемой подстанции 35/10 кВ:

$$R_2 = 0,37 \cdot 20,2 = 7,47 \text{ Ом,}$$

$$X_2 = 0,385 \cdot 20,2 = 7,78 \text{ Ом.}$$

Следующий этап расчёта предусматривает «сворачивание» схемы к каждой точке короткого замыкания и проведения расчёта токов КЗ в них.

«Суммарное сопротивление до расчётной точки К2» [14]:

$$X_{c.2} = X_c + X_2, \text{ Ом,} \quad (14)$$

$$R_{c.2} = R_2, \text{ Ом,} \quad (15)$$

$$X_{c.2} = 13,47 + 7,78 = 21,25 \text{ Ом,}$$

$$R_{c.2} = 7,47 \text{ Ом.}$$

«Технические данные трансформатора ТМН-4000/35: $U_{вн}=38,5$ кВ; $U_{нн}=10,5$ кВ; $U_{к\ мин}=6,9$ %; $U_{к\ ср}=7,5$ %; $U_{к\ макс}=7,6$ %; РПН $\pm 2 \cdot 2,5\%$; $\Delta P_k=33,5$ кВт» [7].

«Активное сопротивление трансформатора» [14]:

$$R_{т.п} = \frac{\Delta P_k \cdot 10^{-3} \cdot U_6^2}{S_{ном.т.}^2} \quad (16)$$

$$R_{т.п} = \frac{33,5 \cdot 10^{-3} \cdot 38,5^2}{4^2} = 2,56 \text{ Ом.}$$

«Индуктивное сопротивление трансформатора» [14]:

$$X_{т.п} = \frac{U_{к.ср.\%} \cdot U_6^2}{100 \cdot S_{ном.т.}^2} \quad (17)$$

«Индуктивное сопротивление силового трансформатора» [14]:

$$X_{3ср} = \frac{7,5 \cdot 38,5^2}{100 \cdot 4^2} = 22,97 \text{ Ом.}$$

Определяется ток КЗ в точке К2.

«Результирующие сопротивления к точке К2» [14]:

$$R_{\Sigma} = R_{c.2}, \text{ Ом,} \quad (18)$$

$$R_{\Sigma} = 7,47 \text{ Ом.}$$

$$X_{\Sigma} = X_{c.2}, \text{ Ом,} \quad (19)$$

$$X_{\Sigma} = 21,25 \text{ Ом.}$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}, \quad (20)$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{7,47^2 + 21,25^2} = 22,52 \text{ Ом.}$$

«Ток трехфазного короткого замыкания в расчётных точках» [14]:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{\text{п}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}}, \text{ А.} \quad (21)$$

«Ток трёхфазного КЗ точке К2» [14]:

$$I_{\kappa 2}^{(3)} = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 22,52} = 0,897 \text{ кА.}$$

«Ударный ток короткого замыкания» [14]:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \text{ кА,} \quad (22)$$

где « $k_{\text{уд}}$ — ударный коэффициент тока короткого замыкания» [14].

«Ударный коэффициент» [14]:

$$k_{\text{уд}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3}{X_{\Sigma}/R_{\Sigma}}}. \quad (23)$$

«Ударные коэффициент и ток для расчётной точки К2» [14]:

$$k_{\text{уд.к2}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3}{21,25/7,47}} = 1,36,$$

$$i_{\text{уд.к2}} = \sqrt{2} \cdot 1,36 \cdot 0,897 = 1,727 \text{ кА.}$$

«Суммарное активное сопротивление до точки К3» [14]:

$$R_{\Sigma} = R_{c,2} + R_{3\text{cp}}, \text{ Ом}, \quad (24)$$

$$R_{\Sigma} = 7,47 + 2,56 = 10,03 \text{ Ом}.$$

«Суммарное индуктивное сопротивление до точки К3» [14]:

$$X_{\Sigma} = X_{c,2} + X_{3\text{cp}}, \text{ Ом}, \quad (25)$$

$$X_{\Sigma} = 21,25 + 22,97 = 44,22 \text{ Ом}.$$

«Суммарное полное сопротивление до точки К3» [14]:

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}, \quad (26)$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{10,03^2 + 44,22^2} = 45,34 \text{ Ом}.$$

«Ток трёхфазного КЗ точке К3» [14]:

$$I_{к3}^{(3)} = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 45,34} \cdot \frac{35}{10} = 1,486 \text{ кА}.$$

«Ударные коэффициент и ток в точке К3» [14]:

$$k_{уд.к3} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3}{44,22/10,03}} = 1,516,$$

$$i_{уд.к3} = \sqrt{2} \cdot 1,516 \cdot 1,486 = 3,184 \text{ кА}.$$

Данные, полученные в результате расчёта токов короткого замыкания, а также значения ударных токов, сведены в таблицу 3. В ней представлены ключевые параметры, которые используются для анализа состояния электрической сети и оценки её надёжности.

Таблица 3 – Токи короткого замыкания и ударные токи в основных расчётных точках КЗ

Параметр и единица его измерения	Значение параметра в расчётной точке	
	К2	К3
$I_k^{(3)}$, кА	0,897	1,486
$i_{уд}$, кА	1,727	3,185

«Результаты расчёта используются в работе далее при выборе и проверке основного оборудования подстанции в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ» [13].

Выводы по разделу 4:

В рамках исследования произведены расчёты предельных значений трёхфазного короткого замыкания и ударного тока в двух ключевых точках электрической сети. Первая точка, обозначенная как К2, находится на выводах силового трансформатора, подключённого к сети с напряжением 35 кВ, где рассчитаны параметры для оценки надёжности работы оборудования при высоких нагрузках. Вторая точка, К3, расположена на выводах трансформатора в сети напряжением 10 кВ. Для каждой из этих точек выполнены подробные вычисления, которые необходимы для анализа устойчивости системы и выбора подходящих защитных устройств.

Данный расчёт проведён в максимальном режиме работы с учётом максимума положения устройства РПН.

Установлено, что на выводе силового трансформатора подстанции значения трёхфазных токов КЗ будут следующими:

- на выводах 35 кВ – 0,897 кА;
- на выводах 10 кВ – 1,486 кА.

Соответственно, значения ударных токов короткого замыкания в указанных расчётных точках будут составлять:

- на выводах 35 кВ – 1,727 кА;
- на выводах 10 кВ – 3,185 кА.

5 Выбор и проверка проводников и электрических аппаратов

5.1 Выбор и проверка проводников

Как известно, рациональный выбор и проверка проводников для подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» в Московской области, как правило, являются критически важными этапами процесса реконструкции электрической части подстанции.

Проводники, как установлено, играют центральную роль в передаче электроэнергии от источника к потребителям, и от их выбора напрямую зависит надёжность и эффективность функционирования подстанции. Определение оптимального сечения и типа проводников должно основываться на тщательном учёте максимальных нагрузок, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации.

Установлено, что недостаточное сечение проводников может привести к их перегреву и снижению пропускной способности, что, в свою очередь, может вызвать аварийные отключения, простои производства и значительные экономические потери.

