

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 группы компрессорных цехов компрессорной станции «КС–
Перегребненская»

Обучающийся

И.Г. Ахтямов
(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., И.В. Горохов
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Эффективное и бесперебойное функционирование компрессорной станции напрямую зависит от качественного и надёжного электроснабжения. Электроэнергия необходима для работы газоперекачивающих агрегатов, систем автоматизации, освещения, систем управления и защиты. В связи с этим разработка оптимальной схемы электроснабжения является одной из важнейших задач при проектировании и эксплуатации станции.

Целью данной выпускной квалификационной работы является проектирование системы электроснабжения компрессорной станции «КС–Перегребненская» с учётом современных требований надёжности, энергоэффективности и электробезопасности.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

- рассмотреть краткую технологическую характеристику;
- рассчитать электрические нагрузки;
- выбрать силовые трансформаторы и компенсирующие устройства;
- рассчитать питающие линии;
- выбрать высоковольтное и низковольтное оборудование;
- рассчитать релейную защиту высоковольтного двигателя;
- рассчитать электрическое освещение.

ВКР представляет собой пояснительную записку, состоящую из введения, семи разделов основной части, заключения, списка используемой литературы и источников и графической части на 6 листах формата А1. Пояснительная записка выполнена на 74 листах формата А4, содержит 28 таблиц и 10 рисунков.

Содержание

Введение.....	4
1 Краткая технологическая характеристика.....	6
2 Расчет электрических нагрузок	9
3 Выбор силовых трансформаторов и компенсирующих устройств.....	13
3.1 Компенсация реактивной мощности	13
3.2 Выбор трансформаторов.....	14
4 Расчет питающей линии	22
4.1 Выбор кабельной линии.....	22
4.2 Расчет токов короткого замыкания с высокой и низкой сторон	26
4.3 Расчет токов короткого замыкания с высокой стороны	29
4.4 Расчет токов короткого замыкания с низкой стороны	35
5 Выбор высоковольтного и низковольтного оборудования.....	41
5.1 Выбор высоковольтного оборудования	41
5.2 Выбор низковольтного оборудования	51
6 Релейная защита высоковольтного двигателя	61
7 Расчет электрического освещения.....	63
Заключение	70
Список используемой литературы и используемых источников.....	72

Введение

Компрессорные станции (КС) играют ключевую роль в обеспечении надёжной транспортировки природного газа по магистральным газопроводам. Они обеспечивают поддержание необходимого давления, требуемого для эффективного перемещения газа на большие расстояния. Одним из таких стратегически важных объектов является компрессорная станция «КС–Перегибненская», входящая в состав Перегибненского линейного производственного управления магистральных газопроводов (ЛПУМГ), эксплуатируемого ООО «Газпром трансгаз Югорск».

Эффективное и бесперебойное функционирование компрессорной станции напрямую зависит от качественного и надёжного электроснабжения. Электроэнергия необходима для работы газоперекачивающих агрегатов, систем автоматизации, освещения, систем управления и защиты. В связи с этим разработка оптимальной схемы электроснабжения является одной из важнейших задач при проектировании и эксплуатации станции.

Целью данной выпускной квалификационной работы (ВКР) является проектирование системы электроснабжения компрессорной станции «КС–Перегибненская» с учётом современных требований надёжности, энергоэффективности и электробезопасности.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

- рассмотреть краткую технологическую характеристику;
- рассчитать электрические нагрузки;
- выбрать силовые трансформаторы и компенсирующие устройства;
- рассчитать питающие линии;
- выбрать высоковольтное и низковольтное оборудование;
- рассчитать релейную защиту высоковольтного двигателя;
- рассчитать электрическое освещение.

Проект электроснабжения компрессорной станции «КС–Перегабененская» разработан с учётом действующих нормативных документов, таких как Правила устройства электроустановок (ПУЭ), ГОСТ, СНиП, СТО Газпром и других стандартов, регламентирующих требования к электроэнергетическим объектам.

Практическая значимость данной работы заключается в возможности использования предложенных решений при реконструкции и модернизации системы электроснабжения компрессорной станции, что позволит повысить её надёжность, безопасность и энергоэффективность.

Важным аспектом работы является оценка влияния электроснабжения КС «Перегабененская» на общую энергосистему региона. В связи с высокой потребляемой мощностью объекта особое внимание уделяется оптимизации режимов работы сети, управлению нагрузками и возможностям резервирования электроэнергии.

Таким образом, данная выпускная квалификационная работа представляет собой комплексный проект по проектированию системы электроснабжения компрессорной станции «КС–Перегабененская». Полученные результаты могут быть использованы как в рамках дальнейшего проектирования и эксплуатации станции, так и при разработке аналогичных проектов для других объектов газотранспортной инфраструктуры.

1 Краткая технологическая характеристика

Компрессорная станция (КС) «Перегребненская» расположена в селе Перегребное Октябрьского района Ханты–Мансийского автономного округа – Югры. Она является частью Перегребненского линейного производственного управления магистральных газопроводов (ЛПУ МГ) и эксплуатируется ООО «Газпром трансгаз Югорск».

Основной задачей КС «Перегребненская» является обеспечение необходимого давления и непрерывной транспортировки природного газа по магистральным газопроводам. Для этого станция оснащена современным оборудованием:

- газоперекачивающие агрегаты (ГПА) – турбокомпрессоры, установленной мощностью 1600 кВт в количестве 4 штук;
- вакуумный насос, установленной мощностью 55 кВт в количестве 2 штук;
- дренажный насос, установленной мощностью 11 кВт в количестве 2 штук;
- электрическая задвижка, установленной мощностью 7 кВт в количестве 12 штук;
- электрическая задвижка, установленной мощностью 4,5 кВт в количестве 24 штук;
- турбодетандер установленной мощностью 90 кВт в количестве 8 штук;
- кран балка, установленной мощностью 4,5 кВт в количестве 2 штук;
- сварочный аппарат, установленной мощностью 4,5 кВт;
- вытяжной вентилятор, установленной мощностью 4,5 кВт в количестве 5 штук.

Для обеспечения экологической безопасности и соблюдения природоохранных норм на территории КС «Перегребненская» функционирует полигон твёрдых бытовых отходов (ТБО). Этот объект предназначен для хранения различных видов отходов, включая мусор от бытовых помещений,

строительные отходы и отработанные фильтры. Эксплуатацию полигона осуществляет Перегребненское ЛПУ МГ ООО «Газпром трансгаз Югорск».

Кроме того, в промзоне Перегребненской КС расположена автомобильная газонаполнительная компрессорная станция (АГНКС), предоставляющая услуги по заправке транспортных средств сжатимированным природным газом.

Таким образом, КС «Перегребненская» является ключевым объектом в системе транспортировки природного газа, обеспечивая надёжную работу газотранспортной инфраструктуры в регионе и способствуя развитию энергетического комплекса России.

Технологическая бригада компрессорной станции занимается выпуском сжатого воздуха, осушенного воздуха, азота, технического и технологического кислорода. Механическая служба осуществляет подготовительные работы к ремонту оборудования, ревизию и ремонт.

Электротехническая служба компрессорной станции также осуществляет подготовительные работы к ремонту, электрооборудования, ревизию и ремонт, и своевременные оперативные включения и отключения оборудования.

Основные задачи:

- бесперебойное обеспечение подразделений объединения сжатым воздухом и продуктами разделения воздуха;
- правильная эксплуатация и своевременное проведение текущих и планово–предупредительных ремонтов оборудования;
- постоянное ведение, совершенствование и внедрение передовых методов работы путём анализа учёта и отчётности на основе механизации автоматизации и управления инженерного труда.

План расположения электроприемников компрессорной станции «Перегребненская» приведен на рисунке 1.

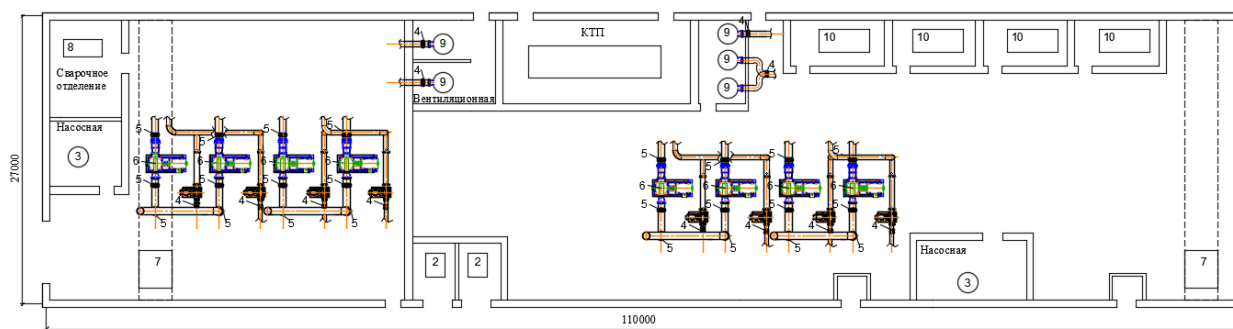


Рисунок 1 – План расположения электроприемников электроприемников компрессорной станции «Перегребненская»

Выводы по разделу один.

В первом разделе ВКР представлена краткая технологическая характеристика объекта, отражающая его основные функциональные особенности, состав оборудования и принципы работы. Компрессорная станция «КС–Перегребненская» является важным элементом газотранспортной инфраструктуры и предназначена для обеспечения стабильной и бесперебойной перекачки природного газа.

Анализ технологического процесса показал, что станция оснащена современными газоперекачивающими агрегатами (ГПА), системами автоматизированного управления, электроснабжения, защиты и мониторинга. Эффективность её работы зависит от надёжности функционирования всех технических систем, а также от соблюдения нормативных требований по эксплуатации оборудования.

Представленная характеристика позволяет сформировать базовое понимание о структуре и техническом оснащении объекта, что является основой для дальнейшего проектирования, оптимизации и модернизации его систем. Полученные сведения также служат отправной точкой для последующих расчётов в рамках разработки проекта электроснабжения компрессорной станции.

2 Расчет электрических нагрузок

Расчёт электрических нагрузок является одним из ключевых этапов проектирования системы электроснабжения. От точности данного расчёта зависит выбор электротехнического оборудования, схем питания, кабельных линий, а также обеспечение надёжности и энергоэффективности работы всей энергосистемы объекта.

В данном разделе рассматривается методика определения электрических нагрузок компрессорной станции «КС–Перегребненская». Станция включает в себя большое количество потребителей электроэнергии, среди которых основное место занимают газоперекачивающие агрегаты (ГПА), трансформаторные подстанции, системы автоматизации, вентиляции, освещения и вспомогательное оборудование.

Целью расчёта является определение суммарной мощности, необходимой для работы всех потребителей, а также анализ режимов их работы. При расчете электрических нагрузок определяются максимальные расчетные мощности – активные, реактивные, полные, коэффициенты мощности – общие и для каждого двигателя.

Рассмотрим пример расчета для одной группы приемников.

Электроосвещение, $P_{\text{ном}} = 100$ кВт:

Расчетная активная мощность [2]:

$$P_{\text{расч}} = \sum P_{\text{ном}} \cdot K_c, \quad (1)$$
$$P_{\text{расч}} = 100 \cdot 1 = 100 \text{ кВт.}$$

Расчетная реактивная мощность [2]:

$$Q_{\text{расч}} = P_{\text{расч}} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$
$$Q_{\text{расч}} = 100 \cdot 0,33 = 33 \text{ кВар.}$$

Остальные расчеты аналогичны, результаты расчетов заносятся в таблицу 1.

Таблица 1 – Расчет нагрузок

Наименование узлов питания и группы ЭП	Количество	Установленная мощность при ПВ=100%		K_c	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	Максимальная расчетная мощность	
		Одного ЭП, $P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	Общая расчетная, $\sum P_{\text{ном}}, \text{кВт}$				$P_{\text{расч}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{расч}}, \text{кВар}$
Электроосвещение	1	100	100	1	0,95	0,33	100	33
Вакуумный насос	2	55	110	1	0,8	0,75	110	82,5
Дренажный насос	2	11	22	1	0,8	0,75	22	16,5
Электрическая задвижка	12	7	84	0,8	0,75	0,66	67,2	44,35
Электрическая задвижка	24	4,5	108	0,8	0,75	0,66	86,4	57,02
Турбодетандер	8	90	720	0,8	0,75	0,66	576	380,16
Кран–балка	2	4,5	9	0,2	0,6	1,3	1,8	2,34
Сварочный аппарат	1	4,5	4,5	0,2	0,4	2,3	0,9	2,07
Вытяжной вентилятор	5	4,5	22,5	0,7	0,8	0,75	15,75	11,81
Итого по 0,4 кВ	69	283,2	1206,4	0,73	0,84	0,54	1001,17	643,69
Газоперекачивающие агрегаты	4	1600	6400	0,6	0,9	-0,48	3840	-1843,2
Итого по 10 кВ	4	1600	6400	0,6	0,9	-0,48	3840	-1843,2
Итого	73	1883,2	7606,4	0,665	0,97	-0,25	4841,17	-1199,51

Определяется полную мощность по 0,4 кВ [2]:

$$\sum S_{\text{расч}_{0,4}} = \sqrt{\sum P_{\text{расч}_{0,4}}^2 + \sum Q_{\text{расч}_{0,4}}^2}, \quad (3)$$

$$\sum S_{\text{расч}_{0,4}} = \sqrt{1001,17^2 + 643,69^2} = 1190,24 \text{ кВА.}$$

Определяется полную мощность по 10 кВ:

$$\sum S_{\text{расч}_{10}} = \sqrt{\sum P_{\text{расч}_{10}}^2 + \sum Q_{\text{расч}_{10}}^2}, \quad (4)$$

$$\sum S_{\text{расч}_{10}} = \sqrt{3840^2 + (-1843,2)^2} = 4259,5 \text{ кВА.}$$

Определяется коэффициент мощности по 0,4 кВ:

$$\cos\varphi_{0,4} = \frac{\sum P_{\text{расч}_{0,4}}}{\sum S_{\text{расч}_{0,4}}}, \quad (5)$$
$$\cos\varphi_{0,4} = \frac{1001,17}{1190,24} = 0,84.$$

Определяется коэффициент мощности по 10 кВ:

$$\cos\varphi_{10} = \frac{\sum P_{\text{расч}_{10}}}{\sum S_{\text{расч}_{10}}}, \quad (6)$$
$$\cos\varphi_{10} = \frac{3840}{4259,5} = 0,9.$$

Определяется суммарную полную мощность:

$$\sum S_{\text{расч}} = \sqrt{(P_{\text{расч}_{0,4}} + P_{\text{расч}_{10}})^2 + (Q_{\text{расч}_{0,4}} + Q_{\text{расч}_{10}})^2}, \quad (7)$$
$$\sum S_{\text{расч}} = \sqrt{(1001,17 + 3840)^2 + (643,69 - 1843,2)^2} = 4987,6 \text{ кВА}.$$

Определяется суммарный коэффициент мощности:

$$\cos\varphi_{\Sigma} = \frac{\sum P_{\text{расч}}}{\sum S_{\text{расч}}} \quad (8)$$
$$\cos\varphi_{\Sigma} = \frac{4841,17}{4987,6} = 0,97.$$

Выводы по разделу два.

Во втором разделе ВКР проведен расчет электрических нагрузок. В результате проведенного расчёта электрических нагрузок определены основные параметры энергопотребления компрессорной станции «КС–

Перегребненская», что позволит обоснованно выбрать оборудование для системы электроснабжения.

