

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 Проектирование электрической части тяговой подстанции переменного тока
ЭЧЭ-85 Октябрьской ЖД

Обучающийся

А.А. Кириллова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., В.И. Платов

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

Аннотация

Работа посвящена разработке технически обоснованного проекта электрической части тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 Октябрьской ЖД.

В рамках реализации основной цели работы, проведено решение основных задач, охватывающих все основные этапы проектирования объекта: от анализа исходных данных, расчётов электрических нагрузок и токов короткого замыкания, до выбора оптимальных схем электрических соединений, основного оборудования, сетей и систем релейной защиты, а также организации надёжных систем молниезащиты и заземления.

Результаты работы позволяют сформировать целостное представление о проектируемой подстанции, определить оптимальные решения с учётом действующих нормативных и технических требований, а также заложить основу для безопасной, экономически оправданной и долговечной эксплуатации электроустановок на тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 Октябрьской ЖД.

Пояснительная записка содержит 74 печатных страницы, включая введение, три основных раздела, заключение с общими выводами по работе, а также перечень используемых источников, состоящий из 20 наименований.

Содержание

Введение	4
1 Анализ исходных данных на выполнение работы	7
2 Разработка проекта электрической части подстанции	13
2.1 Разработка схемы главных электрических соединений подстанции.....	13
2.2 Расчет электрических нагрузок тяговой подстанции	20
2.3 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов	24
2.4 Расчёт токов короткого замыкания	28
2.5 Выбор проводников на подстанции	37
2.6 Расчёт и выбор силового электрооборудования	41
3 Релейная защита, молниезащита и заземление подстанции	53
3.1 Выбор системы релейной защиты подстанции.....	53
3.2 Расчёт молниезащиты подстанции	58
3.3 Расчёт контура заземления подстанции	61
Заключение	68
Список используемых источников.....	72

Введение

Сегодня на энергетических объектах железнодорожной инфраструктуры региона наблюдается ускоренный износ оборудования на основных узлах, что приводит к росту аварийных отключений и росту расходов на планово-предупредительные ремонты.

Устранение недоработок и принятие комплексных схемных решений по проектированию новых энергетических железнодорожных объектов является актуальным и практически ценным заданием.

Новые современные инженерные решения, предлагаемые современным рынком, включают инновационные коммутационные аппараты, цифровые средства мониторинга и оптимизированные схемы управления, позволяющие обеспечить гарантированное энергоснабжение потребителей железнодорожной инфраструктуры различной категории, включая объекты первой группы надёжности.

С другой стороны установлено, что рациональное проектирование электрической части тяговых подстанций переменного тока железной дороги ориентировано на обеспечение надёжного электроснабжения магистрали, интенсификация которой диктуется перспективами социально-экономического роста.

Ключевая практическая ценность состоит в гарантии непрерывной подачи электроэнергии к тяговому подвижному составу, что непосредственно влияет на пропускную способность участка, стабильность расписания движения и безопасность пассажирских и грузовых перевозок.

Внедрение современной тяговой подстанции, характеризующейся высокими показателями надёжности, энергоэффективности, экономичности, безопасности, селективности защиты, а также экологичности, позволяет корректировать рабочие режимы при увеличении пассажиро- и грузопотока, снижать риски технологических отказов, улучшать показатели

энергоэффективности и экономить ресурсы при эксплуатации генерирующих и сетевых мощностей.

Таким образом, указанные аспекты формируют актуальность и практическую ценность настоящей работы.

Основная цель работы заключается в разработке технически обоснованного проекта электрической части тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД (Республика Карелия).

Объектом исследования является тяговая подстанция ЭЧЭ-85 «Нюхча», функционирование которой влияет на весь электротяговый комплекс рассматриваемого участка.

Предмет исследования связан с методами, подходами и технологиями обеспечения требуемого уровня надёжности, безопасности и экономичности на объекте исследования при его проектировании.

В рамках реализации основной цели работы, предусматривается решение основных задач, охватывающих все основные этапы проектирования объекта: от анализа исходных данных, расчётов электрических нагрузок и токов короткого замыкания, до выбора оптимальных схем электрических соединений, основного оборудования, сетей и систем релейной защиты, а также организации надёжных систем молниезащиты и заземления.

При этом формируется комплекс проектных решений, отражающий выбор схемных решений в питающей сети и главных электрических соединений, компоновку подстанции силовыми трансформаторами, электрическими проводниками и аппаратами, а также схемы релейных защит и систем молниезащиты и заземления.

Подобный комплексный подход даёт возможность сформировать целостное представление о проектируемой подстанции, определить оптимальные решения с учётом действующих нормативных и технических требований, а также заложить основу для безопасной, экономически оправданной и долговечной эксплуатации электроустановок.

Все исследования в работе выполняются на основе совокупности методов, сочетающих нормативно-правовой анализ действующих нормативных документов, методик расчёта нагрузок, а также установившихся и переходных режимов, методик выбора и внедрения коммутационных аппаратов и проводников на объектах железнодорожной энергетической структуры, а также непосредственное изучение опыта внедрения аналогичных проектов на отечественных и зарубежных объектах железнодорожной инфраструктуры.

При этом ожидаемые результаты работы позволят сформировать целостное представление о функционале, назначении и работе проектируемой подстанции, определить оптимальные решения на данном объекте проектирования с учётом действующих нормативных и технических требований, а также заложить основу для безопасной, рациональной, надёжной, экономически оправданной и долговечной эксплуатации электроустановок всех классов напряжения на тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД (Республика Карелия).

1 Анализ исходных данных на выполнение работы

Как было указано ранее, основная цель работы заключается в разработке технически обоснованного проекта электрической части тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД [19].

Установлено, что объектом исследования является тяговая подстанция ЭЧЭ-85 «Нюхча», функционирование которой влияет на весь электротяговый комплекс рассматриваемого участка.

Данная подстанция будет состоять на балансе Кемской дистанции электроснабжения Октябрьской дирекции по энергообеспечению, являющейся структурным подразделением Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД» и непосредственно отвечающей за надёжное обеспечение электроэнергией железнодорожного участка на станции Кемь и прилегающего к нему района.

Сфера деятельности организации включает эксплуатацию контактной сети, кабельных линий, трансформаторных подстанций, а также комплексных систем освещения и сигнализации.

Технический персонал отслеживает корректность работы аппаратуры, проводит профилактические и аварийно-восстановительные работы, контролирует параметры передаваемой мощности и качество электроснабжения.

Управление организацией сосредоточено в центральном офисе, руководящие должности занимают специалисты, обладающие опытом в сфере энергетики и инфраструктурных проектов железнодорожного транспорта.

В структуре предусмотрены производственные участки, отдел технического контроля, служба безопасности труда и подразделения, отвечающие за координацию ремонтов.

Эксплуатация многокилометровых линий электропередачи и контактной сети предполагает проведение плановых и внеплановых

инспекций, где применяются современные методы диагностики, включая тепловизионное обследование и анализ вибрационных нагрузок на опоры.

Наличие неблагоприятных климатических факторов определяет повышенные требования к качеству и надёжности электросетей, поэтому организация уделяет значительное внимание повышению устойчивости и безаварийной работе линий, проходящих по территориям с частыми порывами ветра и сезонными осадками.

Таким образом в работе, в рамках решения текущих задач, также учитываются природно-климатические факторы северного региона, характеризующегося низкими температурами в зимний период и повышенной влажностью во время межсезонья.

Данные аспекты необходимо учесть при дальнейшем выборе электрооборудования на подстанции.

Территориальное расположение проектируемой тяговой подстанции ЭЧЭ-85 «Нюхча» на территории города Кемь (Республика Карелия) [19] показана в работе на рисунке 1.

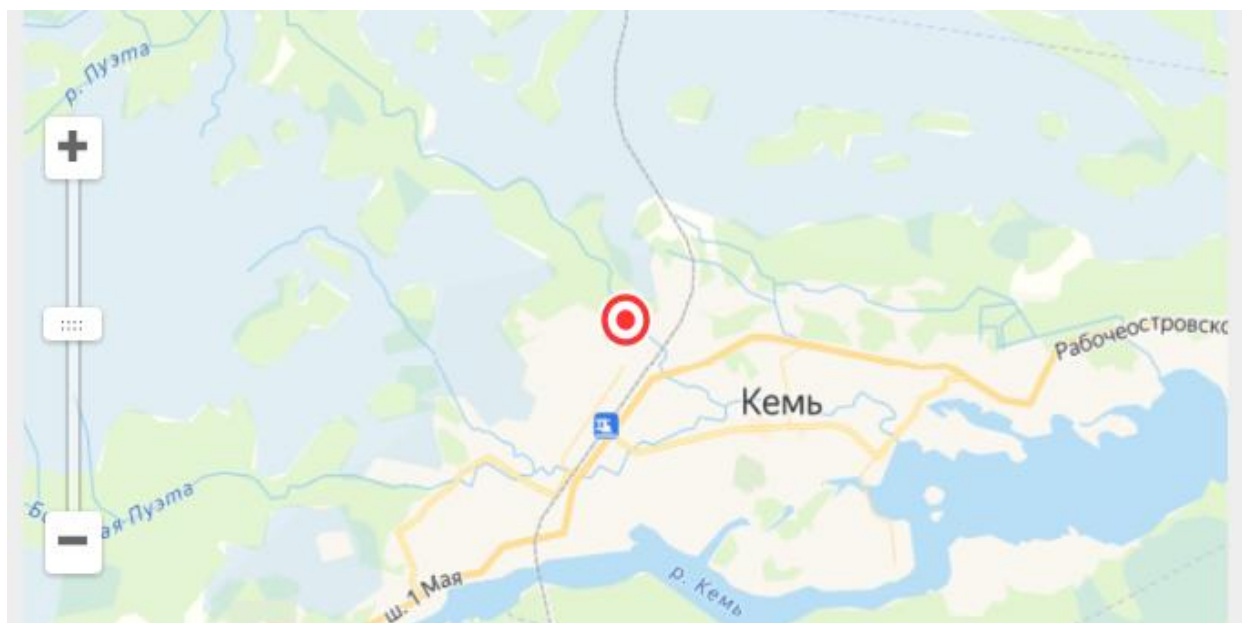


Рисунок 1 – Территориальное расположение проектируемой тяговой подстанции ЭЧЭ-85 на территории города Кемь (Республика Карелия)

Далее в работе проводится анализ исходных технических данных по проектированию электрической части тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД, непосредственно состоящей на балансе Кемской дистанции электроснабжения Октябрьской дирекции по энергообеспечению структурного подразделения «Трансэнерго».

На данном объекте, согласно исходным техническим данным, для питания потребителей будут использоваться два класса напряжения переменного тока: 27,5 кВ и 10 кВ.

Тяговая подстанция переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД, являясь опорной подстанцией региона, будет получать энергообеспечение от трех воздушных линий ВЛ-110.

Первичный источник питания – линия Малошуйка-Нюхча, функционирующая в составе энергосистемы Архангельской области, а также двухцепная линия Беломорск-Нюхча, состоящая из линий №159 и №160, которая интегрирована в энергосистему Республики Карелия.

Таким образом установлено, что на объекте исследования будут расположены три распределительных устройства (110 кВ, 27,5 кВ и 10 кВ), а также два силовых трехобмоточных трансформатора 110/27,5/10 кВ, выбор которых проводится в работе.

Также в работе проводится расчёт и выбор типов РУ-110 кВ, РУ-27,5 кВ и РУ-10 кВ, а также последующая их компоновка рациональным и современным оборудованием.

Данный выбор зависит от полученных результатов расчётной нагрузки, которые будут получены в работе на основании исходных данных.

При этом исходные данные включают удельные показатели нагрузки, которые напрямую зависят от объёма движения поездов, разнообразия тягового подвижного состава и особенностей расписания в регионе, в котором функционирует данная железнодорожная инфраструктура.

Основная задача расчёта электрических нагрузок базируется на анализе движения локомотивов и пассажирских составов в пиковые интервалы, когда суммарное потребление способно достигать максимальных значений.

Согласование пиков тяговой нагрузки с остальными видами электропотребителей влияет на формирование схем резервирования, особенно если опорные подстанции находятся в удалённых точках с большим количеством воздушных линий.

Подразделение, в ведении которого находится обозначенная тяговая подстанция, предоставляет сведения о годовых графиках нагрузок и планы по развитию железнодорожной инфраструктуры.

Таким образом, на этапе сбора исходного материала, за основу для дальнейшего проведения расчёта нагрузочной способности объекта проектирования принимается типичный суточный график нагрузки тяговой подстанции, представленный в работе на рисунке 2.

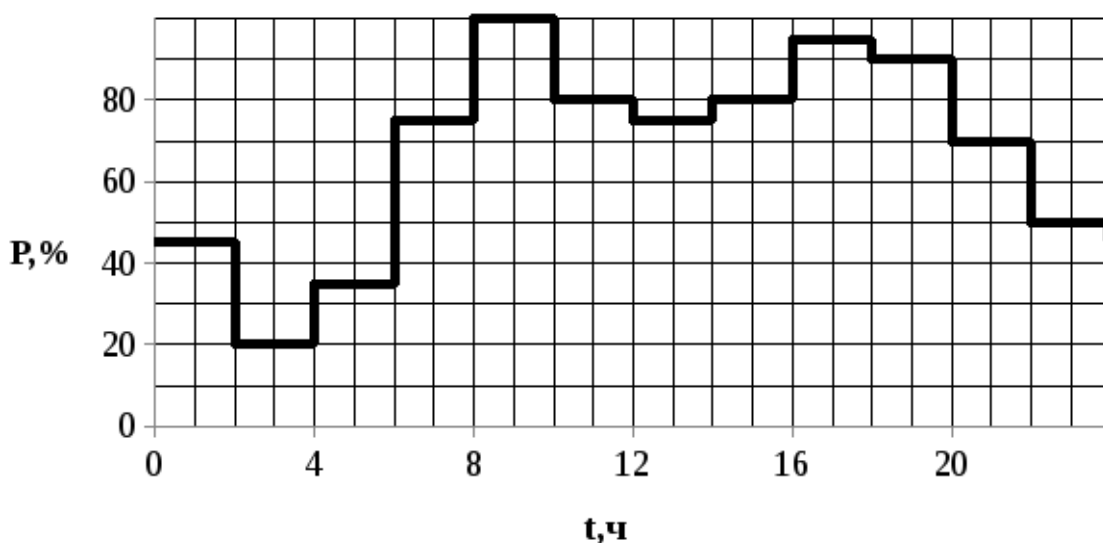


Рисунок 2 – Типичный суточный график нагрузки тяговой подстанции

Согласно техническим замерам в энергетическом узле, в котором планируется сооружение проектируемой тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД, максимальное значение фактической активной нагрузки всех потребителей напряжением 27,5 кВ и 10 кВ для графика рисунка 2, составляет 26,68 МВт (26680 кВт).

