

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 Электроснабжение медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская
ГМК»

Обучающийся

М.Н. Прокофьев
(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

О.В. Федяй

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

Тольятти 2024

Аннотация

«В работе проведена разработка и техническое обоснование мероприятий по реконструкции системы электроснабжения (далее – СЭС) медно-никелевого месторождения» [6] «Спутник» АО «Кольская ГМК». Установлено, что необходимость реконструкции СЭС объекта возникла в связи с планируемым подключением новой нагрузки новых потребителей.

Для достижения поставленной цели, в работе решены основные задачи:

- «определены цели и задачи реконструкции медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК», в результате чего проведён анализ исходных данных на выполнение работы, включая анализ сведений по схеме электрических соединений СЭС месторождения, а также анализ данных существующих и новых потребителей, которые планируется запитать от главной понизительной подстанции (далее – ГПП) 110/10 кВ объекта исследования» [6] в связи с производственной необходимостью;
- осуществлена непосредственная реконструкция основных элементов электрической части медно-никелевого месторождения «Спутник» «АО «Кольская ГМК» с расчётом электрических нагрузок и токов короткого замыкания, а также последующим выбором и проверкой силовых трансформаторов ГПП-110/10 кВ и распределительных трансформаторных подстанций месторождения 10/0,4 кВ (далее – ТП-10/0,4 кВ), проводников и электрических аппаратов СЭС объекта;
- проведена реконструкция системы релейной защиты и автоматики (далее – РЗА) медно-никелевого месторождения с выбором новых устройств на питающей ГПП-110/10 кВ месторождения» [6].

Установлено, что проведённые изменения в схеме электрических соединений медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» позволили значительно повысить надёжность, экономичность и безопасность СЭС объекта исследования. Работа содержит 75 страниц.

Содержание

Введение	4
1 Исходная характеристика системы электроснабжения медно-никелевого месторождения	8
1.1 Исходная характеристика месторождения.....	8
1.2 Обоснование реконструкции системы электроснабжения месторождения	14
2 Реконструкция электрической части системы электроснабжения месторождения	18
2.1 Расчёт электрических нагрузок месторождения.....	18
2.2 Выбор места для расположения ГПП.....	26
2.3 Проверка трансформаторов главной понизительной подстанции месторождения	30
2.4 Выбор и проверка трансформаторов трансформаторных подстанций участков	34
2.5 Выбор и проверка проводников	37
2.6 Расчёт токов короткого замыкания	42
2.7 Выбор электрических аппаратов	50
3 Реконструкция схемы релейной защиты системы электроснабжения месторождения	65
Заключение	69
Список используемых источников.....	74

Введение

Известно, что реконструкция систем электроснабжения месторождений полезных ископаемых в Российской Федерации является одной из приоритетных задач, направленной на повышение эффективности и надёжности энергоснабжения в отдалённых регионах. Центральным элементом в этом процессе выступает внесение необходимых качественных изменений в схемы электрических соединений, которые играют ключевую роль в обеспечении качественной и бесперебойной подачи электроэнергии. Многие устаревшие и неэффективные схемы, используемые на некоторых месторождениях, не способны удовлетворять современные требования по надёжности, гибкости и энергоэффективности, что обуславливает необходимость их реконструкции.

Также реконструкция схем электрических соединений является важным шагом для повышения надёжности энергоснабжения на месторождениях. Современные схемные решения позволяют оптимизировать управление потоками электроэнергии, повысить скорость срабатывания защитных систем и улучшить селективность защит, что минимизирует время отключения при авариях и снижает риск повреждений оборудования. Кроме того, реконструкция и модернизация схем обеспечивает более гибкую работу всей энергосистемы, позволяя ей адаптироваться к изменяющимся условиям и росту нагрузки, что особенно важно для горнодобывающих предприятий, где стабильность энергоснабжения напрямую влияет на производственные процессы.

Реконструкцию схем, как правило, рекомендуется проводить совместно с модернизацией устаревшего оборудования, которое не обеспечивает надёжность и безопасность в силу морального технического износа своего ресурса. При этом актуальность модернизации устаревшего оборудования становится всё более очевидной на фоне роста энергопотребления, увеличения количества подключаемых потребителей и повышения требований к

безопасности эксплуатации объектов. Оборудование, установленное на старых объектах и месторождениях добычи полезных ископаемых, часто не соответствует современным стандартам по пропускной способности и эффективности, что ведёт к увеличению эксплуатационных затрат, повышенным потерям энергии и снижению надёжности и безопасности электроснабжения. В процессе такой модернизации, совместно с внедрением изменений в схемы электрических соединений объектов, зачастую также происходит замена устаревших трансформаторов, кабельных линий, коммутационных аппаратов и устройств релейной защиты на новые, более эффективные решения, что позволяет улучшить характеристики всей системы.

Известно, что низкая эффективность и высокие эксплуатационные затраты устаревшего оборудования систем электроснабжения всех типов увеличивают риск аварийных ситуаций и снижают общую производительность. Модернизация этих элементов позволяет существенно сократить расходы на обслуживание, повысить надёжность электроснабжения и обеспечить соответствие современным стандартам энергоэффективности.

Перспективы модернизации также связаны с внедрением цифровых технологий, автоматизации процессов управления и использования инновационных решений. Данные мероприятия способны обеспечить стабильную работу оборудования даже в самых сложных условиях. Важной задачей становится также интеграция возобновляемых источников энергии, что позволит повысить автономность электроснабжения в удалённых районах и снизить нагрузку на традиционные системы.

Контроль со стороны государства в вопросах реконструкции и модернизации систем электроснабжения месторождений полезных ископаемых играет важную роль, обеспечивая соблюдение стандартов безопасности и надёжности. Государственные программы и финансовая поддержка помогают ускорить реализацию проектов модернизации и привести энергетическую инфраструктуру месторождений в соответствие с долгосрочными стратегическими задачами [20].

Таким образом установлено, что реконструкция систем электроснабжения месторождений полезных ископаемых в России, «включая модернизацию устаревшего оборудования и внесение изменений в схемы электрических соединений, является ключевым шагом для повышения надёжности, энергоэффективности и безопасности функционирования всей отрасли» [20].

«Основной целью настоящей работы является разработка и техническое обоснование мероприятий по реконструкции системы электроснабжения» [6] (далее – СЭС) медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» в связи с планируемым подключением новой нагрузки новых потребителей. Кроме того, параллельно необходимо провести модернизацию устаревшего и неэффективного оборудования силовой электрической части СЭС месторождения, а также её вторичных цепей.

Объектом исследования является система электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК», а «предметом исследования – показатели надёжности, экономичности и безопасности объекта исследования» [20].

Для достижения поставленной цели, в работе необходимо решить три основные задачи:

- первая задача заключается в определении целей и задач реконструкции медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК». Для её решения необходимо «провести анализ исходных данных на выполнение работы, включая анализ сведений по схеме электрических соединений СЭС месторождения, а также анализ данных существующих и новых потребителей, которые планируется запитать от ГПП-110/10 кВ объекта исследования в связи с производственной необходимостью» [6];
- вторая основная задача предусматривает непосредственную реконструкцию основных элементов электрической части медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» с

«расчётом электрических нагрузок и токов короткого замыкания, а также последующим выбором и проверкой силовых трансформаторов ГПП-110/10 кВ и распределительных ТП-10/0,4 кВ месторождения, а также проводников и электрических аппаратов СЭС объекта» [6];

- «третья основная задача работы состоит в проведении реконструкции системы релейной защиты и автоматики медно-никелевого месторождения с выбором новых устройств на питающей ГПП-110/10 кВ месторождения» [6].

Таким образом, в результате проведения исследований предполагается, что проведённые изменения в схеме электрических соединений медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» позволят значительно повысить надёжность, экономичность и безопасность СЭС данного месторождения. Также ожидается значительное улучшение показателей бесперебойности передачи электроэнергии, что критически важно для стабильной работы производственных процессов на месторождении.

Результатом работы при решении третьей задачи станет повышение селективности и быстродействия системы РЗА, что позволит оптимизировать функционирование СЭС месторождения, минимизируя время отключения при аварийных ситуациях и обеспечивая более надёжную защиту оборудования. Такие изменения способствуют не только повышению общей надёжности системы, но и её эффективности. Все предложенные решения требуют подтверждения расчётно-аналитическим путём. Данный подход включает проверку соответствия всех параметров проектным требованиям, что позволит удостовериться в правильности выбора современных схемных решений, нового типа оборудования и систем защиты, а также оценить их эффективность в условиях реальной эксплуатации на объекте исследования.

1 Исходная характеристика системы электроснабжения медно-никелевого месторождения

1.1 Исходная характеристика месторождения

«Акционерное общество «Кольская горно-металлургическая компания» (далее – АО «Кольская ГМК») является одним из ведущих предприятий металлургической отрасли России, специализирующимся на добыче, обогащении и переработке никелевых и медных руд» [11].

Основной продукцией компании является никель, который используется в различных секторах промышленности, включая производство нержавеющей стали, аккумуляторов и электромобилей, а также в аэрокосмической и химической промышленности.

В процессе производства активно применяются современные технологии, что позволяет обеспечивать высокую степень переработки руд и достигать высокого уровня качества конечной продукции.

АО «Кольская ГМК» также уделяет большое внимание вопросам экологической устойчивости.

Важную роль в этом процессе играет модернизация производственных мощностей, которая позволяет не только повысить эффективность технологических процессов, но и сократить их экологический след.

Экономическая важность Кольской ГМК для региона и страны в целом проявляется через её значительный вклад в развитие инфраструктуры, создание рабочих мест и поддержку социальных программ. Благодаря крупным инвестициям в модернизацию, предприятие способствует развитию инновационных решений в металлургической отрасли, что позволяет поддерживать высокую конкурентоспособность на мировом рынке.

В работе объектом исследования является системы электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК».

«Расположение данного месторождения показано на рисунке 1» [6].

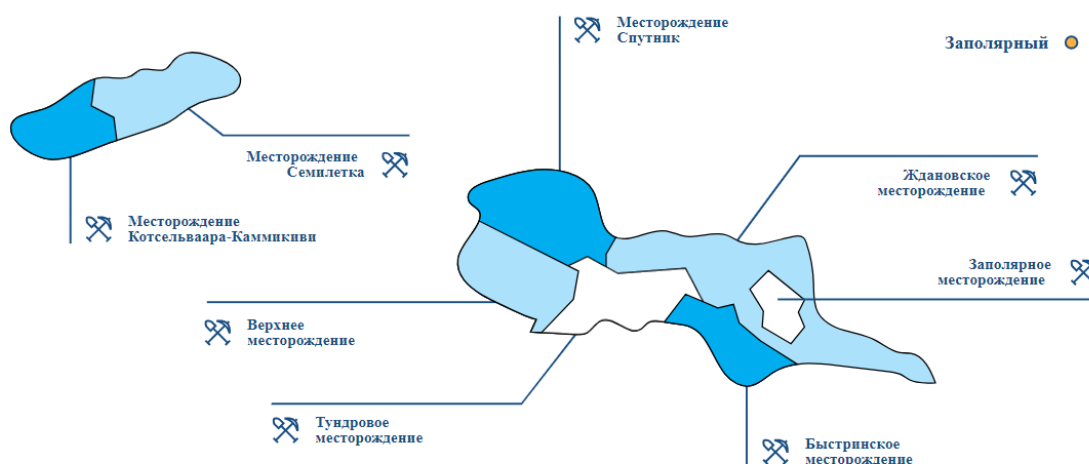


Рисунок 1 – Расположение медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК»

Расположенное на Кольском полуострове, данное месторождение играет ключевую роль в обеспечении металлургических мощностей компании высококачественным сырьём для производства никеля, меди и кобальта.

Месторождение «Спутник» разрабатывается на основе передовых технологий горнодобычи, что позволяет эффективно извлекать полезные компоненты, минимизируя потери при добыче.

Запасы месторождения содержат значительные объёмы медно-никелевых руд, что обеспечивает стабильную сырьевую базу для дальнейшего производства.

Особенностью данного месторождения является высокое содержание никеля и меди, которые находят широкое применение в различных отраслях промышленности, включая металлургию, производство аккумуляторов, электронных устройств и электромобилей.

Важным компонентом добываемых руд также является кобальт, который становится всё более востребованным в связи с ростом рынка аккумуляторных технологий и возобновляемых источников энергии.

Технологические процессы добычи и обогащения на месторождении «Спутник» соответствуют современным стандартам эффективности и экологической безопасности.

Использование прогрессивных методов обогащения позволяет извлекать максимальное количество ценных металлов из руды, обеспечивая высокую экономическую отдачу и сокращение объёмов отходов.

Месторождение «Спутник» является частью интегрированной производственной цепочки Кольской ГМК, обеспечивая сырьё для металлургических заводов компании и поддерживая стабильное производство высококачественных металлов.

Экологические аспекты разработки месторождения также являются важной составляющей работы компании. Кольская ГМК внедряет современные технологии, направленные на снижение воздействия добычи на окружающую среду, что особенно важно для уникальной экосистемы Кольского полуострова.

В 1974 году неподалёку от города Заполярный Мурманской геологоразведочной экспедицией были выявлены значительные залежи медно-никелевых руд. Открытое месторождение получило название «Спутник», став важным источником сырья для дальнейшего развития горно-металлургической промышленности региона. Данное месторождение рассматривается в работе детально.

Медно-никелевое месторождение «Спутник», разрабатываемое АО «Кольская ГМК», является важным объектом добычи, обеспечивающим сырьём металлургические мощности компании.

Основные участки месторождения включают зоны богатого содержания медно-никелевых руд, которые расположены в глубинных слоях земной коры и требуют использования передовых методов добычи полезных ископаемых. На месторождении выделяются участки с различной плотностью залегания руды, что определяет выбор соответствующих технологий и оборудования для их разработки.

Добыча на месторождении «Спутник» осуществляется с применением как подземных, так и карьерных методов, что позволяет эффективно извлекать ресурсы на различных стадиях разработки. Используемое оборудование

включает в себя современную горную технику, такую как буровые установки, экскаваторы и автосамосвалы, обеспечивающие высокую производительность и точность добычи.

Буровые установки применяются для вскрытия рудных пластов и подготовки месторождения к последующей выемке. Экскаваторы и самосвалы выполняют транспортировку добытой руды на обогатительные фабрики, где начинается процесс её переработки.

Также важную роль играет оборудование для обогащения руды, включающее дробилки, мельницы и флотационные установки. Перечисленные системы позволяют максимально эффективно выделять ценные металлы из добытого сырья, сводя к минимуму потери. Кроме того, на месторождении активно используются автоматизированные системы мониторинга и управления, что способствует повышению безопасности работ и улучшению общей эффективности добычи.