Анализ нагрузок показал, что основными потребителями электроэнергии являются газоперекачивающие агрегаты (ГПА). Определены расчётные мощности и коэффициенты нагрузки, что позволит разработать оптимальные схемы питания и распределения электроэнергии.

Результаты расчёта также используются при выборе кабельных линий, коммутационного оборудования, защиты и резервирования, что способствует обеспечению надёжности, энергоэффективности и безопасности системы электроснабжения.

Таким образом, выполненный расчёт является основой для дальнейшего проектирования электроснабжения компрессорной станции и позволяет сформировать технические решения, соответствующие современным нормативным требованиям и стандартам.

3 Выбор силовых трансформаторов и компенсирующих устройств

3.1 Компенсация реактивной мощности

Компенсация реактивной мощности или повышение коэффициента мощности электроустановок имеет большое значение и является частью общей проблемы повышения КПД системы электроснабжения и улучшения качества отпускаемой электроэнергии (повышения $\cos \varphi$ на 0,01 дает экономию электроэнергии в 500 млн. кВт·ч в год). Потребители электроэнергии, например: асинхронные двигатели, для нормальной работы нуждаются как в активной, так и в реактивной мощности, которые вырабатываются синхронными генераторами и передаются по системе электроснабжения трехфазного переменного тока от электростанции к потребителям. В процессе передачи потребителям активной и реактивной мощности в проводниках происходит потери электроэнергии [8].

Следовательно, потери активной мощности обратно пропорциональны $\cos \varphi$, что подтверждает значение величины $\cos \varphi$ при передаче электроэнергии, т.е. при снижении передаваемой реактивной мощности, потери активной мощности сети снижаются, что достигается применением компенсирующих устройств.

Реактивная мощность распределяется между отдельными видами электроприемников следующим образом: 60–70% приходится на асинхронные двигатели, 20–25% на трансформаторы, около 10% на воздушные сети и другие электроприемники (реакторы, индуктивные приборы и т.д.).

С учетом приказа Минэнерго №380 от 23.06.2017 г. «максимальные значения коэффициента реактивной мощности, потребляемой в часы больших суточных нагрузок электрической сети, для энергопринимающих устройств потребителей в точках поставки с уровнем напряжения ниже 220 кВ» (к которым относится рассматриваемая компрессорная станция «Перегребненская»), при уровне напряжения в точке поставки потребителя

электрической энергии равном 10 кВ составляет $tg\varphi_{\text{макс}} = 0,4$ [10]. Для определения необходимости установки устройств компенсации реактивной мощности необходимо рассчитать коэффициент реактивной мощности компрессорной станции «Перегребненская».

$$tg\varphi_p = \frac{Q_{\text{расч}_{0,4}} + Q_{\text{расч}_{10}}}{P_{\text{расч}_{0,4}} + P_{\text{расч}_{10}}}; \quad (9)$$

$$tg\varphi_p = \frac{643,69 - 1843,2}{1001,17 + 3840} = -0,25 < tg\varphi_{\text{макс}} = 0,4,$$

следовательно компенсация реактивной мощности не требуется.

Знак «минус» в значении расчетного коэффициента мощности говорит о том, что реактивная мощность не потребляется компрессорной, а выдается в сеть.

3.2 Выбор трансформаторов

При проектировании схемы электроснабжения предприятия одним из важных вопросов является выбор числа и мощности силовых трансформаторов на подстанции. Наиболее часто подстанции предприятий выполняют с двумя трансформаторами, что обеспечивает достаточную надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей всех категорий. Выбор мощности трансформаторов для подстанций предприятия или другого объекта электроснабжения производится по величине расчетной нагрузки в нормальном режиме работы, с учетом задаваемого энергоснабжающей организацией значения оптимальной реактивной мощности $Q_{\Sigma 1}$, передаваемой из энергосистемы в сеть предприятия в период максимальных нагрузок энергосистемы.

При этом должна быть учтена допустимая перегрузка трансформаторов и их экономическая загрузка. Выгодная загрузка трансформатора зависит от категории электроприемников, числа трансформаторов и способа

резервирования. Выбор мощности трансформаторных подстанций производится по средней расчетной мощности, с учетом допустимой перегрузки.

Так как рассматриваемая компрессорная станция имеет потребителей 1 категории надёжности, то на подстанции должны быть установлены не менее двух силовых трансформатора.

В ВКР рассматриваются два возможных варианта мощности трансформаторов с учетом изменения их количества, т.е. в первом варианте принимается одна двухтрансформаторная КТП, а во втором варианте принимается две двухтрансформаторных КТП.

Определяется предельную мощность [6]:

I вариант ($n_1=2$)

$$S_{\text{расч}_1} = \frac{S_{\text{расч}_{0,4}}}{n_1 \cdot \beta}, \quad (10)$$
$$S_{\text{расч}_1} = \frac{1190,24}{2 \cdot 0,75} = 793,5 \text{ кВА.}$$

II вариант ($n_2=4$)

$$S_{\text{расч}_2} = \frac{S_{\text{расч}_{0,4}}}{n_2 \cdot \beta}, \quad (11)$$
$$S_{\text{расч}_2} = \frac{1190,24}{4 \cdot 0,75} = 396,75 \text{ кВА.}$$

Выбирается тип и стандартную мощность трансформатора:

I вариант: два силовых трансформатора ТМГ 1000/10/0,4 УЗ [20].

II вариант: четыре силовых трансформатора ТМГ 400/10/0,4 УЗ [20].

Проверяются выбранные трансформаторы по коэффициенту загрузки (0,57÷0,75).

I вариант

$$\beta_1 = \frac{S_{\text{расч}0,4}}{n_1 \cdot S_{\text{HT1}}}, \quad (12)$$

$$\beta_1 = \frac{1190,24}{2 \cdot 1000} = 0,6.$$

II вариант

$$\beta_2 = \frac{S_{\text{расч}0,4}}{n_2 \cdot S_{\text{HT2}}}, \quad (13)$$

$$\beta_2 = \frac{1190,24}{4 \cdot 400} = 0,74.$$

Проверяются выбранные трансформаторы по перегрузочной способности.

Коэффициент 1,4 учитывает 40 % дополнительную перегрузку силового трансформатора.

I вариант

$$1,4(n - 1) \cdot S_{\text{HT}} > S_{\text{макс}}, \quad (14)$$

$$1,4(2 - 1) \cdot 1000 > 1190,24,$$

$$1400 > 1190,24.$$

II вариант

$$1,4(n - 1) \cdot S_{\text{HT}} > S_{\text{макс}},$$

$$1,4(4 - 1) \cdot 400 > 1190,24,$$

$$1680 > 1190,24.$$

По справочнику выбираются технические данные выбранных трансформаторов [20], составляется таблица 2.

Таблица 2 – Технические характеристики силовых трансформаторов

№ вар.	Тип трансформатора	$S_{\text{ном}}$, кВА	Потери, кВт		$U_{\text{кз}}$, %	$I_{\text{хх}}$, %	$K_{\text{тр}}$ цена, тыс.руб.
			$\Delta P_{\text{хх}}$	$\Delta P_{\text{кз}}$			
I вариант	ТМГ1000/10	1000	1,6	10,8	4,5	1	2036500
II вариант	ТМГ400/10	400	0,82	5,5	5,5	0,75	909000

Технико-экономическое сравнение вариантов.

Определение приведенных потерь мощности холостого хода трансформатора.

Определение потерь активной мощности, как в самом трансформаторе, так и в электросистеме электроснабжения в зависимости от реактивной мощности, потребляемой трансформатором.

$\Delta P_{\text{хх}}$ – потери ХХ взятые из справочных данных трансформатора.

$\Delta Q_{\text{хх}}$ – реактивная мощность силового трансформатора.

$K_{\text{пп}}$ – коэффициент повышения потерь, который задается предприятию энергосистемой $K_{\text{пп}}=0,05$ кВт/кВар [12].

I вариант

$$\Delta P'_{\text{хх}_1} = \Delta P_{\text{хх}_1} + K_{\text{пп}} \cdot \Delta Q_{\text{хх}_1}, \quad (15)$$

$$\Delta P'_{\text{хх}_1} = 1,6 + 0,05 \cdot 10 = 2,1 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{\text{хх}_1} = S_{\text{нт}_1} \cdot \frac{I_{\text{хх}_1} \%}{100 \%}, \quad (16)$$

$$\Delta Q_{\text{хх}_1} = 1000 \cdot \frac{1}{100} = 10 \text{ кВар}.$$

II вариант

$$\Delta P'_{\text{хх}_2} = \Delta P_{\text{хх}_2} + K_{\text{пп}} \cdot \Delta Q_{\text{хх}_2}, \quad (17)$$

$$\Delta P'_{\text{хх}_2} = 0,82 + 0,05 \cdot 3 = 0,97 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{\text{хх}_2} = S_{\text{нт}_2} \cdot \frac{I_{\text{хх}_2} \%}{100 \%}, \quad (18)$$

$$\Delta Q_{\text{хх}_2} = 400 \cdot \frac{0,75}{100} = 3 \text{ кВар}.$$

Определение приведенных потерь мощности КЗ трансформатора.

Определяется аналогично потерям ХХ.

$\Delta P_{\text{КЗ}}$ – потери КЗ взятые из справочных данных трансформатора.

$\Delta Q_{\text{КЗ}}$ – реактивная мощность, потребляемая трансформатором.

$K_{\text{пп}}$ – коэффициент повышения потерь, который задается предприятию энергосистемой $K_{\text{пп}}=0,05$ кВт/кВар.

I вариант

$$\Delta P'_{\text{КЗ}_1} = \Delta P_{\text{КЗ}_1} + K_{\text{пп}} \cdot \Delta Q_{\text{КЗ}_1}, \quad (19)$$

$$\Delta P'_{\text{КЗ}_1} = 10,8 + 0,05 \cdot 45 = 13,05 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{\text{КЗ}_1} = S_{\text{HT}_1} \cdot \frac{U_{\text{КЗ}_1} \%}{100 \%}, \quad (20)$$

$$\Delta Q_{\text{КЗ}_1} = 1000 \cdot \frac{4,5}{100} = 45 \text{ кВар}.$$

II вариант

$$\Delta P'_{\text{КЗ}_2} = \Delta P_{\text{КЗ}_2} + K_{\text{пп}} \cdot \Delta Q_{\text{КЗ}_2}, \quad (21)$$

$$\Delta P'_{\text{КЗ}_2} = 5,5 + 0,05 \cdot 22 = 6,6 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{\text{КЗ}_2} = S_{\text{HT}_2} \cdot \frac{U_{\text{КЗ}_2} \%}{100 \%}, \quad (22)$$

$$\Delta Q_{\text{КЗ}_2} = 400 \cdot \frac{5,5}{100} = 22 \text{ кВар}.$$

Определяется приведенные потери мощности в трансформаторе.

I вариант

$$\Delta P'_{\text{тр}_1} = n_1 (\Delta P'_{\text{ХХ}_1} + \beta_1^2 \cdot \Delta P'_{\text{КЗ}_1}), \quad (23)$$

$$\Delta P'_{\text{тр}_1} = 2(2,1 + 0,6^2 \cdot 13,05) = 13,596 \text{ кВт},$$

II вариант

$$\Delta P'_{\text{тр}_2} = n_2 (\Delta P'_{\text{xx}_2} + \beta_2^2 \cdot \Delta P'_{\text{кз}_2}), \quad (24)$$

$$\Delta P'_{\text{тр}_2} = 4(0,97 + 0,74^2 \cdot 6,6) = 18,337 \text{ кВт.}$$

Определяется капитальные затраты.

$K_{\text{тр}}$ – цена одного трансформатора по справочнику.

I вариант

$$K_{\text{тр}_1} = n_1 \cdot K_{\text{тр}_1}, \quad (25)$$

$$K_{\text{тр}_1} = 2 \cdot 2036500 = 4073000 \text{ тыс. руб.}$$

II вариант

$$K_{\text{тр}_2} = n_2 \cdot K_{\text{тр}_2} \quad (26)$$

$$K_{\text{тр}_2} = 4 \cdot 909000 = 3636000 \text{ тыс. руб.}$$

Определяется годовые эксплуатационные расходы и амортизация.

φ – коэффициент амортизационных отчислений, $\varphi=0,1$

I вариант

$$C_{a_1} = \varphi \cdot K_{\text{тр}_1} \quad (27)$$

$$C_{a_1} = 0,1 \cdot 4073000 = 407300 \text{ тыс. руб.}$$

II вариант

$$C_{a_2} = \varphi \cdot K_{\text{тр}_2} \quad (28)$$

$$C_{a_2} = 0,1 \cdot 909000 = 90900 \text{ тыс. руб.}$$

Определяется стоимость потерь электроэнергии при стоимости 4,9 руб. / (кВт·час).

$\Delta\mathcal{E}_{\text{п}}$ – суммарные потери электроэнергии.

I вариант

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{п}_1} = \Delta P'_{\text{тр}_1} \cdot T_{\text{макс}}, \quad (29)$$

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{п}_1} = 13,596 \cdot 8760 = 119100,96 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

$$C_{\text{п}_1} = C_0 \cdot \Delta\mathcal{E}_{\text{п}_1}, \quad (30)$$

$$C_{\text{п}_1} = 4,9 \cdot 119100,96 = 583594 \text{ тыс. руб.}$$

II вариант

$$\mathcal{E}_{\text{п}_2} = \Delta P'_{\text{тр}_2} \cdot T_{\text{макс}}, \quad (31)$$

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{п}_2} = 18,337 \cdot 8760 = 160632,12 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

$$C_{\text{п}_2} = C_0 \cdot \Delta\mathcal{E}_{\text{п}_2}, \quad (32)$$

$$C_{\text{п}_2} = 4,9 \cdot 160632,12 = 787097 \text{ тыс. руб.}$$

Определяется суммарные годовые эксплуатационные расходы.

I вариант

$$C_1 = C_{a_1} + C_{\text{п}_1}, \quad (33)$$

$$C_1 = 407300 + 583594 = 990894 \text{ тыс. руб.}$$

II вариант

$$C_2 = C_{a_2} + C_{\text{п}_2} \quad (34)$$

$$C_2 = 90900 + 787097 = 1150697 \text{ тыс. руб.}$$

Производим сравнение по капитальным затратам и эксплуатационным расходам:

$$K_1 = 4073000 \text{ тыс. руб.} > K_2 = 3636000 \text{ тыс. руб.}$$

$$C_1 = 990894 \text{ тыс. руб.} < C_2 = 1150697 \text{ тыс. руб.}$$

Результаты технико–экономического сравнения вариантов внешнего электроснабжения представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Техничко–экономическое сравнение вариантов внешнего электроснабжения

Вариант	К _{тр} , тыс. руб.	С _а , тыс. руб.	С _п , тыс. руб.	С, тыс. руб.
Вариант 1 (2 трансформатора)	4073000	407300	583594	990894
Вариант 2 (4 трансформатора)	3636000	90900	787097	1150697

Так как капитальные затраты второго варианта меньше, но ее эксплуатационные расходы больше производим расчет срока окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_1 - K_2}{C_2 - C_1} \quad (35)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_1 - K_2}{C_2 - C_1} = \frac{4073000 - 3636000}{1150697 - 990894} = 3 \text{ года} < 7 \text{ лет.}$$

Вывод: так как срок окупаемости меньше 7 лет, выбирается вариант с меньшим эксплуатационным расходом – первый вариант с установкой двух силовых трансформатора типа ТМГ-1000/10/0,4 УЗ.