Таким образом, с учётом типичного графика нагрузки, определено проектные значения активной нагрузки для потребителей напряжением 27,5 кВ и 10 кВ. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Проектные значения активной нагрузки для потребителей напряжением 27,5 кВ и 10 кВ электрической части тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД

Наименование присоединения	$P_{пр}$, кВт	Категория надёжности потребителей
Проектная нагрузка 27,5 кВ		
Л1 (Ф1ДПР)	2500,0	1,2
Л2 (Ф1-27,5 «Нюхча-Сумпосад»)	5000,0	1,2
Л3 (Ф3-27,5 «Станция Нюхча»)	5000,0	2,3
Л4 (Ф1-27,5 «Нюхча-Малошуйка»)	5000,0	1,2
Л5 (Ф2ДПР)	2500,0	1,2
Всего проектной нагрузки 27,5 кВ	20000,0	1,2,3
Проектная нагрузка 10 кВ		
Л1 (Ф1ПЭ (север))	1250,0	1,2
Л2 (Ф3ПЭ (жилые дома ст. Нюхча))	1780,0	2,3
Л3 (Ф2ПЭ (восток))	1450,0	1,2
Л4 (Ф «РП-2» (районная нагрузка))	2200,0	1,2,3
Всего проектной нагрузки 10 кВ	6680,0	1,2,3
Всего проектной нагрузки ПС (ввод 110 кВ)	26680,0	1,2,3

Проектные значения активной нагрузки для потребителей напряжением 27,5 кВ и 10 кВ электрической части тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД, приведённые в форме таблицы 1, являются основой для расчёта электрических нагрузок и последующего выбора рациональных технических решений на данном объекте проектирования.

Также анализ проектных электрических нагрузок подстанции даёт возможность технической оценки совместной работы проектируемой тяговой подстанции 110/27,5/10 кВ с энергетической системой вышестоящего уровня, что позволяет выявить перспективы перевода части нагрузки на соседние энергетические объекты электрической тяговой сети при форс-мажоре или вывести оборудование в плановый ремонт без нарушения графика движения поездов.

Выводы по разделу.

В результате проведения анализа исходных технических данных по проектированию электрической части тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД, состоящей на балансе Кемской дистанции электроснабжения Октябрьской дирекции по энергообеспечению структурного подразделения «Трансэнерго», установлено следующее:

- тяговая подстанция, являясь опорной подстанцией региона, будет получать питание от трех воздушных линий ВЛ-110 (первичный источник питания – линия Малошуйка-Нюхча, функционирующая в составе энергосистемы Архангельской области, а также двухцепная линия Беломорск-Нюхча, состоящая из линий №159 и №160, которая интегрирована в энергосистему Республики Карелия);
- на объекте исследования будут расположены три распределительных устройства (110 кВ, 27,5 кВ и 10 кВ), а также два силовых трехобмоточных трансформатора 110/27,5/10 кВ, выбор которых проводится в работе;
- на данном объекте, согласно исходным техническим данным, для питания потребителей будут использоваться два класса напряжения переменного тока: 27,5 кВ (пять отходящих линий) и 10 кВ (четыре отходящие линии);
- согласно техническим замерам в энергетическом узле, в котором планируется сооружение проектируемой тяговой подстанции, максимальное значение фактической активной нагрузки всех потребителей напряжением 27,5 кВ и 10 кВ, составляет 26,68 МВт (26680 кВт).

Проектные значения активной нагрузки для потребителей напряжением 27,5 кВ и 10 кВ электрической части тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД являются основой для расчёта электрических нагрузок и последующего выбора рациональных технических решений на данном объекте проектирования.

2 Разработка проекта электрической части подстанции

2.1 Разработка схемы главных электрических соединений подстанции

Согласно техническим условиям на проектирование установлено, что тяговая подстанция переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД является проходной понизительной подстанцией, получающей питание по трём линиям 110 кВ:

- первая питающая линия – линия 110 кВ «Малошуйка-Нюхча», входящая в состав энергосистемы Архангельской области,
- вторая питающая линия – линия 110 кВ №159 «Беломорск-Нюхча», входящая в состав энергосистемы Республики Карелия;
- третья питающая линия – линия 110 кВ №160 «Беломорск-Нюхча», входящая в состав энергосистемы Республики Карелия.

Вторая и третья питающие линии 110 кВ конструктивно объединены в единую двухцепную воздушную линию электропередачи 110 кВ, которая выполняется на единых опорах.

В схеме рассматриваемой понизительной подстанции присутствуют следующие основные структурные элементы:

- два силовых трансформатора 110/27,5/10 кВ, преобразующие высшее напряжение 110 кВ до уровней 27,5 кВ и 10 кВ;
- распределительные устройства (РУ) высшего – 110 кВ, среднего – 27,5 кВ и низшего – 10 кВ напряжений.

Для питания потребителей подстанции будут использоваться два класса напряжения переменного тока: 27,5 кВ (пять отходящих линий) и 10 кВ (четыре отходящие линии).

Проводится выбор конструктивного выполнения и схем для применения в РУ всех классов напряжения тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД.

Учитывая инновационные решения, предлагается РУ 110 кВ тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД выполнить комплектным с применением ячеек (модулей) с элегазовой изоляцией (КРУЭ).

Выбор выполнения РУ 110 кВ тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» с использованием комплектных ячеек с элегазовой изоляцией обусловлен стремлением повысить уровень защиты оборудования, обеспечить его долговечность и снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций, связанных с пробоями изоляции.

Современные технологии, использующие элегазовую изоляцию, демонстрируют высокие показатели электрической прочности и устойчивости к воздействию внешних факторов, что позволяет добиться значительного увеличения срока эксплуатации подстанции при минимальных эксплуатационных затратах.

С учётом того, что проектируемая подстанция – проходная, предлагается в её РУ 110 кВ применить схему 110-12 «Одна рабочая секционированная и обходная система шин» [5], состоящей из двух рабочих и одной обходной системы сборных шин, которая представлена на рисунке 3.

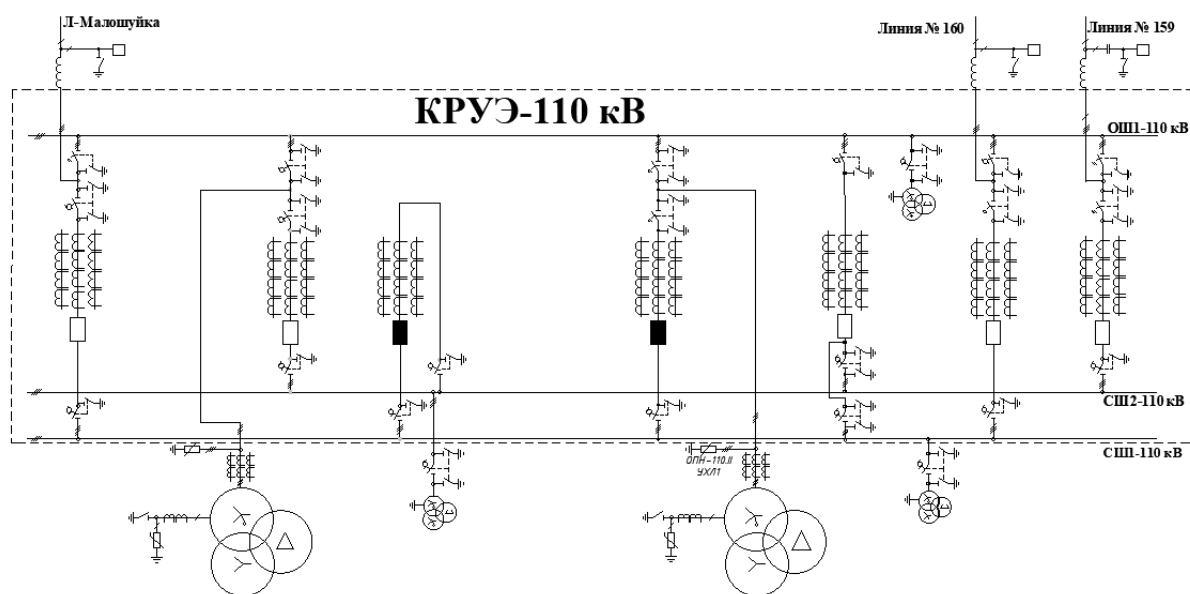


Рисунок 3 – Схема 110-12 «Одна рабочая секционированная и обходная система шин» для применения в РУ 110 кВ тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД

Применение схемы 110-12 «Одна рабочая секционированная и обходная система шин» в РУ 110 кВ позволяет создать оптимальные условия для распределения нагрузки и оперативного переключения на обходную систему в случае возникновения неисправностей в рабочей секции.

Данный подход способствует минимизации времени простоя оборудования и предотвращению риска полного отключения подстанции, что критически важно для поддержания стабильной работы энергосистемы в условиях высоких требований к надежности и безопасности.

Таким образом, системное решение, интегрирующее использование современных комплектных модулей с элегазовой изоляцией и схему с секционированной рабочей и обходной системой шин, обеспечивает высокую степень автоматизации и позволяет оперативно реагировать на изменения в рабочих режимах подстанции.

Такой подход не только улучшает эксплуатационные характеристики объекта, но и способствует повышению энергоэффективности, снижению аварийных рисков и увеличению общей устойчивости энергосистемы в динамично изменяющихся условиях.

В результате комплексного применения данных решений достигается оптимизация процессов управления, что является важным фактором для дальнейшей модернизации и развития подстанций в рамках современных требований электроэнергетики.

РУ 27,5 кВ тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД конструктивно выполняется открытым, так как надёжное и недорогое отечественное оборудование (выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы), которое выпускается на данный класс напряжения и которые предлагается установить на подстанции, выполняется открытым.

Преимущество открытой конструкции заключается в возможности применения экономически эффективных и проверенных временем аппаратов,

выпускаемых на территории Российской Федерации и соответствующих необходимым стандартам.

Такой подход позволяет не только обеспечить высокую надежность работы подстанции, но и снизить затраты на оборудование и его эксплуатацию, что особенно важно в условиях ограниченных бюджетных ресурсов.

Использование открытой конструкции оборудования также предполагает упрощение монтажных работ и дальнейшее техническое обслуживание, что способствует повышению оперативности проведения ремонтных работ и снижению времени простоев системы.

В РУ 27,5 кВ подстанции рекомендуется применение схемы 27,5-9 «Одна рабочая секционированная выключателем система шин» [5], которая представлена на рисунке 4.

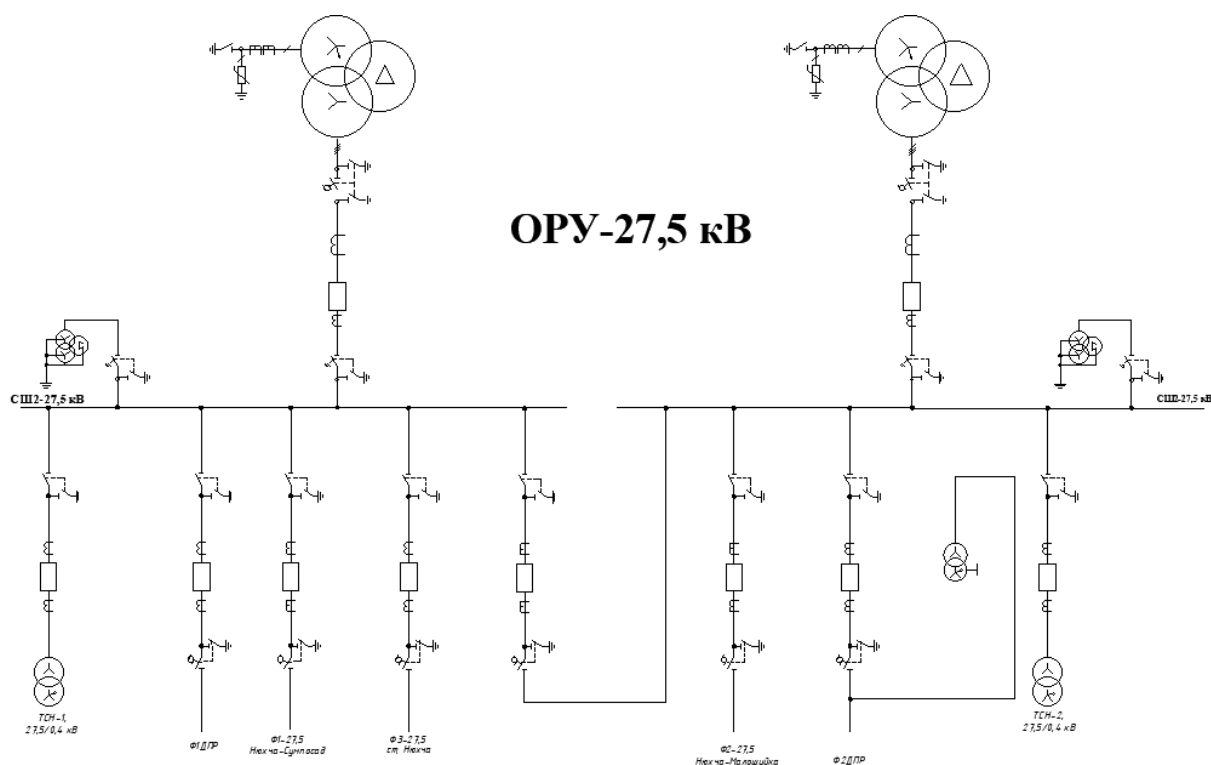


Рисунок 4 – Схема 27,5-9 «Одна рабочая секционированная выключателем система шин» для применения в РУ 27,5 кВ тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД

Таким образом, рекомендованная для применения в РУ-27,5 кВ схема 27,5-9, предусматривает применение одной рабочей секционированной выключателем системы шин, что позволяет обеспечить надежное разделение сети на независимые функциональные зоны.

