

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)

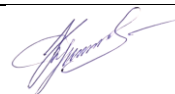
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Электроснабжение ремонтного участка ООО «Газпромнефть Энергосистемы»,
г. Ноябрьска

Обучающийся

С.Э. Курганский

(Инициалы Фамилия)



(личная подпись)

Руководитель

П.А. Николаев

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

Тольятти 2023

Аннотация

Выпускная квалификационная работа состоит из 46 страниц, 12 рисунков, 9 таблиц, 20 источников.

Ключевые слова: электроснабжение, ремонтный участок, цех, предприятие, потребитель, оборудование, подстанция, электроприемник.

Проводится разработка системы электроснабжения (СЭС) ремонтного участка ООО «Газпромнефть Энергосистемы».

Объект исследования: ремонтный участок ООО «Газпромнефть Энергосистемы».

Предмет исследования: электроснабжение ремонтного участка.

Цель работы: проектирование электроснабжения ремонтного участка с учетом актуальных электрических нагрузок и современного электрооборудования.

Актуальность работы: электрооборудование существующего электроснабжения ремонтного участка устарело и сильно изношено, его технические параметры не отвечают актуальным требованиям для обеспечения надежного электроснабжения потребителей и безопасной эксплуатации СЭС. Актуален вопрос разработки новой СЭС с учетом нового современного оборудования и передовых технических решений. Согласно данному проекту СЭС также может быть выполнено электроснабжение аналогичного по структуре и потребителям вводимого в эксплуатацию дополнительного нового ремонтного участка.

Содержание работы включает вопросы: характеристика ремонтного участка и анализ существующего электроснабжения, разработка системы электроснабжения участка, безопасность и охрана труда.

Содержание

Введение	4
1 Исходные данные	6
1.1 Характеристика ремонтного участка	6
1.2 Анализ существующего электроснабжения ремонтного участка.....	8
2 Разработка системы электроснабжения участка	10
2.1 Расчет нагрузок.....	10
2.2 Компенсация реактивной мощности	11
2.3 Подстанция и ее электрооборудование	13
2.4 Расчет высоковольтной линии	15
2.5 Расчет распределительной сети	17
2.6 Определение токов КЗ.....	20
2.7 Защита линий до 1 кВ	29
2.8 Защита высоковольтной линии.....	32
2.9 Автоматический ввод резерва питания	35
3 Безопасность и охрана труда	38
3.1 Обеспечение охраны труда	38
3.2 Проектирование заземления	40
Заключение	44
Список используемых источников.....	45

Введение

Электроснабжение предприятий – это важный аспект деятельности любой промышленной отрасли, обеспечивающий непрерывную работу оборудования и производственных процессов. Системы электроснабжения должны быть надежными, безопасными и эффективными, чтобы поддерживать стабильное функционирование предприятий и удовлетворять потребности в электроэнергии.

Основные принципы электроснабжения предприятий:

- надежность. Обеспечение бесперебойного электроснабжения является приоритетом при проектировании систем электроснабжения. Для этого используются разные виды источников электроэнергии, такие как собственные электростанции, городские электросети или возобновляемые источники энергии.
- безопасность. Системы электроснабжения должны обеспечивать защиту от коротких замыканий, перегрузок, перенапряжений и других аварийных ситуаций. Для этого применяются автоматические выключатели, реле, предохранители и другие устройства защиты.
- эффективность. Электросети должны быть спроектированы таким образом, чтобы минимизировать потери электроэнергии при передаче и распределении. Это достигается за счет использования современных технологий и оборудования, а также оптимизации схем электроснабжения.
- гибкость. Предприятия нуждаются в возможности изменения объемов и видов потребляемой электроэнергии в зависимости от текущих потребностей производства. Системы электроснабжения должны адаптироваться к таким изменениям и обеспечивать оптимальное использование ресурсов.

- экологичность. При выборе источников электроэнергии необходимо учитывать их воздействие на окружающую среду.

Электрооборудование существующего электроснабжения ремонтного участка ООО «Газпромнефть Энергосистемы» устарело и сильно изношено, его технические параметры не отвечают актуальным требованиям для обеспечения надежного электроснабжения потребителей и безопасной эксплуатации СЭС. Актуален вопрос разработки новой СЭС с учетом нового современного оборудования и передовых технических решений. Согласно данному проекту СЭС также может быть выполнено электроснабжение аналогичного по структуре и потребителям вводимого в эксплуатацию дополнительного нового ремонтного участка.