Выводы по разделу три.

В третьем разделе ВКР для электроснабжения компрессорной станции на основании проведённого технико-экономического сравнения принята двухтрансформаторная подстанция с двумя трансформаторами ТМГ 1000/10/0,4 УЗ, мощностью 160 кВА. Компенсация реактивной мощности не требуется.

4 Расчет питающей линии

4.1 Выбор кабельной линии

После определения электрических нагрузок приемников электроэнергии возникает вопрос обеспечения потребителей надежным, экономичным и качественным электроснабжением.

Требования к надежности зависят от категории потребителей электроэнергии и особенностей технологического процесса. Наряду с этим необходимо учитывать характер размещения нагрузок на территории предприятия или цеха, потребляемую мощность, наличии источников питания. Все указанные условия влияют на выбор схемы электроснабжения потребителей.

В зависимости от установленной мощности потребителей электроэнергии различают объекты большой (75–100 МВт и более), средней (от 5 до 75 МВт) и малой мощности (до 5 МВт). Для предприятий и отдельных цехов малой и средней мощности применяют схемы с одним приемным пунктом электроэнергии, которым может быть ТП, РП, ГПП, ГРП.

При наличии потребителей 1 категории предусматривается секционирование шин приемного пункта и питание каждой секции от отдельной линии [13].

Для распределения электроэнергии внутри предприятия, цеха или иного объекта, потребляющего электроэнергию, применяют магистральные, радиальные или смешанные схемы.

При радиальной схеме все подстанции цехов предприятия запитываются отдельными линиями. Так как она является более надежной, применяем радиальную схему снабжения.

Подробно вопрос выбора схемы электроснабжения рассматривается в [3].

Для питания высоковольтных двигателей используется трехфазный переменный ток напряжением 10 кВ. Для питания низковольтных двигателей и освещения используется трехфазный переменный ток напряжением 380 В.

Длительно допустимые токовые нагрузки проводов и кабелей по нагреву.

Любому длительно протекающему току при неизменных внешних условиях соответствует вполне определенная установившаяся температура проводника. Величина длительно протекающего тока, при котором температура становится предельно допустимой для данной марки кабеля или провода называется длительно допустимой токовой нагрузкой, величина которой зависит от материала провода и его сечения, температуры окружающей среды, материала изоляции и способов прокладки. Имеет значение также режим работы проводов и кабелей. Например: для повторно–кратковременного режима работы она может быть увеличена. Для определенной величины длительно допустимого тока необходимо знать наивысшую положительную температуру окружающей среды, так как температура окружающего воздуха и почвы изменяются в зависимости от времени года, а также от района страны. ПУЭ устанавливает расчетные температуры окружающей среды. При выборе сечения иногда целесообразно вместо одного провода или кабеля большого сечения взять два в общей сложности меньшего сечения. Например, для кабеля марки СБ на напряжение 1 кВ сечением 3×120 длительно допустимый ток составляет 309 А, при замене этого кабеля сечением 2 СБ (3×50), ток допустимый равен 423 А.

Располагая данными длительно допустимых токовых нагрузок для разных проводов и кабелей в зависимости от способов прокладки можно решать различные задачи, связанные с изменением условий работы или материала проводника. Для упрощения решения задач по определению допустимых токовых нагрузок на провода или кабели при температурных условиях отличающихся от установок ПУЭ приводятся поправочные

коэффициенты. При выборе сечения проводников по условию допустимого нагрева следует учитывать следующее:

- при проверке на нагрев в качестве расчетного тока принимают получасовой максимум токовой нагрузки.
- при повторно–кратковременном режиме в качестве расчетной токовой нагрузки для проверки сечения по нагреву следует принимать токовую нагрузку, приведенную к длительному режиму.

Для кабелей с бумажной пропитанной изоляцией напряжением 10 кВ и ниже допускает на период ликвидации аварии в течение 5 суток перегрузка до 130% на время максимума, но не более 6 часов ежесуточно. При прокладке более 4 проводов в трубах, коробах или лотках пучками следует принимать допустимую токовую нагрузку со специальными коэффициентами: 0,68–5–6; 0,63–7–9; 0,6–10–12 [14].

$$l = 1000 \text{ м,}$$

$$t_{\text{ср}}^0 = 0^\circ\text{C,}$$

$$T_{\text{макс}} = 8760 \text{ ч.}$$

Находим экономическую плотность тока $j_{\text{э}}$ [9]:

$$j_{\text{э}} = 1,2.$$

Определяется экономическое сечение и расчетный ток [14]:

$$I_{\text{расч}} = \frac{\sum S_{\text{расч}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot n}, \quad (36)$$

$$I_{\text{расч}} = \frac{4987,6}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 157,31 \text{ А.}$$

$$S_{\text{э}} = \frac{I_{\text{макс}}}{j_{\text{э}}}, \quad (37)$$

$$S_3 = \frac{157,31}{1,2} = 131 \text{ мм}^2.$$

По экономическому сечению выбирается кабель марки АСБ 3×150;
 $I_{\text{доп}} = 275 \text{ А}$ [22].

Проверка на нагрев.

Выбранное сечение кабеля проверяется на температурный нагрев [15]:

$$t_{\text{фак}}^0 = t_{\text{ср}}^0 + (t_{\text{доп}}^0 - t_{\text{ср.норм}}^0) \left(\frac{I_{\text{расч}}}{I'_{\text{доп}}} \right)^2, \quad (38)$$

где $t_{\text{ср}}^0$ – заданная температура окружающей среды,

$t_{\text{доп}}^0$ – определяется по справочнику,

$t_{\text{ср.норм}}^0$ – определяется по справочнику,

$I'_{\text{доп}}$ – допустимый ток,

$$I'_{\text{доп}} = K_T \cdot K_{\text{п}} \cdot I_{\text{доп}}, \quad (39)$$

где K_T – поправочный коэффициент на токи для кабелей,

$K_{\text{п}}$ – поправочный коэффициент на количество рабочих кабелей,

$I_{\text{доп}}$ – допустимый ток для выбранного сечения кабеля.

$$I'_{\text{доп}} = 1,15 \cdot 0,9 \cdot 275 = 284,63 \text{ А},$$

$$t_{\text{фак}}^0 = 0 + (60 - 25) \left(\frac{157,31}{284,63} \right)^2 = 12^0.$$

Если соблюдается условие

$$t_{\text{фак}}^0 < t_{\text{доп}}^0, \quad (40)$$

то выбранное сечение по нагреву проходит:

$$12^{\circ} < 60^{\circ}.$$

Условие соблюдается, выбранное сечение по нагреву проходит.

Определение потери напряжения трехфазной линии с нагрузкой на конце.

При равномерном распределении нагрузки по фазам, а также одинаковых сопротивлений проводников потери напряжения могут быть определены для одной фазы. При этом в расчете используются фазные напряжения в начале и в конце линии. С учетом векторной диаграммы формула для потерь напряжения [16]:

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{расч}} \cdot l \cdot (r_0 \cdot \cos\varphi + x_0 \cdot \sin\varphi)}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (41)$$

где r_0, x_0 – это активное и реактивное сопротивления линий на 1 м длины берется по справочнику – для высоковольтных кабелей,

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 157,31 \cdot 1 \cdot (0,122 \cdot 0,89 + 0,079 \cdot 0,46)}{10000} \cdot 100\% = 0,4\%.$$

откуда можно сделать вывод, что кабель проверку по потере напряжения проходит.

4.2 Расчет токов короткого замыкания с высокой и низкой сторон

В системах электроснабжения предприятий и установок возможно возникновение нарушений нормального режима работы вследствие старения или повреждения изоляции элементов электрооборудования, а также неправильных действий обслуживающего персонала. Основным видом аварийных нарушений являются короткие замыкания (КЗ).

Расчёт токов при трёхфазном КЗ выполняется в следующем порядке.

Для рассматриваемой системы электроснабжения составляют

расчетную схему и по ней электрическую схему замещения.

Путем постепенных преобразований приводят схему замещения к наиболее простому виду, при котором каждый источник питания (или группа источников), характеризующийся определенным значением, результирующей ЭДС, был связан с точкой КЗ одним результирующим сопротивлением $x_{рез}$.

Зная величины результирующей ЭДС источника и результирующее напряжения, по закону Ома определяют начальное значение периодической составляющей тока КЗ, $I_{по}$; ударный ток i_y и, при необходимости, установившееся значение тока КЗ, I .

При расчете в относительных единицах все величины приводят к базовым условиям, в качестве которых принимают базисную мощность $S_б$ и базисное напряжения $U_б$. За величину базисной мощности обычно принимают условную мощность кратную 10, например 100 или 1000 МВА. В качестве базисного напряжения принимают среднее напряжения $U_{ср}$, которое на 5% выше номинального: 0,23; 0,4; 0,69; 6,3; 10,5; 3,7; 115; 230 кВ [18].

Если питание предприятия или установки осуществляется от системы неограниченной мощности обычно, когда мощность питающей системы и сопротивление её элементов неизвестны при расчете токов КЗ исходят из следующих условий:

- при значительном удалении точки КЗ от источника питания сопротивление от системы до точки присоединения потребителей принимают равным 0.

- при известных значениях сверхпереходного $I_{по}$ и установившегося I_{∞} токов КЗ на шинах подстанции, к которой подключаются потребители, сопротивление системы до точки КЗ определяют по величинам этих токов.

Если известны типы выключателей, установленных на питающих подстанциях, то значение сверхпереходного тока на шинах этой подстанции $I_{по}$ принимается равным току выключателя $I_{ном.отк}$ и по этому току определяют сопротивления от источника неограниченной мощности до шин подстанции:

$$x_c = \frac{I_6}{I_{\text{НОМ.ОТК}}}; \quad (42)$$

где I_6 – базисный ток, А;

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}. \quad (43)$$

При расчётах, выполняемых в именованных единицах, приведение сопротивлений схемы к одному базовому напряжению U_6 следует выполнять по формуле [19]:

$$x' = x \cdot \frac{U_6^2}{U_{\text{ср}}^2}; \quad (44)$$

где x – индуктивное сопротивление данного элемента схемы (Ом на фазу), заданное при $U_{\text{ср}}$ ступени, на которую включён этот элемент.

x' – сопротивление этого элемента, приведенное к принятому базисному напряжению U_6 .

Расчет токов КЗ в установках до 1 кВт выполняется с учетом всех сопротивлений, как индуктивных, так и активных. При этом необходимо учитывать сопротивления всех переходных контактов в этой короткозамкнутой цепи (на вводах и на выводах аппаратов, разъемных контактов аппаратуры и контактов в месте короткого замыкания). Этот расчёт выполняется в именованных единицах. Сопротивления элементов системы электроснабжения ВН приводят к НН [19]:

$$x_H = x_B \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ.Н}}}{U_{\text{НОМ.В}}} \right)^2. \quad (45)$$

Далее выполняется расчет токов короткого замыкания с высокой стороны.

4.3 Расчет токов короткого замыкания с высокой стороны

Расчетная схема сети приведена на рисунке 2.

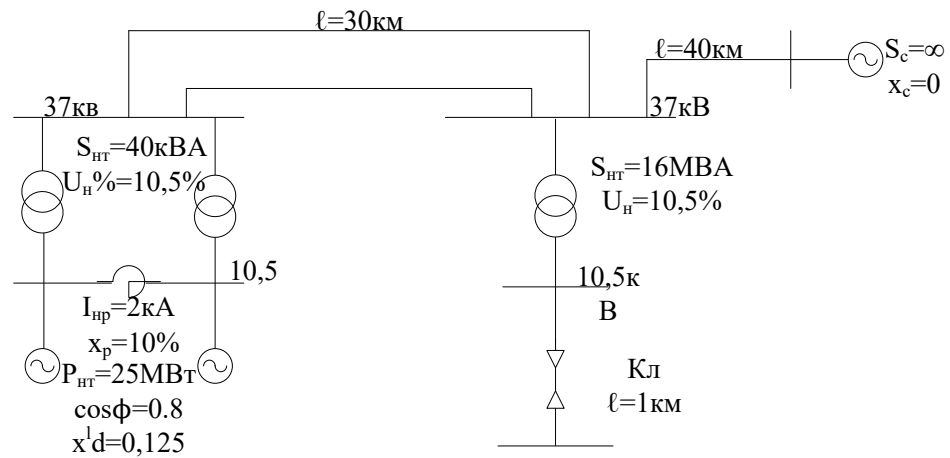


Рисунок 2 – Расчетная схема

Определяется полные мощности электростанций.

$$S_H = \frac{P_H}{\cos\phi}, \quad (46)$$

$$S_H = \frac{125}{0,8} = 156 \text{ kBA},$$

$$S_c = \frac{P_c}{\cos\varphi}, \quad (47)$$

$$S_c = \frac{750}{0,8} = 938 \text{ кВА.}$$

Задаемся базисными условиями $S_6=100$ МВА, $U_6=10,5$ кВ.

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}, \quad (48)$$

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА.}$$

Определяется базисные сопротивления в относительных единицах.

Схема замещения приведена на рисунке 3.

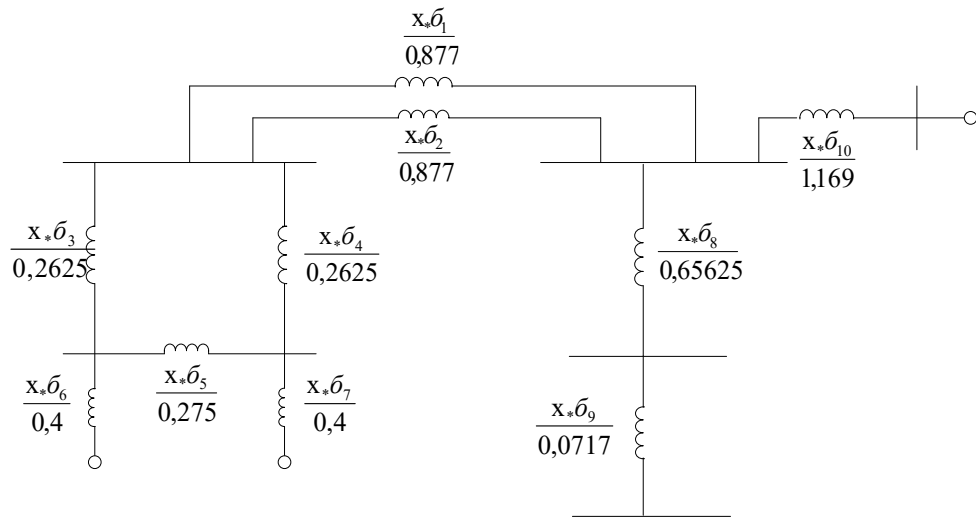


Рисунок 3 – Схема замещения

Сопротивление генераторов станций [11]:

$$x_{*δ_6} = x_{*δ_7} = x_a'' \cdot \frac{S_δ}{S_{н.г.}}, \quad (49)$$

$$x_{*δ_6} = x_{*δ_7} = 0,125 \cdot \frac{100}{31,25} = 0,4,$$

$$S_{н.г.} = \frac{P_{н.г.}}{\cos\varphi}, \quad (50)$$

$$S_{н.г.} = \frac{25}{0,8} = 31,25 \text{ МВА.}$$

Сопротивление трансформаторов [11]:

$$x_{*δ_3} = x_{*δ_4} = \frac{U_K\%}{100} \cdot \frac{S_δ}{S_{н.т.}}, \quad (51)$$

$$x_{*δ_3} = x_{*δ_4} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,2625,$$

$$x_{*δ_8} = \frac{U_K\%}{100} \cdot \frac{S_δ}{S_{н.т.}}, \quad (52)$$

$$x_{*δ_8} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,65625.$$

Сопротивление воздушных и кабельных линий [11]:

$$x_{*6_1} = x_{*6_2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_H^2}, \quad (53)$$

$$x_{*6_1} = x_{*6_2} = 0,4 \cdot 30 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,877,$$

$$x_{*6_9} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_H^2}, \quad (54)$$

$$x_{*6_9} = 0,079 \cdot 1 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,0717,$$

$$r_{*6_9} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_H^2}, \quad (55)$$

$$r_{*6_9} = 0,122 \cdot 1 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,1107,$$

$$x_{*6_{10}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_H^2}, \quad (56)$$

$$x_{*6_{10}} = 0,4 \cdot 40 \cdot \frac{100}{37^2} = 1,169.$$

Сопротивление реактора:

$$x_{*6_5} = \frac{x_p \%}{100 \%} \cdot \frac{I_6 \cdot U_H}{U_6 \cdot I_H}, \quad (57)$$

$$x_{*6_5} = \frac{10}{100} \cdot \frac{5,5 \cdot 10,5}{10,5 \cdot 2} = 0,275.$$

Упрощаем схему замещения.