Такой методический подход гарантирует возможность быстрого переключения в случае возникновения аварийных ситуаций, что, в свою очередь, способствует поддержанию стабильности работы энергосистемы и повышению ее устойчивости к возможным перегрузкам или отказам отдельных элементов.

РУ 10 кВ тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД конструктивно выполнено комплектным (КРУ 10 кВ) с применением ячеек внутренней установки.

Применение комплектного исполнения РУ 10 кВ тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» с использованием ячеек внутренней установки (КРУ 10 кВ) обусловлено необходимостью достижения высокой надежности, оперативности в управлении и техническом обслуживании электроустановки, а также обеспечения оптимального сочетания эксплуатационных характеристик и экономической эффективности.

Такой подход позволяет обеспечить централизованную интеграцию всех функциональных модулей защиты, управления и измерения, что способствует повышению устойчивости работы подстанции в условиях динамичных нагрузок и переменчивых эксплуатационных режимов.

Комплектное решение, реализуемое с применением ячеек внутренней установки, способствует упрощению монтажных работ, минимизации времени пусконаладки и снижению затрат на последующее техническое обслуживание, что является важным фактором для обеспечения непрерывности работы энергосистемы.

В РУ 10 кВ подстанции рекомендуется к применению схема 10-9 «Одна рабочая секционированная выключателем система шин» [5], представленная на рисунке 5.

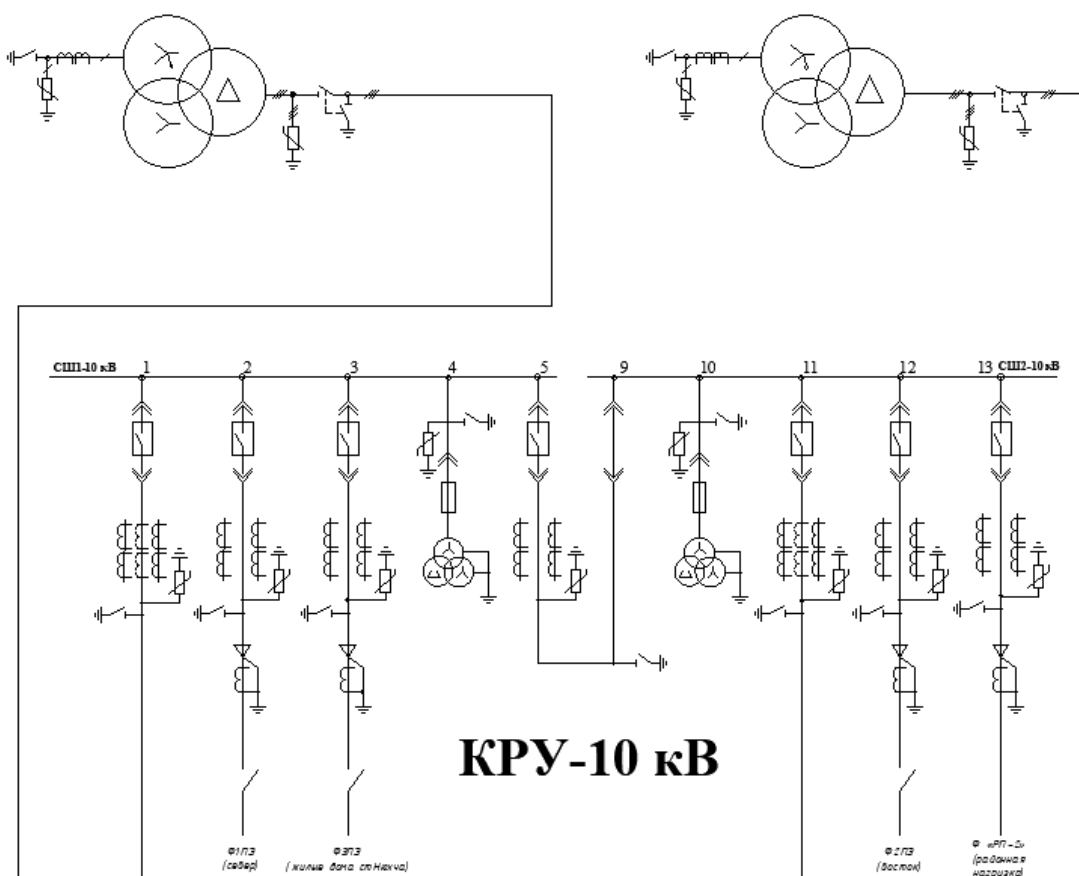


Рисунок 5 – Схема 10-9 «Одна рабочая секционированная выключателем система шин» для применения в РУ 10 кВ тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД

Рекомендуемая схема 10-9 «Одна рабочая секционированная выключателем система шин» для данного типа подстанции позволяет создать оптимальное распределение нагрузок и гарантировать возможность быстрого переключения на резервные цепи в случае возникновения аварийных ситуаций или необходимости проведения ремонтных работ.

Такая конфигурация системы шин обеспечивает высокий уровень разделения сети на функциональные зоны, что значительно повышает безопасность эксплуатации за счет ограничения распространения отказов и позволяет оперативно локализовать неисправности.

Кроме того, применение секционированной схемы снижает риск перегрузок отдельных элементов системы, что является критически важным

для поддержания стабильности работы подстанции в условиях интенсивного использования тяговой сети железнодорожного транспорта.

Интеграция современного комплектного оборудования с ячейками внутренней установки в сочетании с выбранной схемой работы шин демонстрирует высокую адаптивность к требованиям современного рынка электроэнергетики, где особое значение приобретает скорость реагирования на изменения в технологических режимах и возможность дистанционного контроля состояния оборудования.

Такой подход не только способствует повышению уровня надежности и безопасности эксплуатации подстанции, но и обеспечивает гибкость системы, позволяющую при необходимости проводить модернизацию и расширение функциональных возможностей без значительных капитальных затрат.

В итоге, комплексное применение данных решений представляет собой обоснованный инженерный выбор, направленный на формирование высокоэффективной, адаптивной и экономически выгодной системы электроснабжения, способной удовлетворить требования современных условий эксплуатации тяговых подстанций.

Также для обеспечения питания собственных нужд подстанции, необходимо спроектировать систему собственных нужд (СН) подстанции и выбрать трансформаторы собственных нужд (ТСН).

В системе СН предлагается применить два силовых ТСН напряжением 27,5/0,4 кВ, получающим питание от разных секций сборных шин РУ 27,5 кВ, а также двух силовых ТСН напряжением 10/0,4 кВ, аналогично получающим питание от разных секций сборных шин РУ 10 кВ тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД.

Все принятые решения для внедрения в РУ напряжением 110 кВ, 27,5 кВ, а также 10 кВ тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД, после выбора оборудования, показаны в графической части работы.

2.2 Расчет электрических нагрузок тяговой подстанции

Расчет электрических нагрузок на проектируемой тяговой подстанции 110/27,5/10 кВ «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия является необходимым и актуальным мероприятием в контексте обеспечения надежности и эффективности функционирования современной энергосистемы.

В условиях динамичного изменения параметров энергопотребления и роста требований к качеству поставляемой электроэнергии, точное определение величины нагрузок позволяет обеспечить оптимальное проектирование оборудования, предотвратить перегрузки и минимизировать риск возникновения аварийных ситуаций.

Научно обоснованный расчет нагрузок дает возможность учесть как текущие, так и перспективные показатели потребления, что позволяет интегрировать в проект современные методы прогнозирования динамики энергозатрат и обеспечить стабильность работы подстанции при изменении режимов эксплуатации.

Методология расчета электрических нагрузок предусматривает использование комплексных аналитических моделей, способных учитывать влияние различных факторов, таких как сезонные колебания, особенности технологических процессов и специфику распределения нагрузки между различными уровнями напряжения.

Применение современных цифровых инструментов и программных комплексов позволяет детально смоделировать поведение электрической сети в различных сценариях, что способствует повышению точности расчетов и своевременному выявлению потенциальных проблем.

Такой подход позволяет не только оптимизировать конструктивные решения подстанции, но и обеспечить эффективное распределение мощности между линиями и трансформаторами, что в конечном итоге приводит к повышению энергетической эффективности всей системы.

На основе результатов расчетов нагрузок также можно разрабатывать мероприятия по снижению риска перегрузок и минимизировать вероятность выхода из строя элементов сети.

При этом расчет электрических нагрузок становится фундаментальным этапом при подготовке технической документации, так как он позволяет создать обоснованную базу для дальнейшей модернизации и адаптации подстанции к изменяющимся условиям эксплуатации.

Таким образом, комплексный анализ электрических нагрузок на проектируемой тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД не только повышает надежность и устойчивость энергосистемы, но и способствует рациональному использованию ресурсов, что является залогом долгосрочной эксплуатационной эффективности и безопасности работы оборудования в условиях современной энергетики.

«Максимальная расчётная активная нагрузка присоединений подстанции, кВт» [15]:

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

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

K_c – значение коэффициента спроса» [15].

Так как подстанция работает в непрерывном продолжительном режиме круглосуточно, принимается значение $K_c = 1$.

«Максимальная расчётная полная нагрузка присоединений подстанции, кВА» [15]:

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

где $\cos \varphi$ - «коэффициент активной мощности, о.е.» [15].

«Максимальная расчётная реактивная нагрузка присоединений подстанции, квар» [15]:

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

«Суммарная нагрузка на шинах 10 кВ и 27,5 кВ подстанции» [15]:

$$P_{p.i} = K_o \cdot \sum_{i=1}^n P_p, \quad (4)$$

$$Q_{p.i} = K_o \cdot \sum_{i=1}^n Q_p, \quad (5)$$

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

где $P_{p.i}$, $Q_{p.i}$, $S_{p.i}$ - «соответственно, значение расчётной активной,

реактивной и полной нагрузки на сборных шинах подстанции i – напряжения (10 кВ и 27,5 кВ);

K_o – коэффициент одновременности максимума нагрузок на шинах подстанции соответствующего напряжения, о.е» [15].

«Суммарная полная нагрузка всей подстанции определяется как сумма нагрузок на шинах 10 кВ и 27,5 кВ» [15]:

$$P_{p.ПС} = P_{p.35} + P_{p.10}, \quad (7)$$

$$Q_{p.ПС} = Q_{p.35} + Q_{p.10}, \quad (8)$$

$$S_{p.ПС} = \sqrt{P_{p.ПС}^2 + Q_{p.ПС}^2}, \quad (9)$$

где « $P_{p.35}$, $Q_{p.35}$ – соответственно, расчётная активная и реактивная нагрузка на сборных шинах подстанции напряжением 27,5 кВ;

$P_{p.10}$, $Q_{p.10}$ – соответственно, расчётная активная и реактивная нагрузка на сборных шинах подстанции напряжением 10 кВ» [15].

«При этом значение расчётного тока нагрузки» [15]:

$$I_{p.} = \frac{S_{p.}}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (10)$$

где « U_n – номинальное напряжение, кВ» [15].

Расчёт электрических нагрузок проводится на примере новой линии Л1 (Ф1ДПР) напряжением 27,5 кВ, присоединяющееся к первой секции сборных шин 27,5 кВ тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча».

Расчётная активная, реактивная и полная нагрузки, а также значение расчётного тока нормального режима определяются, соответственно, по формулам (1), (2), (3) и (10):

$$\begin{aligned} P_p &= 2500 \cdot 1 = 2500 \text{ кВт}, \\ S_p &= \frac{2500}{0,94} \approx 2660 \text{ кВА}, \\ Q_p &= \sqrt{2660^2 - 2500^2} = 908,6 \text{ квар}, \\ I_p &= \frac{2660}{\sqrt{3} \cdot 27,5} = 55,8 \text{ А}. \end{aligned}$$

Полученные результаты расчёта нагрузок для данного присоединения занесены в первую строку таблицы 1.

Последующий расчет электрических нагрузок присоединений, секций сборных шин 27,5 кВ и 10 кВ, а также всего объекта проектирования, проводится аналогично.

Результаты расчёта электрической нагрузки тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия занесены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчёта электрической нагрузки тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия

Наименование присоединения	$P_{p.,}$ кВт	$Q_{p.,}$ квар	$S_{p.,}$ кВА	$I_{p.,}$ А
Нагрузка 27,5 кВ				
СШ-1, 27,5 кВ				
Л1 (Ф1ДПР)	2500,0	908,6	2660,0	55,8
Л2 (Ф1-27,5 «Нюхча-Сумпосад»)	5000,0	1814,8	5319,1	111,7
Всего нагрузки СШ-1, 27,5 кВ ($K_o = 0,9$)	6750,0	2451,1	7181,2	150,8
СШ-2, 27,5 кВ				
Л3 (Ф3-27,5 «Станция Нюхча»)	5000,0	1814,8	5319,1	111,7
Л4 (Ф1-27,5 «Нюхча-Малошуйка»)	5000,0	1814,8	5319,1	111,7
Л5 (Ф2ДПР)	2500,0	908,6	2660,0	55,8
Всего нагрузки СШ-2, 27,5 кВ ($K_o = 0,9$)	11250,0	4084,4	11968,5	251,3
Всего нагрузки 27,5 кВ	18000,0	6535,5	19149,7	402,0
Нагрузка 10 кВ				
СШ1-10 кВ				
Л1 (Ф1ПЭ (север))	1250,0	454,3	1330,0	76,9
Л2 (Ф3ПЭ (жилые дома ст. Нюхча))	1780,0	646,0	1893,6	109,5
Всего нагрузки СШ-1, 10 кВ ($K_o = 0,9$)	2727,0	990,3	2901,2	167,7
СШ2-10 кВ				
Л3 (Ф2ПЭ (восток))	1450,0	526,4	1542,6	89,2
Л4 (Ф «РП-2» (районная нагрузка))	2200,0	798,4	2340,4	135,3
Всего нагрузки СШ-2, 10 кВ ($K_o = 0,9$)	3285,0	1192,3	3494,7	202,0
Всего нагрузки 10 кВ	6012,0	2182,6	6395,9	369,7
Всего нагрузки ПС (ввод 110 кВ)	24012,0	8718,1	25545,7	134,1

В последней графе таблицы 2 ток нагрузки рассчитан для ввода 110 кВ подстанции. Полученные результаты используются далее.