С другой стороны, выбор проводников с избыточным сечением ведёт к неоправданным затратам на их приобретение и установку, что снижает экономическую эффективность всего проекта.

При выборе проводников, как известно, необходимо учитывать не только текущие нагрузки, но и прогнозировать возможные будущие изменения в производственных процессах, которые могут повлиять на эксплуатационные условия.

Такой подход определённо обеспечивает долгосрочную надёжность работы подстанции.

При выборе также важно учитывать различные сценарии эксплуатации и факторы, которые могут оказать влияние на нагрузки и эксплуатационные условия проводников.

Установлено, что рационально выбранные проводники способствуют снижению потерь энергии при её передаче и распределении, что, в конечном итоге, положительно сказывается на экономических показателях подстанции и всей энергосистемы в целом.

В дальнейшем исследовании осуществляется проверка проводников, планируемых к установке на реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», расположенной в Московской области. Проверка проводится с целью оценки их соответствия реальной нагрузке, которая возросла, а также обновлённой схеме РУ-35 кВ на указанной подстанции.

До проведения реконструкции подстанции, на ней были использованы следующие типы проводников:

- одна одноцепная питающая воздушная линия 35 кВ «Сетовка – Ялфимово», получает питание от энергосистемы (ПС-110/35/10 «Сетовка») на напряжении 35 кВ подстанции по радиальной схеме с использованием провода марки АС-95/16 (в результате проведения реконструкции было обосновано сооружение второй аналогичной питающей линии 35 кВ на тех же опорах);
- одна одноцепная транзитная воздушная линия 35 кВ «Ялфимово – Яганово», получает питание от секции сборных шин 35 кВ подстанции по радиальной схеме с использованием провода марки АС-95/16 (в результате проведения реконструкции было обосновано сооружение второй аналогичной транзитной линии 35 кВ на тех же опорах);
- шесть отходящих кабельных линий марки АСБ-10 различных номинальных сечений – для питания потребителей подстанции на номинальном напряжении 10 кВ.

В результате реконструкции предусмотрено сооружение дополнительных питающей и транзитной линий напряжением 35 кВ (они будут двухцепными). Их сечение необходимо выбрать и проверить в работе.

Остальные сечения линий напряжением 35 кВ и 10 кВ на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» подлежат проверке на соответствие условиям допустимых нагрузок, устойчивости к токам аварийного режима и механической прочности.

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

$$F_3 = \frac{I_p}{j_3}, \quad (27)$$

где « j_3 – экономическая плотность тока, А/мм² (для проводников воздушных линий марки АС принимается $j_3=1,1$ А/мм²)» [11].

После реконструкции схемы подстанции и ввода новой питающей линии, которая резервирует питания, принимается значение максимального рабочего тока питающей ВЛ-35 кВ большим в 1,4 раза тока нормального режима [15]:

$$I_{p.\max} = 1,4 \cdot \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.}}} = 1,4 \cdot I_p, \quad (28)$$

где « S_p – расчётная полная нагрузка воздушной линии, кВА» [15].

«Проверка выбранного сечения провода в нормальном режиме» [15]:

$$I_{\text{доп}} \geq I_p, \quad (29)$$

где « $I_{\text{доп}}$ – допустимое справочное значение тока проводника, А» [15].

«В максимальном режиме» [15]:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{p.\max} \cdot \quad (30)$$

«По механической прочности» [15]:

$$F_{\text{ст}} \geq F_{\text{мин}}, \text{ мм}^2. \quad (31)$$

«Проводится проверка сечения провода первой питающей линии ВЛ-35 кВ (ВЛ-35 кВ-1)» [11]:

$$F_3 = \frac{94,8}{1,1} \approx 85,4 \text{ мм}^2.$$

«Исходя из полученного результата, принимается провод марки АС-95/16 с допустимым током, равным 330 А.

Сечение и марка данного проводника совпадает с сечением и маркой проводника, установленного на данной линии до проведения реконструкции.

Расчётный ток максимального режима на стороне 35 кВ подстанции с учётом резервирования» [11]:

$$I_{\text{р.макс}} = 1,4 \cdot 94,8 = 132,7 \text{ А.}$$

«Проверка выбранного провода ВЛ-35 кВ по току, соответственно, нормального и максимального режима выполняется» [11]:

$$330 \text{ А} \geq 94,8 \text{ А,}$$

$$330 \text{ А} \geq 132,7 \text{ А.}$$

«Условия механической прочности для ВЛ-35 кВ также соблюдены» [11]:

$$95 \text{ мм}^2 \geq 70 \text{ мм}^2.$$

Проведённый анализ подтвердил, что провод марки АС-95/16 с максимально допустимым током в 330 А полностью соответствует требованиям для питающей линии ВЛ-35 кВ. Подробные результаты расчётов для остальных проводников, используемых на подстанции, можно найти в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты выбора проводников на подстанции

Наименование присоединения	I_p , А	$I_{p,max}$, А	Марка провода	$I_{доп.}$, А
Питающие ВЛ-35 кВ				
ВЛ-35 кВ – «Сетовка – Ялфимово» (Т1)	94,8	132,7	АС-95/16	330,0
ВЛ-35 кВ – «Сетовка – Ялфимово» (Т2)	94,8	132,7	АС-95/16	330,0
Транзитные ВЛ-35 кВ				
ВЛ-35 - «Ялфимово – Яганово» (Л1)	94,8	132,7	АС-95/16	330,0
ВЛ-35 - «Ялфимово – Яганово» (Л2)	94,8	132,7	АС-95/16	330,0
Линии 10 кВ к потребителям				
Насосная станция-1	67,6	42,5	АСБ-10 (3×50)	134,0
Городня-1	43,0	26,8	АСБ-10 (3×25)	91,0
Промышленные потребители-1	55,3	34,4	АСБ-10 (3×35)	112,0
Насосная станция-2	67,6	42,5	АСБ-10 (3×50)	134,0
Городня-2	43,0	26,8	АСБ-10 (3×25)	91,0
Промышленные потребители-2	55,3	34,4	АСБ-10 (3×35)	112,0

В результате проведения выбора и проверки сечения проводников на реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», обосновано применение следующих проводов и кабелей:

- для питающей двухцепной воздушной линии 35 кВ «Сетовка – Ялфимово», получающей питание от энергосистемы (ПС-110/35/10 «Сетовка») на напряжении 35 кВ, выбран и подтверждён новый провод второго ввода марки АС-95/16, а также проверен существующий провод первого ввода марки АС-95/16 (в результате проведения реконструкции было обосновано сооружение второй аналогичной питающей линии 35 кВ на тех же опорах);
- для транзитной двухцепной воздушной линии 35 кВ «Ялфимово – Яганово», получающей питание от объекта реконструкции на напряжении 35 кВ, выбран и подтверждён новый провод второй транзитной линии марки АС-95/16, а также проверен существующий

провод первой транзитной линии марки АС-95/16 (в результате проведения реконструкции было обосновано сооружение второй аналогичной транзитной линии 35 кВ на тех же опорах);

- на шести отходящих кабельных линиях для питания потребителей подстанции на номинальном напряжении 10 кВ, были выбраны и подтверждены следующие силовые кабели: марки АСБ-10 различных номинальных сечений: АСБ-10 (3×25) – 2 единицы, АСБ-10 (3×35) – 2 единицы, АСБ-10 (3×50) – 2 единицы.