Цель работы: проектирование электроснабжения ремонтного участка с учетом актуальных электрических нагрузок и современного электрооборудования.

Задачи работы:

- проанализировать существующее электроснабжение ремонтного участка, выявить значимые технико-эксплуатационные недостатки и предложить мероприятия по их устранению;
- определить актуальные электрические нагрузки по отдельным цехам и зданиям и по ремонтному участку в целом;
- обеспечить автоматическую компенсацию реактивной мощности, повышение общей энергоэффективности СЭС;
- выбрать кабели и новое современное оборудование СЭС, с учетом актуальных электрических нагрузок;
- рассчитать рабочие и аварийные режимы;
- рассчитать микропроцессорную релейную защиту и автоматику, выбрать оборудование;
- рассмотреть вопросы обеспечения охраны труда и безопасности.

1 Исходные данные

1.1 Характеристика ремонтного участка

Ремонтный участок (далее ремучасток) ООО «Газпромнефть Энергосистемы», г. Ноябрьск обеспечивает внутренние нужды предприятия по текущему ремонту, обслуживанию, диагностике и наладке различных механических узлов, агрегатов и изделий. Учитывая специфику производственной деятельности предприятия, обеспечивается качественный ремонт и обслуживание элементов систем электро-, тепло- и водоснабжения.

Генеральный план участка – на рисунке 1.