Сопротивления x_{*6_1} и x_{*6_2} соединены параллельно [11]:

$$x_{*6_{12}} = \frac{x_{*6_1}}{2}, \quad (58)$$

$$x_{*6_{12}} = \frac{0,877}{2} = 0,4385.$$

Сопротивления x_{*6_8} и x_{*6_9} соединены последовательно:

$$x_{*6_{13}} = x_{*6_8} + x_{*6_9}, \quad (59)$$

$$x_{*б_{13}} = 0,65625 + 0,0717 = 0,72795.$$

Схема замещения приведена на рисунке 4.

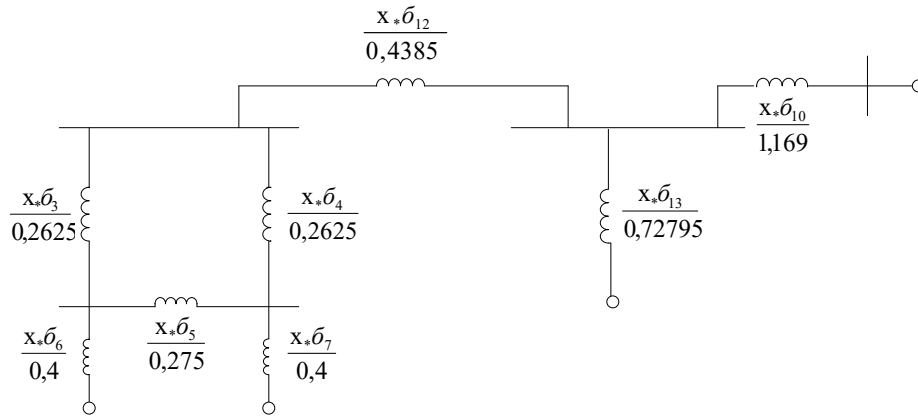


Рисунок 4 – Схема замещения

Сопротивления $x_{*б_3}$, $x_{*б_4}$ и $x_{*б_5}$ образуют треугольник, которую необходимо преобразовать в эквивалентную звезду [11]:

$$x_{*б_{14}} = \frac{x_{*б_3} \cdot x_{*б_4}}{x_{*б_3} + x_{*б_4} + x_{*б_5}}; \quad (60)$$

$$x_{*б_{14}} = \frac{0,2625 \cdot 0,2625}{0,2625 + 0,2625 + 0,275} = 0,086;$$

$$x_{*б_{15}} = \frac{x_{*б_3} \cdot x_{*б_5}}{x_{*б_3} + x_{*б_4} + x_{*б_5}}; \quad (61)$$

$$x_{*б_{15}} = \frac{0,2625 \cdot 0,275}{0,2625 + 0,2625 + 0,275} = 0,09;$$

$$x_{*б_{16}} = \frac{x_{*б_4} \cdot x_{*б_5}}{x_{*б_3} + x_{*б_4} + x_{*б_5}}; \quad (62)$$

$$x_{*б_{16}} = \frac{0,2625 \cdot 0,275}{0,2625 + 0,2625 + 0,275} = 0,09.$$

Схема замещения приведена на рисунке 5.

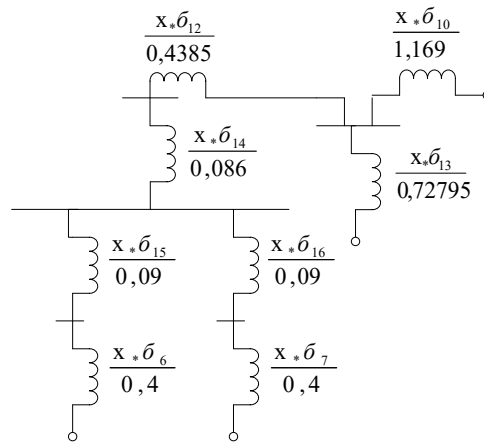


Рисунок 5 – Схема замещения

Сопротивления $x_{*b_{12}}$ и $x_{*b_{14}}$; x_{*b_6} и $x_{*b_{15}}$; x_{*b_7} и $x_{*b_{16}}$ соединены последовательно:

$$x_{*b_{17}} = x_{*b_{12}} + x_{*b_{14}}, \quad (63)$$

$$x_{*b_{17}} = 0,4385 + 0,086 = 0,5245,$$

$$x_{*b_{18}} = x_{*b_6} + x_{*b_{15}}, \quad (64)$$

$$x_{*b_{18}} = 0,09 + 0,4 = 0,49,$$

$$x_{*b_{19}} = x_{*b_7} + x_{*b_{16}}, \quad (65)$$

$$x_{*b_{19}} = 0,09 + 0,4 = 0,49.$$

Сопротивления $x_{*b_{18}}$ и $x_{*b_{19}}$ соединены параллельно:

$$x_{*b_{20}} = \frac{x_{*b_{18}}}{2} = 0,245.$$

Сопротивления $x_{*b_{17}}$ и $x_{*b_{20}}$ соединены последовательно:

$$x_{*b_{21}} = x_{*b_{17}} + x_{*b_{20}}, \quad (66)$$

$$x_{*b_{21}} = 0,5245 + 0,245 = 0,7695.$$

Сопротивления $x_{*б_{21}}$, $x_{*б_{10}}$ и $x_{*б_{13}}$ образуют звезду, которую необходимо преобразовать в эквивалентный треугольник:

$$x_{*б_{22}} = x_{*б_{21}} + x_{*б_{13}} + \frac{x_{*б_{21}} \cdot x_{*б_{13}}}{x_{*б_{10}}} = 1,9766,$$

$$x_{*б_{23}} = x_{*б_{10}} + x_{*б_{13}} + \frac{x_{*б_{10}} \cdot x_{*б_{13}}}{x_{*б_{21}}} = 3,002.$$

Схема замещения приведена на рисунке 6.

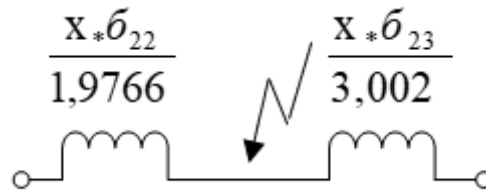


Рисунок 6 – Схема замещения

Так как $S_c = \infty$, то объединение невозможно, поэтому рассчитываем I_k отдельно от каждого источника питания.

Определяется токи к.з. от системы, так как точка к.з. находится вдали от источника питания, то расчет ведем по I методу [11]:

$$I_{kc} = \frac{I_6}{x_{*б_{23}}}, \quad (67)$$

$$I_{kc} = \frac{5,5}{3,002} = 1,83 \text{ кА},$$

$$i_{yc} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{kc}, \quad (68)$$

где K_y – ударный коэффициент, который определяется по кривым [11],

$$i_{yc} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 1,83 = 4,67 \text{ кА},$$

$$S_{kc} = \frac{S_6}{x_{*б_{23}}}, \quad (69)$$

$$S_{Kc} = \frac{100}{3,002} = 33,31 \text{ МВА.}$$

Определяется токи к.з. от генератора:

$$I_{K\Gamma} = \frac{I_6}{x_{*622}}, \quad (70)$$

$$I_{K\Gamma} = \frac{5,5}{1,9766} = 2,7826 \text{ кА,}$$

$$i_{y\Gamma} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{Kc}, \quad (71)$$

$$i_{y\Gamma} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 2,7826 = 7,08 \text{ кА,}$$

$$S_{K\Gamma} = \frac{S_6}{x_{*622}}, \quad (72)$$

$$S_{K\Gamma} = \frac{100}{1,9766} = 50,6 \text{ МВА.}$$

Определяется общие токи к.з.:

$$I_K = I_{Kc} + I_{K\Gamma}, \quad (73)$$

$$I_K = 1,83 + 2,7826 = 4,6126 \text{ кА,}$$

$$i_y = i_{yc} + i_{y\Gamma}, \quad (74)$$

$$i_y = 4,67 + 7,08 = 11,75 \text{ кА,}$$

$$S = S_{Kc} + S_{K\Gamma}, \quad (75)$$

$$S = 33,31 + 50,6 = 83,91 \text{ МВА.}$$

Далее выполняется расчет токов КЗ с низкой стороны.

4.4 Расчет токов короткого замыкания с низкой стороны

Нагрузка с низкой стороны приведена на рисунке 7.

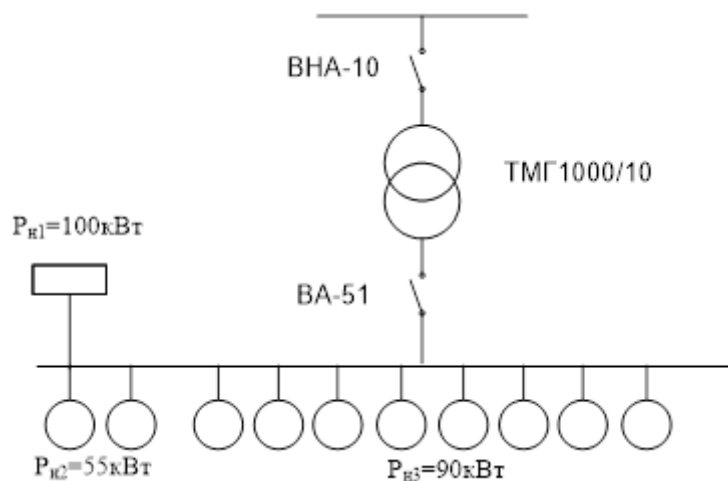


Рисунок 7 – Нагрузка с низкой стороны

Определяется расчетный ток и выбирается сечение шины:

$$I_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{расч}0,4}}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{Н}}}, \quad (76)$$

$$I_{\text{расч}} = \frac{1190,24}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,4} = 859 \text{ A.}$$

Выбирается шину АТ (60×6).

Определяется сопротивление системы:

$$x_c = \frac{U_{\text{Н}}^2}{S_{\text{откл}}}, \quad (77)$$

$$x_c = \frac{400^2}{200 \cdot 10^6} = 0,0008 \text{ Ом} = 0,8 \text{ мОм.}$$

Определяется сопротивление трансформатора в относительных единицах, исходя из паспортных данных [4]:

$$r_{*T} = \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{S_{\text{н.т.}}}, \quad (78)$$

$$r_{*T} = \frac{10,8}{1000} = 0,0108 \text{ мОм;}$$

$$x_{*T} = \sqrt{\left(\frac{U_{K3}}{100}\right)^2 - r_{*T}^2}, \quad (79)$$

$$x_{*T} = \sqrt{\left(\frac{4,5}{100}\right)^2 - 0,0108^2} = 0,0437 \text{ мОм.}$$

Определяется сопротивление трансформатора, приведенное к напряжению 0,4 кВ [4]:

$$r_T = r_{*T} \cdot \frac{U_H^2}{S_{H.T.}}, \quad (80)$$

$$r_T = 0,0108 \cdot \frac{400^2}{1000} = 1,728 \text{ мОм,}$$

$$x_T = x_{*T} \cdot \frac{U_H^2}{S_{H.T.}}, \quad (81)$$

$$x_T = 0,0437 \cdot \frac{400^2}{1000} = 6,992 \text{ мОм.}$$

Определение сопротивления шин [4]:

$$r_{ш} = r_0 \cdot l, \quad (82)$$

$$r_{ш} = 0,099 \cdot 5 = 0,495 \text{ мОм,}$$

$$x_{ш} = x_0 \cdot l, \quad (83)$$

$$x_{ш} = 0,189 \cdot 5 = 0,945 \text{ мОм.}$$

Суммарные сопротивления.

Переходные сопротивления контактов принимаются равным 0,08 мОм, сопротивление самого автомата 0,3 мОм переходное сопротивление в местах присоединения к шине 15 мОм. Тогда результирующее сопротивление цепи КЗ без учета кабеля определяется [4]:

$$r_{\Sigma} = r_T + r_{ш} + r_a + r_{п} + r_{к}, \quad (84)$$

$$r_{\Sigma} = 1,728 + 0,495 + 0,08 + 0,3 + 15 = 17,602 \text{ мОм},$$

$$x_{\Sigma} = x_c + x_T + x_{ш}, \quad (85)$$

$$x_{\Sigma} = 0,8 + 6,992 + 0,945 = 8,737 \text{ мОм},$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}, \quad (86)$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{17,602^2 + 8,737^2} = 19,65 \text{ мОм}.$$

Установленный ток КЗ [4]:

$$I_K = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}}, \quad (87)$$

$$I_K = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 19,65} = 11,75 \text{ кА}.$$

Ударный коэффициент.

K_y определяется по кривой в зависимости от отношения [4]:

$$\frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} = \frac{8,737}{17,603} = 0,5 \rightarrow K_y = 1.$$

Ударный ток КЗ:

$$i_{y_c} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_K, \quad (88)$$

$$i_{y_c} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 11,75 = 16,62 \text{ кА}.$$

Определяется ударный ток от потребителей, для которых сначала находим номинальный ток:

$$n_1 = 1; P_{H_1} = 100 \text{ кВт}; \cos \varphi_1 = 0,95; \eta = 0,93;$$

$$n_2 = 2; P_{H_2} = 55 \text{ кВт}; \cos \varphi_2 = 0,8; \eta = 0,93;$$

$$n_3 = 8; P_{H_3} = 90 \text{ кВт}; \cos \varphi_3 = 0,75; \eta = 0,93.$$

$$I_{H1} = \frac{n_1 \cdot P_{H1}}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_1 \cdot \eta}, \quad (89)$$

$$I_{H1} = \frac{1 \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,95 \cdot 0,93} = 172 \text{ A} = 0,172 \text{ кА},$$

$$I_{H2} = \frac{n_2 \cdot P_{H2}}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_2 \cdot \eta}, \quad (90)$$

$$I_{H2} = \frac{3 \cdot 55}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,65 \cdot 0,93} = 225 \text{ A} = 0,225 \text{ кА},$$

$$I_{H3} = \frac{n_3 \cdot P_{H3}}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_3 \cdot \eta}, \quad (91)$$

$$I_{H3} = \frac{2 \cdot 40}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,8 \cdot 0,93} = 1568 \text{ A} = 1,568 \text{ кА}.$$

Ударный ток потребителей:

$$i_{y_{\Pi}} = K_{\Pi} \cdot I_{H\Sigma}, \quad (92)$$

$$i_{y_{\Pi}} = 4 \cdot 1,965 = 7,86 \text{ кА},$$

$$I_{H\Sigma} = I_{H1} + I_{H2} + I_{H3}, \quad (93)$$

$$I_{H\Sigma} = 0,172 + 0,225 + 1,568 = 1,965 \text{ кА}.$$

Суммарный ударный ток к.з.:

$$i_y = i_{y_c} + i_{y_{\Pi}}, \quad (94)$$

$$i_y = 16,62 + 1,965 = 24,48 \text{ кА}.$$

Результаты расчета токов КЗ приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчета токов КЗ

Ток к.з.	I_K , кА	i_y , кА	S_K , МВА
К-1	4,6126	11,75	83,91
К-2	11,75	24,48	—

Выводы по разделу четыре.