5.2 Выбор и проверка электрических аппаратов

Известно, что выбор и проверка электрических аппаратов на реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» в Московской области, представляет собой один из наиболее важных этапов реконструкции и модернизации подстанции.

Результаты оказывают решающее влияние на надёжность, безопасность, экономичность и эффективность подстанции.

Процесс выбора и проверки аппаратов требует особенно тщательного подхода, так как правильно подобранное оборудование и его оптимальное расположение на подстанции определённо играют ключевую роль в её способности стабильно функционировать в различных эксплуатационных условиях, обеспечивая надёжную защиту и эффективное управление всей подстанцией и энергосистемой в целом.

Установлено, что в современных условиях, когда требования к качеству и устойчивости энергосистемы становятся всё более жёсткими, компоновка распределительных устройств подстанций электрическими аппаратами приобретает особое значение.

Она определяет не только физическое размещение элементов подстанции, но и их взаимосвязь и взаимодействие, что напрямую влияет на способность системы эффективно управлять потоками электроэнергии,

минимизировать их потери и оперативно реагировать на возможные аварийные ситуации.

Определено, что рационально выполненная компоновка должна предусматривать различные сценарии эксплуатации, включая аварийные условия, что обеспечивает надёжное и оперативное управление системой, минимизируя последствия сбоев в электроснабжении.

Безопасность, как известно, является неотъемлемым аспектом, который определяется компоновкой распределительных устройств.

Некорректное расположение оборудования может привести к образованию зон повышенной опасности, затруднить обслуживание и значительно увеличить вероятность аварий.

В отличие от этого, продуманная компоновка электрических аппаратов в распределительных устройствах способствует устранению таких рисков, обеспечивая как безопасность для персонала, так и стабильную работу подстанции.

Более того, такая компоновка должна учитывать долгосрочные перспективы развития и модернизации системы электроснабжения.

Важно предусмотреть возможность внесения будущих изменений и дополнений с минимальными затратами и временем на модернизацию подстанции.

Экономическая эффективность, как установлено, также играет важную роль: правильное расположение оборудования позволяет существенно сократить длину соединительных линий, минимизировать потери энергии и уменьшить затраты на установку и обслуживание подстанции.

Экологические аспекты также не могут быть проигнорированы при проектировании компоновки распределительных устройств.

Сокращение занимаемой площади, минимизация воздействия на окружающую среду и оптимизация использования ресурсов представляют собой ключевые факторы, которые необходимо учитывать для обеспечения устойчивого развития подстанции и энергосистемы.

Следовательно, размещение электрических аппаратов в распределительных устройствах на реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», расположенной в Московской области, играет ключевую роль в процессе её модернизации. Этот этап напрямую влияет на обеспечение надёжности, безопасности и экономической эффективности всей энергосистемы региона.

В работе выбор и проверка электрических аппаратов проводится для всех РУ подстанции. В РУ-35 кВ и РУ-10 кВ подлежат замене устаревшие выключатели (соответственно – С-35/630 и ВМГ-10/630). Кроме того, в связи заменой типа ячеек РУ на ячейки типа КРУ внутренней установки, разъединители марки РВ-10/400 необходимо демонтировать. Все остальные аппараты не требуют замены, их необходимо проверить на соответствие установленной нагрузке сети (с учётом её увеличения).

Результаты выбора выключателей представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты выбора выключателей

Наименование и марка аппарата (модуля)	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные аппарата (модуля)
Выключатели вакуумные ВРНСМ-35-20/1600 [3]	$U_{\text{сети}} \leq U_{\text{НОМ}}$	$U_{\text{сети}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{НОМ}} = 35 \text{ кВ}$
	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{max}} = 28,85 \text{ А}$	$I_{\text{НОМ}} = 1600 \text{ А}$
	$I_{\text{п.т}} \leq I_{\text{отк.ном}}$	$I_{\text{п.т}} = 0,897 \text{ кА}$	$I_{\text{отк.ном}} = 25 \text{ кА}$
	$i_y \leq i_{\text{дин.}}$	$i_y = 1,727 \text{ кА}$	$i_{\text{дин.}} = 25 \text{ кА}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$I_T^2 \cdot t_T = 0,897^2 \cdot 3 = 2,41 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 25^2 \cdot 3 = 1875 \text{ кА}^2\text{с}$
Выключатели вакуумные ВВ/TEL 10-20/630 [2]	$U_{\text{сети}} \leq U_{\text{НОМ}}$	$U_{\text{сети}} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{\text{НОМ}} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{max}} = 101,1 \text{ А.}$	$I_{\text{НОМ}} = 630 \text{ А.}$
	$I_{\text{п.т}} \leq I_{\text{отк.ном}}$	$I_{\text{п.т}} = 1,547 \text{ кА.}$	$I_{\text{отк.ном}} = 20 \text{ кА.}$
	$i_y \leq i_{\text{дин.}}$	$i_y = 3,284 \text{ кА.}$	$i_{\text{дин.}} = 20 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$I_T^2 \cdot t_T = 1,547^2 \cdot 3 = 7,18 \text{ кА}^2\text{с.}$	$B_K = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2\text{с.}$

Далее проводится выбор и проверка разъединителей, которые должны обеспечить видимый разрыв при размыкании цепи без нагрузки для безопасного проведения работ.

При этом новые ячейки РУ-10 кВ оснащены втычными контактами, которые выполняют роль разъединителя, размыкая цепь при выводе ячеек в ремонтное положение.

В связи с этим, разъединители марки РВ-10/400 необходимо демонтировать.

Таким образом, в работе выбору подлежат только разъединители, установленные в РУ-35 кВ.

Результаты их проверки для применения на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты проверки разъединителей РУ-35 кВ для применения на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово»

Наименование и марка аппарата (модуля)	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные аппарата (модуля)
Разъединители РНДЗ-1(2)-35/1000УХЛ1 [13]	$U_{\text{сети}} \leq U_{\text{ном}}$	$U_{\text{сети}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$
	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$	$I_{\text{max}} = 28,85 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{\text{дин.}}$	$i_y = 1,727 \text{ кА}$	$i_{\text{дин.}} = 20 \text{ кА}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$I_T^2 \cdot t_T = 0,897^2 \cdot 3 = 2,41 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2\text{с}$

«Проводится выбор измерительных трансформаторов, к которым относятся трансформаторы напряжения (ТН) и трансформаторы тока (ТТ).

Согласно исходной схеме электрических соединений, трансформаторы напряжения установлены только в РУ-10 кВ. С учётом этого, проводится их проверка» [10].