Таким образом, медно-никелевое месторождение «Спутник» оснащено современным оборудованием, позволяющим эффективно разрабатывать основные участки с различным содержанием руды. Данный аспект обеспечивает стабильные поставки сырья для производственных нужд АО «Кольская ГМК», поддерживая высокий уровень качества добычи и переработки.

Питание медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» осуществляется от главной понизительной подстанции (ГПП-110/10 кВ), на которой установлены два силовые трансформатора марки ТМН - 4000/110 паспортной мощностью 4000 кВА» [6] каждый. Таким образом, максимально возможная номинальная нагрузка месторождения составляет 8000 кВА.

Питающая ГПП-110/10 кВ месторождения была построена и введена в эксплуатацию в 1976 г. Помимо двух силовых трансформаторов, в её состав входят следующие основные элементы:

- «распределительное устройство 110 кВ (РУ-110 кВ): предназначено для приёма электроэнергии от энергосистемы и распределения её на силовые трансформаторы. В РУ-110 кВ используется схема «4Н» с неавтоматической перемычкой со стороны линий, состоящей из двух разъединителей» [1]. Данная схема подходит для тупиковой подстанции, к числу которых относится рассматриваемая в работе ГПП-110/10 кВ месторождения. Транзита мощности на стороне 110 кВ не предусмотрено. Конструктивно РУ-110 кВ выполнено открытым (ОРУ). В его «состав входят следующие коммутационные и защитные аппараты: выключатели масляные баковые марки МКП-110-31,5/2000 УХЛ1 со встроенными трансформаторами тока ТВТ-110-I, разъединители марки РНДЗ-110/1000 УХЛ 1, ограничители перенапряжения марки ОПНп-110/800/146-10-III-УХЛ 1 и трансформаторы напряжения марки НАМИ-110/ УХЛ 1» [5];
- «распределительное устройство 10 кВ (РУ-10 кВ): является распределительным устройством низшего напряжения» [5] ГПП-110/10 кВ и предназначено для непосредственного питания потребителей «ГПП-110/10 кВ месторождения на напряжении 10 кВ. В РУ-10 кВ применяется схема «Одинокaя система сборных шин, секционированная выключателем»» [1]. Такая схема – надёжная и экономичная, она является наиболее распространённой на стороне 10 кВ. В РУ-10 кВ применяются следующие основные аппараты: выключатели горшкового типа масляные марки ВИГ-133/630 УХЛ1, трансформаторы тока марки ТОЛ-10, трансформаторы напряжения марки НАМИТ-10, ограничители перенапряжения марки ОПНп-10/11,5/10/400 УХЛ1.

Установлено, что среди основного оборудования РУ-110 кВ и РУ-10 кВ питающей ГПП-110/10 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» находятся устаревшие выключатели 110 кВ и «10 кВ масляного типа, введённые в эксплуатацию в 1976 году, выработавшие свой

технический ресурс и требующие замены на инновационные современные разработки выключателей. Кроме того, все остальные аппараты РУ-110 кВ и РУ-10 кВ также устарели (кроме ОПН, введённых в эксплуатацию в 2016 г.» [6]. Для замены устаревших трубчатых разрядников).

Помимо этого, также было установлено, что существующая система РЗиА на ГПП месторождения – устарела, вследствие чего участились аварии, что недопустимо для объектов геологических разработок. Данный вопрос по модернизации силового оборудования и оборудования РЗиА требуется решить в работе далее.

От РУ-10 кВ питающей ГПП-110/10 кВ получают питание:

- 7 существующих участков месторождения, оборудование которые получает питание на напряжении 0,38/0,22 кВ через 3 понижительные трансформаторные ТП-10/0,4 кВ месторождений;
- буровые установки (с двумя синхронными высоковольтными электродвигателями 10 кВ) и оборудованием 0,4 кВ.

Исходные данные существующих участков медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные существующих участков медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК»

Наименование участка	Напряжение питания, кВ	Категория надёжности	ΣP_n , кВт
Буровые установки (СД 10 кВ)	10	1	2500
Оборудование буровых установок (0,4 кВ)	0,38/0,22	1	1250
Участок месторождения №1	0,38/0,22	1	520
Участок месторождения №2	0,38/0,22	2	2270
Участок месторождения №3	0,38/0,22	2	460
Участок месторождения №4	0,38/0,22	2	360
Участок месторождения №5	0,38/0,22	1	520
Участок месторождения №6	0,38/0,22	1	780
Участок месторождения №7	0,38/0,22	1	150

Также установлено, что в связи с дальнейшей разработкой месторождения, планируется ввести в эксплуатацию 3 новых участка, подключив их к существующей системе электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» путём ввода в эксплуатацию

новой ТП-10/0,4 кВ, мощность трансформаторов и оборудования которой планируется выбрать в работе. Исходные данные перспективных участков медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные перспективных участков медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК»

Наименование участка	Напряжение питания, кВ	Категория надёжности	ΣP_n , кВт
Участок месторождения №8	0,38/0,22	1	1550
Участок месторождения №9	0,38/0,22	1	480
Участок месторождения №10	0,38/0,22	1	850

В результате анализа информации на выполнение работы, проведён анализ существующей системы электроснабжения объекта исследования.

1.2 Обоснование реконструкции системы электроснабжения месторождения

Известно, что системы электроснабжения объектов добычи полезных ископаемых должны соответствовать ряду требований, обеспечивающих их надёжную и безопасную эксплуатацию в сложных производственных условиях.

Прежде всего, такие системы должны обладать высокой устойчивостью к аварийным ситуациям и обеспечивать бесперебойную подачу электроэнергии, что особенно важно для непрерывных технологических процессов на горнодобывающих предприятиях. Надёжность систем электроснабжения заключается в способности выдерживать высокие нагрузки и работать в условиях значительных перепадов напряжения, характерных для удалённых регионов с ограниченной инфраструктурой.

Безопасность эксплуатации также играет важную роль в системах электроснабжения для горнодобывающих объектов. Выполнение данного требования предусматривает применения средств релейной защиты и

автоматизации, которые способны своевременно реагировать на аварийные режимы, предотвращая повреждения оборудования и обеспечивая защиту персонала.

Селективность и быстродействие таких систем должны быть адаптированы к специфике месторождений, где возможны как внутренние короткие замыкания, так и внешние воздействия, связанные с природными условиями или технологическими особенностями.

Энергоэффективность систем электроснабжения месторождений также является важным аспектом, так как использование устаревших и ненадёжных технологий может привести к значительным потерям электроэнергии, увеличению эксплуатационных затрат и снижению общего уровня эффективности производства.

Современные системы должны учитывать возможность оптимизации энергопотребления и использование возобновляемых источников энергии, что особенно актуально для удалённых месторождений, где традиционные источники электроснабжения могут быть ограничены.

Перечисленные требования, применяемые вместе с комплексным подходом к эксплуатации, позволяют создавать надёжные, безопасные и эффективные системы электроснабжения для добычи полезных ископаемых, которые соответствуют современным стандартам и требованиям отрасли.

Ранее в работе было установлено, что в связи с дальнейшей разработкой месторождения, планируется ввести в эксплуатацию 3 новых участка, подключив их к существующей системе электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» путём ввода в эксплуатацию новой ТП-10/0,4 кВ, мощность трансформаторов и оборудования которой планируется выбрать в работе далее.

При этом предполагается для питания новых потребителей ТП-10/0,4 кВ применить два силовых трансформатора запитав их от разных секций сборных шин напряжением 10 кВ ГПП месторождения и создав необходимые и достаточные условия резервирования. Таким образом, в реконструируемой

схеме объекта будут соблюдены условия надёжности для питания новых потребителей 1 категории надёжности.

Кроме того, было также установлено, что в системе электроснабжения на питающей ГПП-110/10 кВ находится устаревшее оборудование, которое необходимо заменить на новые современные модификации.

Данный вопрос относится к силовому оборудованию (выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы), а также к оборудованию системы РЗА. Кроме того, при выборе нового оборудования также предлагается рассмотреть вопрос замены типов ячеек РУ-110 кВ и РУ-10 кВ на современные типы.

Выводы по разделу 1.

Решена первая основная задача, которая заключалась в определении целей и задач реконструкции медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК».

В результате проведения данного анализа установлено следующее:

- определено, что питание медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» - централизованное, оно «осуществляется от питающей ГПП-110/10 кВ месторождения, на которой установлены два силовые трансформатора марки ТМН - 4000/110» [6] паспортной мощностью 4000 кВА каждый. Таким образом, максимально возможная номинальная нагрузка месторождения составляет 8000 кВА;
- показано, что в связи с дальнейшей разработкой месторождения, планируется ввести в эксплуатацию 3 новых участка, необходимых для расширения и углубления технологического процесса на медно-никелевом месторождении «Спутник» АО «Кольская ГМК»;
- установлено, что в системе электроснабжения на питающей ГПП-110/10 кВ находится устаревшее оборудование, которое не отвечает требованиям надёжности и безопасности. Данный вопрос относится к силовому оборудованию (выключатели, разъединители,

измерительные трансформаторы), а также к оборудованию системы РЗиА. Кроме того, устаревшими являются также типы и ячейки РУ-110 кВ и РУ-10 кВ ГПП.

Для решения поставленных задач и устранения выявленных недостатков в системе электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК», предлагается следующее:

- в связи с вводом новых участков в эксплуатацию, предполагается изменение в схеме электрических соединений СЭС месторождения путём её реконструкции. При этом предполагается для питания новых потребителей ТП-10/0,4 кВ применить два силовых трансформатора запитав их от разных секций сборных шин напряжением 10 кВ ГПП месторождения и создав необходимые и достаточные условия резервирования. Таким образом, в реконструируемой схеме объекта будут соблюдены условия надёжности для питания новых потребителей 1 категории надёжности;
- предлагается провести замену устаревших и «изношенных» ячеек и типов РУ-110 кВ и РУ-10 кВ питающей ГПП-110/10 кВ на новые типы и модификации. Также предлагается провести замену кабельных линий 10 кВ и 0,4 кВ» [6] и силового оборудования и оборудования РЗиА, установленного в них.

Таким образом будет решена вторая основная задача.

Определено, что решение третьей основной задачи работы заключается в модернизации системы РЗиА на ГПП месторождения.

2 Реконструкция электрической части системы электроснабжения месторождения

2.1 Расчёт электрических нагрузок месторождения

Расчёт электрических нагрузок в системе электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» является важнейшим этапом при проведении мероприятий по реконструкции схемы и модернизации энергетической инфраструктуры.

Расчёт нагрузок на объекте проводится на основе анализа всех подключённых потребителей, включая горнодобывающее оборудование.

Помимо этого, расчёт позволяет учесть возможные пиковые нагрузки, возникающие при запуске тяжёлого оборудования, что минимизирует риск перегрузок и обеспечивает корректную работу системы в любых режимах.

Одним из ключевых аспектов является расчёт резервных мощностей, необходимых для питания потребителей 1 категории надёжности, к которым относится большинство оборудования месторождения. Данный фактор особенно важен для месторождений, где любые сбои в электроснабжении могут привести к значительным производственным потерям и травмам людей.

Таким образом, в результате расчёта определяется нагрузка, необходимая для стабильной работы месторождения (с учётом ввода в эксплуатацию новых потребителей), а также разрабатываются необходимые рекомендации и принимаются рациональные технические решения по реконструкции схемы и модернизации энергетической инфраструктуры системы электроснабжения объекта.

Расчёт электрических нагрузок в системе электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» включает несколько ключевых этапов, каждый из которых важен для обеспечения надёжной и эффективной работы энергосистемы.

На первом этапе проводится анализ и расчёт осветительных нагрузок, который позволяет определить энергопотребление, необходимое для обеспечения безопасного и эффективного освещения на всей территории месторождения, включая рабочие зоны и вспомогательные участки. Данный этап особенно важен для обеспечения соответствия стандартам освещённости в условиях круглосуточной работы.

Следующий этап состоит в расчёте силовых нагрузок участков месторождения, связанных с работой тяжёлого горнодобывающего и перерабатывающего оборудования. При этом учитываются все производственные установки участков месторождения, включая новые, которые требуют значительных энергетических ресурсов.

Заключительный этап включает расчёт суммарных нагрузок, где производится сведение всех полученных данных для определения полной нагрузки системы электроснабжения месторождения.

Данный расчёт позволяет не только точно оценить текущее энергопотребление, но и заложить резервные мощности для обеспечения надёжности системы в пиковые периоды или в случае ввода новых потребителей.

«Расчётная мощность освещения участка месторождения, кВт» [16]:

$$P_{p.o} = K_{c.o} P_{ном.o} K_{пра}, \quad (1)$$

где « $K_{c.o}$ – коэффициент спроса приемников освещения;

$P_{ном.o}$ – суммарная номинальная мощность освещения, кВт;

$K_{пра}$ – коэффициент, учитывающий потери мощности в пускорегулирующей аппаратуре для светодиодных ламп» [8].

При этом [16]:

$$P_{ном.o} = P_{уд.o} F_{ц}, \quad (2)$$

где « $P_{уд.o}$ – удельная установленная мощность осветительных

приемников на 1 м^2 освещаемой площади участка, кВт/м²;

$F_{\text{ц}}$ – площадь участка по генплану, м²» [8].

«Реактивная мощность светодиодных ламп» [16]:

$$Q_{p.o} = P_{p.o} \cdot \operatorname{tg} \varphi_o, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_o$ – «коэффициент реактивной мощности освещения» [16].

«Расчет освещения для участка месторождения №1» [16]:

$$P_{\text{уд.о}} = 15 \text{ Вт} / \text{м}^2,$$

$$F = 50 \cdot 100 = 5000 \text{ м}^2,$$

$$P_{\text{ном.о}} = 5000 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 75 \text{ кВт},$$

$$P_{p.o} = 75 \cdot 1,05 \cdot 0,95 = 74,8 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.o} = 75 \cdot 0,43 = 32,3 \text{ квар}.$$

Расчет освещения участков месторождения сведён в таблицу 3.

Таблица 3 – Расчет освещения для участков месторождения

Наименование участка	$F_{\text{ц}}, \text{ м}^2$	$P_{\text{уд.о}}, \text{ Вт/м}^2$	$P_{\text{ном.о}}, \text{ кВт}$	$P_{p.o}, \text{ кВт}$	$Q_{p.o}, \text{ квар}$
Буровые установки (освещение)	5000	15	75,0	74,8	32,3
Участок месторождения №1	5000	17	85,0	84,8	36,5
Участок месторождения №2	5000	17	85,0	84,8	36,5
Участок месторождения №3	6000	17	102,0	101,7	43,8
Участок месторождения №4	4000	18	72,0	71,8	30,9
Участок месторождения №5	4500	15	67,5	67,3	28,9
Участок месторождения №6	11250	15	168,8	168,4	72,4
Участок месторождения №7	1200	15	18,0	17,9	7,7
Участок месторождения №8	5000	15	75,0	74,8	32,3
Участок месторождения №9	5000	17	85,0	84,8	36,5
Участок месторождения №10	5000	15	75,0	74,8	32,3
Наружное освещение территории месторождения	122250	4	48,9	48,8	21,0
Всего освещения	179200	-	-	1033,0	466,0

«Активная силовая нагрузка участков месторождения, кВт» [16]:

$$P_{p.n} = P_n \cdot K_c, \quad (4)$$

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

K_c – значение коэффициента спроса» [16].