В четвертом разделе ВКР рассчитана питающая линия компрессорной станции. В ходе расчета питающей линии от источника до трансформаторной подстанции компрессорной станции «КС–Перегребненская» был выбран кабель 10 кВ марки АСБ 3×150, который соответствует требованиям по пропускной способности и надежности для данного объекта. Рассчитаны токи КЗ на стороне 10 кВ и 0,4 кВ трансформаторной подстанции компрессорной, которые являются основой для правильного выбора защитного оборудования, что гарантирует стабильность работы системы электроснабжения котельной и защиту от возможных перегрузок или коротких замыканий.

Произведенные расчеты токов короткого замыкания позволят корректно выбрать электрооборудование, соответствующее всем требованиям безопасности и эксплуатационным характеристикам для системы электроснабжения котельной.

5 Выбор высоковольтного и низковольтного оборудования

5.1 Выбор высоковольтного оборудования

Токоведущие части и все виды аппаратов должны выбираться в соответствии с максимальными величинами (ток, напряжение, мощность) для нормального режима и для режима короткого замыкания. Для их выбора сравнивают указанные расчетные величины с допускаемыми значениями, на основании чего составляем таблицы сравнения расчетных и допустимых величин, причем для обеспечения надежности расчетные величины должны быть меньше допустимых.

Выбор шин.

Шины выбирают по номинальному току, а проверяют на термическое и динамическое действие токов короткого замыкания. Изоляторы выбирают на номинальное напряжение и номинальный ток и проверяют на механическую нагрузку при коротком замыкании [7]:

$$F^{(3)} = 1,76 \cdot \frac{l}{a} \cdot i_y^2 \cdot 10^{-3}, \quad (95)$$
$$F^{(3)} = 1,76 \cdot \frac{130}{30} \cdot 11,75^2 \cdot 10^{-3} = 1,1 \text{ Н.}$$

Полученное значение $F_{\text{расч}}$ не должно превышать 60% от разрушающей нагрузки для данного типа изоляторов:

$$I_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{расч}0,4} + S_{\text{расч}10}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n}, \quad (96)$$
$$I_{\text{расч}} = \frac{1190,24 + 4259,5}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 157 \text{ А.}$$

Выбирается шину АТ (15×3), $I_{\text{доп}} = 165 \text{ А.}$

Изгибающий момент, создаваемый ударным током [19]:

$$M = \frac{F^{(3)} \cdot l}{10}, \quad (97)$$

$$M = \frac{1,1 \cdot 130}{10} = 13,7 \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

Наибольшая сила, действующая на шину [19]:

$$F^{(3)} = 1,76 \cdot \frac{l}{a} \cdot i_y^2 \cdot 10^{-3}, \quad (98)$$

$$F^{(3)} = 1,76 \cdot \frac{130}{30} \cdot 11,75^2 \cdot 10^{-3} = 1,1 \text{ Н}.$$

Наибольшее механическое напряжение в металле:

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{M}{W}, \quad (99)$$

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{13,7}{0,1125} = 121,8 \text{ МПа} \not\leq 80 \text{ МПа},$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (100)$$

$$W = \frac{1,5^2 \cdot 0,3}{6} = 0,1125 \text{ см}^3.$$

Выбранная шина не прошла проверку на наибольшее механическое напряжение в металле. Проверяются шину АТ (20×3), $I_{\text{доп}} = 215 \text{ А}$ [19]:

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{M}{W}, \quad (101)$$

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{13,7}{0,2} = 68,5 \text{ МПа} < 80 \text{ МПа};$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (102)$$

$$W = \frac{2^2 \cdot 0,3}{6} = 0,2 \text{ см}^3.$$

Шина АТ (20×3) проходит проверку на наибольшее механическое напряжение в металле.

Проверяется выбранное сечение на термическую стойкость [19]:

$$S_{\min} = \frac{I_k \cdot \sqrt{t_{\text{пр}}}}{\sqrt{A}}, \quad (103)$$

$$S_{\min} = \frac{4,6126 \cdot \sqrt{0,26}}{\sqrt{1,2 \cdot 10^4}} = 20 \text{ мм}^2 < 60 \text{ мм}^2.$$

Выбираются параметры шины в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры шин

Расчетные параметры	Табличные параметры
$I_{\text{расч}} = 157 \text{ А}$	$I_{\text{доп}} = 215 \text{ А}$
$\sigma_{\text{расч}} = 68,5 \text{ МПа}$	$\sigma_{\text{доп}} = 80 \text{ МПа}$
$S_{\min} = 20 \text{ мм}^2$	$S_{\min} = 60 \text{ мм}^2$

Выбор изоляторов.

Выбирается параметры изоляторов ИО–10–3,75–3УХЛ.

Изоляторы выбирают на номинальный ток и номинальное напряжение и проверяют на режим к.з. Параметры изоляторов приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры изоляторов

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_n = 10 \text{ кВ}$	$U_n = 10 \text{ кВ}$
$F^{(3)} = 1,1 \text{ Н}$	$0,6F_{\text{разр}} = 2250 \text{ Н}$

Выбор высоковольтных выключателей.

Выбор высоковольтных выключателей на вводе и для секционирования шин. Такие выключатели выбирают по напряжению и номинальному току, по конструктивному выполнению и месту установки, по отключаемому току и мощности. Высоковольтные аппараты выбирают на основании сравнения

каталожных данных с соответствующими расчетными, данными для чего составляют сравнительную таблицу. Условие устойчивости к токам короткого замыкания проверяют сравнением величины отключаемого выключателем тока при данном напряжении с действующим током короткого замыкания, для определенного момента времени t и времени действия выключателя практически принимается, что при времени отключения выключателей равным 0,1 с.

Величина тока короткого замыкания равна начальному значению периодической слагающей тока КЗ. Разъединители – это аппараты, не предназначенные для отключения токов короткого замыкания, поэтому на отключающую способность они не проверяются, на термическую устойчивость высоковольтные аппараты проверяются по условию [24]:

$$I_t^2 \cdot t \geq I_{\infty}^2 \cdot t_{\text{пр}}, \quad (104)$$

где I_t – ток термической устойчивости, который допускается заводом изготовителем в течении времени t .

Динамическую устойчивость аппаратов проверяют сравнением $i_{\text{макс}}$ (по таблице), с i_y (по расчету).

Выбирается вакуумный выключатель типа ВР1–10–12,5/630У2, производства компании «Высоковольтный союз» [21].

$$I_K^2 \cdot t_{\text{пр}} = 4,613^2 \cdot 0,26 = 5,53 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$I_t^2 \cdot t = 12,5^2 \cdot 3 = 469 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$S_K = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_K = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 4,6126 = 80 \text{ МВА};$$

$$S_{\text{откл}} = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_{\text{откл}} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 12,5 = 217 \text{ МВА}.$$

Выбор выключателей проведён в таблице 7.

Таблица 7 – Выбор выключателей

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_H = 10 \text{ кВ}$	$U_H = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{расч}} = 157 \text{ А}$	$I_H = 630 \text{ А}$
$i_y = 11,75 \text{ кА}$	$i_{\text{макс}} = 32 \text{ кА}$
$I_K = 4,6126 \text{ кА}$	$I_{\text{откл}} = 12,5 \text{ кА}$
$I_K^2 \cdot t_{\text{пр}} = 5,53 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t = 469 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$S_K = 80 \text{ МВА}$	$S_{\text{откл}} = 217 \text{ МВА}$

Выбор высоковольтных выключателей для подключения высоковольтных двигателей.

Расчетный ток газоперекачивающих агрегатов, номинальной активной мощностью $P_H = 1600 \text{ кВт}$ [24]:

$$I_{\text{расч}} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi \cdot \eta} \quad (105)$$

$$I_{\text{расч}} = \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,9 \cdot 0,93} = 110,4 \text{ А.}$$

Выбирается вакуумный выключатель типа ВР1–10–12,5/630У2, производства компании «Высоковольтный союз» [21]. Выбор данных выключателей показан в таблице 8.

Таблица 8 – Выбор выключателей

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_H = 10 \text{ кВ}$	$U_H = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{расч}} = 110,4 \text{ А}$	$I_H = 630 \text{ А}$
$i_y = 11,75 \text{ кА}$	$i_{\text{макс}} = 32 \text{ кА}$
$I_K^2 \cdot t_{\text{пр}} = 5,53 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_t^2 \cdot t = 469 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

Выбор кабелей для высоковольтных двигателей.

Газоперекачивающие агрегаты, $P_H = 1600 \text{ кВт}$.

Выбирается кабель АСБ (3×70) [22] в таблице 9.

Таблица 9 – Выбор кабелей

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_H = 10 \text{ кВ}$	$U_H = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{расч}} = 110,4 \text{ А}$	$I_{\text{доп}} = 130 \text{ А}$
$t_{\text{расч}}^0 = 15^\circ \text{C}$	$t_{\text{расч}}^0 = 60^\circ \text{C}$
$\Delta U\%_{\text{расч}} = 0,1\%$	$\Delta U\%_{\text{доп}} = 5\%$
$S_{\text{мин}} = 25 \text{ мм}^2$	$S_{\text{ст}} = 70 \text{ мм}^2$

Выбор трансформаторов тока.

Выбор трансформаторов тока на вводе и секционирование шин.

Выбирают по номинальным токам и напряжению, нагрузке первичной и вторичной обмоток, по классу точности, по допускаемой погрешности и проверяют на термическую и динамическую устойчивость к токам КЗ и 10% погрешность в цепях защиты. К трансформаторам тока подключается, как правило, амперметр, ваттметр, варметр, счетчики активной и реактивной энергии [24].

Выбирается трансформатор тока типа ТПЛ 10–М. Выбор показан в таблице 10.

Таблица 10 – Выбор трансформаторов тока

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_H = 10 \text{ кВ}$	$U_H = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{расч}} = 157 \text{ А}$	$I_{1H} = 200 \text{ А}$
$i_y = 11,75 \text{ кА}$	$i_{\text{макс}} = 74,95 \text{ кА}$
$I_K^2 \cdot t_{\text{пр}} = 5,53 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$(K_t \cdot I_{1H})^2 \cdot t = 432 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

$$i_{\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot K_{\text{дин}} \cdot I_{1H} = \sqrt{2} \cdot 265 \cdot 200 = 74,95 \text{ кА};$$

$$(K_t \cdot I_{1H})^2 \cdot t = (60 \cdot 0,2)^2 \cdot 3 = 432 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Выбор трансформаторов тока для высоковольтных двигателей

Газоперекачивающие агрегаты, $P_H = 1600 \text{ кВт}$:

Выбирается трансформатор тока типа ТПЛ 10–М по таблице 11.

Таблица 11 – Выбор трансформаторов тока

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_H = 10 \text{ кВ}$	$U_H = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{расч}} = 110,4 \text{ А}$	$I_{1H} = 150 \text{ А}$
$i_y = 11,75 \text{ кА}$	$i_{\text{макс}} = 56,21 \text{ кА}$
$I_K^2 \cdot t_{\text{пр}} = 5,53 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$(K_t \cdot I_{1H})^2 \cdot t = 243 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

Кратность тока динамической стойкости определяется по [25]:

$$K_t = \frac{I_{H1}}{I_{H2}} = \frac{I_H}{S}. \quad (106)$$

Схема подключения приборов на трансформатор тока приведена на рисунке 8.

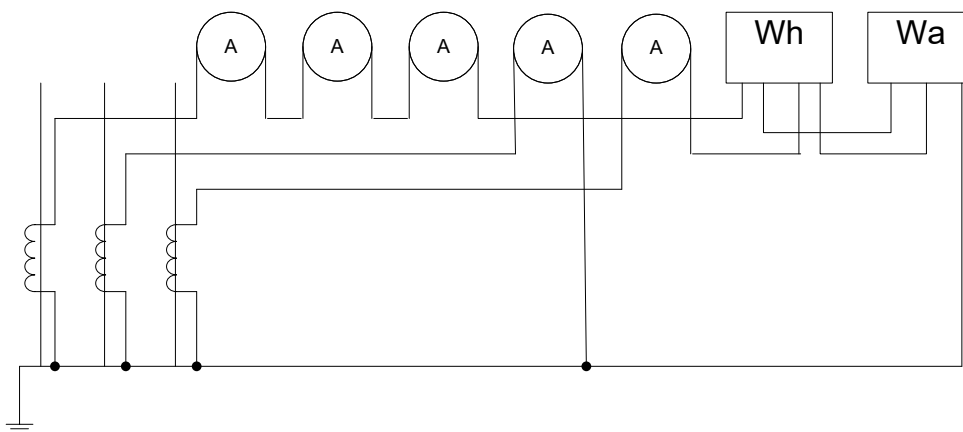


Рисунок 8 – Схема подключения приборов на трансформатор тока

Трансформаторы тока проверяются дополнительно по вторичной нагрузке. Вторичной нагрузкой трансформатора тока $Z_{H.TT}$ – называется полное сопротивление вторичной цепи, которое равно сумме сопротивлений всех последовательно включенных катушек приборов, ремонтно–соединительных проводов и переходных контактов [24]:

$$Z_{H.TT} = \sum Z_{\text{приб}} + Z_{\text{пров}} + 0,01 \cdot n_K; \quad (107)$$

где n_k – число контактов и в практических расчетах

$$\sum Z_k = 0,1 \text{ Ом} = 0,01 \cdot n_k.$$

Принимая по справочникам допустимое сопротивление $Z_{нт}$ и сопротивление включенных приборов можно определить требуемое сечение соединительных проводов [24]:

$$Z_{\text{пров}} = Z_{\text{н.тт}} - \sum Z_{\text{приб}} - \sum Z_k; \quad (108)$$

$$Z_{\text{пров}} \approx R_{\text{пров}};$$

$$S_{\text{пров}} = \frac{l_{\text{расч}}}{\gamma \cdot R_{\text{пров}}}; \quad (109)$$

$$l_{\text{расч}} = 1,5 \cdot l_{\text{дейст}};$$

где $l_{\text{дейст}}$ – действительная длина соединительных проводов, $l_{\text{дейст}} = 20$;

γ – удельное сопротивление проводов, для меди $\gamma = 54$.

Сопротивления приборов и $Z_{\text{н.тт}}$ определяются по [5].