Результаты проверки трансформаторов напряжения для применения на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты проверки трансформаторов напряжения для применения на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово»

Наименование и марка аппарата (модуля)	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные аппарата (модуля)
Трансформаторы напряжения марки НАМИ-10	$U_{\text{сети}} \leq U_{\text{ном.}}$	$U_{\text{сети}} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{\text{ном.}} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном.1}}$	$I_{\text{max}} = 101,1 \text{ А.}$	$I_{\text{ном.1}} = 500 \text{ А.}$
	$S_{\text{вт.цепей}} \leq S_{\text{обм.ном}}$	$S_{\text{вт.цепей}} = 40 \text{ ВА}$	$S_{\text{обм.ном}} = 75 \text{ ВА}$
	$i_y \leq i_{\text{дин.}}$	$i_y = 3,284 \text{ кА.}$	$i_{\text{дин.}} = 20 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$I_T^2 \cdot t_T = 1,547^2 \cdot 3 = 7,18 \text{ кА}^2\text{с.}$	$B_K = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2\text{с.}$

В таблице 8 приведены результаты проверки трансформаторов тока, предназначенных для использования на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово».

Таблица 8 – Результаты проверки трансформаторов тока для применения на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово»

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные
Трансформаторы тока ТВТ-35-1 (встроенные в выключатели)	$U_{\text{сети}} \leq U_{\text{ном.}}$	$U_{\text{сети}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном.}} = 35 \text{ кВ.}$
	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном.1}}$	$I_{\text{max}} = 28,85 \text{ А}$	$I_{\text{ном.1}} = 100 \text{ А}$
	$S_{\text{вт.цепей}} \leq S_{\text{обм.ном}}$	$S_{\text{вт.цепей}} = 20 \text{ ВА}$	$S_{\text{обм.ном}} = 80 \text{ ВА}$
	$i_y \leq i_{\text{дин.}}$	$i_y = 1,727 \text{ кА}$	$i_{\text{дин.}} = 40 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$I_T^2 \cdot t_T = 0,897^2 \cdot 3 = 2,41 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 40^2 \cdot 3 = 4800 \text{ кА}^2\text{с.}$
Трансформаторы тока ТПОЛМ-10	$U_{\text{сети}} \leq U_{\text{ном.}}$	$U_{\text{сети}} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{\text{ном.}} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном.1}}$	$I_{\text{max}} = 101,1 \text{ А.}$	$I_{\text{ном.1}} = 200 \text{ А}$
	$S_{\text{вт.цепей}} \leq S_{\text{обм.ном}}$	$S_{\text{вт.цепей}} = 10 \text{ ВА}$	$S_{\text{обм.ном}} = 50 \text{ ВА}$
	$i_y \leq i_{\text{дин.}}$	$i_y = 3,284 \text{ кА.}$	$i_{\text{дин.}} = 20 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$I_T^2 \cdot t_T = 1,547^2 \cdot 3 = 7,18 \text{ кА}^2\text{с.}$	$B_K = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2\text{с.}$

Ограничители перенапряжения (далее – ОПН) на трансформаторной подстанции играют важную роль в защите оборудования от скачков

напряжения, которые могут возникать из-за атмосферных разрядов или коммутационных операций.

Они обеспечивают снижение амплитуды перенапряжений до безопасного уровня, предотвращая повреждения оборудования.

В таблице 9 отображены результаты проверки ограничителей перенапряжения, предназначенных для эксплуатации на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово».

Таблица 9 – Результаты проверки ограничителей перенапряжения для применения на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово»

Наименование и марка аппарата (модуля)	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные аппарата (модуля)
РУ-35 кВ: ОПН-35/40,5/10/600	$U_{\text{сети}} \leq U_{\text{ном}}$	$U_{\text{сети}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$
	$I_{\text{мах}} \leq I_{\text{ном}}$	$I_{\text{мах}} = 28,85 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$
	$I_{\text{п.т}} \leq I_{\text{макс.проп.}}$	$I_{\text{п.т}} = 0,897 \text{ кА}$	$I_{\text{макс.проп.}} = 10 \text{ кА}$
	$i_y \leq i_{\text{дин.}}$	$i_y = 1,727 \text{ кА}$	$i_{\text{дин.}} = 100 \text{ кА}$
РУ-10 кВ: ОПН-КР/TEL-10/12 УХЛ2	$U_{\text{сети}} \leq U_{\text{ном}}$	$U_{\text{сети}} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{\text{мах}} \leq I_{\text{ном}}$	$I_{\text{мах}} = 101,1 \text{ А.}$	$I_{\text{ном}} = 250 \text{ А}$
	$I_{\text{п.т}} \leq I_{\text{макс.проп.}}$	$I_{\text{п.т}} = 1,547 \text{ кА.}$	$I_{\text{макс.проп.}} = 20 \text{ кА}$
	$i_y \leq i_{\text{дин.}}$	$i_y = 3,284 \text{ кА.}$	$i_{\text{дин.}} = 20 \text{ кА.}$

Все аппараты отвечают требованиям нормативных документов.

Выводы по разделу 5:

Обосновано применение следующих проводов и кабелей:

- для питающей двухцепной воздушной линии 35 кВ «Сетовка – Ялфимово», получающей питание от энергосистемы (ПС-110/35/10 «Сетовка») на напряжении 35 кВ, выбран и подтвержден новый провод второго ввода марки АС-95/16, а также проверен существующий провод первого ввода марки АС-95/16 (в результате проведения реконструкции было обосновано сооружение второй аналогичной питающей линии 35 кВ на тех же опорах);

- для транзитной линии 35 кВ «Ялфимово – Яганово», питающейся от реконструируемого объекта, выбран новый провод марки АС-95/16 для второй цепи, а также проверен существующий провод первой цепи того же типа;
- на шести отходящих кабельных линиях для питания потребителей подстанции на номинальном напряжении 10 кВ, были выбраны и подтверждены следующие силовые кабели: марки АСБ-10 различных номинальных сечений: АСБ-10 (3×25) – 2 единицы, АСБ-10 (3×35) – 2 единицы, АСБ-10 (3×50) – 2 единицы.

В процессе выбора и проверки электрических аппаратов, проведённых в рамках реконструкции схемы и модернизации оборудования подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», были приняты решения о замене устаревших масляных выключателей в РУ-35 кВ и РУ-10 кВ на современные вакуумные модели. Также в результате перехода на использование ячеек типа КРУ в РУ-10 кВ было решено демонтировать разъединители, поскольку их функции выполняются встроенными втычными контактами в новой конфигурации. Кроме того, отдельные аппараты в РУ-35 кВ были подтверждены на соответствие расчётным данным и не требуют замены.

Все элементы оборудования прошли необходимые проверки и признаны пригодными для дальнейшей эксплуатации в составе распределительных устройств подстанции после её реконструкции.