«Реактивная силовая нагрузка участков месторождения, квар» [16]:

$$Q_{p.n} = P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi, \text{ квар}. \quad (5)$$

«Полная силовая нагрузка участков месторождения, кВА» [16]:

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

При этом расчётный ток нормального режима силовой нагрузки участков месторождения, А:

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

где $S_{p.n}$ – «полная силовая нагрузка участков месторождения, кВА» [16];

$U_{ном.}$ – «номинальное напряжение присоединения, кВ» [16].

«Расчёт электрических силовых нагрузок для участка месторождения №1 по условиям (4) – (7)» [16]:

$$P_{p.n} = 0,5 \cdot 2500 = 1250 \text{ кВт},$$

$$Q_{p.n} = 0,75 \cdot 1250 = 937,5 \text{ квар},$$

$$S_{p.n} = \sqrt{1250^2 + 937,5^2} = 1562,5 \text{ кВА},$$

$$I_{p.n} = \frac{1562,5}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 85,9 \text{ кВА}.$$

«Аналогичные расчёты проведены для остальных участков системы электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК». Результаты расчёта силовых электрических нагрузок объекта» [12] представлены в сводной таблице 2.

Полная расчетная нагрузка участков месторождения определяется суммой осветительной и силовой нагрузки, рассчитанной в работе ранее, кВА» [16]:

$$S_p = \sqrt{(P_{p.n} + P_{p.o})^2 + (Q_{p.n} + Q_{p.o})^2}. \quad (8)$$

«Полная суммарная расчетная нагрузка на примере участка месторождения №1» [16]:

$$S_p = \sqrt{(775 + 74,8)^2 + (581,3 + 32,3)^2} = 1048,2 \text{ кВА}.$$

«На данном этапе трансформаторы ТП-10/0,4 кВ месторождения еще не выбраны, поэтому потери мощности в них приближенно определяются по формулам, исходя из значения расчётной суммарной нагрузки, которая приходится на их шины 10 кВ» [16]:

$$\Delta P_{m.TП} = 0,02 S_{p1.TП}, \text{ кВт}, \quad (9)$$

$$\Delta Q_{m.TП} = 0,1 S_{p1.TП}, \text{ квар}. \quad (10)$$

«Предварительные потери активной и реактивной мощности на примере трансформаторов ТП-10/0,4 кВ участка №1» [16]:

$$\Delta P_{m.ГПП} = 0,02 \cdot 1048 = 21 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{m.ГПП} = 0,1 \cdot 1048,2 = 104,8 \text{ квар}.$$

«При этом расчётная суммарная активная и реактивная нагрузка ГПП-110/10 кВ всего месторождения» [16]:

$$P_{p.ГПП} = (\Sigma P_{p.n} + \Sigma P_{p.в}) K_{pm} + \Sigma P_{p.o} + \Sigma \Delta P_{mц}, \text{ кВт}, \quad (11)$$

$$Q_{p.ГПП} = (\Sigma Q_{p.n} + \Sigma Q_{p.в}) K_{pm} + \Sigma Q_{p.o} + \Sigma \Delta Q_{mц}, \text{ квар}, \quad (12)$$

где $K_{pm} = 0,95$ – «коэффициент разновременности максимумов нагрузки отдельных групп приемников» [19].

«Значение полной расчётной суммарной нагрузки питающей ГПП-110/10 кВ месторождения» [16]:

$$S_{p.ГПП} = \sqrt{P_{p.ГПП}^2 + Q_{p.ГПП}^2}, \text{ кВА}. \quad (13)$$

«Входная реактивная мощность, которую целесообразно передавать через шины 110 кВ питающей ГПП-110/10 кВ месторождения» [8]:

$$Q_{\text{эл}} = \text{tg} \varphi_{\text{эл}} P_{p.ГПП}, \text{ квар}, \quad (14)$$

где $\text{tg} \varphi_{\text{эл}}$ – «экономически целесообразный коэффициент реактивной мощности на шинах 10 кВ ГПП-110/10 кВ» [8].

«Тогда полная расчётная мощность на шинах высшего напряжения 110 кВ питающей ГПП-110/10 кВ месторождения» [8]:

$$S_{p.n} = \sqrt{P_{p.n}^2 + Q_{p.n}^2} = \sqrt{(P_{p.ГПП} + \Delta P_{m.ГПП})^2 + (Q_{p.ГПП} + \Delta Q_{m.ГПП})^2}, \text{ кВА}. \quad (15)$$

«Суммарные расчётные нагрузки ГПП-110/10 кВ без учета КРМ» [8]:

$$P_{p.ГПП} = 4398 \cdot 0,95 + 951 + 256 = 5385,1 \text{ кВт.}$$

$$Q_{p.ГПП} = 1986 \cdot 0,95 + 431 + 627 = 2944,7 \text{ квар.}$$

$$S_{p.ГПП} = \sqrt{(5385,1)^2 + (2944,7)^2} = 6137,6 \text{ кВА.}$$

«Известно, что необходимость компенсации реактивной мощности (далее – КРМ)» [8] в системах электроснабжения возникает в связи с тем, что многие потребители, особенно промышленные, используют электрическое оборудование, создающее значительные уровни реактивной мощности.

Реактивная мощность не совершает полезной работы, но вызывает дополнительные потери в сети, что снижает эффективность электроснабжения и увеличивает нагрузку на оборудование.

На объектах, таких как медно-никелевые месторождения, значительное количество силовых установок и электродвигателей потребляют реактивную мощность, что требует её компенсации для повышения общей эффективности системы.

Поэтому дальнейший расчёт суммарной нагрузки на ГПП-110/10 кВ месторождения проводится с учётом КРМ.

«Суммарные расчётные нагрузки ГПП-110/10 кВ с учетом КРМ» [8]:

$$Q_{\Sigma 1} = 0,328 \cdot 5385,1 = 1766,3 \text{ квар,}$$

$$S_{p.ГПП} = \sqrt{(5385,1)^2 + (1766,3)^2} = 5667,4 \text{ кВА.}$$

«На данном этапе трансформаторы питающей ГПП-110/10 кВ месторождения еще не выбраны, поэтому потери мощности в них приближенно определяются, исходя из значения расчётной суммарной нагрузки, которая приходится на их шины высшего напряжения 110 кВ» [8]:

$$\Delta P_{m.ГПП} = 0,02 S_{p1,ГПП}, кВт, \quad (16)$$

$$\Delta Q_{m.ГПП} = 0,1 S_{p1,ГПП}, квар. \quad (17)$$

«Значит, для условий ГПП-110/10 кВ месторождения, учитывая значения расчётных суммарных нагрузок с учётом компенсации реактивной мощности» [8]:

$$\Delta P_{m.ГПП} = 0,02 \cdot 5667,4 = 113,3 кВт,$$

$$\Delta Q_{m.ГПП} = 0,1 \cdot 5667,4 = 566,7 квар.$$

«Тогда полная суммарная расчетная нагрузка на шинах высшего напряжения 110 кВ ГПП-110/10 кВ» [8]:

$$S_{p.n} = \sqrt{(5385,1 + 113,3)^2 + (1766,3 + 566,7)^2} = 5972,9 кВА.$$

При этом для СД 10 кВ буровых установок принят $\cos \varphi = 1$, так как они не являются источниками и приёмниками реактивной электроэнергии, а сами могут её компенсировать.

Известно, что синхронные электродвигатели, помимо основной функции преобразования электрической энергии в механическую, способны регулировать реактивную мощность, потребляемую из сети.

Данный результат достигается за счёт настройки возбуждения синхронной машины.

Таким образом, данные синхронные электродвигатели будут компенсировать реактивную мощность в сети 10 кВ системы электроснабжения месторождения.

«Результаты расчётов силовых и суммарных нагрузок месторождения приведены в таблице 4» [8].

Таблица 4 – Результаты расчётов силовых и суммарных нагрузок системы электроснабжения месторождения

Наименование участка	P _{р.н.} , кВт	P _{р.о.} , кВт	Q _{р.н.} , квар	Q _{р.о.} , квар	P _{р.} , кВт	Q _{р.} , квар	S _{р.} , кВА	ΔP _{т.} , кВт	ΔQ _{т.} , квар
Буровые установки (СД 10 кВ)	2500,0	-	-	-	2500,0	-	2500,0	-	-
Оборудование буровых установок (0,4 кВ)	1250,0	74,8	937,5	32,3	1324,8	905,2	1644	1,6	8,2
Участок месторождения №1	182,0	84,8	185,6	36,5	266,8	222,1	347,1	6,9	34,7
Участок месторождения №2	908,0	84,8	681	36,5	992,8	717,5	1224,9	24,5	122,5
Участок месторождения №3	138,0	101,7	103,5	43,8	239,7	147,3	281,3	5,6	28,1
Участок месторождения №4	108,0	71,8	110,2	30,9	179,8	141,1	228,6	4,6	22,9
Участок месторождения №5	208,0	67,3	276,6	28,9	275,3	305,5	411,2	8,2	41,1
Участок месторождения №6	321,0	168,4	327,4	72,4	489,4	399,8	631,9	12,6	63,2
Участок месторождения №7	-	17,9	-	7,7	459,8	297,7	547,8	10,76	54,8
Участок месторождения №8	775,0	74,8	581,3	32,3	849,8	613,6	1048,2	21,0	104,8
Участок месторождения №9	168,0	84,8	171,4	36,5	252,8	207,9	327,3	6,5	32,7
Участок месторождения №10	340,0	74,8	452,2	32,3	414,8	484,5	637,8	12,8	63,8
Освещение территории	-	48,8	-	21,0	48,8	21,0	53,1	0,25	5,3
Всего нагрузки (без КРМ)	4398,0	951,0	1986,0	431,0	5385,1	2944,7	6137,6	256,0	627,0
Потери в трансформаторах ГПП с учетом КРМ	-	-	-	-	5385,1	1766,3	5667,4	113,3	566,7
Всего нагрузки (с КРМ)	-	-	-	-	5498,4	2333,0	5972,9	-	-

Таким образом, суммарная расчётная нагрузка ГПП-110/10 кВ системы электроснабжения месторождения составила 5972,9 кВА (с учётом КРМ).

2.2 Выбор места для расположения ГПП

Известно, что определение рационального местоположения питающей ГПП-110/10 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская

ГМК» является важнейшим этапом реконструкции системы электроснабжения данного объекта.

Указанный расчёт требует учёта множества факторов, основным из которых является центр электрических нагрузок.

Центр нагрузок определяется распределением потребителей электроэнергии на территории месторождения и позволяет найти оптимальную точку для размещения ГПП-110/10 кВ с целью минимизации потерь энергии, уменьшения длины кабельных линий распределительной сети 10 кВ, а также для улучшения общей эффективности системы электроснабжения.

Известно, что искомый центр электрических нагрузок представляет собой условную точку, в которой сосредоточено максимальное потребление электроэнергии.

Расположение ГПП вблизи этого центра даёт возможность снизить потери в линиях электропередачи, оптимизировать распределение энергии и обеспечить стабильную работу оборудования.

Кроме того, правильное определение местоположения подстанции способствует снижению капитальных и эксплуатационных затрат, связанных с прокладкой кабельных линий и обслуживанием инфраструктуры.

При выборе места для ГПП необходимо учитывать как текущее распределение потребителей, так и перспективные планы развития месторождения, связанные с подключением новых объектов или увеличением мощности оборудования, что позволяет учесть не только сегодняшние требования, но и возможное увеличение нагрузки в будущем.

При этом важными факторами являются также геологические условия, наличие доступных площадок для строительства и удобство транспортной доступности для проведения монтажных и эксплуатационных работ.

Таким образом, определение местоположения главной понизительной подстанции на основе центра электрических нагрузок является ключевым аспектом реализуемого проекта реконструкции системы электроснабжения,

который позволяет обеспечить оптимальное распределение энергии, минимизировать потери и поддерживать стабильную работу оборудования на месторождении «Спутник» АО «Кольская ГМК».

«Координаты ЦЭН для питающей ГПП-110/10 кВ на месторождении «Спутник» АО «Кольская ГМК»» [10]:

$$X_0 = \frac{\sum P_{p,i} X_i}{\sum P_{p,i}}, \text{ м}, \quad (18)$$

$$Y_0 = \frac{\sum P_{p,i} Y_i}{\sum P_{p,i}}, \text{ м}, \quad (19)$$

где « X_i, Y_i – координаты центров нагрузок отдельных участков, м» [10].

«Радиус окружностей картограммы электрических нагрузок на месторождении «Спутник» АО «Кольская ГМК»» [8]:

$$R_i = \sqrt{\frac{P_{p,i}}{\pi m}}, \quad (20)$$

где « $P_{p,i}$ – расчетная активная мощность i -го участка, кВт;

m – масштаб мощности, принимается $m = 1000 \text{ Вт/мм}^2$ » [10].

«Угол заштрихованного сектора» [10]:

$$\varphi = 360 \frac{P_{p,o}}{P_p}. \quad (21)$$

Результаты расчёта картограммы нагрузок и ЦЭН на месторождении «Спутник» АО «Кольская ГМК» представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты расчёта картограммы нагрузок и ЦЭН на месторождении «Спутник» АО «Кольская ГМК»

Наименование участка	P _p , кВт	X,м	Y,м	P _p ·X, кВт·м	P _p ·Y, кВт·м	R, мм	φ,°
Оборудование буровых установок (0,4 кВ)	1324,8	150	280	198720	370944	21	20
Участок месторождения №1	266,8	150	220	40020	58696	9	114
Участок месторождения №2	992,8	150	160	148920	158848	18	31
Участок месторождения №3	239,7	200	50	47940	11985	9	153
Участок месторождения №4	179,8	450	140	80910	25172	8	144
Участок месторождения №5	275,3	420	50	115626	13765	9	88
Участок месторождения №6	489,4	480	250	234912	122350	12	124
Участок месторождения №7	459,8	10	220	4958	101156	12	14
Участок месторождения №8	849,8	350	280	297430	237944	16	32
Участок месторождения №9	252,8	350	220	88480	55616	9	121
Участок месторождения №10	414,8	350	160	145180	66368	12	65
Итого	5816,0	-	-	1403096	1222844	-	-

Искомые координаты центра электрических нагрузок месторождения для установки питающей ГПП-110/10 кВ:

$$X_0 = \frac{1403096}{5816} = 241 м,$$

$$Y_0 = \frac{1222844}{5816} = 210 м.$$

В результате проведения расчётов было установлено, что питающая ГПП-110/10 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» расположена в непосредственной близости к рассчитанным координатам центра электрических нагрузок объекта исследования. Такое расположение является оптимальным и позволяет значительно снизить потери электроэнергии и перетоки мощностей в питающей сети 110 кВ и распределительных сетях 10 кВ, а также экономить проводниковый материал, что положительно сказывается на всей системе электроснабжения месторождения.