2.3 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов

Далее проводится выбор силовых трансформаторов с целью их установки на проектируемой тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия.

Из таблицы 1 можно сделать вывод, что подавляющее большинство потребителей, которых питает подстанция на напряжениях 27,5 кВ и 10 кВ, относятся к 1 и 2 категориям надёжности, следовательно, они должны быть обеспечены двумя независимыми источниками питания.

Таким образом, для установки на проектируемой тяговой подстанции принимается два силовых трансформатора 110/27,5/10 кВ.

Кроме того, применение двух трансформаторов оправдано не только по причине повышенных требований к надёжности, но и с точки зрения гибкости эксплуатационных режимов.

На подстанции принимается за основу раздельная работа трансформаторов в нормальном режиме, что способствует распределению нагрузок и снижает вероятность перегрева обмоток, а также уменьшает удельные потери.

Мониторинг загрузки и своевременная оценка технического состояния каждого трансформатора подстанции позволяют оптимизировать график ремонтов и продлевать ресурс оборудования. При этом соответствующее разделение потоков мощности снижает пиковое тепловое воздействие на изоляцию и минимизирует риск повреждений во время режимов перегрузки.

Кроме того, известно, что увеличение числа трансформаторов свыше двух обычно не имеет достаточного экономического эффекта, поскольку возрастает совокупная стоимость монтажа, обслуживания и ремонта дополнительного оборудования. Таким образом, число и номинальные классы напряжения трансформаторов для применения на объекте проектирования, обосновано.

«Расчётная мощность силового трансформатора для установки на двухтрансформаторной подстанции» [15]:

$$S_{\text{ном.т.р.}} \geq \frac{S_{p.ПС}}{2 \cdot 0,7}, \quad (11)$$

где « $S_{p.ПС}$ – расчётная суммарная нагрузка подстанции» [15].

Для условий проектируемой подстанции с учётом ранее рассчитанного значения суммарной нагрузки:

$$S_{\text{ном.т.р.}} \geq \frac{25545,7}{2 \cdot 0,7} \approx 18246,9 \text{ кВА.}$$

Учитывая результаты расчётного выбора мощности трансформатора, а также принимая во внимание то, что проектируемая подстанция – тяговая, принимаются к установке два силовых трансформатора марки ТМТНЖСМ-25000/110 УХЛ1 [4].

Применение двух силовых трансформаторов марки ТМТНЖСМ-25000/110 УХЛ1 на подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» обусловлено необходимостью обеспечения высокой надежности и стабильности функционирования электросети в условиях переменных нагрузок и повышенных требований к качеству энергоснабжения.

Данная конструктивная реализация предназначена для установки на тяговых подстанциях и позволяет создать резервирование активных мощностей, что обеспечивает непрерывность работы системы даже в случае отказа одного из трансформаторов, а также способствует более равномерному распределению электрических нагрузок между элементами подстанции.

Использование современных трансформаторов с высокими эксплуатационными характеристиками на тяговой подстанции позволяет добиться оптимальной работы оборудования в широком диапазоне режимов, снижая риск перегрузок и повышая общую энергоэффективность установки.

Проверка выбранных силовых трансформаторов ТМТНЖСМ-25000/110 УХЛ1 для установки на подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» представляет собой важный этап обеспечения оптимальной работы электросистемы как в нормальном режиме, так и в условиях послеаварийного перегрузочного режима.

Такой комплексный анализ включает в себя оценку характеристик трансформаторов при стандартной эксплуатации, когда устройство работает в пределах оптимальной загрузки, а также при динамичных изменениях нагрузки, характерных для послеаварийного режима, что позволяет

определить предельные возможности оборудования с точки зрения допустимого перегрузочного режима.

Проверка на оптимальную загрузку силового трансформатора в нормальном режиме проводится по следующему условию [3]:

$$K_{3.H} = \frac{S_{p.ПC}}{2 \cdot S_{T.НОМ}} \leq 0,7. \quad (12)$$

Условие проверки по формуле (12) выполняется:

$$K_{3.H} = \frac{25545,7}{2 \cdot 25000} = 0,51 \leq 0,7.$$

Проверка на допустимую перегрузку силового трансформатора в послеаварийном режиме проводится по следующему условию [3]:

$$K_{3.П} = \frac{S_{ПC}}{S_{T.НОМ}} \leq 1,4. \quad (13)$$

Условие проверки по формуле (13) выполняется:

$$K_{3.П} = \frac{25545,7}{2 \cdot 25000} = 1,02 \leq 1,4.$$

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о целесообразности использования двух силовых трансформаторов марки ТМТНЖСМ-25000/110 УХЛ1 для установки на подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча».

Показано, что применение данных силовых трансформаторов обосновано их способностью обеспечивать стабильную работу энергосистемы

как в нормальном режиме эксплуатации, так и при временных перегрузках, характерных для послеаварийных условий.

Установлено, что трансформаторы данной марки разработаны для применения на современных тяговых подстанциях и демонстрируют высокие эксплуатационные характеристики, отвечают требованиям по оптимальной загрузке и устойчивости к кратковременным перегрузкам, что позволяет минимизировать риск повреждений оборудования и обеспечить непрерывность электроснабжения ответственных потребителей контактной сети проектируемой подстанции.

Таким образом, результаты проведённой комплексной оценки подтверждают, что выбранные трансформаторы марки ТМТНЖСМ-25000/110 УХЛ1 обладают достаточным запасом прочности и надежности, что является ключевым фактором в условиях современного уровня требований к безопасности и эффективности функционирования тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия.

2.4 Расчёт токов короткого замыкания

Расчет токов короткого замыкания на тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия является неотъемлемой частью процесса проектирования и эксплуатации энергосистемы, поскольку он обеспечивает возможность прогнозирования и анализа поведения электрической сети в аварийных условиях.

Такой расчет имеет первостепенное значение для установки и корректировки уставок защитных устройств, позволяющих своевременно обнаруживать и локализовывать аварийные ситуации, тем самым минимизируя риск повреждения оборудования и обеспечивая непрерывность электроснабжения.

Актуальность данного процесса обусловлена постоянным ростом требований к надежности работы электросетей, где динамичные изменения нагрузок и многополюсные подключения требуют точного определения величин токов, возникающих при коротких замыканиях, что в свою очередь позволяет обеспечить безопасное и устойчивое функционирование системы при любых эксплуатационных режимах.

В основе алгоритма расчета токов короткого замыкания лежат методические подходы, позволяющие моделировать поведение электрической сети с учетом всех элементов системы, начиная от источников питания и трансформаторов, заканчивая линиями передачи и распределительными устройствами.

Процесс расчета включает в себя определение эквивалентного сопротивления сети в точке замыкания, оценку влияния последовательных реактивных составляющих и расчёт распределения токов в зависимости от характера соединения оборудования.

Таким образом, расчет токов короткого замыкания на подстанции «Нюхча» представляет собой фундаментальный этап в обеспечении безопасности и надежности работы энергосистемы, позволяющий не только предвидеть и предотвратить возможные аварийные ситуации, но и обеспечить эффективное управление ресурсами, оптимизировать параметры эксплуатации оборудования и повысить общую энергоэффективность подстанции в условиях постоянно изменяющихся нагрузок и эксплуатационных требований.

Процесс расчёта токов КЗ начинается с изучения фактической конфигурации сети и параметров её элементов: внешних источников питания, силовых трансформаторов, секций шин и линий, после чего формируется упрощённая модель, дающая возможность аналитически определить максимальные уровни трёхфазного короткого замыкания.

Данная модель отображается в виде расчётной схемы, представленной в работе на рисунке 6.

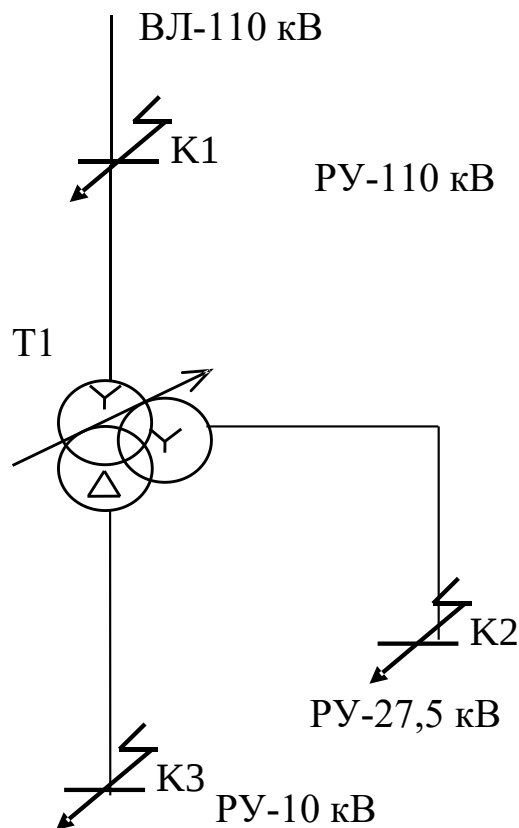


Рисунок 6 – Расчётная схема для определения токов КЗ

Схема замещения для определения токов КЗ, построенная по расчётной схеме, представлена на рисунке 7.

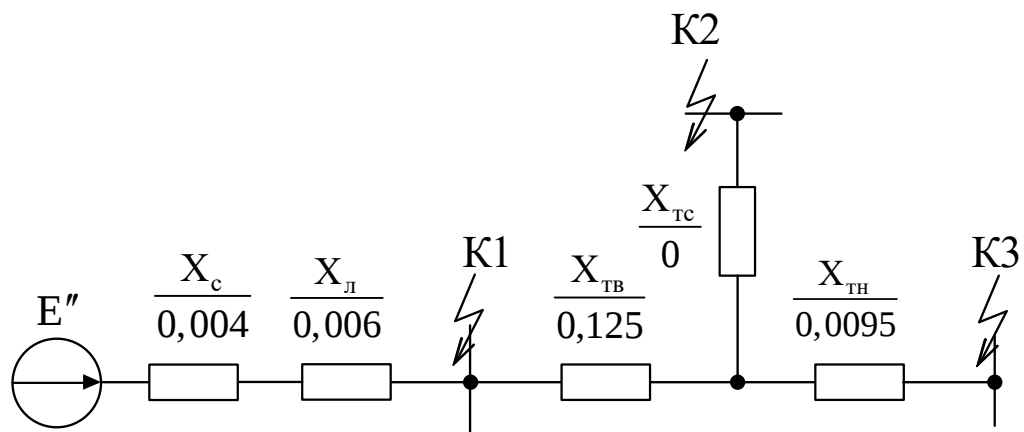


Рисунок 7 – Схема замещения для определения токов КЗ

«Базисная мощность в работе для удобства расчётов принимается равной номинальной мощности силового трансформатора тяговой подстанции 110/27,5/10 кВ – 25000 кВА» [14].

Максимальные значения напряжений для ступеней схемы замещения зависят от максимальных напряжений на выводах силовых трансформаторов марки ТМТНЖСМ-25000/110 УХЛ1 и принимаются следующими (по справочным данным):

$$U_{\delta 1} = 115 \text{ кВ},$$

$$U_{\delta 2} = 27,5 \text{ кВ},$$

$$U_{\delta 3} = 10,5 \text{ кВ}.$$

При расчёте в работе принимается единое базисное напряжение основной ступени ВН, равное 115 кВ. К данному напряжению приводятся все полученные значения сопротивлений схемы замещения.

«Базисный ток» [14]:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta}}. \quad (14)$$

«Для ступеней напряжения 110 кВ, 27,5 кВ и 10 кВ схемы замещения, значения базисного тока с учётом принятых ранее базисных условий» [14] по формуле (14):

$$I_{\delta 1} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,13 \text{ кА},$$

$$I_{\delta 2} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 27,5} = 0,52 \text{ кА},$$

$$I_{\delta 3} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 1,37 \text{ кА}.$$

«Сопротивление питающей энергосистемы» [14]:

$$x_c = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{\kappa}''}, o.e., \quad (15)$$

где S_{κ}'' - «мощность энергосистемы в режиме КЗ на шинах источника питания» [14].

«При приведении к базисной мощности» [14] по формуле (15):

$$x_{c.} = \frac{16}{4000} = 0,004 o.e.$$

«Сопротивление питающей линии 110 кВ» [14]:

$$x_l = x_0 \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2}, o.e., \quad (16)$$

где « x_0 – удельное индуктивное сопротивление линии, Ом/км;

L – длина линии, км» [14].

«Питающая ВЛ-110 кВ имеет длину 20 км, следовательно, её сопротивление» [14]:

$$x_l = 0,4 \cdot 20 \cdot \frac{25}{115^2} \approx 0,015 o.e.$$

«Относительные сопротивления лучей схемы замещения трехобмоточного силового трансформатора подстанции, при приведении к базисным условиям» [14]:

$$x_{m\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} \cdot \frac{0,5 \cdot (U_{\kappa.вн}, \% + U_{\kappa.вс}, \% - U_{\kappa.сн}, \%)}{100}, \quad (17)$$

$$x_{mc} = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} \cdot \frac{0,5 \cdot (U_{к.вс}, \% + U_{к.сн}, \% - U_{к.вн}, \%)}{100}, \quad (18)$$

$$x_{mn} = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{ном}} \cdot \frac{0,5 \cdot (U_{к.вн}, \% + U_{к.сн}, \% - U_{к.вс}, \%)}{100}. \quad (19)$$

«Расчет сопротивлений силового трансформатора» [14] производится по соответствующим формулам (17,18,19):

$$x_{mv} = \frac{25}{25} \cdot \frac{0,5 \cdot (22 + 12,5 - 9,5)}{100} = 0,125 \text{ o.e.},$$

$$x_{mc} = \frac{25}{25} \cdot \frac{0,5 \cdot (12,5 + 9,5 - 22)}{100} = 0 \text{ o.e.},$$

$$x_{mn} = \frac{25}{25} \cdot \frac{0,5 \cdot (22 + 9,5 - 12,5)}{100} = 0,095 \text{ o.e.}$$

На втором этапе необходимо провести расчёт требуемых расчётных параметров тока КЗ для схемы замещения.