Применение нового современного оборудования значительно повысит показатели надёжности, экономичности и безопасности подстанции.

6 Релейная защита, молниезащита и собственные нужды подстанции

6.1 Выбор устройств системы релейной защиты и автоматики

Далее в работе, в рамках выполнения основных задач по модернизации подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», предлагается обновить вторичные цепи, включая замену устаревших устройств релейных защит (РЗ) на современные модификации.

Ранее на подстанции были установлены устаревшие индукционные и электромагнитные релейные элементы, которые изнашивались и устарели.

Таким образом, модернизация РЗ на подстанции приведёт к повышению надёжности, селективности и безопасности.

Известно, что выбор устройств системы релейной защиты и автоматики (РЗиА) на реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» представляет собой один из ключевых этапов реконструкции, от которого зависит общая надёжность и безопасность энергосистемы.

Основные требования к данным устройствам направлены на обеспечение оперативного обнаружения и устранения аварийных ситуаций, что способствует поддержанию стабильности электроснабжения и предотвращению повреждений оборудования.

Далее приводятся основные критерии выбора РЗиА, которые необходимо учесть в работе.

Установлено, что надёжность работы релейной защиты в различных эксплуатационных режимах является ключевым аспектом выбора.

Устройства РЗиА должны быть способны эффективно функционировать при любых отклонениях от нормальных параметров сети, своевременно отключая повреждённые участки и предотвращая развитие аварий.

Указанный аспект особенно важен в условиях реконструируемой подстанции, где возможны увеличение нагрузки и изменение конфигурации схемы электрических сетей.

Точность и быстродействие устройств РЗА также играют важнейшую роль.

Известно, что устройства РЗА должны обеспечивать минимальное время срабатывания.

Кроме того, высокая точность в определении местоположения и характера повреждений помогает снизить риск ложных срабатываний, что важно для обеспечения бесперебойного электроснабжения.

Гибкость и адаптивность также имеют большое значение.

Устройства РЗА должны быть способны адаптироваться к принятию необходимых мер в реальном времени.

Безопасность и надёжность устройств РЗА также являются основополагающими требованиями.

Данные устройства должны обеспечивать защиту как самого оборудования, так и обслуживающего персонала, что достигается за счёт применения передовых технологий и материалов, способных обеспечить долговечность и стабильную работу системы в различных эксплуатационных условиях.

Выбор устройств релейной защиты и автоматики для подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», находящейся в процессе реконструкции, является ключевым этапом. От его успешного выполнения зависит не только обеспечение надёжной и безопасной работы подстанции, но и устойчивость всей региональной энергосистемы.

В результате проведения анализа отечественных и иностранных разработок систем РЗА, с целью качественной, надёжной и селективной защиты подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», обосновано применение «современных микропроцессорных блоков марки РЗА SMPR 155

(производство – Orion Italia S.R.L. Данная компания имеет представительство во многих регионах РФ и работает на отечественном рынке более 25 лет.

Внешний вид микропроцессорного блока марки РЗА SMPR 155 производителя Orion Italia S.R.L.» [9] представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Внешний вид микропроцессорного блока марки РЗА SMPR 155

Микропроцессорный блок марки РЗА SMPR 155, разработанный производителем Orion Italia S.R.L., представляет собой высокотехнологичное устройство, которое интегрирует современные подходы к релейной защите и автоматике.

Данный блок РЗА отличается высокой надёжностью и точностью работы, что обеспечивается использованием передовых микропроцессорных технологий.

Благодаря этому, он способен эффективно обрабатывать большие объёмы данных и быстро реагировать на изменения в электрической сети, что существенно повышает общую безопасность и устойчивость подстанции и энергосистемы.

Устройство обладает широкими возможностями настройки, что позволяет адаптировать его под конкретные условия эксплуатации, что обеспечивает гибкость и возможность интеграции блока в различные конфигурации сетей, включая сложные и высоконагруженные системы.

При этом высокая точность измерений и быстроедействие в работе блока способствуют минимизации рисков ложных срабатываний и аварийных отключений, что особенно важно для поддержания стабильного и надёжного электроснабжения.

«Кроме того, блок РЗА SMPR 155 имеет возможность удалённого мониторинга и управления, что значительно упрощает процесс эксплуатации и технического обслуживания.

Долговечность и стабильность работы устройства в различных условиях эксплуатации также являются значимыми характеристиками, что делает его предпочтительным выбором для использования в современных энергосистемах» [9].

Кроме того, данный блок РЗА имеет очень простой способ подключения, схема которого представлена в работе на рисунке 6 [9].

6.2 Расчёт молниезащиты подстанции

Молниезащита является базовым элементом в обеспечении безопасности и надёжности функционирования подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» в Московской области. В условиях современной энергетической инфраструктуры, защита от атмосферных разрядов становится неотъемлемым компонентом проектирования и эксплуатации подстанций, поскольку именно она предотвращает разрушительное воздействие молний на критически важное оборудование и системы.

Атмосферные разряды, как установлено, могут вызвать серьёзные повреждения, затрагивающие трансформаторы, линии электропередач и системы управления. Такие повреждения часто приводят к необходимости дорогостоящих ремонтов и замены оборудования, а также к длительным простоям, что влечёт за собой значительные экономические потери. Надёжная система молниезащиты, как определено, минимизирует риск подобных инцидентов, предотвращая разрушительные последствия ударов молний и поддерживая стабильность работы энергосистемы.

Одной из важнейших задач молниезащиты является обеспечение безопасности персонала, обслуживающего подстанцию. Атмосферные разряды могут создавать крайне опасные условия, включая возникновение пожаров и поражение электрическим током, что представляет серьёзную угрозу для жизни и здоровья сотрудников. Система молниезащиты, как известно, значительно снижает вероятность таких опасностей, создавая более безопасные условия работы и защищая персонал от потенциальных рисков.

«Кроме того, молниезащита способствует сохранению целостности и долговечности электрической инфраструктуры подстанции. Частые удары молний, как определено, могут постепенно разрушать изоляцию кабелей, вызывать коррозию и механические повреждения оборудования, что сокращает срок его службы и увеличивает эксплуатационные расходы» [20]. Защита от атмосферных перенапряжений позволяет поддерживать

оборудование в надлежащем состоянии, обеспечивая его надёжную и долгосрочную эксплуатацию, что особенно важно для поддержания экономической эффективности подстанции и всей энергосистемы Московской области.

Таким образом, молниезащита на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» в Московской области является не просто важным, а критически необходимым элементом, обеспечивающим безопасность, надёжность и долговечность работы всей энергосистемы. Её основная роль заключается в защите оборудования от разрушительных воздействий молний, снижении рисков для персонала и предотвращении экономических потерь, связанных с авариями и простоями.

В работе устройство молниезащиты подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области осуществляется стержневыми молниеотводами. Определяется их радиус действия, длина и количество.

«Для молниезащиты ПС-35/10 кВ «Ялфимово» принимается четыре стержневых молниеотвода, установленные по периметру понизительной подстанции» [20].