Следовательно, изменять расположение питающей ГПП-110/10 кВ на территории месторождения нет необходимости.

2.3 Проверка трансформаторов главной понизительной подстанции месторождения

Проверка силовых трансформаторов, установленных на питающей ГПП-110/10 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК», проводится для оценки их соответствия новым нагрузкам, связанным с подключением дополнительных потребителей.

Возникновение необходимости такой проверки объясняется увеличением нагрузки на подстанцию после реконструкции. Расчёты электрических нагрузок, выполненные ранее, послужили основой для оценки способности трансформаторов справляться с возросшими требованиями.

На реконструируемой питающей ГПП-110/10 кВ установлены два силовых трансформатора марки ТМН-4000/110 с классами напряжения 110/10 кВ, предназначенные для понижения напряжения с 110 кВ до 10 кВ.

После капитального ремонта, проведённого в 2020 году, состояние данных трансформаторов было признано удовлетворительным.

Тем не менее, проверка их соответствия новым условиям эксплуатации является важнейшим шагом в процессе обеспечения надёжности электроснабжения месторождения.

В связи с реконструкцией схемы электрических соединений, указанная проверка помогает подтвердить эффективность реконструкции схемы и модернизации оборудования.

Силовые трансформаторы играют центральную роль в распределении и преобразовании электроэнергии между различными уровнями напряжения. Их соответствие расчётным нагрузкам критически важно для надёжного функционирования всей энергосистемы.

Неверная оценка их нагрузочной способности может привести к серьёзным последствиям, таким как преждевременный выход из строя, снижение надёжности сети и увеличение эксплуатационных затрат.

Проведение качественной проверки позволяет выявить возможные отклонения между расчётными параметрами и реальными условиями эксплуатации, что даёт возможность принять корректирующие меры для предотвращения сбоев в работе.

Проверка трансформаторов требует комплексного подхода, который учитывает как текущие эксплуатационные потребности, так и возможные будущие изменения в энергопотреблении. Такой подход позволяет подготовить систему к возможному росту нагрузок и избежать потенциальных проблем, которые могут возникнуть при изменении эксплуатационных условий.

Таким образом, проверка силовых трансформаторов после реконструкции не только гарантирует надёжность и устойчивость электроснабжения, но и подтверждает успешность и обоснованность проведённых мероприятий. Такая проверка обеспечивает долгосрочную стабильность всей системы электроснабжения месторождения, минимизируя риски и создавая условия для дальнейшего развития.

«Проверка мощности трансформаторов на ГПП-110/10 кВ проводится с учётом максимальных нагрузок подстанции и увеличенной нагрузки потребителей, рассчитанных ранее. При этом учитывается значение рекомендуемого оптимального коэффициента загрузки трансформаторов подстанции» [9]:

$$S_{ном.т} \geq \frac{S_{м.зн}}{N \cdot K_3}, \quad (22)$$

где « $S_{м.зн}$ – максимальное значение полной нагрузки подстанции (принимается равной расчётной нагрузке месторождения на вводе 110 кВ, рассчитанной в работе ранее);

N – число трансформаторов на подстанции, шт.

K_3 – нормативный коэффициент загрузки трансформаторов подстанции (с учётом состояния трансформаторов» [9] после

капитального ремонта, проведённого в 2020 году, принимается значение $K_3 = 0,75$).

Для условий данной реконструируемой подстанции с учётом суммарной полной нагрузки, рассчитанной в работе ранее:

$$S_{ном.т} \geq \frac{5972,9}{2 \cdot 0,75} = 3981,9 \text{ кВА}.$$

Следовательно, нужно выбрать трансформатор ближайшей номинальной мощности, которая превышает расчётную мощность, равную 3981,9 кВА.

«С учётом полученных результатов, принимается стандартная ближайшая мощность двух силовых трансформаторов для установки на подстанции, равная 4000 кВА (4 МВА). Данному условию полностью соответствуют два силовых трансформатора марки ТМН-4000/110 с классами напряжений 110/10 кВ, которые были установлены на подстанции ранее» [9].

Повторная проверка по номинальной мощности выполняется:

$$4000 \text{ кВА} \geq 3981,9 \text{ кВА}.$$

Оба силовых трансформатора марки ТМН-4000/110 проходят предварительную проверку.

Выбор мощности трансформаторов напрямую связан с вопросами безопасности. Трансформаторы, работающие в условиях перегрузки, подвергаются риску перегрева, что может привести к их серьёзному повреждению или выходу из строя. Данный факт не только ставит под угрозу надёжность энергоснабжения, но и создаёт опасность для персонала, обслуживающего подстанцию. Перегрев, вызванный превышением

допустимых нагрузок, может стать причиной аварийных ситуаций, таких как пожары и повреждения инфраструктуры.

С учётом этих рисков проверка мощности трансформаторов должна основываться на тщательном анализе всех возможных сценариев нагрузки, чтобы гарантировать стабильную и безопасную эксплуатацию подстанции. Оценка перегрузочной способности трансформаторов играет важную роль в этом процессе, особенно с точки зрения эффективности их системы охлаждения. При повышенных нагрузках эффективность охлаждения становится критическим фактором, который способен предотвратить перегрев и избежать серьёзных повреждений оборудования.

Проверка системы охлаждения трансформаторов даёт возможность не только подтвердить их соответствие расчётным нагрузкам, но и обеспечить надёжную и безопасную эксплуатацию в долгосрочной перспективе. Предлагаемый подход обеспечивает защиту как оборудования подстанции, так и обслуживающего персонала, минимизируя риски аварий и гарантируя стабильность электроснабжения.

С учётом вышеизложенных факторов, а также системы охлаждения трансформаторов и проведённого в 2020 году капитального ремонта, осуществляется проверка перегрузочной способности системы охлаждения в нормальном и послеаварийном режимах работы ГПП-110/10 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» [9]:

$$K_{з.н} = \frac{0,5 \cdot S_{м.знп}}{S_{ном.т}} \leq 0,75. \quad (23)$$

$$K_{з.н} = \frac{S_{м.знп}}{S_{ном.т}} \leq 1,5. \quad (24)$$

«Проверки силовых трансформаторов марки ТМН-4000/110 с классами напряжений 110/10 кВ выполняются» [9]:

$$K_{3.n} = \frac{0,5 \cdot 5972,9}{4000} = 0,74 \leq 0,75.$$

$$K_{3.n} = \frac{5972,9}{4000} = 1,48 \leq 1,5.$$

Таким образом, трансформаторы марки ТМН-4000/110 полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к их системе охлаждения по нагрузочной способности, что подтверждает их пригодность для установки на реконструируемой ГПП-110/10 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК».

2.4 Выбор и проверка трансформаторов трансформаторных подстанций участков

Установлено, что в связи с реконструкцией системы электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК», обусловленной подключением новой нагрузки и вводом новой ТП-10/0,4 кВ для её питания, необходимо провести выбор и проверку силовых трансформаторов подстанций 10/0,4 кВ месторождений на соответствие увеличившейся нагрузке.

«Мощность силовых трансформаторов ТП-10/0,4 кВ медно-никелевого месторождения определяется с учётом её загрузки активной мощностью» [15]:

$$S_{\text{ном.т}} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{\sum P_{\text{р.}}}{N \beta_{\text{т}}}, \quad (25)$$

где « $\sum P_{\text{р.}}$ – суммарная активная нагрузка объектов участка,

получающего питание от ТП-10/0,4 кВ, кВт;

N – количество трансформаторов ТП-10/0,4 кВ участка месторождения, шт.;

$\beta_{\text{т}}$ – коэффициент активной загрузки трансформаторов» [15].

Проводится проверка правильности выбора силовых трансформаторов для установки на ТП-1 (10/0,4 кВ) медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК». Ранее на «ТП-1 (10/0,4 кВ) месторождения» было установлено два силовых трансформатора марки ТМ-1600/10» [15].

Следовательно, «номинальная мощность трансформатора должна превышать расчётную мощность нагрузки данной подстанции» [15]:

$$S_{\text{ном.т}} = 1600 \text{ кВА} \geq S_{\text{ном.т.р}} = \frac{1590,8}{2 \cdot 0,8} = 994,25 \text{ кВА}.$$

Известно, что проверка на перегрузочную способность трансформаторов подстанции является важным аспектом их эксплуатации и обеспечения надёжности. При работе трансформатор испытывает значительные электрические и тепловые нагрузки, что может привести к повреждению обмоток. Регулярное проведение таких проверок позволяет обеспечить надёжную и безопасную работу СЭС, минимизировать риски аварий и продлить срок службы оборудования.

Проверка загрузки трансформатора в нормальном режиме [15]:

$$K_3^H = \frac{0,5 \cdot S_p}{S_{\text{ном.т}}} \leq 0,8. \quad (26)$$

Условия данной проверки выполняются [15]:

$$K_3^H = \frac{0,5 \cdot 1590,8}{1600} \approx 0,5 \leq 0,8.$$

Проверка в «максимальном режиме» [15]:

$$K_3^{n.ав} = \frac{S_p}{S_{ном.т}} \leq 1,6. \quad (27)$$

«Условия этой проверки также выполняются» [15]:

$$K_3^{n.ав} = \frac{1590,8}{1600} \approx 1,0 \leq 1,6.$$

«Наибольшая РМ, которую целесообразно передать через ТП» [15]:

$$Q_{\max,т} = \sqrt{\left(N_{опт} \beta_{норм.т} S_{ном}\right)^2 - P_{см}^2}, \text{квар}. \quad (28)$$

«Для ТП-1 месторождения» [15]:

$$Q_{\max,т} = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 1127,3^2} = 1935,7 \text{квар}.$$

«Суммарная мощность конденсаторных батарей, квар» [15]:

$$Q_{НБК} = Q_{см} - Q_{\max,т}. \quad (29)$$

Для ТП-1:

$$Q_{НБК} = 1127,3 - 1935,7 = -808,4 \text{квар}.$$

«При $Q_{НБК} < 0$ установка конденсаторных батарей напряжением 0,4 кВ на шинах низкого напряжения подстанции не требуется, следовательно, на ТП-1 месторождения КРМ не нужна.

Аналогично проведён выбор трансформаторов ТП-10/0,4 кВ участков с учётом КРМ» [12] (таблица 6).

Таблица 6 – Выбор трансформаторов ТП-10/0,4 кВ участков месторождения с учётом КРМ

Номер ТП	Наименование участка	F_u , м ²	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	$S_{ном.т.}$, кВА	$Q_{max.т.}$, квар	$Q_{НБК}$, квар
ТП-1	Оборудование буровых установок (0,4 кВ)	5000	1324	905,2	1644	1600	1935,7	-808,4
	Участок месторождения №1	5000	266,8	222,1	347,1			
ТП-2	Участок месторождения №2	5000	992,8	717,5	1224,9	1600	1214,1	-198,9
	Участок месторождения №7	1200	459,8	297,7	547,8			
ТП-3	Участок месторождения №6	11250	489,4	399,8	631,9	1600	1901,4	-907,7
	Участок месторождения №4	4000	179,8	141,1	228,6			
	Участок месторождения №5	4500	275,3	305,5	411,2			
	Участок месторождения №3	6000	239,7	147,3	281,3			
ТП-4	Участок месторождения №8	5000	849,8	613,6	1048,2	1600	1647,8	-341,8
	Участок месторождения №9	5000	252,8	207,9	327,3			
	Участок месторождения №10	5000	414,8	484,5	637,8			

«Проведённые исследования подтвердили, что использование в системе электроснабжения месторождения на всех четырёх двухтрансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ силовых трансформаторов марки ТМ-1600/10» [15] является оптимальным решением, способствующим повышению общей надёжности и эффективности системы электроснабжения объекта в результате его реконструкции путём подключения дополнительных потребителей.

При этом также определено, что на всех ТП-10/0,4 кВ компенсация реактивной мощности не требуется.

2.5 Выбор и проверка проводников

С учётом проведённого анализа литературных источников, учитывая месторасположение, тип подстанции, а также наличие на ней определённого типа оборудования, в работе предлагается применить следующие типы проводников:

- «для питающей линия 110 кВ предложено использовать двухцепную воздушную линию электропередачи, выполненная современным проводом марки AERO-Z» [5];

- «распределительные линии 10 кВ – кабельные линии электропередачи, выполненные кабелем АПвБПу (изоляция со сшитого полиэтилена)» [2];
- «распределительные линии 0,4 кВ – кабельные линии электропередачи с применением кабелей марки АПвВГ (изоляция со сшитого полиэтилена)» [3].

Провода марки AERO-Z отличаются высокой механической прочностью и устойчивостью к неблагоприятным погодным условиям. Такие провода имеют небольшой вес, что облегчает их монтаж и снижает нагрузку на опоры. Благодаря своей конструкции, такие провода обеспечивают минимальные потери энергии при передаче и устойчивы к коррозии, что увеличивает их срок службы. Следовательно, они удовлетворяют условиям и требованиям для установки на питающей линии 110 кВ месторождения.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена обладают высокой электрической прочностью и устойчивы к воздействию высоких температур. Таким образом, их выбор обоснован.

Таким образом, все проводники в работе выбираются алюминиевыми.

«Выбор рационального сечения проводника по экономической плотности тока» [13]:

$$F_{\text{э}} = \frac{I_{\text{р.}}}{j_{\text{э}}}, \quad (30)$$

где « $j_{\text{э}}$ – экономическая плотность тока, А/мм² (для неизолированных проводников воздушных линий принимается значение $j_{\text{э}}=1,1$ А/мм², для кабельных линий 10 кВ и 0,4 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена принимается значение $j_{\text{э}}=1,6$ А/мм²)» [13].

«Проверка выбранного сечения проводника в нормальном режиме» [13]:

$$I_{доп} \geq I_p, \quad (31)$$

где « $I_{доп}$ – допустимое справочное значение тока проводника, А» [13].

«Проверка проводника в послеаварийном (максимальном) режиме работы» [13]:

$$I_{доп} \geq I_{p.маx}, \quad (32)$$

где « $I_{p.маx}$ – максимальный ток, А» [13].