Известно, что начальное значение периодической составляющей «трёхфазного тока короткого замыкания и ударный ток на выводах силового трансформатора» [14] в режиме максимальной загрузки характеризуют высоту пики и интенсивность электродинамических воздействий, возникающих в первые мгновения аварии.

Периодическая составляющая определяет амплитуду устоявшегося короткого замыкания и указывает на динамику потоков энергии в элементах сети, а ударный ток отражает мгновенную перегрузку оборудования, вызывающую пиковые механические усилия в его узлах.

Оценка обоих параметров подчиняется требованиям надёжности и безопасности, поскольку правильно рассчитанные значения позволяют оптимизировать как собственно систему защиты, так и механическую прочность основного оборудования для установки в РУ всех классов

напряжения на подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия.

«Начальное значение периодической составляющей тока КЗ при приведении к базисным условиям, в именованных единицах» [14]:

$$I_K^{(3)} = \frac{E''}{x_{рез}} \cdot I_\phi. \quad (20)$$

где « $x_{рез}$ – значение результирующих сопротивлений к каждой точке КЗ, о.е.» [14].

«Значение результирующего сопротивления к точке К1 в относительных единицах» [14]:

$$x_{рез.К1} = x_c + x_l, \text{ о.е.}, \quad (21)$$

$$x_{рез.К1} = 0,004 + 0,015 = 0,019 \text{ о.е.}$$

«Начальное значение периодической составляющей тока трёхфазного КЗ в расчётной точке К1 (выводы трансформатора 110 кВ)» [14]:

$$I_{K1\max}^{(3)} = \frac{1}{0,019} \cdot 0,13 \approx 6,8 \text{ кА.}$$

«Аналогично определены результирующие сопротивления и начальное значение периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания в расчётной точке К2 (выводы трансформатора 27,5 кВ) в максимальном режиме работы с приведением к базисным условиям в именованных единицах» [14]:

$$x_{рез.К2} = x_c + x_l + x_{тв} + x_{тс}, \text{ о.е.}, \quad (22)$$

$$x_{рез.К2} = 0,004 + 0,015 + 0,125 + 0 = 0,144 \text{ о.е.},$$

$$I_{К2\max}^{(3)} = \frac{1}{0,144} \cdot 0,52 = 3,61 \text{ кА}.$$

«Аналогично определены результирующие сопротивления и начальное значение периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания в расчётной точке К3 (выводы трансформатора 10 кВ) в максимальном режиме работы с приведением к базисным условиям в именованных единицах» [14]:

$$x_{рез.К3} = x_c + x_l + x_{тв} + x_{тн}, \text{ о.е.}, \quad (23)$$

$$x_{рез.К3} = 0,004 + 0,015 + 0,125 + 0,095 = 0,239 \text{ о.е.},$$

$$I_{К3\max}^{(3)} = \frac{1}{0,239} \cdot 1,37 = 5,73 \text{ кА}.$$

«Значение ударного тока в расчётных точках схемы» [14]:

$$i_{уд.К} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{уд} \cdot I_K^{(3)}, \quad (24)$$

где « $\kappa_{уд}$ – ударный коэффициент трёхфазного тока К3» [14].

«Расчёт ударных токов трёхфазного К3» [14]:

$$i_{удК1} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 6,8 = 17,31 \text{ кА},$$

$$i_{удК2} = \sqrt{2} \cdot 1,6 \cdot 3,61 = 8,17 \text{ кА},$$

$$i_{удК3} = \sqrt{2} \cdot 1,4 \cdot 5,73 = 11,34 \text{ кА}.$$

Необходимо провести расчёты двухфазного (минимального) тока КЗ, которые используются при определении надёжности и чувствительности релейной защиты, поскольку двухфазные режимы характеризуются отличным от трёхфазных аварий распределением тока и напряжения и двухфазный ток КЗ считается минимальным расчётным током при проверке указанных параметров.

«Значение двухфазного тока КЗ» [14]:

$$I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_K^{(3)}. \quad (25)$$

«Расчёт токов двухфазного КЗ, соответственно, в расчётных точках К1, К2 и К3 схемы замещения» [14] по формуле (25):

$$I_{K1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 6,8 = 5,89 \text{ кА},$$

$$I_{K2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 3,61 = 3,13 \text{ кА},$$

$$I_{K3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 5,73 = 4,96 \text{ кА}.$$

Результаты расчёта токов КЗ, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчёта токов КЗ

Параметр, единица измерения	Значение параметра в точке КЗ		
	Точка К1 (110 кВ)	Точка К2 (27,5 кВ)	Точка К3 (10 кВ)
$I_K^{(3)}, \text{кА}$	6,80	3,61	5,73
$I_K^{(2)}, \text{кА}$	5,89	3,13	4,96
$i_{уд.К}, \text{кА}$	17,31	8,17	11,34

Полученные результаты расчёта токов КЗ применяются в работе далее.

2.5 Выбор проводников на подстанции

В результате выбора способа канализации электроэнергии для применения на тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия, рекомендуются к применению следующие типы и марки проводников:

- на стороне 110 кВ (питающая линия 110 кВ) – предлагается применить современные проводники воздушной линии марки АААС-Z (производства ООО «Ламифил») [12];
- на стороне 27,5 кВ (отходящие линии 27,5 кВ) – также предлагается применить современные воздушные линии марки АААС-Z (производства ООО «Ламифил») [12];
- на стороне 10 кВ (отходящие линии 10 кВ) – предлагается применить современные кабельные линии марки АПвВ-10 (изоляция – сшитый полиэтилен) [7].

Принятые решения способствуют повышению эксплуатационной эффективности энергосистемы, снижению потерь и минимизации затрат на техническое обслуживание, что является залогом устойчивой работы подстанции и обеспечения надежного электроснабжения тяговых потребителей.

На питающей линии высокого напряжения 110 кВ используются современные проводники воздушной линии марки АААС-Z, производимыми ООО «Ламифил» (Российская Федерация) [12].

Известно, что такие современные проводники обладают улучшенными механическими и электрическими характеристиками, что обеспечивает их устойчивость к воздействию атмосферных условий, способствует уменьшению эксплуатационных потерь, что особенно важно для обеспечения стабильной работы сети.

Приводится методика выбора проводников напряжением выше 1 кВ.

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

$$F_{\text{э}} = \frac{I_{\text{р.}}}{j_{\text{э}}}, \quad (26)$$

где « $j_{\text{э}}$ – экономическая плотность тока, А/мм² (для проводников воздушных линий принимается $j_{\text{э}}=1,1$ А/мм², для проводников кабельных линий – $j_{\text{э}}=1,6$ А/мм²)» [11].

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

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{р.}}, \quad (27)$$

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

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

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{р. max}}. \quad (28)$$

«Проверка выбранного сечения провода по механической прочности» [15]:

$$F_{\text{ст}} \geq F_{\text{мин}}, \text{ мм}^2. \quad (29)$$

По приведённым условиям, проводится выбор сечения провода питающей воздушной линии 110 кВ подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД:

$$F_{\text{э}} = \frac{134,1}{1,1} \approx 121,9 \text{ мм}^2.$$

Для применения на объекте, на стороне 110 кВ, выбирается ближайший стандартный провод марки АААС-Z177-1Z сечением 177 мм² [12].

Проверки выбранного проводника питающей воздушной линии 110 кВ, по току нормального и максимального режима, а также по механической прочности, включая условия (27) – (29), выполняются:

$$\begin{aligned} 572 A &\geq 134,1 A, \\ 572 A &\geq 187,7 A, \\ 177 \text{ мм}^2 &\geq 120 \text{ мм}^2. \end{aligned}$$

Таким образом, в качестве проводника питающей воздушной линии 110 кВ подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД, окончательно принимается провод марки АААС-Z177-1Z сечением 177 мм² и допустимым током 572 А [12].

Для применения на отходящих линиях 27,5 кВ также применяются современные проводники марки воздушной линии марки АААС-Z, производимыми ООО «Ламифил» (Российская Федерация) [12].

Выбор сечения проводников данных линий осуществляется по методике и расчётным формулам, приведённым в работе ранее (при выборе сечения питающей линии 110 кВ) по условиям (27) – (30).

Результаты выбора проводников на отходящих линиях 27,5 кВ подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты выбора проводников для применения на отходящих воздушных линиях 27,5 кВ подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча»

Наименование линии	I_p, A	$I_{p.max}, A$	Марка проводника	$I_{доп}, A$
Л1 (Ф1ДПР)	55,8	78,1	АААС-Z148-1Z	482,0
Л2 (Ф1-27,5 «Нюхча-Сумпосад»)	111,7	156,4	АААС-Z148-1Z	482,0
Л3 (Ф3-27,5 «Станция Нюхча»)	111,7	156,4	АААС-Z148-1Z	482,0
Л4 (Ф1-27,5 «Нюхча-Малошуйка»)	111,7	156,4	АААС-Z148-1Z	482,0
Л5 (Ф2ДПР)	55,8	78,1	АААС-Z148-1Z	482,0

Таким образом, в качестве проводников всех отходящих воздушных линиях 27,5 кВ подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД, окончательно принимаются современные провода марки АААС-Z148-1Z сечением 148 мм² [12].

Для применения на отходящих линиях 10 кВ рекомендуются к применению современные кабельные линии марки АПвВ-10. Выбор данных кабельных линий осуществляется по методике и расчётным формулам, приведённым в работе ранее (при выборе сечения питающей линии 110 кВ) по условиям (27) – (30).

Результаты выбора проводников для применения на отходящих линиях 10 кВ подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты выбора проводников для применения на отходящих линиях 10 кВ подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД

Наименование присоединения	I_p , А	$I_{p,max}$, А	Марка кабеля	$I_{доп.}$, А
СШ1-10 кВ				
Л1 (Ф1ПЭ (север))	76,9	107,7	3АПвВ 1×35-10	172,0
Л2 (Ф3ПЭ (жилые дома ст. Нюхча))	109,5	153,3	3АПвВ 1×35-10	172,0
СШ2-10 кВ				
Л3 (Ф2ПЭ (восток))	89,2	124,9	3АПвВ 1×35-10	172,0
Л4 (Ф «РП-2» (районная нагрузка))	135,3	189,4	3АПвВ 1×35-10	172,0

Таким образом, на всех линиях 10 кВ, предлагается применить современные кабельные линии марки 3АПвВ 1×35-10 сечением 35 мм² и допустимым током 172 А. В результате выбора способа канализации электроэнергии для применения на тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия, выбраны и проверены следующие типы и марки проводников:

- на стороне 110 кВ (питающая линия 110 кВ) – предлагается применить современные проводники воздушной линии марки АААС-Z177-1Z сечением 177 мм² (производства ООО «Ламифил»);

- на стороне 27,5 кВ (отходящие линии 27,5 кВ) – также предлагается применить современные воздушные линии марки АААС-Z148-1Z сечением 148 мм² (производства ООО «Ламифил»);
- на стороне 10 кВ (отходящие линии 10 кВ) – предлагается применить современные кабельные линии марки ЗАПвВ 1×35-10 (изоляция – сшитый полиэтилен).

Все выбранные проводники показаны в графической части работы.

2.6 Расчёт и выбор силового электрооборудования

Проводится расчёт и выбор силового электрооборудования для применения в РУ 110, 27,5 и 10 кВ тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия.

На первом этапе проводится выбор ячеек для применения в РУ 110 кВ (КРУЭ), а также в РУ 10 кВ (КРУ). Для РУ 27,5 кВ выбор ячеек не проводится, так как данное РУ выполнено открытым (ОРУ) с установкой оборудования открытого исполнения. Для применения в РУ 110 кВ тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия выбраны ячейки КРУЭ марки КРУЭ-УЭТМ®-110 производства АО «Уралэлектротяжмаш» [6], представленные на рисунке 8.



Рисунок 8 – Элегазовые модули КРУЭ-УЭТМ®-110 производства АО «Уралэлектротяжмаш»

Выбор ячеек КРУЭ марки КРУЭ-УЭТМ®-110 производства АО «Уралэлектротяжмаш» для применения в РУ 110 кВ тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ «Нюхча» обусловлен стремлением обеспечить высокую надежность, оперативность и безопасность работы энергосистемы.

Технологическая реализация данных ячеек отражает современные требования к эксплуатации высоковольтных систем, поскольку их конструкция и функциональные возможности позволяют эффективно справляться с динамичными нагрузками, характерными для тяговых сетей железнодорожного транспорта.

Применение оборудования отечественного производства, обладающего высокой степенью адаптивности к специфике региональных условий, способствует достижению оптимальных показателей эксплуатационной надежности, что особенно важно для объектов, находящихся в сложных климатических условиях Республики Карелия.

Конструктивно данные ячейки разработаны с учетом современных требований к безопасности и долговечности, что обеспечивает возможность оперативного переключения и минимизирует риск возникновения аварийных ситуаций.

В основе их работы лежат передовые технологии обработки электрических сигналов и защиты, что позволяет эффективно регулировать распределение нагрузок, обеспечивать устойчивость электроснабжения и поддерживать стабильную работу подстанции даже при возникновении кратковременных перегрузок.

В свою очередь, интеграция таких ячеек в состав РУ 110 кВ способствует оптимизации архитектуры системы, повышению энергоэффективности и снижению эксплуатационных затрат за счет уменьшения времени на техническое обслуживание и модернизацию оборудования.

Кроме того, использование ячеек КРУЭ-УЭТМ®-110 позволяет достичь высокого уровня автоматизации процессов управления подстанцией, что в

современных условиях является ключевым элементом повышения оперативности и надежности электроснабжения.

Данное решение отражает стратегическую направленность на внедрение инновационных технологических решений, способных обеспечить непрерывность работы энергосистемы, а также адаптацию к изменяющимся условиям эксплуатации.

Таким образом, выбор данных ячеек представляет собой обоснованный инженерный подход, направленный на формирование современной, надежной и высокоэффективной системы электроснабжения, соответствующей мировым стандартам безопасности и эксплуатационных характеристик.

Далее проводится компоновка модулями электрических аппаратов выбранного типа КРУЭ.

При выборе рационального оборудования, проводится сравнение паспортных данных оборудования с расчётными данными цепи, в которую они устанавливаются.