Определяется $Z_{\text{н.тт}}$ по каталогу при классе точности 0,5.

$Z_{\text{н.тт}} = 0,4 \text{ Ом}$.

Сопротивление проводов.

$$Z_{\text{пров}} = Z_{\text{н.тт}} - \sum Z_{\text{приб}} - Z_k \quad (110)$$

$$Z_{\text{пров}} = 0,4 - (0,07 \cdot 3 + 0,04 + 0,02) - 0,1 = 0,03 \text{ Ом}.$$

Сечение провода:

$$S_{\text{пров}} = \frac{l_{\text{расч}}}{\gamma \cdot R_{\text{пров}}} \quad (111)$$

$$S_{\text{пров}} = \frac{1,5 \cdot 20}{24 \cdot 0,03} = 18,52 \text{ мм}^2.$$

Принимается ближайшее стандартное сечение 25 мм^2 .

Выбор трансформатора напряжения.

Выбирается трехфазный трансформатор напряжения типа НТМИ–10, который допускает нагрузку 80 ВА в классе точности 0,5.

Схема соединения приборов на трансформатор напряжения приведена на рисунке 9.

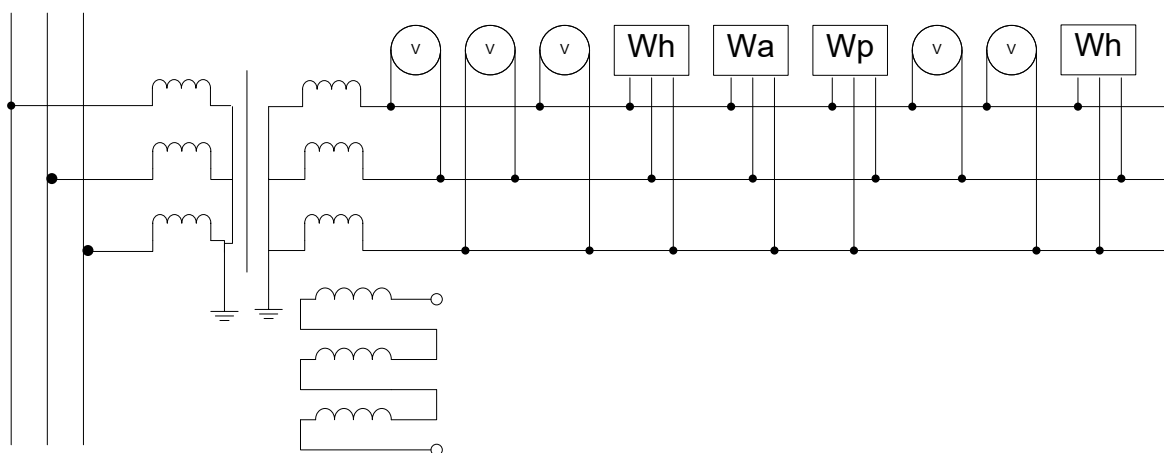


Рисунок 9 – Схема соединения приборов на трансформатор напряжения

Составляется таблица 12 распределения нагрузок между фазами:

Таблица 12 – Таблица распределения нагрузок между фазами

Прибор	Между фазами											
	AB				BC				AC			
	S, BA	cos φ	P=S·cos φ, Вт	Q=S·sin φ, Вар	S, BA	cos φ	P=S·cos φ, Вт	Q=S·sin φ, Вар	S, BA	cos φ	P=S·cos φ, Вт	Q=S·sin φ, Вар
Вольтметр	9,4	1	9,4	0	4,7	1	4,7	0	9,4	1	9,4	0
Ваттметр активный	5	0,4	2	4,55	5	0,4	2	4,55	–	–	–	
Ваттметр реактивный	–	–	–	–	5	0,4	2	4,55	5	0,4	2	4,55
Счетчик	2,5	0,4	1	2,3	5	0,4	2	4,6	5	0,4	2	4,6
Итого			12,4	6,85			10,7	13,7			13,4	9,15

Составляем таблицу 13 распределения нагрузок по фазам.

Таблица 13 – Таблица распределения нагрузок по фазам

Фаза	Формула	ΣP , Вт	ΣQ , Вар	$S_{\text{НТН}}$, ВА
А	$P_A = \frac{P_{AB} + P_{AC}}{2}$ $Q_A = \frac{Q_{AB} + Q_{AC}}{2}$	12,9	8	—
В	$P_B = \frac{P_{AB} + P_{BC}}{2}$ $Q_B = \frac{Q_{AB} + Q_{BC}}{2}$	11,55	10,275	—
С	$P_C = \frac{P_{AC} + P_{BC}}{2}$ $Q_C = \frac{Q_{AC} + Q_{BC}}{2}$	12,05	11,425	—
Общая мощность трех фаз	—	36,5	19,7	41,5

Выбор КТП и проверка высоковольтного оборудования, которым она комплектуется на соответствие расчетным параметрам приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Выбор КТП

Наименование параметра	Значение
Мощность, кВА	1000
Номинальное напряжение ВН, кВ	10
Номинальное напряжение НН, кВ	0,4
Наибольшее рабочее напряжение на стороне ВН, кВ	12
Номинальный ток сборных шин ВН, А	75
Номинальный ток сборных шин НН, А	1000
Ток термической стойкости в течение 1 с на ВН, кА	20
Ток термической стойкости в течение 1 с на ВН, кА	20
Ток электродинамической стойкости на ВН, кА	51
Ток электродинамической стойкости на ВН, кА	51

Расчетный ток равен:

$$I_{\text{расч}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot n}, \quad (112)$$

$$I_{\text{расч}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 58 \text{ A.}$$

Выбирается выключатель нагрузки автогазовый переменного тока с заземляющими ножами и предохранителями типа ВНА–10/630–2ОУ2 [23]. Результаты выбора приведены в таблице 15.

$$S_{\text{к}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot I_{\text{к}}, \quad (113)$$

$$S_{\text{к}} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 4,613 = 80 \text{ МВА.}$$

Таблица 15 – Выбор выключателя нагрузки

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_{\text{н}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{н}} = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{расч}} = 58 \text{ А}$	$I_{\text{н}} = 630 \text{ А}$
$I_{\text{к}} = 4,613 \text{ кА}$	$I_{\text{откл}} = 20 \text{ кА}$
$i_{\text{у}} = 11,75 \text{ кА}$	$i_{\text{макс}} = 51 \text{ кА}$
$S_{\text{к}} = 80 \text{ МВА}$	$S_{\text{к}} = 200 \text{ МВА}$

Выбирается плавкий предохранитель ПКТ 102–6–80–20У3. Результаты выбора приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Выбор предохранителя

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_{\text{н}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{н}} = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{расч}} = 58 \text{ А}$	$I_{\text{н}} = 630 \text{ А}$
$I_{\text{к}} = 4,613 \text{ кА}$	$I_{\text{откл}} = 20 \text{ кА}$

Далее выполняется выбор низковольтного оборудования.

5.2 Выбор низковольтного оборудования

Выбор шин.

Расчет и выбор аналогичен расчету высоковольтных шин, только токи КЗ берутся с низкой стороны.

Проверяются ранее выбранные шины типа АТ (60×6) (из расчета токов КЗ с НН) на электродинамическое и электротермическое действие токов КЗ.

Наибольшая сила, действующая на шину [24]:

$$F^{(3)} = 1,76 \cdot \frac{l}{a} \cdot i_y^2 \cdot 10^{-3}, \quad (114)$$
$$F^{(3)} = 1,76 \cdot \frac{130}{30} \cdot 24,48^2 \cdot 10^{-3} = 4,6 \text{ Н.}$$

Изгибающий момент создаваемый ударным током:

$$M = \frac{F^{(3)} \cdot l}{10}, \quad (115)$$
$$M = \frac{4,6 \cdot 130}{10} = 59,4 \text{ Н} \cdot \text{см.}$$

Наибольшее механическое напряжение в металле:

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad (116)$$
$$\sigma = \frac{59,4}{5,4} = 11 \text{ МПа,}$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (117)$$
$$W = \frac{6^2 \cdot 0,6}{4} = 5,4 \text{ см}^3.$$

Проверяется шина на термическую стойкость:

$$S_{\text{мин}} = \frac{I_{\text{к}} \cdot \sqrt{t_{\text{пр}}}}{\sqrt{A}}, \quad (118)$$

$$S_{\text{мин}} = \frac{11,75 \cdot \sqrt{0,26}}{\sqrt{1,2 \cdot 10^4}} = 55 \text{ мм}^2.$$

Выбирается параметры шины. Выбор представлен в таблице 17.

Таблица 17 – Параметры шин

Расчетные параметры	Табличные параметры
$I_{\text{расч}} = 859 \text{ А}$	$I_{\text{доп}} = 880 \text{ А}$
$\sigma_{\text{расч}} = 11 \text{ МПа}$	$\sigma_{\text{доп}} = 80 \text{ МПа}$
$S_{\text{мин}} = 55 \text{ мм}^2$	$S_{\text{мин}} = 360 \text{ мм}^2$

Всю низковольтную нагрузку распределяем на две шины. Потребители мощностью менее 40 кВт распределяем на 6 распределительных пунктов:

- РП–1, $P_{\text{РП-1}} = 41 \text{ кВт}$, $\cos\varphi = 0,75$, 5 электрических задвижек по 4,5 кВт, 7 электрических задвижек по 7 кВт;
- РП–2, $P_{\text{РП-2}} = 41 \text{ кВт}$, $\cos\varphi = 0,75$, 5 электрических задвижек по 4,5 кВт, 7 электрических задвижек по 7 кВт;
- РП–3, $P_{\text{РП-1}} = 43 \text{ кВт}$, $\cos\varphi = 0,7$, 1 кран-балка 4,5 кВт, 3 вытяжных вентилятора 4,5 кВт, 2 электрических задвижки по 7 кВт, 1 дренажный насос 11 кВт;
- РП–4, $P_{\text{РП-4}} = 41 \text{ кВт}$, $\cos\varphi = 0,75$, 5 электрических задвижек по 4,5 кВт, 7 электрических задвижек по 7 кВт;
- РП–5, $P_{\text{РП-5}} = 41 \text{ кВт}$, $\cos\varphi = 0,75$, 5 электрических задвижек по 4,5 кВт, 7 электрических задвижек по 7 кВт;
- РП–6, $P_{\text{РП-1}} = 43 \text{ кВт}$, $\cos\varphi = 0,76$, 1 кран-балка 4,5 кВт, 3 вытяжных вентилятора 4,5 кВт, 2 электрических задвижки по 7 кВт, 1 дренажный насос 11 кВт.

Выбор кабелей для низковольтных двигателей и РП.

Кабели выбираются по расчетному току.

Кабели выбираются четырехжильные, для двигателей мощностью до 40 кВт выбираются кабели типа ВВГнг, а для двигателей свыше 40 кВт – АСБ.

Вакуумный насос.

Определяется расчетный ток:

$$I_{\text{расч}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta}, \quad (119)$$

$$I_{\text{расч}} = \frac{55}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,8 \cdot 0,93} = 112 \text{ А.}$$

Выбирается кабель ВВГнг (3×70+1×25).

Проверяется кабель по потере напряжения:

$$\Delta U \%_{\text{расч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{расч}} \cdot l \cdot (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi)}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (120)$$

$$\Delta U \%_{\text{расч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 112 \cdot 0,03 \cdot (0,358 \cdot 0,8 + 0,08 \cdot 0,6)}{380} \cdot 100\% = 0,5\%,$$

$$l = 0,03 \text{ км}; \gamma_{\text{Al}} = 39,9; S = 70 \text{ мм}^2,$$

$$x_0 = 0,08 \text{ Ом/км},$$

$$r_0 = \frac{1000}{\gamma_{\text{Al}} \cdot S}, \quad (121)$$

$$r_0 = \frac{1000}{39,9 \cdot 70} = 0,358 \text{ Ом/км.}$$

Для остальных двигателей кабеля выбираются аналогично. Кабели компрессорной приведен в таблице 18.

Таблица 18 – Выбор кабелей

Наименование оборудования	$P_{\text{расч}},$ кВт	$I_{\text{расч}},$ А	Кабель		$I_{\text{доп}},$ А	$\Delta U \%_{\text{расч}}$
			Марка	Сечение		
Электроосвещение	100	172	АСБ	(3×120+1×35)	190	0,53
Вакуумный насос	55	112	АСБ	(3×70+1×25)	126	0,5
Дренажный насос	11	22	ВВГнг	5×4	32	1,5
Электрическая задвижка	7	15	ВВГнг	5×2,5	25	1,6
Электрическая задвижка	4,5	10	ВВГнг	5×2,5	25	1
Турбодетандер	90	196	АСБ	(3×150+1×50)	212	0,48
Кран-балка	4,5	12,3	ВВГнг	5×2,5	25	1,3

Продолжение таблицы 18

Наименование оборудования	$P_{\text{расч}},$ кВт	$I_{\text{расч}},$ А	Кабель		$I_{\text{доп}},$ А	$\Delta U\%_{\text{расч}}$
			Марка	Сечение		
Сварочный аппарат	4,5	18,4	ВВГнг	5×4	32	0,65
Вытяжной вентилятор	4,5	9,2	ВВГнг	5×2,5	25	1
РП–1	41	89,31	АСБ	(3×16+1×10)	90	1,5
РП–2	41	89,31	АСБ	(3×16+1×10)	90	1,5
РП–3	43	100,4	АСБ	(3×25+1×16)	115	3,5
РП–4	41	89,31	АСБ	(3×16+1×10)	90	1,5
РП–5	41	89,31	АСБ	(3×16+1×10)	90	1,5
РП–6	43	92,43	АСБ	(3×25+1×16)	115	3,2

Выбор пускателей и контакторов для низковольтных двигателей

Для двигателей до 40 кВт выбирают пускатели, а свыше – контакторы, по таблицам в справочнике.

Выбор пускателей дренажного насоса приведен в таблице 19.

Таблица 19 – Выбор пускателей дренажного насоса

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$	$U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$
$P_{\text{расч}} = 11 \text{ кВт}$	$P_{\text{н}} = 11 \text{ кВт}$
$I_{\text{расч}} = 22 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 25 \text{ А}$

Выбирается пускатель типа – КМА(р)2510.

Для остальных двигателей пускатели выбираются аналогично и сведены в таблицу 20.

Таблица 20 – Выбор пускателей

Наименование оборудования	$P_{\text{расч}},$ кВт	$I_{\text{расч}},$ А	Тип пускателя	$P_{\text{н}},$ кВт	$I_{\text{ном}},$ А
Дренажный насос	11	22	КМА(р)2510	11	25
Электрическая задвижка	7	15	КМА(р)1810	7,5	18
Электрическая задвижка	4,5	10	КМА(р)1210	5,5	12
Кран-балка	4,5	12,3	КМА(р)1810	7,5	18
Сварочный аппарат	4,5	18,4	КМА(р)2510	11	25
Вытяжной вентилятор	4,5	9,2	КМА(р)1210	5,5	12

Выбор контакторов.

Выбор контакторов для вакуумного насоса приведён в таблице 21.

Таблица 21 – Выбор контактора для вакуумного насоса

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_n = 380 \text{ В}$	$U_n = 380 \text{ В}$
$I_{\text{расч}} = 112 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 160 \text{ А}$

Выбирается контактор типа КТ6022Б.

Для остальных двигателей пускатели и контакторы выбираются аналогично. Результаты выбора сведены в таблицу 22.