«Проводник должен быть проверен по механической прочности, а также условиям коронирующего разряда (только для ВЛ-110 кВ)» [13]:

$$F_{ст} \geq F_{мин}, \text{ мм}^2. \quad (33)$$

«Проводится выбор и проверка сечения провода питающей ВЛ-110 кВ ГПП-110/10 кВ месторождения.

Ранее было установлено, что длина данной линии составляет 1 км, провод, используемый на данной линии – марки АЕРО-Z» [5].

«Расчётный ток нормального режима для всех линий рассчитывается по известной формуле с учётом суммарной полной нагрузки и номинального напряжения» [13]:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (34)$$

Для питающей ВЛ-110 кВ месторождения:

$$I_p = \frac{5972,9}{\sqrt{3} \cdot 110} = 31,35 \text{ А}.$$

«Значение аварийного тока линий» [13]:

$$I_{p.ав} = 1,4 \cdot I_p, \quad (35)$$

«Для питающей ВЛ-110 кВ месторождения» [13]:

$$I_{p.ав} = 1,4 \cdot 31,35 = 43,89 \text{ A}.$$

«Сечение проводника для питающей ВЛ-110 кВ месторождения» [13]:

$$F_{\text{э}} = \frac{31,35}{1,1} \approx 28,5 \text{ мм}^2.$$

Для питающей ВЛ-110 кВ принимается стандартное сечение провода марки АААС АЕRО-Z 177 А3F со стандартным сечением 177 мм² и допустимым током 825 А. «Условие проверки по нормальному режиму для питающей ВЛ-110 кВ выполняется» [13]:

$$825 \text{ A} \geq 31,5 \text{ A}.$$

«Условия проверок по максимальному режиму послеаварийного режима для питающей ВЛ-110 кВ выполняются» [13]:

$$825 \text{ A} \geq 43,89 \text{ A}.$$

«Условия механической прочности для ВЛ-110 кВ соблюдены» [13]:

$$177 \text{ мм}^2 \geq 120 \text{ мм}^2.$$

«Выбор кабельных линий напряжением 10 кВ также проводится по экономической плотности тока. При выборе кабельных линий напряжением 0,4 кВ, формула экономической плотности тока» [15] не используется, данные кабели выбираются и проверяются по условию допустимого нагрева токами нормального и послеаварийного режимов.

При этом для питания каждого объекта используется по 2 силовых кабеля, значит, на каждый из двух кабелей будет приходиться по половине нагрузки линии.

Результаты выбора кабельных линий распределительной сети 10 кВ и 0,4 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты выбора и проверки кабельных линий распределительной сети 10 кВ и 0,4 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК»

Линия	$\frac{S_p}{2}$, кВА	$I_{p.}$, А	$I_{p.ав}$, А	$I_{доп}$, А	Площадь сечения, мм ²		Марка и принятое сечение кабеля
					по j ₃	S _{ст.} , мм ²	
Сеть 10 кВ							
ГПП-ТП1	995,6	57,7	80,8	108,0	36,0	35	АПвБПу-10 (3×35)
ГПП-ТП2	886,4	51,1	71,5	108,0	31,9	35	АПвБПу-10 (3×35)
ГПП-ТП3	776,5	44,9	62,9	108,0	28,1	35	АПвБПу-10 (3×35)
ГПП-ТП4	1006,7	58,2	81,5	108,0	36,4	35	АПвБПу-10 (3×35)
ГПП-Буровые установки (СД)	1250,0	72,3	101,2	134,0	45,2	50	АПвБПу-10 (3×50)
Сеть 0,4 кВ							
ТП1-участок 1	173,6	267,1	373,9	450,0	-	150	АПвВГ (4×150)
ТП2-участок 2	612,5	942,3	1319,2	3×450,0	-	150	3×АПвВГ (4×150)
ТП3-участок 3	140,7	216,5	303,1	327,0	-	95	АПвВГ (4×95)
ТП3-участок 4	114,3	175,8	246,1	265,0	-	70	АПвВГ (4×70)
ТП3-участок 5	205,6	316,3	442,8	450,0	-	150	АПвВГ (4×150)
ТП3-участок 6	316,0	486,2	666,7	2×381	-	2×120	2×АПвВГ (4×120)
ТП2-участок 7	273,9	421,4	590,0	612,0	-	240	АПвВГ (4×240)
ТП4-участок 8	524,1	806,3	1128,8	2×612,0	-	2×240	2×АПвВГ (4×240)
ТП4-участок 9	163,7	251,8	352,5	381,0	-	120	АПвВГ (4×120)
ТП4-участок 10	318,9	490,6	686,8	2×381	-	2×120	2×АПвВГ (4×120)

В результате проведения расчётов, были выбраны и подтверждены следующие сечения и марки проводников:

- «для питающей воздушной линии 110 кВ – голые провода марки АААС АЕRО-Z 177 А3F;
- для распределительных линий 10 кВ – кабели марки АПвБПу-10 (3×35) – на линиях ко всем ТП-10/0,4 кВ, АПвБПу-10 (3×50) – на линиях» [15] к синхронным электродвигателям 10 кВ буровых установок;
- для распределительных линий 0,4 кВ: к участкам 1,2 и 5 – кабели марки АПвВГ (4×150), к участку 4 – кабели АПвВГ (4×70), к участку 3 – кабели АПвВГ (4×95), к участкам 6,9 и 10 – кабели АПвВГ (4×120), к участкам 7 и 8 – кабели АПвВГ (4×240).

Все выбранные проводники системы электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» показаны в графической части работы.

2.6 Расчёт токов короткого замыкания

«Процесс расчёта токов короткого замыкания (КЗ) в системе электроснабжения месторождения является важной составляющей для выбора и проверки оборудования. Он включает несколько основных шагов.

Вначале необходимо собрать и проанализировать исходные данные, такие как номинальные напряжения, мощности трансформаторов, длины и сечения кабелей, а также характеристики источников питания» [14].

На основании этих данных строится расчётная, а затем – эквивалентная схема замещения сети, которая используется для расчётов.

Следующим шагом является вычисление параметров элементов схемы, включая активные и реактивные сопротивления линий, трансформаторов и других элементов.

«На завершающем этапе проводится расчёт токов короткого замыкания для различных типов замыканий, таких как трёхфазные и двухфазные

замыкания. Также определяется ударный ток трёхфазного короткого замыкания в начальный момент времени» [14].

Расчёты максимальных токов КЗ и их ударных токов позволяют оценить правильность выбора и настройки защитных устройств, а также проверить устойчивость оборудования подстанции.

Также расчёт токов короткого замыкания помогает обеспечить правильную настройку защитных устройств, проверить устойчивость оборудования и повысить надёжность и безопасность электрической системы.

Расчётная схема, построенная по однолинейной схеме СЭС объекта исследования и представленная на рисунке 2, визуализирует конфигурацию сети и способствует более точным расчётам, что имеет большое значение для успешной реконструкции и модернизации системы электроснабжения месторождения.

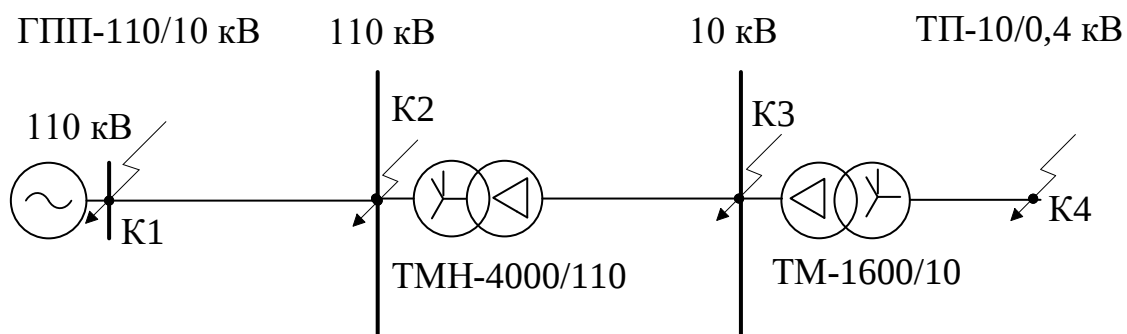


Рисунок 2 – Схема для расчётов токов КЗ в системе электроснабжения месторождения

«Установлено, что основными составляющими, влияющими на результаты расчёта токов КЗ в системе электроснабжения месторождения» [14] в максимальном режиме, являются:

- параметры энергосистемы;
- питающая линия напряжением 10 кВ;
- трансформатор ГПП-110/10 кВ марки ТМН-4000/110;
- трансформатор ТП-10/0,4 кВ участка марки ТМ-1600/10.

«Эквивалентная схема замещения для определения токов КЗ в системе электроснабжения месторождения» [14] представлена в работе на рисунке 3.

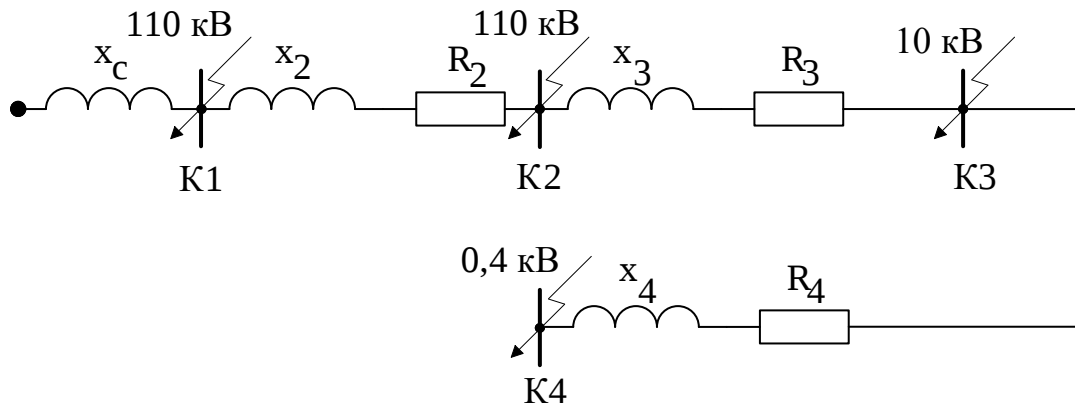


Рисунок 3 – Эквивалентная схема замещения для определения токов КЗ в системе электроснабжения месторождения

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

- $U_{п.1} = 115 \text{ кВ}$ (принимается в качестве базисного напряжения);
- $U_{п.2} = 10,5 \text{ кВ}$;
- $U_{п.3} = 0,4 \text{ кВ}$ » [14].

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

В работе необходимо провести расчёт токов КЗ на выводах силового трансформатора в сети 110 кВ (точка К2), а также на выводах трансформатора в точках К3 (сеть напряжением 10 кВ) и К4 (сеть напряжением 0,4 кВ).

Расчёт проводится в максимальном положения устройства РПН.

«Сопротивление энергосистемы» [14]:

$$X_c = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot I_{к.макс}^{(3)}}. \quad (36)$$

«С учётом токов КЗ на шинах 110 кВ в точке К1 в максимальном режиме:

$$X_c = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 1,5} = 44,3 \text{ Ом.}$$

«Сопротивления питающей линии электропередачи напряжением 110 кВ» [14]:

$$R_2 = r_{y\partial} \cdot L, \quad (37)$$

$$X_2 = x_{y\partial} \cdot L, \quad (38)$$

где « $x_{уд}$ - удельное сопротивление ВЛ, Ом/км;

L - суммарная длина ВЛ, км» [14].

Значит:

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

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

«Активное сопротивление трансформатора ГПП-110/10 кВ марки ТМН-4000/110» [14]:

$$R_{m.n} = \frac{\Delta P_{\kappa} \cdot 10^{-3} \cdot U_{\bar{o}}^2}{S_{ном.т.}^2}. \quad (39)$$

$$R_3 = \frac{33,5 \cdot 10^{-3} \cdot 115^2}{4^2} = 27,7 \text{ Ом.}$$

«Индуктивное сопротивление трансформатора ГПП-110/10 кВ марки ТМН-4000/110» [14]:

$$X_{m.n} = \frac{U_{\kappa.ср.\%} \cdot U_{\bar{o}}^2}{100 \cdot S_{ном.т.}^2}. \quad (40)$$

$$X_3 = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 4^2} = 86,8 \text{ Ом.}$$

Аналогично для силового трансформатора ТП-10/0,4 кВ марки ТМ-1600/10 участка месторождения при приведении к базисному напряжению 115 кВ:

$$R_4 = \frac{12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 115^2}{1,6^2} = 64,6 \text{ Ом.}$$

$$X_4 = \frac{7,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 1,6^2} = 387,5 \text{ Ом.}$$

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

$$X_{\Sigma 2} = X_c + X_2, \text{ Ом,} \quad (41)$$

$$R_{\Sigma 2} = R_2, \text{ Ом,} \quad (42)$$

$$Z_{\Sigma 2} = \sqrt{R_{\Sigma 2}^2 + X_{\Sigma 2}^2}, \quad (43)$$

$$X_{\Sigma 2} = 44,3 + 7,78 = 52,08 \text{ Ом,}$$

$$R_{\Sigma 2} = 7,47 \text{ Ом.}$$

$$Z_{\Sigma 2} = \sqrt{7,47^2 + 52,08^2} = 52,61 \text{ Ом.}$$

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

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}}, \text{ А.} \quad (44)$$

«Ток трёхфазного КЗ точке К2» [14]:

$$I_{\kappa 2}^{(3)} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 52,61} = 1,26 \text{ кА}.$$

«Ударный ток короткого замыкания» [14]:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{\text{уд}} \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \text{ кА}, \quad (45)$$

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

«Ударный коэффициент» [14]:

$$\kappa_{\text{уд}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3}{X_{\Sigma}/R_{\Sigma}}}. \quad (46)$$

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

$$\begin{aligned} \kappa_{\text{уд.к2}} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3}{21,25/7,47}} = 1,36, \\ i_{\text{уд.к2}} &= \sqrt{2} \cdot 1,36 \cdot 1,26 = 2,42 \text{ кА}. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R_{\Sigma 3} &= R_{\Sigma 2} + R_3, \text{ Ом}, \\ R_{\Sigma} &= 7,47 + 27,7 = 35,17 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (47)$$

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

$$\begin{aligned} X_{\Sigma 3} &= X_{\Sigma 2} + X_3, \text{ Ом}, \\ X_{\Sigma 3} &= 52,08 + 86,8 = 138,88 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (48)$$

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

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}, \quad (49)$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{35,17^2 + 138,88^2} = 143,26 \text{ Ом.}$$