«Зона их защиты» [20]:

$$r_X = h_a \cdot \left[1,6 / (1 + (h_X / h) \cdot p) \right]. \quad (32)$$

$$h_a = h - h_X. \quad (33)$$

«Минимальная ширина зоны защиты» [20]:

$$b_X = 4 \cdot r_X \cdot \left[(7 \cdot h_a - a) / (14 \cdot h_a - a) \right], \quad (34)$$

где «а – расстояние между молниеотводами, м» [20].

«Проверка работоспособности молниезащиты» [20]:

$$D \leq 8 \cdot h_a \cdot p, \quad (35)$$

где «D – наибольшая диагональ четырёхугольника, м» [20].

«Зона защиты молниеотводов спроектированной молниезащиты» [20]:

$$r_x = (19 - 11) \cdot \left[1,6 / (1 + (11/19) \cdot 1) \right] = 8,11 \text{ м.}$$

$$b_x^I = 4 \cdot 8,11 \cdot \left[(7 \cdot 8 - 21) / (14 \cdot 8 - 21) \right] = 12,48 \text{ м.}$$

$$b_x^I / 2 = 6,24 \text{ м.}$$

$$b_x^{II} = 4 \cdot 8,11 \cdot \left[(7 \cdot 8 - 43,5) / (14 \cdot 8 - 43,5) \right] = 5,92 \text{ м.}$$

$$b_x^{II} / 2 = 2,96 \text{ м.}$$

$$D_1 \leq 8 \cdot 8 \cdot 1 = 64 \text{ м.}$$

$$D_1 = \sqrt{21^2 + 43,5^2} = 48,3 \leq 64 \text{ м.}$$

«Установлено, что молниезащита подстанции выполнена с применением четырёх стержневых молниеотводов. Молниеотводы установлены по периметру подстанции» [20].

6.3 Расчёт системы собственных нужд подстанции

Система собственных нужд трансформаторной подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» в Московской области предназначена для обеспечения бесперебойного питания всех необходимых вспомогательных систем и оборудования, которые поддерживают функционирование подстанции в различных эксплуатационных режимах.

Известно, что назначение этой системы заключается в создании условий для стабильной и безопасной работы основного оборудования, включая трансформаторы, распределительные устройства и системы управления, а также в обеспечении надёжности электроснабжения, даже в случае аварийных ситуаций в основной сети.

Состав системы собственных нужд подстанции включает в себя разнообразные потребители, каждый из которых выполняет важные функции для обеспечения надёжной работы подстанции.

К таким потребителям относятся:

- системы освещения, которые обеспечивают видимость на территории подстанции и внутри её зданий, особенно в ночное время и при неблагоприятных погодных условиях;
- системы вентиляции и кондиционирования;
- устройства питания для устройств управления и автоматики, таких как релейная защита, системы сигнализации и телемеханики. Данные устройства обеспечивают контроль и управление основными процессами на подстанции, включая автоматическое отключение в случае аварийных ситуаций и передачу данных на диспетчерские пункты;
- устройства подзарядки аккумуляторных батарей, которые обеспечивают резервное питание для важнейших систем подстанции в случае полного отключения внешнего энергоснабжения.

Таким образом, система собственных нужд трансформаторной подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области представляет собой комплексное решение, обеспечивающее питание всех вспомогательных и критически важных систем подстанции.

Её работа является залогом надёжности и безопасности всего электроснабжения, поддерживая устойчивость подстанции в любых эксплуатационных условиях и предотвращая возможные сбои и аварии.

Проводится расчёт системы собственных нужд подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области.

Для расчёта используется рекомендуемый метод коэффициента спроса [14].

«Расчетная активная мощность СН» [14]:

$$P_p = \alpha \cdot P_{\text{ном}}, \quad (36)$$

где « α – коэффициент спроса потребителей;

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность соответствующих потребителей
собственных нужд ГПП-35/10 кВ» [14].

«Номинальная мощность СН подстанции» [14]:

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{ном.ед}} \cdot n, \quad (37)$$

где « $P_{\text{ном.ед}}$ – номинальная мощность СН;

n – число единиц СН, шт.» [14].

«Расчетная реактивная мощность СН» [14]:

$$Q_p = P_p \cdot \text{tg}\varphi, \quad (38)$$

где « $\text{tg}\varphi$ – коэффициент мощности потребителя СН» [14].

«Расчетная полная мощность СН» [14]:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}. \quad (39)$$

«Расчётная нагрузка освещения ОРУ-35 кВ системы СН» [14]:

$$P_{\text{ном}} = 0,5 \cdot 2 = 1 \text{ кВт.}$$

$$P_p = 1 \cdot 1 = 1 \text{ кВт.}$$

$$Q_p = 1 \cdot 0 = 0 \text{ квар.}$$

$$S_p = \sqrt{1^2 + 0^2} = 1 \text{ кВА.}$$

Результаты расчёта нагрузок системы собственных нужд подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты расчёта нагрузок системы собственных нужд подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области

Нагрузка	Кол-во	Номинальная мощность		η	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	Расчетная нагрузка		
		одного ЭП, кВт	общая, кВт				α	P_p , кВт	Q_p , квар
Питание ОПУ	1	35	35	1	0,9	0,48	0,7	24,5	11,8
Обогрев шкафов РЗА на ОРУ-35 кВ	1	12	12	1	0,8	0,75	1,0	12,0	9,0
ЗВУ	2	8	16	1	0,9	0,48	0,5	8,0	3,8
РПН Т1 и Т2	2	1	2	1	0,85	0,62	0,7	1,4	0,9
Охлаждение Т1,2	12	0,75	9	1	0,85	0,62	0,85	7,7	4,7
Обогрев РПН Т1 и Т2	1	4	4	1	1,0	0	1,0	4,0	0,0
Освещение ОРУ-35 кВ	2	0,5	1	1	1,0	0	1,0	1,0	0,0
Обогрев, вентиляция и отопление ячеек и оборудования КРУ-10 кВ	1	25	25	1	0,95	0	0,7	17,5	0,0
Обогрев, вентиляция и отопление оборудования ОРУ-35 кВ	1	20	20	1	0,95	0	0,7	14	0,0
Телемеханика, видеонаблюдение, сигнализация и автоматика	1	8	8	1	0,7	0,39	1,0	8,0	3,1
Аварийное освещение	1	0,3	0,3	1	1,0	0	1,0	0,3	0,0
Питание цепей блокировки	1	1	1	1	0,9	0,48	1,0	1,0	0,5
Итого по системе СН ПС-35/10 кВ	26	115,55	133,3	1	0,88	0,48	0,85	99,4	33,8

«Полная мощность системы собственных нужд подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области» [14]:

$$S_p = \sqrt{99,4^2 + 33,8^2} = 104,9 \text{ кВА.}$$

Таким образом установлено, что суммарная расчётная нагрузка системы собственных нужд реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области составляет:

- активная нагрузка – 99,4 кВт;
- реактивная нагрузка – 33,8 кВт;
- полная нагрузка – 104,9 кВА.