Таблица 22 – Выбор контакторов

Наименование оборудования	$P_{\text{расч}}$, кВт	$I_{\text{расч}}$, А	Тип контактора	$I_{\text{ном}}$, А
Вакуумный насос	55	112	КТ6022Б	160
Турбодетандер	90	196	КТ6032Б	250

Выбор автоматов на вводах и для секционирования шин:

$$I_{\text{расч}_{0,4}} = \frac{S_{\text{расч}_{0,4}}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi}, \quad (122)$$

$$I_{\text{расч}_{0,4}} = \frac{1190,24}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,84} = 2315 \text{ А}.$$

Выбирается автоматический выключатель ЭО25В. Выбор данного автоматического выключателя приведён в таблице 23.

Таблица 23 – Выбор автоматических выключателей

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_n = 380 \text{ В}$	$U_n = 380 \text{ В}$
$I_{\text{расч}} = 2315 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 2500 \text{ А}$
$I_k = 11,75 \text{ кА}$	$I_{\text{откл}} = 50 \text{ кА}$

Выбор автоматов для низковольтных двигателей и РП

Автоматы проверяются по следующим параметрам в следующем порядке: расчетный ток двигателя; пусковой ток двигателя; номинальный ток расцепителя максимального тока автомата ближайший к номинальному току. Проверка электромагнитного расцепителя, на котором ток трогания отсечки установлен равным $10 \cdot I_{\text{эл.м.р.}}$.

Вакуумный насос.

Определяется пусковой ток двигателя:

$$I_{\text{п}} = K_{\text{п}} \cdot I_{\text{расч}} \quad (123)$$

где $K_{\text{п}}$ – пусковой коэффициент, для выключателя ВА57–33 $K_{\text{п}} = 4,5$.

$$I_{\text{п}} = 4,5 \cdot 112 = 504 \text{ A};$$

Выбор номинального тока расцепителя: ВА57–33, $I_{\text{ном}} = 160 \text{ A}$ [23].

Определяется ток электромагнитного расцепителя: $I_{\text{эл.м.р.}} = 125 \text{ A}$ [23].

Проверка по максимальному кратковременному току отсечения:

$$\begin{aligned} 10 \cdot I_{\text{эл.м.р.}} &\geq 1,25 \cdot I_{\text{п}}, \\ 1250 &\geq 630. \end{aligned}$$

Выбор автоматических выключателей вакуумного насоса приведен в таблице 24.

Таблица 24 – Выбор автоматических выключателей вакуумного насоса

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$	$U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$
$I_{\text{расч}} = 112 \text{ А}$	$I_{\text{н}} = 160 \text{ А}$
$I_{\text{расч}} = 112 \text{ А}$	$I_{\text{эл.м.р.}} = 125 \text{ А}$
$1,25 \cdot I_{\text{п}} = 630 \text{ А}$	$10 \cdot I_{\text{эл.м.р.}} = 1250 \text{ А}$

Для остальных двигателей и РП автоматы выбираются аналогично.
Результаты выбора приведены в таблице 25.

Таблица 25 – Выбор автоматических выключателей

Наименование оборудования	$P_{\text{расч}},$ кВт	$I_{\text{расч}},$ А	$1,25 \cdot I_{\text{п}},$ А	Тип автомата	$I_{\text{н}},$ А	$I_{\text{эл.м.р}},$ А	$10 \cdot I_{\text{эл.м.р}},$ А
Электроосвещение	100	172	967,5	ВА 57–35	250	200	2000
Вакуумный насос	55	112	630	ВА 57–33	160	125	1250
Дренажный насос	11	22	127,75	ВА 57–31	100	25	250
Электрическая задвижка	7	15	84,375	ВА 57–31	100	20	200
Электрическая задвижка	4,5	10	56,25	ВА 57–31	100	16	160
Турбодетандер	90	196	1102,5	ВА 57–35	250	200	2000
Кран-балка	4,5	12,3	69,19	ВА 57–31	100	16	160
Сварочный аппарат	4,5	18,4	103,5	ВА 57–31	100	20	200
Вытяжной вентилятор	4,5	9,2	51,75	ВА 57–31	100	16	160
РП–1	41	89,31	502	ВА 57–31	100	100	1000
РП–2	41	89,31	502	ВА 57–31	100	100	1000
РП–3	43	100,4	565	ВА 57–33	160	125	1250
РП–4	41	89,31	502	ВА 57–31	100	100	1000
РП–5	41	89,31	502	ВА 57–31	100	100	1000
РП–6	43	92,43	520	ВА 57–31	100	100	1000

Выбор рубильников для РП и освещения

Определяется расчетный ток для РП–1:

$$I_{\text{расч}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} \quad (124)$$

$$I_{\text{расч}} = \frac{41}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,75 \cdot 0,93} = 89,31 \text{ А.}$$

Выбирается рубильник типа Р–34. Расчет проведен в таблице 26.

Таблица 26 –Выбор рубильника

Расчетные параметры	Табличные параметры
$U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$	$U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$
$I_{\text{расч}} = 89,31 \text{ А}$	$I_{\text{н}} = 400 \text{ А}$
$i_{\text{у}} = 24,48 \text{ кА}$	$i_{\text{макс}} = 30 \text{ кА}$
$I_{\text{к}}^2 \cdot t_{\text{пр}} = 36 \text{ кА} \cdot \text{с}^2$	$I_{\text{т}}^2 \cdot t = 144 \text{ кА} \cdot \text{с}^2$

Остальные расчеты аналогичны, результаты расчетов заносятся в таблицу 27.

Таблица 27 – Выбор рубильников

Наименование оборудования	$P_{\text{расч}}$, кВт	$I_{\text{расч}}$, А	i_y , кА	$I_k^2 \cdot t_{\text{пр}}$, кА $\cdot$ с ²	Тип рубильника	I_n , А	$i_{\text{макс}}$, кА	$I_t^2 \cdot t$, кА $\cdot$ с ²
Электроосвещение	100	172	24,4	36	Р34	400	30	144
РП-1	41	89,31	24,4	36	Р34	400	30	144
РП-2	41	89,31	24,4	36	Р34	400	30	144
РП-3	43	100,4	24,4	36	Р34	400	30	144
РП-4	41	89,31	24,4	36	Р34	400	30	144
РП-5	41	89,31	24,4	36	Р34	400	30	144
РП-6	43	92,43	24,4	36	Р34	400	30	144

Составляется таблица 28 с выбранным низковольтным оборудованием компрессорной.

Таблица 28 – Таблица с выбранным оборудованием

Наименование оборудования	Кол-во	$P_{\text{расч}}$, кВт	$I_{\text{расч}}$, А	Тип пускателя или контактора	Тип автомата	Кабель		Тип рубильника
						Марка	Сечение	
Электроосвещение	1	100	172	–	ВА 57–35	АСБ	(3×120+1×35)	Р34
Вакуумный насос	2	55	112	КТ6022Б	ВА 57–33	АСБ	(3×70+1×25)	–
Турбодетандер	8	90	196	КТ6032Б	ВА 57–35	АСБ	(3×150+1×50)	–
РП-1	1	41	89,31	–	ВА 57–31	АСБ	(3×16+1×10)	Р34
Эл.задвижка	2	7	15	КМА(р)1810	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
Эл.задвижка	6	4,5	10	КМА(р)1210	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
РП-2	1	41	89,31	–	ВА 57–31	АСБ	(3×16+1×10)	Р34
Эл.задвижка	2	7	15	КМА(р)1810	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
Эл.задвижка	6	4,5	10	КМА(р)1210	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
РП-3	1	43	100,4	–	ВА 57–33	АСБ	(3×25+1×16)	Р34
Кран-балка	1	4,5	12,3	КМА(р)2510	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
Сварочный аппарат	1	4,5	18,4	КМА(р)1810	ВА 57–31	ВВГнг	5×4	–
Вытяжной вентилятор	2	4,5	9,2	КМА(р)1210	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
Эл.задвижка	2	7	15	КМА(р)1810	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
Дренажный насос	1	11	22	КМА(р)2510	ВА 57–31	ВВГнг	5×4	–
РП-4	1	41	89,31	–	ВА 57–31	АСБ	(3×16+1×10)	Р34
Эл.задвижка	2	7	15	КМА(р)1810	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–

Продолжение таблицы 28

Наименование оборудования	Кол-во	$P_{расч}, кВт$	$I_{расч}, А$	Тип пускателя или контактора	Тип автомата	Кабель		Тип рубильника
						Марка	Сечение	
Эл.задвижка	6	4,5	10	КМА(р)1210	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
РП–5	1	41	89,31	–	ВА 57–31	АСБ	(3×16+1×10)	Р34
Эл.задвижка	2	7	15	КМА(р)1810	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
Эл.задвижка	6	4,5	10	КМА(р)1210	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
РП–6	1	43	92,43	–	ВА 57–31	АСБ	(3×25+1×16)	Р34
Кран-балка	1	4,5	12,3	КМА(р)2510	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
Вытяжной вентилятор	3	4,5	9,2	КМА(р)1210	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
Эл.задвижка	2	7	15	КМА(р)1810	ВА 57–31	ВВГнг	5×2,5	–
Дренажный насос	1	11	22	КМА(р)2510	ВА 57–31	ВВГнг	5×4	–

Выводы по разделу пять.

В пятом разделе ВКР выбрано высоковольтное и низковольтное оборудование.

Высоковольтные двигатели подключаются кабелями АСБ (3×70). В КТП на стороне 10 кВ применяются шины АТ (20×3), которые крепятся при помощи изоляторов ИО–10–3,75–3УХЛ. В РУ 10 кВ приняты вакуумные выключатели типа ВР1–10–12,5/630У2, трансформаторы тока ТПЛ–10М, трансформаторы напряжения НТМИ–10. Для включения и отключения силовых трансформаторов в КТП применяются выключатели нагрузки ВНА–10/630–2ОУ2 с предохранителями ПКТ 102–6–80–20 УЗ.

В РУ 0,4 кВ применяются шины АТ (60×6). Выбраны кабели для питания низковольтных двигателей и РП. Для коммутации двигателей до 40 кВт выбраны пускатели, а свыше 40 кВт – контакторы. Для защиты низковольтных двигателей и РП выбраны автоматические выключатели типа ВА 57 и рубильники Р–34.

6 Релейная защита высоковольтного двигателя

Релейная защита является неотъемлемой частью системы автоматического управления и обеспечения безопасности электросетевого оборудования, в том числе высоковольтных двигателей. В частности, для высоковольтных двигателей напряжением 10 кВ, которые используются в различных отраслях промышленности, важным аспектом является защита от различных аварийных режимов, таких как короткие замыкания, перегрузки, повреждения изоляции и другие неисправности, которые могут привести к повреждению оборудования и нарушению нормальной работы производства.

В данном разделе необходимо выбрать типы защит и их уставки для защиты короткозамкнутого двигателя при $U = 10$ кВ; $P_H = 1600$ кВт; $\cos\varphi = 0,9$; $\eta = 0,93$; $k_{\text{пуск}} = 5$; $I_K = 6,126$ кА.

Принимаем максимально-токовую защиту от перегрузки и токовую отсечку для защиты от коротких замыканий.

Номинальный ток двигателя [1]:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos\varphi \cdot \eta}, \quad (125)$$
$$I_H = \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,9 \cdot 0,93} = 110,4 \text{ А.}$$

Ток срабатывания отсечки с отстройкой от пусковых токов при установке двух трансформаторов тока 100/5 ($k_{\text{т.т}} = 5$), включенных на разность токов ($k_{\text{сх}} = \sqrt{3}$) [1]:

$$I_{\text{ср.п}} = \frac{k_{\text{над}} \cdot k_{\text{сх}} \cdot k_{\text{пуск}} \cdot I_H}{k_{\text{т.т}}}, \quad (126)$$
$$I_{\text{ср.п}} = \frac{1,8 \cdot \sqrt{3} \cdot 5 \cdot 110,4}{20} = 86 \text{ А.}$$

Коэффициент чувствительности отсечки [1]:

$$k_{\text{ч.отс}} = \frac{I_{\text{к}}}{k_{\text{т.т}} \cdot I_{\text{ср.п}}}, \quad (127)$$
$$k_{\text{ч.отс}} = \frac{4,126}{20 \cdot 86} = 2,68 > 2.$$

Ток срабатывания защиты от перегрузки при $k_{\text{над}} = 1,2$; $k_{\text{в}} = 0,8$ [1]:

$$I_{\text{ср.п}} = \frac{k_{\text{над}} \cdot k_{\text{сх}} \cdot I_{\text{н}}}{(k_{\text{в}} \cdot k_{\text{т.т}})}, \quad (128)$$
$$I_{\text{ср.п}} = \frac{1,2 \cdot \sqrt{3} \cdot 5 \cdot 110,4}{0,8 \cdot 20} = 14,32 \text{ А.}$$

Принимается для токовой отсечки и для защиты от перегрузки реле типа РСТ–80 с уставками тока срабатывания $I_{\text{отс}} = 86 \text{ А}$, $I_{\text{пер}} = 15 \text{ А}$.

Выводы по разделу шесть.

В шестом разделе ВКР рассчитана релейная защита высоковольтного двигателя. Принимается для токовой отсечки и для защиты от перегрузки реле типа РСТ–80.

7 Расчет электрического освещения

Электрическое освещение играет ключевую роль в обеспечении комфортных и безопасных условий труда, быта и производства. Грамотно спроектированная система освещения позволяет не только повысить эффективность работы персонала, но и снизить энергопотребление, что особенно актуально в современных условиях энергосбережения.

В данном разделе проводится расчет системы электрического освещения для компрессорной станции, учитывая нормативные требования, характеристики светильников и источников света, а также экономическую целесообразность выбора оборудования. Основное внимание уделяется соответствию проектируемой системы освещения санитарным нормам, параметрам зрительной комфортности и требованиям к надежности.

В осветительных установках применяются системы общего освещения и комбинированного освещения. Система общего освещения подразделяется на общее равномерное и локализованное освещение. При общем равномерном освещении светильники располагаются равномерно, создают по возможности одинаковую освещенность. Система общего локализованного освещения рекомендуется при расположении рабочих мест сосредоточенно, отдельными участками, где требуется повышенная освещенность. Местное освещение предназначается только для освещения рабочих мест и может быть стационарным или переносным.

Расчет рабочего освещения.

Исходными данными для расчёта являются габаритные размеры компрессорной $A = 110$ м; $B = 27$ м; $H = 18$ м.

Решение.

Светильник – РСП-12-1000-011 IP23. Лампы – ДРЛ

Определяется высота: $h_c = 2,3$ м; $h_p = 1$ м.

$$h = H - (h_c + h_p), \quad (129)$$

$$h = 18 - (2,3 + 1) = 14,7 \text{ м.}$$

Определяется расстояние между светильниками

$$L = h \cdot \lambda, \quad (130)$$

$$L = 14,7 \cdot 1,4 = 20,58 \text{ м.}$$

По результатам практики L принимаем 8 м.