«Ток трёхфазного КЗ точке К3 определяется с учётом того, что расчётная точка К3 находится не на основной ступени (умножается на квадрат K_T)» [14]:

$$I_{\kappa 3}^{(3)} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 143,26} \cdot \left(\frac{115}{10,5}\right)^2 = 5,08 \text{ кА.}$$

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

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

$$i_{\text{уд.к3}} = \sqrt{2} \cdot 1,516 \cdot 5,08 = 10,89 \text{ кА.}$$

«Суммарное активное сопротивление до точки К4» [14]:

$$R_{\Sigma 4} = R_{\Sigma 3} + R_4, \text{ Ом,} \quad (50)$$

$$R_{\Sigma 4} = 35,17 + 64,6 = 99,77 \text{ Ом.}$$

«Суммарное индуктивное сопротивление до точки К4» [14]:

$$X_{\Sigma 4} = X_{\Sigma 3} + X_4, \text{ Ом,} \quad (51)$$

$$X_{\Sigma 4} = 138,88 + 387,5 = 526,38 \text{ Ом.}$$

«Суммарное полное сопротивление до точки К4» [14]:

$$Z_{\Sigma 4} = \sqrt{R_{\Sigma 4}^2 + X_{\Sigma 4}^2}, \quad (52)$$

$$Z_{\Sigma 4} = \sqrt{99,77^2 + 526,38^2} = 535,75 \text{ Ом.}$$

«Ток трёхфазного КЗ точке К4 определяется с учётом того, что расчётная точка КЗ находится не на основной ступени (умножается на квадрат K_T всех ступеней трансформации до искомой точки К4)» [14]:

$$I_{\kappa 3}^{(3)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 535,75} \cdot \left(\frac{115}{10,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{10,5}{0,4}\right)^2 = 3,29 \text{ кА.}$$

Ударный коэффициент в сети 0,4 кВ принимается равным единице, с учётом этого, значение ударного тока в точке К4 [14]:

$$i_{\text{уд.к4}} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 3,29 = 4,65 \text{ кА.}$$

Результаты расчета токов короткого замыкания и ударных токов в основных расчётных точках схемы представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Токи короткого замыкания и ударные токи в основных расчётных точках схемы

Параметр и единица его измерения	Значение параметра в расчётной точке		
	К2 (110 кВ)	К3 (10 кВ)	К4 (0,4 кВ)
$I_{\kappa}^{(3)}$, кА	1,26	5,08	3,29
$i_{\text{уд}}$, кА	2,42	10,89	4,65

Расчёт токов КЗ проведён в максимальном режиме работы с учётом максимума положения устройства РПН трансформатора ГПП-110/10 кВ.

Установлено, что значения трёхфазных токов КЗ в системе электроснабжения месторождения будут следующими:

- на выводах 110 кВ – 1,26 кА;
- на выводах 10 кВ – 5,08 кА;
- на выводах 0,4 кВ – 3,29 кА.

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

- на выводах 110 кВ – 2,42 кА;
- на выводах 10 кВ – 10,89 кА;
- на выводах 0,4 кВ – 4,65 кА.

2.7 Выбор электрических аппаратов

Ранее в работе было показано, что в связи с дальнейшей разработкой месторождения, планируется ввести в эксплуатацию 3 новых участка, необходимых для расширения и углубления технологического процесса на медно-никелевом месторождении «Спутник» АО «Кольская ГМК». Для обеспечения питания новых потребителей была выбрана ТП-4 (10/0,4 кВ) с двумя силовыми трансформаторами марки ТМ-1600/10. Всё перечисленное оборудование нуждается в защите и коммутации, роль которых выполняют коммутационные и защитные аппараты.

Также было установлено, что в системе электроснабжения на питающей ГПП-110/10 кВ находится устаревшее оборудование, которое не отвечает требованиям надёжности и безопасности. Данный вопрос относится к силовому оборудованию (выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы). Кроме того, устаревшими являются также типы и ячейки РУ-110 кВ и РУ-10 кВ ГПП.

«На стороне 110 кВ рекомендуется установить современное комплектное элегазовое распределительное устройство (КРУЭ-110 кВ) с ячейками марки ЯТЭ 110Л/2500 У2, произведёнными ЗАО «ЗЭТО» (Великолукский завод электротехнического оборудования)» [7].

«На стороне 10 кВ ГПП-110/10 кВ предлагается вакуумное комплектное распределительное устройство с выкатным элементом КРУ 6 (10) кВ «Классика», выпускаемое АО «Таврида Электрик»» [4].

«КРУЭ-110 кВ с ячейками марки ЯТЭ 110Л/2500 У2, разработанное и произведённое ЗАО «ЗЭТО» (Великолукский завод электротехнического оборудования), представляет» [7] современное высокотехнологичное решение для энергетических объектов, обеспечивающее надёжность и безопасность эксплуатации.

Одной из ключевых особенностей данного устройства является использование элегаза в качестве изоляционной среды, что обеспечивает высокую электрическую прочность и минимизирует риск возникновения дуговых разрядов.

Такое современное решение отличается компактностью, что позволяет существенно сократить пространство, необходимое для его установки, и упрощает процесс монтажа, что особенно важно для объектов с ограниченной площадью.

Благодаря своим характеристикам, КРУЭ-110 кВ демонстрирует высокую стойкость к неблагоприятным внешним условиям, включая влажность, пыль и агрессивные среды, что делает его эффективным выбором для эксплуатации в различных климатических зонах.

Ячейки ЯТЭ 110Л/2500 У2 обладают высокой надёжностью и устойчивостью к перегрузкам, что гарантирует стабильную работу оборудования даже при интенсивной эксплуатации.

Их конструкция, представленная на рисунке 4, позволяет проводить диагностику и обслуживание с минимальными временными затратами, что способствует снижению эксплуатационных расходов [7].



Рисунок 4 – Конструкция модульных ячеек ЯТЭ 110Л/2500 У2

«Вакуумное комплектное распределительное устройство с выкатным элементом КРУ 6 (10) кВ «Классика», выпускаемое АО «Таврида Электрик», представляет собой передовое решение» [4] для распределительных сетей среднего напряжения.

Основной особенностью данного устройства является использование вакуумных выключателей, которые обеспечивают высокую надёжность коммутационных операций и устойчивость к повторяющимся коммутациям без необходимости частого технического обслуживания.

Современная вакуумная технология позволяет минимизировать образование дуги при отключении токов, что значительно повышает безопасность эксплуатации.

Устройство отличается модульной конструкцией, что упрощает его установку и обслуживание, а выкатной элемент обеспечивает удобный доступ к основным компонентам для диагностики и замены.

КРУ «Классика» разработано с учётом современных требований к компактности и оптимизации пространства, что позволяет эффективно использовать его в условиях ограниченного пространства на объектах.

Инновационные решения, заложенные в конструкцию устройства, представленного на рисунке 5, обеспечивают надёжность, долговечность и экономическую эффективность его использования в энергетических системах.



Рисунок 5 – Конструкция и размещения ячеек КРУ 6 (10) кВ «Классика»

На следующем этапе проводится выбор оборудования для компоновки ячеек КРУЭ-110 кВ и КРУ-10 кВ.

«Для КРУЭ-110 кВ выбирается модульное элегазовое оборудование, для КРУ-10 кВ – вакуумное» [8].

«Результаты выбора выключателей высокого напряжения для компоновки КРУЭ-110 кВ и КРУ-10 кВ питающей ГПП-110/10 кВ месторождения» [8], представлены в форме таблицы 9.

Таблица 9 – Результаты выбора выключателей высокого напряжения

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
Модули выключателей КРУЭ-110 кВ ячейки ЯТЭ 110Л/2500 У2 [7]	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 110 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 43,89 \text{ А.}$	$I_{ном} = 2500 \text{ А.}$
	$I_{н.т} \leq I_{отк.ном.}$	$I_{н.т} = 1,26 \text{ кА.}$	$I_{отк.ном} = 40 \text{ кА.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 2,42 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 40 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$B_K = 1,26^2 \cdot 3 = 4,76 \text{ кА}^2\text{с.}$	$I_T^2 \cdot t_T = 40^2 \cdot 3 = 4800 \text{ кА}^2\text{с.}$
Вакуумные выключатели РУ-10 кВ: ВВ/TEL-10-20/630-У2-48 [4]	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 323,7 \text{ А.}$	$I_{ном} = 630 \text{ А.}$
	$I_{н.т} \leq I_{отк.ном.}$	$I_{н.т} = 5,08 \text{ кА.}$	$I_{отк.ном} = 20 \text{ кА.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 10,89 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 20 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$B_K = 5,08^2 \cdot 3 = 77,42 \text{ кА}^2\text{с.}$	$I_T^2 \cdot t_T = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2\text{с.}$

Результаты выбора модулей разъединителей КРУЭ-110 кВ представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты выбора разъединителей для компоновки КРУЭ-110 кВ питающей ГПП-110/10 кВ месторождения

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные технические данные
Модуль разъединителя КРУЭ-110 кВ ячейки ЯТЭ 110Л/2500 У2 [7]	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 110 \text{ кВ.}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 43,89 \text{ А.}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 2,42 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 31,5 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$B_K = 1,26^2 \cdot 3 = 4,76 \text{ кА}^2\text{с.}$	$I_T^2 \cdot t_T = 80^2 \cdot 3 = 19200 \text{ кА}^2\text{с.}$

Результаты выбора трансформаторов тока для компоновки КРУЭ-110 кВ и КРУ-10 кВ питающей ГПП-110/10 кВ месторождения представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты выбора трансформаторов тока для компоновки КРУЭ-110 кВ и КРУ-10 кВ питающей ГПП-110/10 кВ месторождения

Тип ТТ	$\frac{I_n}{I_{уст}}, A$	$\frac{U_n}{U_{уст}}, кВ$	$\frac{S_n}{S_2 \Sigma}, ВА$	Класс точности	$\frac{i_y}{i_{дин.}}, кА$	$\frac{B_K}{I_T^2 \cdot t_T}, кА^2с$
Модуль трансформатора тока ячейки КРУЭ-110 кВ ЯТЭ 110Л/2500 У2 [7]	$\frac{50}{43,89}$	$\frac{110}{110}$	$\frac{300,0}{\leq 300,0}$	1,0	$\frac{2,42}{31,5}$	$\frac{4,76}{19200}$
ТОЛ-СЭЩ-10-21	$\frac{500}{323,7}$	$\frac{10}{10}$	$\frac{30,0}{\leq 30,0}$	1,0	$\frac{10,89}{20,0}$	$\frac{77,42}{2976,8}$

Результаты выбора трансформаторов напряжения для компоновки КРУЭ-110 кВ и КРУ-10 кВ питающей ГПП-110/10 кВ месторождения представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты выбора трансформаторов напряжения для компоновки КРУЭ-110 кВ и КРУ-10 кВ питающей ГПП-110/10 кВ месторождения

Тип ТН	Кол-во ТН	Мощность на один ТН, ВА	Класс точности	$\frac{U_n}{U_{уст}}, кВ$	$\frac{S_n}{S_2 \Sigma}, ВА$
Модуль трансформатора напряжения ячейки КРУЭ-110 кВ ЯТЭ 110Л/2500 У2 [7]	2	600/2	1,0	$\frac{110}{110}$	$\frac{1200,0}{\leq 1200,0}$
НАМИТ-10	2	100/2	1,0	$\frac{10}{10}$	$\frac{200,0}{\leq 200,0}$

Результаты проверки ограничителей перенапряжения для применения на питающей ГПП-110/10 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» представлены в таблице 13.

«Ограничители перенапряжения устанавливаются на вводе питающей линии 110 кВ, а также выходе линии из КРУЭ-110 кВ (к силовым трансформаторам)» [8].

Кроме того, ОПН устанавливаются в ячейках КРУ-10 кВ совместно с вакуумными выключателями.

Таблица 13 – Результаты проверки ограничителей перенапряжения для применения на питающей ГПП-110/10 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК»

Наименование и марка аппарата (модуля)	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные аппарата (модуля)
РУ-110 кВ: ОПНп-110/800/146-10-III-УХЛ1	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 110 \text{ кВ.}$	$U_{ном.} = 110 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 43,89 \text{ А.}$	$I_{ном} = 800 \text{ А}$
	$I_{н.т} \leq I_{макс.проп.}$	$I_{н.т} = 1,26 \text{ кА.}$	$I_{макс.проп.} = 146 \text{ кА}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 2,42 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 10 \text{ кА.}$
РУ-10 кВ: ОПН-КР/TEL-10/12 УХЛ2	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{ном.} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном}$	$I_{max} = 323,7 \text{ А.}$	$I_{ном} = 500 \text{ А}$
	$I_{н.т} \leq I_{макс.проп.}$	$I_{н.т} = 5,08 \text{ кА.}$	$I_{макс.проп.} = 10 \text{ кА}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 10,89 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 12 \text{ кА.}$

Далее проверяются аппараты высокого напряжения 10 кВ, установленные непосредственно на четырёх ТП-10/0,4 кВ месторождения.

Результаты выбора выключателей нагрузки для установки в РУ-10 кВ ТП-10/0,4 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты выбора выключателей нагрузки для установки в РУ-10 кВ ТП-10/0,4 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК»

Наименование и место установки аппарата	Условие выбора	Расчетные данные сети	Паспортные данные
Выключатели нагрузки ВНА СЭЩ 80-10/630-20	$U_{сети} \leq U_{ном.}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ.}$	$U_{ном.} = 10 \text{ кВ.}$
	$I_{max} \leq I_{ном.}$	$I_{max} = 323,7 \text{ А.}$	$I_{ном.} = 630 \text{ А.}$
	$i_y \leq i_{дин.}$	$i_y = 10,89 \text{ кА.}$	$i_{дин.} = 20 \text{ кА.}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T.$	$B_K = 5,08^2 \cdot 3 = 77,42 \text{ кА}^2\text{с.}$	$I_T^2 \cdot t_T = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2\text{с.}$

Выбор плавких предохранителей для установки в РУ-10 кВ ТП-10/0,4 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» в таблицу 15.

Таблица 15 – Результаты выбора плавких предохранителей для установки в РУ-10 кВ ТП-10/0,4 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник»

Наименование аппарата	Условие выбора	Расчетные данные	Паспортные данные
Предохранители марки ПКТ-103-10-160-12,5-У3	$U_{сети} \leq U_{ном}$	$U_{сети} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
	$1,1 - 1,5 I_{ном.т} \leq I_{ном.вст}$	$1,5 I_{ном.т} = 1,5 \times 92,48 = 138,7 \text{ А}$	$I_{ном.вст} = 160 \text{ А}$
	$I_{ном.п} \geq I_{ном.вст}$	$I_{ном.п} = 160 \text{ А}$	$I_{ном.вст} = 160 \text{ А}$
	$B_K \leq I_T^2 \cdot t_T$	$B_K = 5,08^2 \cdot 3 = 77,42 \text{ кА}^2\text{с}$	$I_T^2 \cdot t_T = 10^2 \cdot 3 = 300 \text{ кА}^2\text{с}$

С учётом реконструкции системы электроснабжения и подключения новых потребителей, связанных с технологическими потребностями месторождения, возникает необходимость выбора дополнительных коммутационных и защитных аппаратов напряжением до 1 кВ. При этом существующие аппараты, не требующие замены, должны быть проверены на соответствие обновлённым параметрам электрической сети.