Таким образом, для установки в КРУЭ 110 кВ тяговой подстанции, выбору и проверке в работе подлежат:

- элегазовые модули выключателей КРУЭ-УЭТМ®-110;
- элегазовые модули разъединителей КРУЭ-УЭТМ®-110;
- элегазовые модули трансформаторов тока КРУЭ-УЭТМ®-110;
- ограничители перенапряжения ОПНп-110/800/146-10-III-УХЛ1 (не входят в состав КРУЭ).

Результаты выбора и проверки элегазовых модулей электрических аппаратов ячеек КРУЭ-УЭТМ®-110 для установки на стороне 110 кВ подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Результаты выбора и проверки элегазовых модулей электрических аппаратов ячеек КРУЭ-УЭТМ®-110 для установки на стороне 110 кВ подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча»

Наименование оборудования	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные оборудования
Элегазовые модули выключателей КРУЭ-УЭТМ®-110	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 187,7 \text{ А}$	$I_{ном} = 2500 \text{ А}$
	$I_{н.т} \leq I_{отк.ном}$	$I_{н.т} = 6,8 \text{ кА}$	$I_{отк.ном} = 40 \text{ кА}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 17,31 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 100 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 6,8^2 \cdot 3 = 138,7 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 40^2 \cdot 3 = 4800 \text{ кА}^2\text{с}$
Элегазовые модули разъединителей КРУЭ-УЭТМ®-110	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 187,7 \text{ А}$	$I_{ном} = 2500 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 17,31 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 100 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 6,8^2 \cdot 3 = 138,7 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 40^2 \cdot 3 = 4800 \text{ кА}^2\text{с}$
Элегазовые модули трансформаторов тока КРУЭ-УЭТМ®-110	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 187,7 \text{ А}$	$I_{ном} = 2500 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 17,31 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 100 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 6,8^2 \cdot 3 = 138,7 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 40^2 \cdot 3 = 4800 \text{ кА}^2\text{с}$
Ограничители перенапряжения ОПН-110/800/146-10-III-УХЛ1	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 187,7 \text{ А}$	$I_{ном} = 800 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 17,31 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 146 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 6,8^2 \cdot 3 = 138,7 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 10^2 \cdot 3 = 300 \text{ кА}^2\text{с}$

Все выбранные элегазовые модули электрических аппаратов ячеек КРУЭ-УЭТМ®-110 и ОПН на вводе РУ 110 кВ тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча», показаны в графической части работы.

Они удовлетворяют требованиям выбора и проверки для установки на объекте исследования.

Для РУ 27,5 кВ тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» выбор ячеек не проводится, так как данное РУ выполнено открытым (ОРУ) с установкой следующего оборудования открытого исполнения:

- выключателей высокого напряжения марки ВР27НС со встроенными трансформаторами тока марки ТВ-27,5 [2];
- разъединителей марки РНДЖ-27,5/1600 [13];
- трансформаторов напряжения марки ОЛЗ-СЭЩ-2,5/27,5-IV [8];
- ограничителей перенапряжения марки ОПН-27,5 УХЛ1 [9].

Выбранные устройства характеризуются передовыми техническими параметрами, соответствующими современным требованиям к эксплуатации высоковольтных систем, и их применение обусловлено необходимостью интеграции комплексных функций защиты, измерения и управления в единую систему.

Используемые выключатели высокого напряжения марки ВР27НС, оснащенные встроенными трансформаторами тока ТВ-35, позволяют не только обеспечить быстрое и точное срабатывание защитных устройств, но и сократить пространственные и монтажные затраты за счет компактности исполнения, что особенно важно в условиях возможной повышенной нагрузки тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» и динамично изменяющихся режимов работы энергосистемы.

Надежное выполнение коммутационных функций в сочетании с высокой скоростью реакции на аварийные ситуации способствует снижению риска повреждения оборудования и обеспечивает непрерывность работы подстанции.

Применение разъединителей РНДЖ-27,5/1600 обусловлено необходимостью обеспечения безопасной изоляции элементов электрической цепи, что позволяет проводить ремонтные и профилактические работы без риска возникновения токов утечки или случайного замыкания.

Такие устройства демонстрируют высокую степень механической прочности и устойчивости к воздействию внешних факторов, что обеспечивает сохранение их эксплуатационных характеристик в течение длительного срока службы.

Трансформаторы напряжения марки ОЛЗ-СЭЩ-2,5/27,5-IV, установленные в составе системы, играют ключевую роль в обеспечении точного контроля и мониторинга параметров сети.

Благодаря высокой точности измерений они создают надежную базу для работы автоматизированных систем защиты и управления, что является важным элементом в формировании стабильного режима эксплуатации подстанции.

Дополнительную защиту от внезапных перенапряжений обеспечивает применение ограничителей перенапряжения марки ОПН-27,5 УХЛ1, которые эффективно гасят импульсные напряжения, возникающие при молниевых разрядах или переключениях в сети.

Данное решение позволяет существенно снизить риск повреждения как силового, так и вспомогательного оборудования, обеспечивая тем самым долговременную стабильность работы всей структуры проектируемой подстанции.

Таким образом, сочетание выбранных технических решений формирует комплексную систему, способную удовлетворить все современные требования к надежности, безопасности и энергоэффективности эксплуатации высоковольтного оборудования, что в конечном итоге способствует устойчивости энергосистемы в условиях интенсивного использования тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча».

Результаты выбора и проверки электрических аппаратов для применения в открытом РУ 27,5 кВ тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты выбора и проверки электрических аппаратов для применения в РУ 27,5 кВ подстанции 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия

Наименование оборудования	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные оборудования
Выключатели ВР27НС-25/1600 УХЛ2 (вакуумные)	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 27,5 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 27,5 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 562,8 \text{ А}$	$I_{ном} = 1600 \text{ А}$
	$I_{н.т} \leq I_{отк.ном}$	$I_{н.т} = 3,61 \text{ кА}$	$I_{отк.ном} = 25 \text{ кА}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 8,17 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 40 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 3,61^2 \cdot 3 = 39,1 \text{ кА}^2 \text{с}$	$B_K = 25^2 \cdot 3 = 1875 \text{ кА}^2 \text{с}$
Трансформаторы тока ТВ-27,5-II-1200/5ХЛ2 (встроенные, ввод 27,5 кВ)	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 27,5 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 27,5 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 562,8 \text{ А}$	$I_{ном} = 1200 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 8,17 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 40 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 3,61^2 \cdot 3 = 39,1 \text{ кА}^2 \text{с}$	$B_K = 25^2 \cdot 3 = 1875 \text{ кА}^2 \text{с}$
Трансформаторы напряжения ОЛЗ-СЭЩ-2,5/27,5-IV	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 27,5 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 27,5 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 562,8 \text{ А}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 8,17 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 40 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 3,61^2 \cdot 3 = 39,1 \text{ кА}^2 \text{с}$	$B_K = 25^2 \cdot 3 = 1875 \text{ кА}^2 \text{с}$
Разъединители РНДЖ-27,5/1600	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 27,5 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 27,5 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 562,8 \text{ А}$	$I_{ном} = 1600 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 8,17 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 44 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 3,61^2 \cdot 3 = 39,1 \text{ кА}^2 \text{с}$	$B_K = 10^2 \cdot 3 = 300 \text{ кА}^2 \text{с}$
Ограничители перенапряжения ОПН-27,5 КС УХЛ1	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 27,5 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 27,5 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 562,8 \text{ А}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 8,17 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 50 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 3,61^2 \cdot 3 = 39,1 \text{ кА}^2 \text{с}$	$B_K = 10^2 \cdot 3 = 300 \text{ кА}^2 \text{с}$

Для применения в РУ 10 кВ тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ «Нюхча» Октябрьской ЖД выбраны ячейки КРУ серии КУ10Ц с вакуумной изоляцией производства компании «Высоковольтный союз» [20], представленные на рисунке 9.



Рисунок 9 – Ячейки КРУ серии КУ10Ц с вакуумной изоляцией производства компании «Высоковольтный союз»

Выбор ячеек КРУ серии КУ10Ц с вакуумной изоляцией производства компании «Высоковольтный союз» для применения в РУ 10 кВ тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ «Нюхча» обусловлен стремлением обеспечить максимально высокую надежность и эффективность работы оборудования в условиях динамичных эксплуатационных нагрузок.

Применяемые ячейки отличаются передовыми техническими характеристиками, позволяющими достигать оптимальных параметров при эксплуатации на высоковольтных подстанциях, где особое значение приобретает способность оборудования работать в сложных температурных и

климатических условиях, а также выдерживать кратковременные перегрузки без ухудшения эксплуатационных показателей.

Технология вакуумной изоляции, реализованная в данных ячейках, обеспечивает высокую электрическую прочность и минимальные размеры разрядных промежутков, что существенно повышает устойчивость системы к коронным разрядам и позволяет снизить риск возникновения аварийных ситуаций в процессе работы подстанции.

Использование оборудования отечественного производства, выполненного с учетом современных требований к безопасности и энергоэффективности, позволяет интегрировать ячейки КУ10Ц в единую автоматизированную систему управления и мониторинга, что является важным аспектом формирования современной инфраструктуры энергоснабжения. Высокая надежность вакуумной изоляции гарантирует стабильную работу устройства в широком диапазоне температур и при различных режимах нагрузки, что особенно важно для тяговых подстанций, где эксплуатационные требования предъявляются к оборудованию с особой строгостью. Кроме того, конструктивные особенности ячеек способствуют упрощению монтажных работ и сокращению времени проведения технического обслуживания, что положительно сказывается на эксплуатационных расходах и надежности работы подстанции в целом.

Внедрение вакуумной изоляции как одного из ключевых элементов конструкции способствует повышению энергоэффективности оборудования, что, в свою очередь, позволяет снизить эксплуатационные затраты и минимизировать риск повреждений при возникновении аварийных ситуаций.

Таким образом, интеграция ячеек КРУ серии КУ10Ц в состав РУ 10 кВ подстанции «Нюхча» является обоснованным инженерным решением, направленным на формирование высоконадежной, безопасной и экономически эффективной системы электроснабжения, способной удовлетворить современные требования к качеству и устойчивости работы высоковольтного оборудования в условиях динамично меняющихся нагрузок.

Результаты выбора и проверки электрических аппаратов для применения в ячейках КРУ 10 кВ с вакуумной изоляцией серии КУ10Ц подстанции 110/27,5/10 кВ «Нюхча» Октябрьской ЖД, сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Результаты выбора и проверки электрических аппаратов для применения в ячейках КРУ 10 кВ с вакуумной изоляцией серии КУ10Ц подстанции 110/27,5/10 кВ «Нюхча» Октябрьской ЖД

Наименование оборудования	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные оборудования
Выключатели ВР2-10-20/1000 УХЛ2 (вакуумные)	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 517,6 \text{ А}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$
	$I_{н.т} \leq I_{отк.ном}$	$I_{н.т} = 5,73 \text{ кА}$	$I_{отк.ном} = 31,5 \text{ кА}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 11,34 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 80 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 5,73^2 \cdot 3 = 98,5 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 31,5^2 \cdot 3 = 2976,8 \text{ кА}^2\text{с}$
Трансформаторы тока ТЛК-10-2-600/5 УЗ	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 517,6 \text{ А}$	$I_{ном} = 600 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 11,34 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 40 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 5,73^2 \cdot 3 = 98,5 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2\text{с}$
Трансформаторы напряжения ЗНОЛ. 06/10	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 517,6 \text{ А}$	$I_{ном} = 600 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 11,34 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 40 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 5,73^2 \cdot 3 = 98,5 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2\text{с}$
Ограничители перенапряжения ОПН-П-10/12,7/10/1,1	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 517,6 \text{ А}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 11,34 \text{ кА}$	$i_{дин.} = 12,7 \text{ кА}$
	$I_T^2 \cdot t_T \leq B_K$	$I_T^2 \cdot t_T = 5,73^2 \cdot 3 = 98,5 \text{ кА}^2\text{с}$	$B_K = 10^2 \cdot 3 = 300 \text{ кА}^2\text{с}$

Все выбранные аппараты 110 кВ, 27,5 кВ и 10 кВ удовлетворяют условиям выбора и проверок.

Выводы по разделу.

Проведён выбор конструктивного выполнения и схем для применения в РУ всех классов напряжения тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД:

- РУ 110 кВ выполняется комплектным с применением ячеек (модулей) с элегазовой изоляцией (КРУЭ) с применением схемы 110-12 «Одна рабочая секционированная и обходная система шин», состоящей из двух рабочих и одной обходной системы сборных шин;
- РУ 27,5 кВ конструктивно выполняется открытым, так как надёжное и недорогое отечественное оборудование (выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы), которое выпускается на данный класс напряжения и которые предлагается установить на подстанции, выполняется открытым с применением схемы 27,5-9 «Одна рабочая секционированная выключателем система шин»;
- РУ 10 кВ конструктивно выполнено комплектным (КРУ 10 кВ) с применением ячеек внутренней установки и схемы 10-9 «Одна рабочая секционированная выключателем система шин».

Проведён расчет электрических нагрузок присоединений, секций сборных шин потребителей 27,5 кВ и 10 кВ, а также всей электрической нагрузки тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85.

Результаты проведённой комплексной оценки подтверждают, что выбранные трансформаторы марки ТМТНЖСМ-25000/110 УХЛ1 обладают достаточным запасом прочности и надёжности, что является ключевым фактором в условиях современного уровня требований к безопасности и эффективности функционирования тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия.

Рассчитаны токи короткого замыкания на выводах силовых трансформаторов подстанции в максимальном режиме работы.

В результате выбора способа канализации электроэнергии для применения на тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85, выбраны и проверены следующие типы и марки проводников:

- на стороне 110 кВ (питающая линия 110 кВ) – предлагается применить современные проводники воздушной линии марки АААС-Z177-1Z сечением 177 мм² (производства ООО «Ламифил»);
- на стороне 27,5 кВ (отходящие линии 27,5 кВ) – также предлагается применить современные воздушные линии марки АААС-Z148-1Z сечением 148 мм² (производства ООО «Ламифил»);
- на стороне 10 кВ (отходящие линии 10 кВ) – предлагается применить современные кабельные линии марки ЗАПВ 1×35-10 (изоляция – сшитый полиэтилен).