Мощность силового трансформатора системы собственных нужд подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области определяется по условию:

$$S_{\text{ном.т.р}} \geq \frac{S_{\text{м.СН}}}{N \cdot K_3}, \quad (40)$$

где « $S_{\text{м.СН}}$ – максимальное значение полной нагрузки системы собственных нужд подстанции;

K_3 – нормативный коэффициент загрузки трансформаторов» [14] собственных нужд подстанции (в работе принят для системы СН коэффициент загрузки $K_3 = 0,85$).

Для условий данной реконструируемой подстанции с учётом суммарной полной нагрузки системы собственных нужд, рассчитанной в работе ранее (таблица 10):

$$S_{\text{ном.т.СН}} \geq \frac{104,9}{2 \cdot 0,85} = 61,7 \text{ кВА.}$$

Учитывая полученные результаты, выбираются два силовые трансформатора собственных нужд марки ТЛС–СЭЩ – 160/10/0,4, паспортной мощностью 160 кВА каждый [17].

Применение двух ТСН в системе собственных нужд обеспечит достаточную надёжность и резервирование.

Выводы по разделу б:

В результате проведения реконструкции вторичных цепей на объекте, выбраны, обоснованы и рекомендованы к использованию на объекте современные микропроцессорные блоки РЗА SMPR 155 от Orion Italia S.R.L., которые сочетает в себе передовые технологии, гибкость настройки и надёжность, что делает их важными элементами в обеспечении эффективной и безопасной работы оборудования и электрических сетей реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» и энергосистемы Московской области в целом.

В рамках исследования выполнены расчёты, связанные с обеспечением молниезащиты подстанции 35/10 кВ. Проведённый анализ показал, что система молниезащиты реализована с использованием четырёх стержневых молниеотводов, которые установлены по периметру объекта. Такое расположение молниеотводов обеспечивает эффективное покрытие зоны защиты, минимизируя вероятность попадания молнии на элементы оборудования подстанции.

Дополнительно проведённый расчёт подтвердил, что выбранное количество и расположение молниеотводов полностью соответствует установленным нормативным требованиям. Это гарантирует высокий уровень защиты оборудования подстанции от грозových перенапряжений, что способствует повышению надёжности её работы и снижению рисков аварийных ситуаций.

Рассчитана система собственных нужд подстанции, для которой выбраны два силовые трансформатора марки ТЛС–СЭЩ – 160/10/0,4, паспортной мощностью 160 кВА каждый.

Заключение

В работе проведена разработка проекта реконструкции электрической части понизительной подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» Московской области.

Проведённый анализ показал, что необходимость данной реконструкции связана с увеличением нагрузок на отходящие соединения напряжением 10 кВ, а также с несоответствием первоначальной схемы электрических соединений требованиям надёжности, установленным нормативными актами. Помимо этого, на подстанции была выполнена модернизация ключевого силового оборудования распределительных устройств, а также устройств релейной защиты и автоматики, что позволило значительно повысить её эксплуатационные характеристики и соответствие современным стандартам.

В работе проведён анализ исходной схемы и оборудования на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», в результате чего было установлено следующее:

- отсутствие резервирования в существующей схеме электрических соединений РУ-35 кВ приводит к несоответствию требованиям надёжности, установленным для транзитных подстанций. В связи с этим необходима её реконструкция. В качестве решения предлагается внедрить схему 35-9, предполагающую использование одной рабочей системы шин, разделённой на секции посредством выключателя, что обеспечит повышение надёжности работы подстанции;
- в связи с тем, что подавляющее большинство потребителей, которые питаются от подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», относятся к 1 и 2 категориям надёжности, рекомендуется на всех ступенях трансформации, а также на источниках питания и транзита, применять два независимых ввода. Исходя из этого, необходимо ввести в эксплуатацию вторую питающую линию 35 кВ, а также вторую транзитную линию 35 кВ. При этом, с целью экономии средств,

- данные линии предлагается сделать из одноцепных двухцепными, сменив на них траверсы (без замены опор);
- рекомендовано во всех РУ провести модернизацию электрических аппаратов, заменив устаревшие модификации на новые современного типа;
 - в связи со значительным увеличением мощности нагрузки подстанции (на 600 кВт), необходимо провести проверку всех основных технических решений на подстанции.

Основываясь на полученных результатах расчёта установлено, что суммарная полная нагрузка первой и второй секций сборных шин напряжением 10 кВ составила по 2872,3 кВА, а расчётный ток – по 165,8 А.

Суммарная полная нагрузка всей реконструируемой подстанции равна 5744,6 кВА.

Расчётный ток на вводе 35 кВ равен 94,8 А.

Полученные результаты используются в работе далее при проверке всех технических решений на объекте реконструкции.

Анализ показал, что силовые трансформаторы модели ТМН-4000/35, ранее смонтированные на подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к системе охлаждения, включая её способность выдерживать нагрузку и перегрузку. Это подтверждено в рамках проверки, проведённой в связи с реконструкцией схемы РУ-35 кВ, изменением режима работы подстанции и увеличением нагрузки на соединения потребителей в сети напряжением 10 кВ.

Исходя из этого, определено, что указанные трансформаторы не нуждаются в замене в связи с реконструкцией объекта исследования.

Установлено также, что в послеаварийном режиме работы один трансформатор, оставшийся в работе, будет питать всю нагрузку подстанции без ущерба для своей системы охлаждения, обеспечивая надёжным питанием потребителей 1 и 2 категорий надёжности (с учётом отключения потребителей 3 категории).

В работе проведён расчёт максимального трёхфазного и ударного тока КЗ на выводах силового трансформатора в сети 35 кВ (точка К2) и на выводах трансформатора в точке К3 (сеть напряжением 10 кВ).

Данный расчёт проведён в максимальном режиме работы с учётом максимума положения устройства РПН.

Установлено, что на выводе силового трансформатора подстанции значения трёхфазных токов КЗ будут следующими:

- на выводах 35 кВ – 0,897 кА;
- на выводах 10 кВ – 1,486 кА.

Соответственно, значения ударных токов короткого замыкания в указанных расчётных точках будут составлять:

- на выводах 35 кВ – 1,727 кА;
- на выводах 10 кВ – 3,185 кА.

Обосновано применение следующих проводов и кабелей:

- для питающей двухцепной воздушной линии 35 кВ «Сетовка – Ялфимово», получающей питание от энергосистемы (ПС-110/35/10 «Сетовка») на напряжении 35 кВ, выбран и подтверждён новый провод второго ввода марки АС-95/16, а также проверен существующий провод первого ввода марки АС-95/16 (в результате проведения реконструкции было обосновано сооружение второй аналогичной питающей линии 35 кВ на тех же опорах);
- для транзитной двухцепной воздушной линии 35 кВ «Ялфимово – Яганово», получающей питание от объекта реконструкции на напряжении 35 кВ, выбран и подтверждён новый провод второй транзитной линии марки АС-95/16, а также проверен существующий провод первой транзитной линии марки АС-95/16 (в результате проведения реконструкции было обосновано сооружение второй аналогичной транзитной линии 35 кВ на тех же опорах);
- на шести отходящих кабельных линиях для питания потребителей подстанции на номинальном напряжении 10 кВ, были выбраны и

подтверждены следующие силовые кабели: марки АСБ-10 различных номинальных сечений: АСБ-10 (3×25) – 2 единицы, АСБ-10 (3×35) – 2 единицы, АСБ-10 (3×50) – 2 единицы.