Для защиты сети напряжением 0,38/0,22 кВ выбираются автоматические воздушные выключатели марки ВА. Такие современные выключатели оснащены различными типами расцепителей: электромагнитными, тепловыми и нулевыми, что обеспечивает комплексную защиту электрической сети. В рамках данной работы необходимо выбрать оптимальные уставки для всех типов расцепителей, учитывая их технические характеристики и параметры сети.

При выборе автоматических выключателей важно учитывать все рекомендуемые технические параметры, что позволяет гарантировать долговечность и надёжную работу оборудования в условиях эксплуатации.

Правильный выбор и настройка уставок расцепителей автоматов являются ключевыми для повышения устойчивости и стабильности системы электроснабжения, минимизации рисков аварий и обеспечения продолжительной эксплуатации оборудования.

Процесс выбора автоматов проводится в соответствии с методикой, изложенной в источнике [18].

Номинальный ток автомата [17]:

$$I_{ном.а} \geq I_{р.}, \quad (53)$$

где $I_{ном.а}$ - номинальный ток автомата, А;

$I_{р.}$ - расчётный ток сети, по которому выбирается автомат, А.

Тепловые расцепители, входящие в состав автоматов серии ВА, реагируют на перегрузки в сети, защищая оборудование от длительных воздействий повышенных токов.

Регулируемость этих расцепителей даёт возможность подстроиться под конкретные параметры потребителей, что особенно важно в условиях переменных нагрузок, характерных для промышленных предприятий.

Данный аспект способствует минимизации риска перегрева и последующих повреждений оборудования, продлевая его срок службы [13].

Номинальный ток уставки теплового расцепителя [18]:

$$I_{у.т.р} \geq [1,05 - 1,1] \cdot I_{р.}. \quad (54)$$

где $I_{у.т.р}$ - номинальный ток уставки теплового расцепителя, А.

Электромагнитные расцепители, в свою очередь, предназначены для защиты от коротких замыканий.

Возможность регулировки уставок электромагнитных расцепителей обеспечивает быстрое и «точное срабатывание при возникновении аварийных ситуаций, что предотвращает серьёзные повреждения сети и оборудования.

Благодаря этому, повышается общая устойчивость и стабильность работы системы электроснабжения» [18], что особенно важно в условиях

повышенной ответственности и критической важности непрерывности производственных процессов.

Номинальный ток уставки электромагнитного расцепителя автомата [18]:

$$I_{ном.э.р} \geq K_{то} \cdot I_p \geq I_k. \quad (55)$$

где $K_{то}$ – коэффициент тепловой отсечки автомата (указывается заводом-изготовителем), о.е.;

I_k - значение трёхфазного симметричного тока КЗ в расчётной точке сети 0,4 кВ, ближайшей к выбираемому автомату, А.

«Для автомата с регулируемым электромагнитным расцепителем» [18]:

$$I_{у.э.р} \geq K \cdot I_{у.т.р}, \quad (56)$$

где « K – кратность тока уставки расцепителя» [18].

Ранее в качестве вводного автомата на данной ТП-1 (10/0,4 кВ) месторождения был использован автомат марки ВА79Е-4000 с параметрами: $I_{ном.а} = 4000$ А, $I_{у.т.р.} = 4000$ А, $I_{у.э.р.} = 12000$ А [18].

В качестве расчётного тока для всех вводных и секционных автоматов на ТП1-ТП4 используется максимальный рабочий ток силового трансформатора марки ТМ-1600/10 на стороне 0,4 кВ.

При выборе линейных автоматов участков используется максимальный ток их нагрузки, рассчитанный в работе ранее.

По условию (53):

$$4000 А \geq 3446,15 А.$$

По условию (54):

$$4000 A \geq 1,05 \cdot 3446,15 = 3618,5 A.$$

По условию (56) при $K=3$:

$$12000 A = 3 \cdot 4000 = 12000 A.$$

Таким образом, в качестве вводного автомата ТП-10/0,4 кВ месторождения, проверочным расчётом был подтверждён автомат марки ВА79Е-4000 со следующими техническими параметрами и уставками расцепителей: $I_{ном.а} = 4000 A$, $I_{у.т.р.} = 4000 A$, $I_{у.э.р.} = 12000 A$.

Для всех остальных присоединений системы электроснабжения месторождения также выбираются автоматы серии ВА с регулируемыми расцепителями.

Автоматы серии ВА с регулируемыми тепловыми и электромагнитными расцепителями обладают рядом преимуществ, которые делают их особенно эффективными в системах электроснабжения.

Их основное преимущество заключается в высокой степени защиты, обеспечиваемой гибкими настройками уставок тепловых и электромагнитных расцепителей.

Данный факт позволяет точно регулировать параметры автоматов в зависимости от специфики нагрузки и условий эксплуатации, что значительно повышает надёжность и безопасность электрических сетей [18].

Ещё одним важным преимуществом автоматов серии ВА является их универсальность.

Возможность регулировки как тепловых, так и электромагнитных расцепителей позволяет использовать эти автоматы в широком диапазоне приложений, от бытовых до промышленных, обеспечивая надёжную защиту и эффективное управление электроэнергией.

Аналогично выбраны остальные автоматы для защиты и коммутации питающей и распределительной сети объекта исследования.

Результаты выбора автоматов СЭС месторождения приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Результаты выбора автоматов СЭС медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК»

Потребитель	I_p , А	Марка	$I_{ном.а}$, А	$I_{у.т.р.}$, А	$I_{у.э.р.}$, А
Вводные и секционные автоматы					
ТП-1	3446,15	ВА79Е-4000	4000	4000	12000
ТП-2	3446,15	ВА79Е-4000	4000	4000	12000
ТП-3	3446,15	ВА79Е-4000	4000	4000	12000
ТП-4	3446,15	ВА79Е-4000	4000	4000	12000
Линейные автоматы участков					
ТП1-участок 1	373,9	ВА 51-39	400	400	1200
ТП2-участок 2	1319,2	ВА55-43	2000	1600	4800
ТП3-участок 3	303,1	ВА 51-39	400	400	1200
ТП3-участок 4	246,1	ВА 51-39	400	400	1200
ТП3-участок 5	442,8	ВА 57-39	630	630	1890
ТП3-участок 6	666,7	ВА 55-41	1000	800	2400
ТП2-участок 7	590,0	ВА 57-39	630	630	1890
ТП4-участок 8	1128,8	ВА55-43	2000	1600	4800
ТП4-участок 9	352,5	ВА 51-39	400	400	1200
ТП4-участок 10	686,8	ВА 55-41	1000	800	2400

Таким образом, для защиты и коммутации питающей и распределительной сети 0,4 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК», выбраны следующие автоматические выключатели:

- для защиты и коммутации питающей сети 0,4 кВ в качестве вводных и секционных автоматов на всех четырёх ТП-10/0,4КВ участков месторождения, выбраны автоматы марки ВА79Е-4000 с параметрами: $I_{ном.а} = 4000$ А, $I_{у.т.р.} = 4000$ А, $I_{у.э.р.} = 12000$ А;
- для защиты и коммутации распределительной сети в качестве линейных автоматов к участкам месторождения, выбраны автоматы марки ВА55-43 (2 единицы), ВА 55-41 (2 единицы), ВА 57-39 (2 единицы), ВА 51-39 (4 единицы).

Все выбранные аппараты показаны в графической части настоящей работы.

Выводы по разделу 2.

В результате расчёта электрических нагрузок месторождения было установлено, что суммарная расчётная нагрузка ГПП-110/10 кВ системы электроснабжения данного объекта составила 5972,9 кВА (с учётом КРМ).

Также было определено, что питающая ГПП-110/10 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» расположена в непосредственной близости к рассчитанным координатам центра электрических нагрузок объекта исследования.

Такое расположение является оптимальным и позволяет значительно снизить потери электроэнергии и перетоки мощностей в питающей сети 110 кВ и распределительных сетях 10 кВ, а также экономить проводниковый материал, что положительно сказывается на всей системе электроснабжения месторождения. Следовательно, изменять расположение питающей ГПП-110/10 кВ на территории месторождения нет необходимости.

Установлено, что трансформаторы марки ТМН-4000/110 полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к их системе охлаждения по нагрузочной способности, что подтверждает их пригодность для установки на реконструируемой ГПП-110/10 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК».

Определено, что в нормальном режиме оба трансформатора питают текущие нагрузки месторождения без перегрузки. В случае аварийной ситуации, один из трансформаторов сможет полноценно обеспечить электроснабжение всех потребителей I и II категории надёжности, покрывая энергетические потребности всего месторождения (с учётом резервирования).

Проведённые исследования подтвердили, что использование в системе электроснабжения месторождения на всех четырёх двухтрансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ силовых трансформаторов марки ТМ-1600/10 является оптимальным решением.

Выбраны и подтверждены следующие сечения и марки проводников:

- для питающей воздушной линии 110 кВ – голые провода марки АААС АЕРО-Z 177 АЗФ;
- для распределительных линий 10 кВ – кабели марки АПвБПу-10 (3×35) – на линиях ко всем ТП-10/0,4 кВ, АПвБПу-10 (3×50) – на линиях к синхронным электродвигателям 10 кВ буровых установок;
- для распределительных линий 0,4 кВ: к участкам 1,2 и 5 – кабели марки АПвВГ (4×150), к участку 4 – кабели АПвВГ (4×70), к участку 3 – кабели АПвВГ (4×95), к участкам 6,9 и 10 – кабели АПвВГ (4×120), к участкам 7 и 8 – кабели АПвВГ (4×240).

Установлено, что значения трёхфазных токов КЗ в системе электроснабжения месторождения будут следующими:

- на выводах 110 кВ – 1,26 кА;
- на выводах 10 кВ – 5,08 кА;
- на выводах 0,4 кВ – 3,29 кА.

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

- на выводах 110 кВ – 2,42 кА;
- на выводах 10 кВ – 10,89 кА;
- на выводах 0,4 кВ – 4,65 кА.

Для модернизации питающей ГПП-110/10 кВ выбраны современные ячейки РУ, которое укомплектовано современным надёжным оборудованием:

- на стороне 110 кВ ГПП-110/10 кВ выбрано КРУЭ-110 кВ с ячейками марки ЯТЭ 110Л/2500 У2, для которого выбрано и проверено модульное оборудование (выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы, а также ОПНп-110/800/146-10-III-УХЛ1 на линиях в РУ-110 кВ (вне КРУЭ-110 кВ));
- на стороне 10 кВ ГПП-110/10 кВ выбрано КРУ 6 (10) кВ «Классика», которое предложено укомплектовать вакуумными выключателями ВВ/TEL-10-20/630-У2-48, трансформаторами тока ТОЛ-СЭЩ-10-21,

трансформаторами напряжения НАМИТ-10, ограничителями перенапряжений ОПН-КР/TEL-10/12 УХЛ2;

- в РУ-10 кВ всех ТП-10/0,4 кВ предложено установить выключатели нагрузки ВНА СЭЩ 80-10/630-20 и предохранители марки ПКТ-103-10-160-12,5-У3.

Для защиты и коммутации питающей и распределительной сети 0,4 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК», выбраны следующие автоматические выключатели:

- для защиты и коммутации питающей сети 0,4 кВ в качестве вводных и секционных автоматов на всех четырёх ТП-10/0,4КВ участков месторождения, выбраны автоматы марки ВА79Е-4000 с параметрами: $I_{ном.а} = 4000$ А, $I_{у.т.р.} = 4000$ А, $I_{у.э.р.} = 12000$ А;
- для защиты и коммутации распределительной сети в качестве линейных автоматов к участкам месторождения, выбраны автоматы марки ВА55-43 (2 единицы), ВА 55-41 (2 единицы), ВА 57-39 (2 единицы), ВА 51-39 (4 единицы).

3 Реконструкция схемы релейной защиты системы электроснабжения месторождения

Проводится реконструкция схемы релейной защиты системы электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК».

Определено, что решение третьей основной задачи работы заключается в модернизации системы РЗА на ГПП месторождения.

Для решения данной задачи предлагается провести замену оборудования и схемных решений РЗА на современные перспективные решения.

В работе предлагается применить следующие современные устройства РЗА «Сириус» АО «РАДИУС Автоматика»:

- «для защиты силовых трансформаторов ГПП-110/10 кВ месторождения – устройство микропроцессорной защиты «Сириус-Т-БПТ»» [17];
- «для защиты линий – цифровое устройство РЗА «Орион-2-Л»» [12].

«Микропроцессорное устройство защиты «Сириус-Т-БПТ», представленное на рисунке 6, представляет собой современную систему для обеспечения надёжной защиты электрических сетей» [17].

Основной его особенностью является использование передовых микропроцессорных технологий, что позволяет осуществлять высокоточные измерения и анализ параметров электрической сети в реальном времени.

Высокая скорость реакции устройства обеспечивает своевременное обнаружение аварийных режимов и предотвращение возможных повреждений оборудования. «Сириус-Т-БПТ» обладает гибкими настройками, что делает его универсальным решением для различных типов сетей и объектов.

Благодаря встроенному алгоритму самодиагностики, устройство может автоматически выявлять неисправности в своей работе, что способствует повышению общей надёжности системы.