Для применения в РУ 110 кВ тяговой подстанции выбраны ячейки КРУЭ марки КРУЭ-УЭТМ®-110 производства АО «Уралэлектротяжмаш», укомплектованные элегазовыми модулями выключателей, разъединителей, трансформаторов тока. Отдельно также выбраны и проверены ограничители перенапряжения ОПНп-110/800/146-10-III-УХЛ1 (не входят в состав КРУЭ).

РУ 27,5 кВ тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 выполнено открытым с установкой следующего оборудования:

- выключателей высокого напряжения марки ВР27НС-25/1600 УХЛ2 со встроенными трансформаторами тока марки ТВ-27,5-II-1200/5ХЛ2;
- разъединителей марки РНДЖ-27,5/1600;
- трансформаторов напряжения марки ОЛЗ-СЭЩ-2,5/27,5-IV;
- ограничителей перенапряжения марки ОПН-27,5 УХЛ1.

Для применения в РУ 10 кВ подстанции выбраны ячейки серии КУ10Ц с вакуумной изоляцией производства компании «Высоковольтный союз», для комплектации которых выбраны: выключатели ВР2-10-20/1000 УХЛ2, трансформаторы тока ТЛК-10-2-600/5 УЗ, трансформаторы напряжения ЗНОЛ. 06/10, ограничители перенапряжения ОПН-П-10/12,7/10/1,1.

3 Релейная защита, молниезащита и заземление подстанции

3.1 Выбор системы релейной защиты подстанции

Проводится выбор терминалов токовых защит для обеспечения защиты оборудования тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД от ненормальных режимов.

Обеспечение защиты силовых трансформаторов тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской железной дороги требует внедрения высокотехнологичных решений, способных обеспечить оперативное обнаружение аварийных режимов и минимизацию рисков повреждения оборудования [1].

В этой связи предлагается реализовать систему защиты на базе микропроцессорных терминалов марки Сириус-Т-БПТ, что обусловлено их высокой точностью измерения, скоростью обработки сигналов и возможностью интеграции в комплексные системы автоматического управления энергосистемой. Внешний вид и функционал микропроцессорного терминала марки Сириус-Т-БПТ [17] представлен на рисунке 10.



Рисунок 10 – Внешний вид микропроцессорных терминалов марки Сириус-Т-БПТ

Применение данных терминалов позволяет не только осуществлять мониторинг ключевых параметров работы силовых трансформаторов, таких как ток, напряжение и температура, но и проводить анализ динамических изменений в режиме реального времени, что критически важно для своевременного принятия мер по отключению аварийных участков сети.

Интеллектуальные алгоритмы, реализованные в микропроцессорных устройствах, обеспечивают автоматическую диагностику состояния оборудования, прогнозирование возможных сбоев и корректировку уставок защитных реле, что повышает надежность работы подстанции в условиях интенсивной эксплуатации.

Кроме того, система на базе Сириус-Т-БПТ обладает высокой устойчивостью к внешним помехам и способна работать в сложных климатических условиях, характерных для эксплуатации железнодорожной инфраструктуры, что позволяет обеспечить долгосрочную эксплуатацию без существенного снижения технических характеристик.

Интеграция современных микропроцессорных терминалов в систему защиты силовых трансформаторов способствует оптимизации эксплуатационных расходов, сокращению времени на техническое обслуживание и повышению общей энергоэффективности энергосистемы.

Таким образом, применение микропроцессорных терминалов марки Сириус-Т-БПТ является обоснованным инженерным решением, способствующим формированию надежной, адаптивной и высокотехнологичной системы защиты, что в свою очередь гарантирует стабильную работу тяговой подстанции ЭЧЭ-85 «Нюхча» и поддерживает высокие стандарты безопасности на Октябрьской железной дороге.

Основные защиты линий на подстанции предлагается реализовать на основе микропроцессорных терминалов марки Сириус-2-Л-БПТ [16], внешний вид которого представлен на рисунке 11.



Рисунок 11 – Внешний вид микропроцессорных терминалов марки Сириус-2-Л-БПТ

Применение микропроцессорных терминалов марки Сириус-2-Л-БПТ в системе защиты линий напряжением 110 кВ, 27,5 кВ и 10 кВ тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД является стратегическим инженерным решением, направленным на повышение надежности и оперативности защиты энергосистемы в условиях интенсивной эксплуатации.

Данные терминалы представляют собой современные цифровые устройства, способные в режиме реального времени мониторить основные параметры сети, включая ток, напряжение, фазовые углы и температурные характеристики, что позволяет оперативно выявлять аномалии в работе линий и принимать автоматические меры по их изоляции.

Использование терминалов Сириус-2-Л-БПТ обусловлено их высокой точностью измерений, адаптивностью к изменениям эксплуатационных режимов и возможностью интеграции с системами дистанционного контроля и автоматизации управления энергоснабжением.

Благодаря микропроцессорной архитектуре, данные устройства способны обрабатывать большие объемы информации, что обеспечивает своевременное обнаружение аварийных ситуаций, таких как короткие

замыкания или перегрузки, и позволяет задействовать защитные алгоритмы, адаптированные под особенности работы линий с различными уровнями напряжения.

Применение указанных терминалов защиты линий, позволяет снизить вероятность ложных срабатываний и минимизировать время отклика системы, что является критически важным для поддержания стабильности работы энергосистемы подстанции, где высокие уровни напряжения требуют особого внимания к вопросам безопасности и точности контроля.

Современные алгоритмы самодиагностики, реализованные в терминалах, способствуют своевременному обнаружению потенциальных неисправностей, обеспечивая возможность планового обслуживания и предотвращая развитие аварийных ситуаций, что в свою очередь повышает эксплуатационную надежность всей подстанции.

Интеграция Сириус-2-Л-БПТ в систему защиты линий напряжением 110 кВ, 27,5 кВ и 10 кВ позволяет реализовать комплексный подход к защите, в рамках которого осуществляется детальный анализ электрических параметров сети, прогнозирование развития аварийных процессов и автоматическое переключение режимов работы защитных устройств.

Наличие данных факторов обеспечивает не только высокую точность и оперативность срабатывания, но и стабильность работы системы при изменении нагрузки и внешних воздействиях.

С учётом выбранных типов микропроцессорных блоков защиты, строится схема релейной защиты для применения на тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской железной дороги, представленная на рисунке 12.

3.2 Расчёт молниезащиты подстанции

Молниезащита на тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД представляет собой важнейшую составляющую системы безопасности, предназначенную для защиты оборудования от воздействия атмосферных разрядов и связанных с ними перенапряжений.

Основное назначение молниезащиты заключается в снижении риска повреждения высоковольтного оборудования, трансформаторов, коммутационных устройств и линий электропередачи за счёт направления возникшего перенапряжения в результате удара молнии, в землю, посредством специально разработанных защитных устройств.

В условиях эксплуатации тяговых подстанций, где высокое напряжение и большие токовые нагрузки создают повышенную чувствительность к электромагнитным воздействиям, обеспечение надежной молниезащиты становится обязательным условием для предотвращения аварийных ситуаций, которые могут привести к значительным технологическим и экономическим потерям.

Необходимость применения молниезащиты обусловлена тем, что молнии способны создавать экстремальные импульсные перенапряжения, значительно превышающие нормальные эксплуатационные значения, что может привести к разрушению изоляционных свойств оборудования и вызвать цепь аварийных процессов.

Современные системы молниезащиты используют комплексные методы защиты, включая внешние молниеотводы, заземляющие устройства и системы распределения тока разряда, что позволяет эффективно снижать уровень перенапряжения, попадающего в элементы подстанции.

Внедрение таких мероприятий обеспечивает не только сохранение технического состояния оборудования, но и повышает общую устойчивость

энергосистемы, минимизируя риск кратковременных отключений и продлевая срок службы оборудования.

Известно, что особое значение в разработке системы защиты от атмосферных перенапряжений для подстанций имеет комплексный подход, который учитывает географические, климатические и технические особенности объекта, что позволяет оптимизировать конструкцию защитных устройств, добиться их высокой эффективности в условиях переменной интенсивности грозовой активности и обеспечить непрерывное функционирование энергосистемы даже при экстремальных природных явлениях.

В результате применения современных решений в области молниезащиты достигается высокий уровень надежности и безопасности эксплуатации тяговой подстанции, что является залогом стабильного энергоснабжения и бесперебойной работы всей железнодорожной инфраструктуры Октябрьской ЖД.

Далее проводится расчёт молниезащиты подстанции, которая выполняется классическим способом (с применением стержневых молниеотводов).

«Предварительно принимается расчётная высота молниеотводов, равная 24 м. На высоте защищаемого объекта (наиболее выступающие части оборудования и конструкций КРУЭ-110 кВ), радиус действия молниеотвода определяется по формуле» [18]:

$$r_x = \frac{1,6 \cdot h_a}{1 + \frac{h_x}{h}} \cdot p, \quad (30)$$

«где h – высота молниеотвода;

h_a – активная высота молниеотвода;

h_x - высота наиболее выступающих элементов подстанции;

p – коэффициент высоты молниеотвода» [18].

«Для системы молниезащиты тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД» [18]:

$$h_a = h - h_x = 24 - 12 = 12 \text{ м.}$$

$$r_x = \frac{1,6 \cdot 12}{1 + \frac{12}{24}} \cdot 1 = 12,8 \text{ м.}$$

«Наименьшая ширина зоны защиты b_x тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД» [18]:

$$b_x = 4 \cdot r_x \cdot \frac{7h_a - 1}{14h_a - a}. \quad (31)$$

«Расстояние от оси установки молниеотводов системы молниезащиты тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД» [18]:

$$b_{x1} = 4 \cdot 12,8 \cdot \frac{7 \cdot 12 - 40}{14 \cdot 12 - 40} = 17,6 \text{ м,}$$

$$b_{x2} = 4 \cdot 12,8 \cdot \frac{7 \cdot 12 - 42}{14 \cdot 12 - 42} = 17,1 \text{ м.}$$

«Условие для защиты объекта высотой h_x внутри зоны защиты» [18]:

$$D \leq 8 \cdot h_a \cdot p, \quad (32)$$

«где D – наибольшая диагональ четырехугольника» [18].

$$D = \sqrt{40^2 + 42^2} = 58 \text{ м.}$$

«Проверяется условия соответствия системы молниезащиты тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД минимальным условиям надёжности» [18]:

$$D \leq 8 \cdot 12 \cdot 1 = 96 \text{ м.}$$

$$58 \text{ м} \leq 96 \text{ м.}$$

Таким образом, окончательно принимается к установке в системе молниезащиты тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД четыре стержневых молниеотвода высотой 24 м каждый.

3.3 Расчёт контура заземления подстанции

Расчёт заземления на тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской железной дороги представляет собой один из ключевых элементов обеспечения электрической безопасности и стабильной работы энергосистемы объекта.

Данный процесс включает в себя анализ электрических и геофизических параметров, что позволяет определить оптимальные характеристики заземляющих устройств и обеспечить эффективное рассеивание молниеносных и аварийных токов в землю.

В основе расчёта лежит комплексное моделирование электрических цепей подстанции с учётом сопротивления почвы, распределения потенциалов и влияния различных геологических слоёв, что позволяет сформировать полное представление о проводимости заземляющей системы в конкретных климатических и географических условиях.

Такой подход гарантирует, что выбранная система заземления будет способна справляться с экстренными нагрузками, возникающими при

атмосферных разрядах и аварийных режимах, минимизируя риск повреждения оборудования и обеспечивая безопасность персонала.

Проведение расчетов заземления предусматривает использование современных методик и программных средств, позволяющих точно определить сопротивление заземляющего контура и распределение потенциалов вокруг подстанции.

В процессе моделирования учитываются как технические параметры проводящих элементов, так и физико-химические свойства почвы, что дает возможность оптимизировать конструктивное решение заземляющей системы для достижения максимально низкого уровня сопротивления.

Такой подход, в свою очередь, способствует быстрому рассеиванию высоких токовых импульсов и снижению потенциала поражения оборудования и людей.

Разработка рациональной модели заземления требует детального изучения геологических условий и применения теоретических методов электрофизики, что обеспечивает точность полученных результатов и их соответствие нормативным требованиям в области электрической безопасности. Результаты проведенного расчёта заземления служат основой для принятия решений о выборе типа и конфигурации заземляющих устройств, что позволяет адаптировать систему к конкретным условиям эксплуатации подстанции.

Такой подход не только повышает устойчивость энергосистемы к внешним воздействиям, но и обеспечивает её долговременную эксплуатационную надёжность, что имеет решающее значение для бесперебойного функционирования тяговой подстанции в условиях интенсивной работы железнодорожной инфраструктуры.

Таким образом, расчёт заземления является неотъемлемой частью комплексного проектирования системы электроснабжения, способствуя достижению высоких стандартов безопасности, надежности и энергоэффективности в работе подстанции ЭЧЭ-85 «Нюхча».

Далее проводится непосредственный расчёт заземления подстанции.