В результате выбора и проверки электрических аппаратов, в связи с реконструкцией схемы и модернизацией оборудования подстанции 35/10 кВ «Ялфимово», приняты следующие решения:

- заменены устаревшие масляные выключатели в РУ-35 кВ (марки С-35/630) и в РУ-10 кВ (марки ВМГ-10/630) подстанции, на новые современные марки (соответственно, выключатели вакуумные ВРНСМ-35-20/1600 и ВВ/TEL 10-20/630);
- в связи заменой в РУ-10 кВ подстанции типа ячеек ЗРУ на ячейки типа КРУ внутренней установки, разъединители марки РВ-10/400 подлежат демонтажу, так как в новой модификации ячеек КРУ-10 кВ роль разъединителя выполняют втычные контакты;
- подтверждены на соответствие расчётным данным электрической сети следующие электрические аппараты в РУ-35 кВ подстанции, которые не требуют замены.

Выбранное оборудование успешно прошло все необходимые испытания, что подтверждает его соответствие требованиям для использования в распределительных устройствах подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» после завершения реконструкции. Установка современного оборудования позволит значительно улучшить показатели надёжности, безопасности и экономической эффективности работы подстанции.

В ходе модернизации вторичных цепей на объекте были обоснованы и предложены к применению микропроцессорные блоки РЗА SMPR 155 производства Orion Italia S.R.L. Эти устройства объединяют современные технологические решения, гибкость в настройке и высокую надёжность, что делает их важным компонентом в обеспечении эффективного функционирования оборудования и электрической сети подстанции. Их

использование также способствует улучшению стабильности энергосистемы региона в целом.

В результате проведения реконструкции вторичных цепей на объекте, выбраны, обоснованы и рекомендованы к использованию на объекте современные микропроцессорные блоки РЗА SMPR 155 от Orion Italia S.R.L., которые сочетает в себе передовые технологии, гибкость настройки и надёжность, что делает их важными элементами в обеспечении эффективной и безопасной работы оборудования и электрических сетей реконструируемой подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» и энергосистемы Московской области в целом.

В рамках работы был проведён расчёт молниезащиты подстанции 35/10 кВ. Выявлено, что система защиты от грозových перенапряжений реализована с применением четырёх стержневых молниеотводов, размещённых по периметру объекта. Данное расположение обеспечивает эффективное покрытие зоны защиты, снижая риск попадания молнии на оборудование подстанции и уменьшая вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Дополнительно был рассчитан комплекс систем собственных нужд подстанции. В результате анализа для обеспечения электроснабжения выбраны два силовых трансформатора марки ТЛС–СЭЩ – 160/10/0,4, каждый из которых имеет мощность 160 кВА. Применение двух трансформаторов позволяет достичь высокого уровня надёжности системы и обеспечить её резервирование, что создаёт условия для стабильной работы даже при выходе одного из трансформаторов из строя. Такое решение полностью отвечает современным стандартам и требованиям к надёжности энергообъектов.

Таким образом установлено, что разработанный проект реконструкции электрической части понизительной подстанции 35/10 кВ «Ялфимово» характеризуется достаточными условиями надёжности, экономичности, безопасности и экологичности.

Список используемой литературы и используемых источников

1. АСБ длительно допустимый ток [Электронный ресурс]: URL: <https://elmarkets.ru/blog/spravochnik/asb-dlitelno-dopustimyy-tok/> (дата обращения: 20.08.2024).

2. Вакуумные выключатели ВВ/TEL 6-20 кВ [Электронный ресурс]: URL: <https://www.tavrida.ru/ter/support/documents/1/> (дата обращения: 20.08.2024).

3. ВР35НСМ / Вакуумные выключатели 35 кВ [Электронный ресурс]: URL: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj1w5vm-ICFAxXx9LsIHecXDokQFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.vsoyuz.com%2Fru%2Fprodukcija%2Fcb%2Fvakuumnye-vyklyuchateli-35-kv%2Fvr35nsm.htm&usg=AOvVaw1GbYeWhPt0-hEdypY2-WRc&opi=89978449> (дата обращения: 20.08.2024).

4. ГОСТ 14209–85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки (с Изменением № 1). [Электронный ресурс]: URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200012414> (дата обращения: 17.08.2024).

5. 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: 17.08.2024).

6. Допустимые длительные токовые нагрузки на неизолированные провода [Электронный ресурс]: URL: <http://electro.narod.ru/tables/4.1.9.htm> (дата обращения: 17.08.2024).

7. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.

8. Линия: Ямфилово (321585205) [Электронный ресурс]: URL:

<https://www.openstreetmap.org/way/321585205#map=18/55.164419/38.386512>

(дата обращения: 17.08.2024).

9. Микропроцессорный блок РЗА SMPR 155 [Электронный ресурс]: URL: https://rospolus.ru/6_35kv/rza/rza_0003.html (дата обращения: 20.08.2024).

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

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

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

13. Разъединитель РДЗ-2-35/1000Н УХЛ1. [Электронный ресурс]: URL: <https://tmnrg.ru/razedinitel-rdz-2-35-1000> (дата обращения: 19.08.2024).

14. РД 153-34.0-20.527-98 «Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования» [Электронный ресурс]: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294817/4294817179.htm> (дата обращения: 17.08.2024).

15. Сибикин Ю.Д. Пособие к курсовому и дипломному проектированию электроснабжения промышленных, сельскохозяйственных и городских объектов. Учебное пособие. М.: Форум, 2021. 383 с.

16. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю., Яшков В.А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. Учебное пособие. М.: Форум, Инфра-М, 2022. 365 с.

17. Схема ЛЭП и электроснабжения России. Трансформаторная подстанция 35/10 кВ «Ялфимово» [Электронный ресурс]: URL: <https://frexosm.ru/power/#13.46/55.16847/38.38742> (дата обращения: 17.08.2024).

18. Типовые схемы РУ 35-750 кВ [Электронный ресурс]: URL: https://powersystem.info/index.php/Типовые_схемы_РУ_35-750_кВ (дата обращения: 19.08.2024).

19. Трансформатор силовой масляный ТМН-4000/35 с РПН.
[Электронный ресурс]: URL: <http://www.rus-trans.com/?ukey=product&productID=1193> (дата обращения: 20.08.2024).

20. Устройство молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций: Сборник документов. Серия 17. Выпуск 27. Электронный ресурс]: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815349.pdf> (дата обращения: 20.08.2024).