Расстояние от стен: $a = 0,25 \cdot L = 0,25 \cdot 8 = 2 \text{ м.}$

Общее количество светильников:

Число рядов

$$n_p = \frac{B-2a}{L} + 1, \quad (131)$$

$$n_p = \frac{27 - 2 \cdot 2}{8} + 1 = 4 \text{ ряда.}$$

Число ламп в ряду:

$$n_{\text{л}} = \frac{A-2a}{L} + 1, \quad (132)$$

$$n_{\text{л}} = \frac{110 - 2 \cdot 2}{8} + 1 = 14 \text{ шт.}$$

Всего светильников

$$n = n_p \cdot n_{\text{л}}, \quad (133)$$

$$n = 4 \cdot 14 = 56 \text{ шт.}$$

Метод коэффициента использования светового потока

Индекс помещения

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A+B)}, \quad (134)$$

$$i = \frac{110 \cdot 27}{14,7 \cdot (110 + 27)} = 1,47.$$

Коэффициент отражения

$$p_{\text{пот}} = 50\%; p_c = 30\%; p_{\text{пол}} = 10\%.$$

Площадь помещения

$$S = A \cdot B, \quad (135)$$

$$S = 110 \cdot 27 = 2970 \text{ м}^2.$$

Световой поток

$$F_{\text{л}} = \frac{E_{\text{н}} \cdot K \cdot z \cdot S}{n \cdot \eta}, \quad (136)$$

где $E_{\text{н}}$ – нормативная освещённость, для компрессорной принимается

$$E_{\text{н}} = 200 \text{ лк [17];}$$

$$K – \text{коэффициент запаса, } K = 1,5;$$

$$z – \text{коэффициент, } z = 1,15,$$

$$F_{\text{л}} = \frac{200 \cdot 1,5 \cdot 1,15 \cdot 2970}{56 \cdot 0,49} = 56012 \text{ лм.}$$

ДРЛ 1000 (12)–4 1000 Вт.

$$P_{\text{уст}} = P_{\text{л}} \cdot n = 1000 \cdot 56 = 56000 \text{ Вт.}$$

Кроме того, для освещения территории участка компрессорной и подъездных дорог используются 110 светильников РКУ-02-400-003 400 Вт

Е40 IP53 с лампами ДРЛ–00. Таким образом, суммарная мощность электроосвещения составляет 100 кВт.

Расчет аварийного освещения

Аварийное электроосвещение – часть электроосвещения, которая продолжает работать при прекращении штатной подачи электрической энергии. Для электропитания аварийного электроосвещения применяются или электросети резервного питания, или источники автономного питания (аккумуляторные батареи или генераторы). Аварийное электроосвещение предназначается для обеспечения возможности эвакуации персонала участка при отключении рабочего электроосвещения.

Определяется освещенность:

$$E = 5\% \cdot E_n = 10\% \cdot 200 = 10 \text{ лк.}$$

Количество светильников:

$$n = \frac{E \cdot K_3 \cdot Z \cdot S}{\Phi_n \cdot \eta}, \quad (137)$$
$$n = \frac{10 \cdot 1,5 \cdot 1,15 \cdot 2970}{18000 \cdot 0,49} = 6 \text{ шт.}$$

Электротехнический расчет электрического освещения компрессорной станции.

Планируется следующая разбивка светильников по группам:

Для щита аварийного освещения ЩАО от каждого автоматического выключателя подключается по 2 светильника РСП-12-1000-011 IP23. Таким образом, всего в щитке будет 3 группы. Схема щита аварийного освещения ЩАО приведена на рисунке 10.

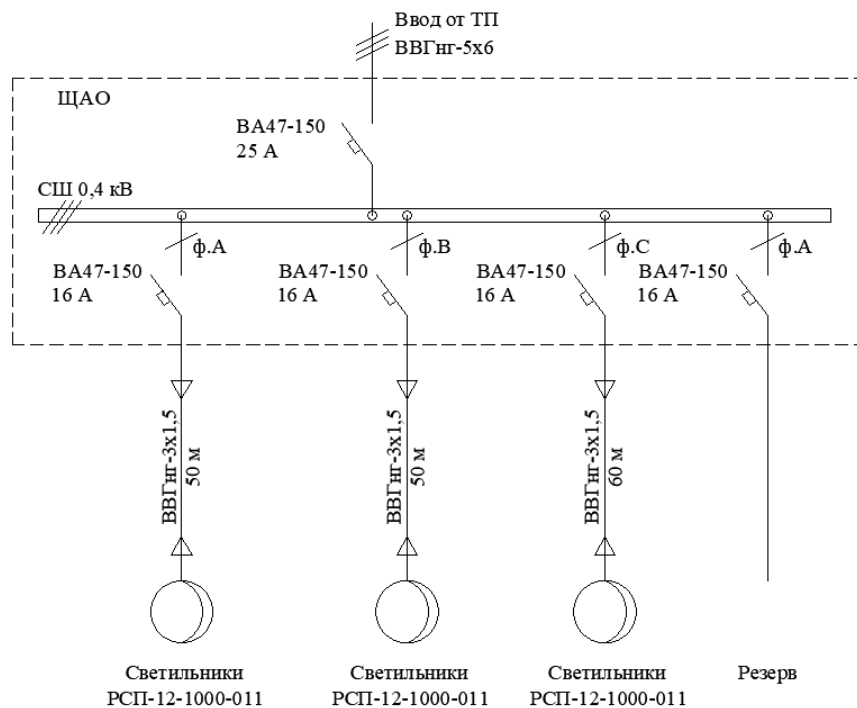


Рисунок 10 – Схема щита ЩАО

Для каждой группы ток равен:

$$I_p = \frac{n_{св} \cdot P_{л}}{U_{ном} \cdot \cos \varphi}, \quad (138)$$

где $n_{св}$ – число светильников, подключенных от каждого фидера, шт.;

$P_{л}$ – мощность лампы светильника, Вт;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение светильников, так как светильники от каждого фидера подключаются по одной фазе, то $U_{ном} = 220$ В;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности,

$$I_p = \frac{2 \cdot 1000}{220 \cdot 0,95} = 9,6 \text{ А.}$$

Принимаются однополюсные автоматические выключатели ВА47–150 с током теплового расцепителя 16 А, номинальной отключающей способностью 15 кА. Данные светильники подключаются кабелем ВВГнг 3×1,5.

Расчётный ток щита аварийного освещения ЩАО равен:

$$I_p = \frac{n_{св} \cdot P_{л}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \cos \varphi}, \quad (139)$$

$$I_p = \frac{6 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,95} = 9,6 \text{ А.}$$

С учётом согласования защит на вводе щита ЩАО принимается автоматический выключатель ВА47–150 с током теплового расцепителя 25 А, в ТП для подключения данного щита автоматический выключатель ВА57–31 с током теплового расцепителя 32 А. Кабель для подключения щита ЩАО необходимо выбирать с учётом того, чтобы автоматический выключатель защищал данный кабель. Принимается решение для подключения щита ЩАО использовать кабель ВВГнг 5×6.

Расчёт остальных щитов освещения выполняется аналогично.

В щите рабочего освещения ЩО от каждого автоматического выключателя подключается по 6 или 7 светильников РСП–12–1000–011 IP23. Все светильники разбиты на 8 групп. Для каждой группы в щите ЩО установлены трехполюсные автоматические выключатели ВА47–150 с током теплового расцепителя 16 А, номинальной отключающей способностью 15 кА. Каждая группа светильников подключается кабелем ВВГнг 5×1,5. С учётом согласования защит на вводе щита ЩО принимается автоматический выключатель ВА47–150 с током теплового расцепителя 100 А, в ТП для подключения данного щита автоматический выключатель ВА57–31 с током теплового расцепителя 125 А. Кабель для подключения щита ЩАО необходимо выбирать с учётом того, чтобы автоматический выключатель защищал данный кабель. Принимается решение для подключения щита ЩАО использовать кабель ВВГнг 5×25.

В щите уличного освещения ЩУО от каждого автоматического выключателя подключается по 4 светильника РКУ-02-400-003 400 Вт Е40 IP53 с лампами ДРЛ–400. Все светильники разбиты на 11 групп. Для каждой группы в щите ЩО установлены однополюсные автоматические выключатели ВА47–150 с током теплового расцепителя 16 А, номинальной отключающей

способностью 15 кА. Каждая группа светильников подключается кабелем ВВГнг 3×1,5. С учётом согласования защит на вводе щита ЩО принимается автоматический выключатель ВА47–150 с током теплового расцепителя 100 А, в ТП для подключения данного щита автоматический выключатель ВА57–31 с током теплового расцепителя 125 А. Кабель для подключения щита ЩАО необходимо выбирать с учётом того, чтобы автоматический выключатель защищал данный кабель. Принимается решение для подключения щита ЩАО использовать кабель ВВГнг 5×25.

Схемы щитов освещения приведены в графической части ВКР.

Выводы по разделу семь.

В седьмом разделе ВКР рассчитана система освещения компрессорной станции. Освещение компрессорной выполняется светильниками РСП–12–1000–011 IP23 с лампами ДРЛ-1000. Для освещения территории участка компрессорной и подъездных дорог используются 110 светильников РКУ-02-400-003 400 Вт Е40 IP53 с лампами ДРЛ–400. Выбраны автоматические выключатели и кабели для системы освещения компрессорной.

Заключение

В данной ВКР разработана система электроснабжения компрессорной станции «Перегибненская». В процессе проектирования были учтены нормативные требования, особенности технологического оборудования, режимы работы потребителей и требования к надежности энергоснабжения.

Приведена краткая технологическая характеристика компрессорной станции, проведен расчет электрических нагрузок компрессорной станции. Приведен план расположения электроприемников компрессорной станции «Перегибненская». Определено, что установка компенсирующих устройств в рассматриваемом участке не требуется. В ВКР рассматриваются два возможных варианта мощности трансформаторов с учетом изменения их количества, т.е. в первом варианте принимается одна двухтрансформаторная КТП с силовыми трансформаторами ТМГ–1000/10/0,4 УЗ, а во втором варианте принимается две двухтрансформаторных КТП с силовыми трансформаторами ТМГ–400/10/0,4 УЗ. Принят вариант с меньшим эксплуатационным расходом – первый вариант с установкой одной двухтрансформаторной КТП с силовыми трансформаторами ТМГ–1000/10/0,4 УЗ. Питание КТП компрессорной станции выполняется кабелем АСБ (3×150). Высоковольтные двигатели подключаются кабелями АСБ (3×70). Рассчитаны токи короткого замыкания. Выбрано оборудование участка. В КТП на стороне 10 кВ применяются шины АТ (20×3), которые крепятся при помощи изоляторов ИО–10–3,75–ЗУХЛ. В РУ 10 кВ приняты вакуумные выключатели типа ВР1–10–12,5/630У2, трансформаторы тока ТПЛ–10М, трансформаторы напряжения НТМИ–10. Для включения и отключения силовых трансформаторов в КТП применяются выключатели нагрузки ВНА–10/630–2ОУ2 с предохранителями ПКТ 102–6–80–20 УЗ.

В РУ 0,4 кВ применяются шины АТ (60×6). Выбраны кабели для питания низковольтных двигателей и РП. Для коммутации двигателей до 40 кВт выбраны пускатели, а свыше 40 кВт – контакторы. Для защиты низковольтных

двигателей и РП выбраны автоматические выключатели типа ВА 57 и рубильники Р-34.

Разработана релейная защита высоковольтного двигателя.

Рассчитано электрическое освещение компрессорной станции. Освещение компрессорной выполняется светильниками РСП-12-1000-011 IP23 с лампами ДРЛ-1000. Для освещения территории участка компрессорной и подъездных дорог используются 110 светильников РКУ-02-400-003 400 Вт Е40 IP53 с лампами ДРЛ-400. Выбраны автоматические выключатели и кабели для системы освещения компрессорной.

Применение предложенных технических решений обеспечит надежную и экономичную работу системы электроснабжения, снижение потерь электроэнергии, а также высокий уровень автоматизации и контроля за процессами энергоснабжения. Разработанная система соответствует действующим нормативным документам и требованиям промышленной безопасности, что подтверждает ее целесообразность и возможность практической реализации.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Агафонов А.И., Бростилова Т.Ю., Джазовский Н.Б. Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. 3–е изд. Вологда: Инфра–Инженерия, 2025. 287 с.
2. Бакшаева Н.С. Расчёт электрических нагрузок, учебно–справочное пособие. Киров: Издательство ВятГУ, 2008. 129с.
3. Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Электроснабжение промышленных и гражданских объектов. Вологда: Инфра–Инженерия, 2022. 204 с.
4. ГОСТ 28249–93 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока до 1 кВ // Консультант плюс: справочно–правовая система
5. Кабышев А.В., Обухов С.Г. Расчет и проектирование систем электроснабжения объектов и установок: Учеб. пособие. Томск: Изд–во ТПУ, 2006. 415 с.
6. Кудрин Б.И. Быстрицкий Г.Ф. Электроснабжение. Силовые трансформаторы 2–е изд., испр. и доп. Учебное пособие для академического бакалавриата. М.: ЮРАЙТ, 2016. 176 с.
7. Мещеряков В.Н., Сычев М.Н., Крюков О.В. Современные электроэнергетические и электромеханические системы компрессорных станций газопроводов. Вологда: Инфра–Инженерия, 2022. 364 с.
8. Панова Е.А., Варганова А.В. Проектирование электроснабжения. Учебное пособие. Вологда: Инфра–Инженерия, 2024. 505 с.
9. Правила устройства электроустановок // Консультант плюс: справочно–правовая система
10. Приказ Минэнерго от 23 июня 2015 года N 380 О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии // Консультант плюс: справочно–правовая система

11. РД 153–34.0–20.527–98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования // Консультант плюс: справочно–правовая система
12. Рогова О.Е. Внутреннее и внешнее электроснабжение промышленных и гражданских зданий. Методические указания по выполнению расчётных (практических) работ. М.: КноРус, 2024. 93 с.
13. Родыгина С.В. Проектирование и эксплуатация систем электроснабжения. От теории к практике. Новосибирск : Издательство НГГУ, 2018. 100 с.
14. Сибикин Ю.М., Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Директ–Медиа, 2014. 338 с.
15. Сизганова Е.Ю. Петухов Р. Электроснабжение. Учебное пособие. Красноярск : Издательство СФУ, 2022. 328 с.
16. Сопов В.И. Щуров Н.И. Электроснабжение нефтегазовых комплексов и производств. Практикум. Новосибирск : ООО «МЦ ЭОР», 2017. 168 с.
17. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» (актуализированная редакция СНиП 23–05–95*) // Консультант плюс: справочно–правовая система
18. Сташко В.И. Проектирование и расчеты систем электроснабжения. Учебно–методическое пособие. Барнаул : Издательство НГГУ, 2020. 43 с.
19. Степанов В. М., Косырихин В. С. Системы электроснабжения промышленных предприятий : учебно–методическое пособие. Тула : Изд–во ТулГУ, 2013. 368 с.
20. Технические характеристики силовых трансформаторов. URL: <http://metz.by> (дата обращения 16.02.2025 г.)
21. Технические характеристики вакуумных выключателей BP1. URL: <https://www.vsoyuz.com/ru/produkcija/cb/vakuumnye-vyklyuchateli-10-kv/vr1.htm> (дата обращения 16.02.2025 г.)

22. Технические характеристики кабелей. URL: <http://www.kamkabel.ru>
(дата обращения 16.02.2025 г.)

23. Технические характеристики электрооборудования. URL:
<https://keaz.ru/> (дата обращения 16.02.2025 г.)

24. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения: методическое пособие для курсового проектирования. М.: ФОРУМ: ИНФРА – М., 2003. 214 с.

25. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях : учебное пособие. М. : Форум, 2016. 208 с.