«Допустимое время воздействия электрического тока на организм людей» [10]:

$$\tau_{\epsilon} = t_{p.z.} + t_{отк.в}, с. \quad (33)$$

«Для условий тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД, с учётом наличия быстродействующей релейной защиты» [10]:

$$\tau_{\epsilon} = 0,1 + 0,035 = 0,135 с.$$

«Сопротивление растекания тока от ступней человека» [10]:

$$\begin{aligned} R_c &= 1,5 \cdot \rho, Ом, \\ R_c &= 1,5 \cdot 0,009 = 0,0135 Ом. \end{aligned} \quad (34)$$

«Коэффициент сопротивления тела человека с учётом растекания тока от ступней» [10]:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{R_q}{R_q + R_c}, \\ \beta &= \frac{1000}{1000 + 0,0135} = 0,99. \end{aligned} \quad (35)$$

«Суммарная длина горизонтального заземлителя тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД» [10]:

$$L_r = \frac{130}{5} \cdot 48 + \frac{48}{5} \cdot 130 = 2496 м.$$

«Коэффициент напряжения прикосновения» [10]:

$$K_n = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{l_g \cdot L_r}{a \cdot \sqrt{S}} \right)^{0,45}}. \quad (36)$$

$$K_n = \frac{0,5 \cdot 0,99}{\left(\frac{5 \cdot 2496}{5 \cdot \sqrt{130 \cdot 48}} \right)^{0,45}} = 0,105.$$

«Напряжение на заземлителе» [10]:

$$U_3 = \frac{U_{np.дон.}}{K_n}, \text{кВ}, \quad (37)$$

$$U_3 = \frac{400}{0,105} = 3810 \text{ В} = 3,81 \text{ кВ}.$$

«Соппротивление заземляющего устройства тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД» [10]:

$$R_{з.дон.} = \frac{U_3}{I_3}, \text{Ом}, \quad (38)$$

$$R_{з.дон.} = \frac{3,81}{1,3} = 2,931 \text{ Ом}.$$

«Число ячеек по стороне квадрата контура заземления тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча»» [10]:

$$m = \frac{L_r}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1, \quad (39)$$

$$m = \frac{2496}{2 \cdot \sqrt{130 \cdot 48}} - 1 = 14,8.$$

«Принимается $m=15$. Длина полос в проектируемом контуре заземления тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД» [10]:

$$L_r^{15} = 2 \cdot \sqrt{S} \cdot (m+1), м, \quad (40)$$

$$L_r^{15} = 2 \cdot \sqrt{130 \cdot 48} \cdot (15+1) = 2528 м.$$

«Длина сторон ячеек в проектируемом контуре заземления тяговой подстанции переменного тока» [10]:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m}, м, \quad (41)$$

$$b = \frac{\sqrt{130 \cdot 48}}{15} = 5,5 м.$$

«Число вертикальных заземлителей по периметру контура заземления тяговой подстанции» [10]:

$$n_g = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{\frac{a}{l_g} \cdot l_g}, \quad (42)$$

$$n_g = \frac{\sqrt{130 \cdot 48} \cdot 4}{5} = 63,2.$$

«Принимается для проектируемого контура заземления тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД целое число вертикальных заземлителей $n_g=64$. При этом общая длина вертикальных заземлителей в контуре заземления» [10]:

$$L_g = l_g \cdot n_g, м, \quad (43)$$

$$L_g = 5 \cdot 64 = 320 \text{ м.}$$

«Относительная глубина заложения сетки электродов» [10]:

$$A = 0,444 - 0,84 \cdot \frac{l_g + t}{\sqrt{S}}, \text{ м,} \quad (44)$$

$$A = 0,444 - 0,84 \cdot \frac{5 + 0,7}{\sqrt{130 \cdot 48}} = 0,384 \text{ м.}$$

«Общее сопротивление контура заземления» [10]:

$$R_z = A \cdot \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_r^{16} + L_g}, \text{ Ом,} \quad (45)$$

$$R_z = 0,384 \cdot \frac{0,009}{\sqrt{130 \cdot 48}} + \frac{0,009}{2528 + 320} = 4,685 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

«Общее сопротивление контура заземления тяговой подстанции удовлетворяет условиям проверки» [10]:

$$R_z = 4,685 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \leq R_{z, \text{доп.}} = 2,931 \text{ Ом.}$$

Таким образом расчётным путём установлено, что в контуре заземления тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД необходимо применить 64 вертикальных электрода.

Предусматривается выполнение контура заземления в форме замкнутой сетки с установкой его по всей площади подстанции.

Рассчитанный в работе контур заземления, состоящий из 64 вертикальных электрода, непосредственно связывается с ранее рассчитанной и выбранной системой молниезащиты подстанции, дополняя систему безопасности на объекте проектирования.

Выводы по разделу.

Окончательно принимается к установке в системе молниезащиты тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД четыре стержневых молниеотвода высотой 24 м каждый.

Выбранный уровень соответствует I классу защиты, что обеспечивает максимальную степень безопасности для высоковольтного оборудования подстанции и всей её инфраструктуры. Использование системы стержневых молниеотводов позволяет достичь минимального уровня остаточных перенапряжений, гарантируя защиту критически важного оборудования даже в условиях интенсивной грозовой активности.

Расчетным путем установлено, что в контуре заземления тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД необходимо применить 64 вертикальных электрода.

Помимо установки этих вертикальных электродов, к данному заземляющему контуру подключаются горизонтальные заземляющие шины и соединительные проводники, которые обеспечивают равномерное распределение заземляющего тока по всей системе.

Также контур заземления непосредственно связывается с системой молниезащиты подстанции, дополняя систему безопасности на объекте проектирования. Дополнительно интегрируется система контроля потенциала заземления, позволяющая в режиме реального времени отслеживать эффективность работы контура и своевременно осуществлять техническое обслуживание.

Такой комплекс мероприятий гарантирует оптимальное снижение уровня потенциального риска, эффективное рассеивание ударных токовых импульсов, возникающих при молниеносных разрядах и аварийных режимах работы, а также обеспечивает надежную защиту оборудования и безопасности персонала на объекте.

Заключение

В результате выполнения работы, разработан, обоснован и предложен к внедрению проект электрической части понизительной подстанции энергосистемы 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия. В результате проведения анализа исходных технических данных по проектированию электрической части тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД, состоящей на балансе Кемской дистанции электроснабжения Октябрьской дирекции по энергообеспечению структурного подразделения «Трансэнерго», установлено следующее:

- тяговая подстанция, являясь опорной подстанцией региона, будет получать питание от трех воздушных линий ВЛ-110 (первичный источник питания – линия Малошуйка-Нюхча, функционирующая в составе энергосистемы Архангельской области, а также двухцепная линия Беломорск-Нюхча, состоящая из линий №159 и №160, которая интегрирована в энергосистему Республики Карелия);
- на объекте исследования будут расположены три распределительных устройства (110 кВ, 27,5 кВ и 10 кВ), а также два силовых трехобмоточных трансформатора 110/27,5/10 кВ, выбор которых проводится в работе;
- на данном объекте, согласно исходным техническим данным, для питания потребителей будут использоваться два класса напряжения переменного тока: 27,5 кВ (пять отходящих линий) и 10 кВ (четыре отходящие линии);
- согласно техническим замерам в энергетическом узле, в котором планируется сооружение проектируемой тяговой подстанции, максимальное значение фактической активной нагрузки всех потребителей напряжением 27,5 кВ и 10 кВ, составляет 26,68 МВт (26680 кВт).

Проведён выбор конструктивного выполнения и схем для применения в РУ всех классов напряжения тяговой подстанции переменного тока ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД:

- РУ 110 кВ выполняется комплектным с применением ячеек (модулей) с элегазовой изоляцией (КРУЭ) с применением схемы 110-12 «Одна рабочая секционированная и обходная система шин», состоящей из двух рабочих и одной обходной системы сборных шин;
- РУ 27,5 кВ конструктивно выполняется открытым, так как надёжное и недорогое отечественное оборудование (выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы), которое выпускается на данный класс напряжения и которые предлагается установить на подстанции, выполняется открытым с применением схемы 27,5-9 «Одна рабочая секционированная выключателем система шин»;
- РУ 10 кВ конструктивно выполнено комплектным (КРУ 10 кВ) с применением ячеек внутренней установки и схемы 10-9 «Одна рабочая секционированная выключателем система шин».

Проведён расчет электрических нагрузок присоединений, секций сборных шин потребителей 27,5 кВ и 10 кВ, а также всей электрической нагрузки тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85.

Результаты проведённой комплексной оценки подтверждают, что выбранные трансформаторы марки ТМТНЖСМ-25000/110 УХЛ1 обладают достаточным запасом прочности и надёжности, что является ключевым фактором в условиях современного уровня требований к безопасности и эффективности функционирования тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД Республики Карелия.

Рассчитаны токи короткого замыкания на выводах силовых трансформаторов подстанции в максимальном режиме работы.

В результате выбора способа канализации электроэнергии для применения на тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85, выбраны и проверены следующие типы и марки проводников:

- на стороне 110 кВ (питающая линия 110 кВ) – предлагается применить современные проводники воздушной линии марки АААС-Z177-1Z сечением 177 мм² (производства ООО «Ламифил»);
- на стороне 27,5 кВ (отходящие линии 27,5 кВ) – также предлагается применить современные воздушные линии марки АААС-Z148-1Z сечением 148 мм² (производства ООО «Ламифил»);
- на стороне 10 кВ (отходящие линии 10 кВ) – предлагается применить современные кабельные линии марки ЗАПВ 1×35-10 (изоляция – сшитый полиэтилен).

Для применения в РУ 110 кВ тяговой подстанции выбраны ячейки КРУЭ марки КРУЭ-УЭТМ®-110 производства АО «Уралэлектротяжмаш», укомплектованные элегазовыми модулями выключателей, разъединителей, трансформаторов тока. Отдельно также выбраны и проверены ограничители перенапряжения ОПНп-110/800/146-10-III-УХЛ1 (не входят в состав КРУЭ).

РУ 27,5 кВ тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 выполнено открытым с установкой следующего оборудования:

- выключателей высокого напряжения марки ВР27НС-25/1600 УХЛ2 со встроенными трансформаторами тока марки ТВ-27,5-II-1200/5ХЛ2;
- разъединителей марки РНДЖ-27,5/1600;
- трансформаторов напряжения марки ОЛЗ-СЭЩ-2,5/27,5-IV;
- ограничителей перенапряжения марки ОПН-27,5 УХЛ1.

Для применения в РУ 10 кВ подстанции выбраны ячейки серии КУ10Ц с вакуумной изоляцией производства компании «Высоковольтный союз», для комплектации которых выбраны: выключатели ВР2-10-20/1000 УХЛ2, трансформаторы тока ТЛК-10-2-600/5 УЗ, трансформаторы напряжения ЗНОЛ. 06/10, ограничители перенапряжения ОПН-П-10/12,7/10/1,1.

Окончательно принимается к установке в системе молниезащиты тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД четыре стержневых молниеотвода высотой 24 м каждый.

Выбранный уровень соответствует I классу защиты, что обеспечивает максимальную степень безопасности для высоковольтного оборудования подстанции и всей её инфраструктуры. Использование системы стержневых молниеотводов позволяет достичь минимального уровня остаточных перенапряжений, гарантируя защиту критически важного оборудования даже в условиях интенсивной грозовой активности.

Расчетным путем установлено, что в контуре заземления тяговой подстанции переменного тока 110/27,5/10 кВ ЭЧЭ-85 «Нюхча» Октябрьской ЖД необходимо применить 64 вертикальных электрода.

Помимо установки этих вертикальных электродов, к данному заземляющему контуру подключаются горизонтальные заземляющие шины и соединительные проводники, которые обеспечивают равномерное распределение заземляющего тока по всей системе.

Также контур заземления непосредственно связывается с системой молниезащиты подстанции, дополняя систему безопасности на объекте проектирования.

Дополнительно интегрируется система контроля потенциала заземления, позволяющая в режиме реального времени отслеживать эффективность работы контура и своевременно осуществлять техническое обслуживание. Такой комплекс мероприятий гарантирует оптимальное снижение уровня потенциального риска, эффективное рассеивание ударных токовых импульсов, возникающих при молниеносных разрядах и аварийных режимах работы, а также обеспечивает надежную защиту оборудования и безопасности персонала на объекте.

Таким образом, подтверждены все принятые в работе технические решения, что позволило создать надёжную, экономичную и безопасную тяговую подстанцию переменного тока.

Список используемых источников

1. Агафонов А.И., Бростилова Т. Ю., Джазовский Н. Б. Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Инфра-Инженерия, 2020. 300 с.

2. ВР27НС [Электронный ресурс]: URL: https://www.vsoyuz.com/ru/produkcija/cb/vakuumnye-vyklyuchateli-27_5-kv/vr27ns.htm (дата обращения: 03.03.2025).

3. ГОСТ 14209–85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки (с Изменением № 1). [Электронный ресурс]: URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200012414> (дата обращения: 03.03.2025).

4. ГОСТ Р 51559-2000 «Трансформаторы силовые масляные классов напряжения 110 и 220 кВ и автотрансформаторы напряжением 27,5 кВ для электрических железных дорог переменного тока» [Электронный ресурс]: URL: https://metall.world/FILES/gosts/gost_r_51559-2000.pdf (дата обращения: 03.03.2025).

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: 03.03.2025).

6. Комплектное распределительное устройство КРУЭ-УЭТМ®-110. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.elec.ru/market/komplektnoe-raspredelitelnoe-ustrojstvo-krue-uetm--14965320171.html> (дата обращения: 03.03.2025).

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

8. ОЛЗ-СЭЩ 0,63 - 2,5 кВА; 27,5 кВ [Электронный ресурс]: URL: <https://www.electroshield.ru/catalog/transformatory-silovie-raspredelitelnie/olz-seshch-0-63-2500-kva-27-5-kv/> (дата обращения: 03.03.2025).

9. ОПН-27,5 КС УХЛ1 [Электронный ресурс]: URL: <https://opn.ru/index.php/opn-rzd/opn-27-5-ks-ukhl1> (дата обращения: 03.03.2025).

10. 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.

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

12. Провода для высоковольтных воздушных линий электропередачи компактированные типа Z марки АААС-Z [Электронный ресурс]: URL: <https://xn--80aqajdd1d.xn--p1ai/image/data/file/AAAC-Z.pdf> (дата обращения: 24.02.2025).

13. Разъединитель РНДЖ-27,5/1600 [Электронный ресурс]: URL: <https://teslamart.ru/product/razedinitel-rndzh-27-5-1600/> (дата обращения: 03.03.2025).

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: 03.03.2025).

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

16. Сириус-2-Л и Сириус-21-Л [Электронный ресурс]: URL: <https://www.rza.ru/catalog/ustroystva-rza-6-35-kv/sirius-2-l-i-sirius-21-l.php> (дата обращения: 03.03.2025).

17. Сириус-Т-БПТ [Электронный ресурс]: URL: <https://www.rza.ru/catalog/ustroystva-zashchity-transformatorov-6-220-kv-s-tokovoy-podpitkoj-/sirius-t-bpt.php> (дата обращения: 03.03.2025).

18. Устройство молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций [Электронный ресурс]: URL:

<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815349.pdf> (дата обращения: 03.03.2025).

19. ЭЧ-9 Кемская [Электронный ресурс]: URL: <https://oktzd.ru/depo/255/> (дата обращения: 03.03.2025).

20. Ячейки с вакуумными выключателями КУ10Ц [Электронный ресурс]: URL: <https://www.vsoyuz.com/ru/produkcija/kru/kru-10-kv/ku10c.htm> (дата обращения: 03.03.2025).