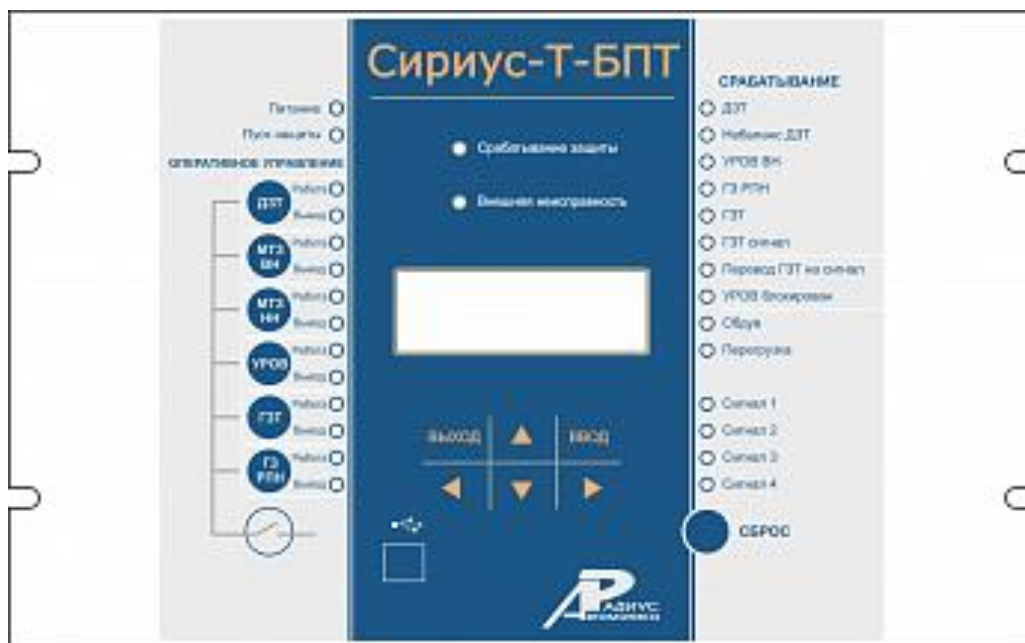


Рисунок 6 – Устройство микропроцессорной защиты «Сириус-Т-БПТ»

Интерфейс управления и возможность интеграции с «автоматизированными системами управления энергоснабжением делают эксплуатацию устройства более удобной и эффективной.

Преимущества «Сириус-Т-БПТ» включают его компактные размеры, что упрощает установку, а также низкое энергопотребление, что снижает затраты на эксплуатацию.

Устройство обладает высокой устойчивостью к внешним воздействиям, таким как электромагнитные помехи, что обеспечивает его стабильную работу в сложных условиях эксплуатации» [17].

Цифровое устройство релейной защиты и автоматики «Орион-2-Л» представляет собой инновационное решение для обеспечения надёжности и безопасности работы электрических сетей. Одной из его ключевых особенностей является использование цифровых технологий, что позволяет точно контролировать параметры сети и своевременно реагировать на отклонения от нормальных режимов. Высокая скорость обработки данных и анализа аварийных ситуаций делает «Орион-2-Л» эффективным средством защиты оборудования от повреждений.

Цифровое устройство РЗиА «Орион-2-Л», рекомендуемое для защиты линий в системе электроснабжения месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК», представлено на рисунке 7.



Рисунок 7 – Цифровое устройство РЗиА «Орион-2-Л»

Устройство отличается высокой адаптивностью и возможностью гибкой настройки под различные схемы электроснабжения, что делает его универсальным для применения на энергетических объектах различного масштаба. Интеграция с системами диспетчерского управления и контроля упрощает процесс мониторинга и управления состоянием сети. Наличие встроенных функций самодиагностики и автоматического восстановления работы системы в случае сбоев повышает общую надёжность эксплуатации.

Преимущества устройства включают его компактные размеры, что облегчает монтаж, и низкие требования к обслуживанию благодаря высокой долговечности компонентов. Устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям и возможность работы в сложных условиях делают «Орион-2-Л» эффективным выбором для эксплуатации на объектах с повышенными требованиями к надёжности электрических систем.

Выводы по разделу 3.

Проведено практическое решение третьей основной задачи работы, которая заключается в модернизации системы РЗА на ГПП-110/10 кВ месторождения.

Для решения данной задачи проведена замена устаревшего оборудования и схемных решений РЗА на современные перспективные решения.

В работе предложено применить следующие современные устройства РЗА «Сириус» АО «РАДИУС Автоматика»:

- для защиты силовых трансформаторов ГПП-110/10 кВ месторождения – устройство микропроцессорной защиты «Сириус-Т-БПТ»;
- для защиты линий – цифровое устройство РЗА «Орион-2-Л».

Установлено, что применение современных цифровых устройств релейной защиты и автоматики, таких как «Сириус-Т-БПТ» и «Орион-2-Л», в системе электроснабжения значительно повышает её надёжность, безопасность и эффективность. Благодаря использованию передовых микропроцессорных технологий и цифрового анализа параметров сети, данные устройства позволяют не только своевременно реагировать на изменения в работе сети, но и проводить её глубокую диагностику, что способствует оптимизации работы всей системы.

Заключение

В работе осуществлена разработка и техническое обоснование мероприятий по реконструкции системы электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» в связи с планируемым подключением новой нагрузки новых потребителей. Кроме того, параллельно проведена модернизация устаревшего и неэффективного оборудования силовой электрической части СЭС месторождения, а также её вторичных цепей.

Решена первая основная задача, которая заключалась в определении целей и задач реконструкции медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК». В результате проведения данного анализа установлено следующее:

- определено, что питание медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» - централизованное, оно «осуществляется от питающей ГПП-110/10 кВ месторождения, на которой установлены два силовые трансформатора марки ТМН - 4000/110» [6] паспортной мощностью 4000 кВА каждый. Таким образом, максимально возможная номинальная нагрузка месторождения составляет 8000 кВА;
- показано, что в связи с дальнейшей разработкой месторождения, планируется ввести в эксплуатацию 3 новых участка, необходимых для расширения и углубления технологического процесса на медно-никелевом месторождении «Спутник» АО «Кольская ГМК»;
- установлено, что в системе электроснабжения на питающей ГПП-110/10 кВ находится устаревшее оборудование, которое не отвечает требованиям надёжности и безопасности. Данный вопрос относится к силовому оборудованию (выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы), а также к оборудованию системы

РЗиА. Кроме того, устаревшими являются также типы и ячейки РУ-110 кВ и РУ-10 кВ ГПП.

Для решения поставленных задач и устранения выявленных недостатков в системе электроснабжения медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК», предлагается следующее:

- в связи с вводом новых участков в эксплуатацию, предполагается изменение в схеме электрических соединений СЭС месторождения путём её реконструкции. При этом предполагается для питания новых потребителей ТП-10/0,4 кВ применить два силовых трансформатора запитав их от разных секций сборных шин напряжением 10 кВ ГПП месторождения и создав необходимые и достаточные условия резервирования. Таким образом, в реконструируемой схеме объекта будут соблюдены условия надёжности для питания новых потребителей 1 категории надёжности;
- предлагается провести замену устаревших и «изношенных» ячеек и типов РУ-110 кВ и РУ-10 кВ питающей ГПП-110/10 кВ на новые типы и модификации. Также предлагается провести замену кабельных линий 10 кВ и 0,4 кВ [6] и силового оборудования и оборудования РЗиА, установленного в них.

Таким образом будет решена вторая основная задача. Определено, что решение третьей основной задачи работы заключается в модернизации системы РЗиА на ГПП месторождения.

В результате расчёта электрических нагрузок месторождения было установлено, что суммарная расчётная нагрузка ГПП-110/10 кВ системы электроснабжения данного объекта составила 5972,9 кВА (с учётом КРМ).

Также было определено, что питающая ГПП-110/10 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» расположена в непосредственной близости к рассчитанным координатам центра электрических нагрузок объекта исследования.

Такое расположение является оптимальным и позволяет значительно снизить потери электроэнергии и перетоки мощностей в питающей сети 110 кВ и распределительных сетях 10 кВ, а также экономить проводниковый материал, что положительно сказывается на всей системе электроснабжения месторождения. Следовательно, изменять расположение питающей ГПП-110/10 кВ на территории месторождения нет необходимости.

Установлено, что трансформаторы марки ТМН-4000/110 полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к их системе охлаждения по нагрузочной способности, что подтверждает их пригодность для установки на реконструируемой ГПП-110/10 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК». Определено, что в нормальном режиме оба трансформатора питают текущие нагрузки месторождения без перегрузки. В случае аварийной ситуации, один из трансформаторов сможет полноценно обеспечить электроснабжение всех потребителей I и II категории надёжности, покрывая энергетические потребности всего месторождения (с учётом резервирования). Проведённые исследования подтвердили, что использование в системе электроснабжения месторождения на всех четырёх двухтрансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ силовых трансформаторов марки ТМ-1600/10 является оптимальным решением.

Выбраны и подтверждены следующие сечения и марки проводников:

- для питающей воздушной линии 110 кВ – голые провода марки АААС АЕРО-Z 177 АЗФ;
- для распределительных линий 10 кВ – кабели марки АПвБПу-10 (3×35) – на линиях ко всем ТП-10/0,4 кВ, АПвБПу-10 (3×50) – на линиях к синхронным электродвигателям 10 кВ буровых установок;
- для распределительных линий 0,4 кВ: к участкам 1,2 и 5 – кабели марки АПвВГ (4×150), к участку 4 – кабели АПвВГ (4×70), к участку 3 – кабели АПвВГ (4×95), к участкам 6,9 и 10 – кабели АПвВГ (4×120), к участкам 7 и 8 – кабели АПвВГ (4×240).

Установлено, что значения трёхфазных токов КЗ в системе электроснабжения месторождения будут следующими:

- на выводах 110 кВ – 1,26 кА;
- на выводах 10 кВ – 5,08 кА;
- на выводах 0,4 кВ – 3,29 кА.

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

- на выводах 110 кВ – 2,42 кА;
- на выводах 10 кВ – 10,89 кА;
- на выводах 0,4 кВ – 4,65 кА.

Для модернизации питающей ГПП-110/10 кВ выбраны современные ячейки РУ, которое укомплектовано современным надёжным оборудованием:

- на стороне 110 кВ ГПП-110/10 кВ выбрано КРУЭ-110 кВ с ячейками марки ЯТЭ 110Л/2500 У2, для которого выбрано и проверено модульное оборудование (выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы, а также ОПНп-110/800/146-10-III-УХЛ1 на линиях в РУ-110 кВ (вне КРУЭ-110 кВ));
- на стороне 10 кВ ГПП-110/10 кВ выбрано КРУ 6 (10) кВ «Классика», которое предложено укомплектовать вакуумными выключателями ВВ/TEL-10-20/630-У2-48, трансформаторами тока ТОЛ-СЭЩ-10-21, трансформаторами напряжения НАМИТ-10, ограничителями перенапряжений ОПН-КР/TEL-10/12 УХЛ2;
- в РУ-10 кВ всех ТП-10/0,4 кВ предложено установить выключатели нагрузки ВНА СЭЩ 80-10/630-20 и предохранители марки ПКТ-103-10-160-12,5-У3.

Для защиты и коммутации питающей и распределительной сети 0,4 кВ медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК», выбраны следующие автоматические выключатели:

- для защиты и коммутации питающей сети 0,4 кВ в качестве вводных и секционных автоматов на всех четырёх ТП-10/0,4кВ участков

месторождения, выбраны автоматы марки ВА79Е-4000 с параметрами: $I_{ном.а} = 4000 \text{ А}$, $I_{у.т.р.} = 4000 \text{ А}$, $I_{у.э.р.} = 12000 \text{ А}$;

- для защиты и коммутации распределительной сети в качестве линейных автоматов к участкам месторождения, выбраны автоматы марки ВА55-43 (2 единицы), ВА 55-41 (2 единицы), ВА 57-39 (2 единицы), ВА 51-39 (4 единицы).

Проведено практическое решение третьей основной задачи работы, которая заключается в модернизации системы РЗиА месторождения. Для решения данной задачи проведена замена устаревшего оборудования и схемных решений РЗиА на современные перспективные решения. В работе предложено применить следующие современные устройства РЗиА «Сириус» АО «РАДИУС Автоматика»: для защиты силовых трансформаторов ГПП-110/10 кВ месторождения – устройство микропроцессорной защиты «Сириус-Т-БПТ», для защиты линий – цифровое устройство РЗиА «Орион-2-Л».

Установлено, что применение современных цифровых устройств релейной защиты и автоматики, таких как «Сириус-Т-БПТ» и «Орион-2-Л», в системе электроснабжения значительно повышает её надёжность, безопасность и эффективность. Благодаря использованию передовых микропроцессорных технологий и цифрового анализа параметров сети, данные устройства позволяют не только своевременно реагировать на изменения в работе сети, но и проводить её глубокую диагностику, что способствует оптимизации работы всей системы.

Таким образом, в результате проведения исследований показано, что проведённые изменения в схеме электрических соединений медно-никелевого месторождения «Спутник» АО «Кольская ГМК» позволят значительно повысить надёжность, экономичность и безопасность СЭС данного месторождения.

Также улучшены показатели бесперебойности передачи электроэнергии, что критически важно для стабильной работы производственных процессов на месторождении.

Список используемых источников

1. 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: 12.09.2024).
2. Кабель АПвБПу. [Электронный ресурс]: URL: <https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-izolyacziej-iz-sshitogo-polietilena-10kv/apvbpu-10kv/> (дата обращения: 12.09.2024).
3. Кабель АПвВГ [Электронный ресурс]: URL: [https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-izolyacziej-iz-silanolnosshitogo-polietilena-\(1kv\)/apvvvg/](https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-izolyacziej-iz-silanolnosshitogo-polietilena-(1kv)/apvvvg/) (дата обращения: 12.09.2024).
4. Камеры КРУ 6(10) кВ «Классика». [Электронный ресурс]: URL: <https://tavrida.ru/ter/solutions/SEC/kru-klassika/> (дата обращения: 12.09.2024).
5. Киреева Э.В. Электроснабжение и электрооборудование организаций и учреждений. М.: Кнорус, 2019. 233 с.
6. Кольская горно-металлургическая компания. Кольский Никель Кн51/ [Электронный ресурс]: URL: <https://kn51.ru/> (дата обращения: 12.09.2024).
7. Комплектное распределительное устройство КРУЭ–110 кВ. [Электронный ресурс]: URL: <https://zeto.ru/krue-110/> (дата обращения: 12.09.2024).
8. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Академия, 2021. 400 с.
9. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.
10. Немировский А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций. М.: Инфра-Инженерия, 2020. 174 с.
11. Норникель. Кольская ГМК [Электронный ресурс]: URL: <https://www.kolagmk.ru/company/production/> (дата обращения: 12.09.2024).
12. Орион-2-Л [Электронный ресурс]: URL:

<https://www.rza.ru/catalog/arkhiv-urza/orion-2-l.php> (дата обращения: 12.09.2024).

13. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. М.: Моркнига, 2024. 584 с.

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: 12.09.2024).

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

16. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий. Учебное пособие. М.: НИЦ Инфра-М, 2024. 405 с.

17. Сириус-Т-БПТ [Электронный ресурс]: URL: <https://www.rza.ru/catalog/ustroystva-zashchity-transformatorov-6-220-kv-s-tokovoy-podpitkoy-/sirius-t-bpt.php> (дата обращения: 12.09.2024).

18. Фризен В.Э., Назаров С.Л. Расчет и выбор электрооборудования низковольтных распределительных сетей промышленных предприятий. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2021. 194 с.

19. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях. М.: Форум, 2019. 495 с.

20. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р. Москва: Министерство энергетики, 2020. 142 с.