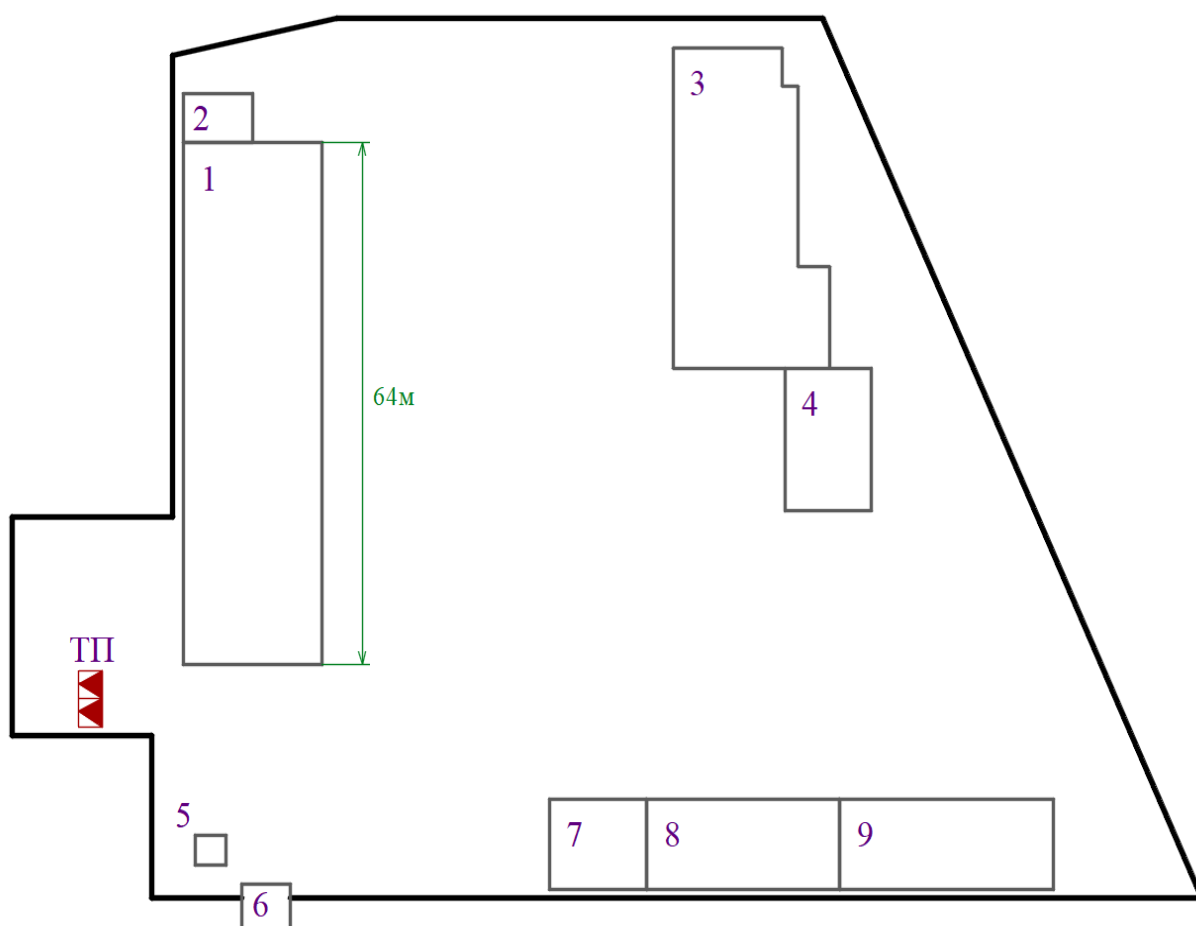


Рисунок 1 – Генеральный план участка

Основные производственные цеха и дополнительные вспомогательные здания и производственные участки обеспечивают основной производственный процесс. Основное производство сосредоточено в четырех крупных промышленных цехах (обозначены номерами 1,4,8,9 на генеральном плане, рисунок 1), где выполняются различные работы по текущему ремонту, обслуживанию, диагностике и наладке различных механических узлов, агрегатов и изделий, ремонту и обслуживанию элементов систем электро-, тепло- и водоснабжения. Материальные ценности, поставляемая и выпускаемая продукция складываются в хранилище (обозначено номером 3 на генплане). Котельная (обозначена номером 2 на генплане) обеспечивает теплоснабжение ремучастка и является потребителем первой категории надежности электроснабжения. Промышленные цеха и хранилище относятся ко второй категории. Операторная (обозначена номером 5 на генплане) обеспечивает общий контроль за технологическими процессами и наблюдение за территорией. Проходная (обозначена номером 6 на генплане) обеспечивает контроль и досмотр автотранспорта, контроль за доступом на территорию ремучастка. Операторная и проходная относятся к третьей категории надежности электроснабжения.

Внутреннее электроснабжение ремучастка выполнено от собственной трансформаторной подстанции (ТП) 10/0,4 кВ наружной установки, установленной также внутри территории, в удаленной ее части, данная ТП обеспечивается питанием от энергосистемы по высоковольтной кабельной линии (КЛ) 10 кВ.

Промышленные цеха и остальные производственные участки имеют параметры энергопотребления (установленная суммарная нагрузка потребителей, коэффициенты спроса нагрузки и мощности), приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры энергопотребления цехов

Цеха	P_y , кВт	K_c	$\cos\varphi$
Цех №1	398	0,3	0,82
Котельная	21	0,7	0,8
Хранилище	12	0,3	0,9
Цех №2	179	0,4	0,8
Операторная	7	0,2	0,91
Проходная	8	0,2	0,9
СТО	29	0,4	0,81
Цех №3	89	0,4	0,8
Цех №4	130	0,3	0,75

Данные параметры энергопотребления будут учтены при расчете актуальных электрических нагрузок ремуучастка и дальнейшем проектировании его электроснабжения.

1.2 Анализ существующего электроснабжения ремонтного участка

Однолинейная схема существующего электроснабжения ремуучастка приведена на листе 1 графической части.

«Электроснабжение цехов и вспомогательных зданий или производственных участков (ПУ) выполнено от трансформаторной подстанции (ТП) 10/0,4 кВ, расположенной на территории предприятия. От шин 0,4 кВ ТП отходят кабельные линии (КЛ) 0,4 кВ к распределительным пунктам (РП) и распределительным щиткам (ЩРН), расположенным на ПУ. Для обеспечения возможности индивидуального отключения ПУ для удобства обслуживания и вывода оборудования в ремонт, а также точной селективной работы автоматических выключателей, защищающих линии

распределительной сети используется радиальная схема электроснабжения. Электроснабжение участков 1 и 2-ой категории обеспечивается по двухцепным КЛ; 3-ей категории – по одноцепным» [3].

Электрооборудование существующего электроснабжения ремучастка устарело и сильно изношено, его технические параметры не отвечают актуальным требованиям для обеспечения надежного электроснабжения потребителей и безопасной эксплуатации СЭС. Устарели, критически изношены и подлежат замене:

- выключатели масляные;
- разрядники вентильные;
- кабели;
- силовые трансформаторы ТП;
- измерительные трансформаторы;
- автоматические выключатели.

Отмечаются значительные потери мощности и электроэнергии ввиду устаревших неэнергоэффективных действующих силовых трансформаторов на подстанции и отсутствия компенсации реактивной мощности (КРМ). Ввиду устаревших измерительных трансформаторов тока и напряжения не обеспечивается должная точность измерений электрических величин, учета электроэнергии и работы релейной защиты и автоматики (РЗА). Электромеханическая действующая РЗА также критически изношена и устарела.

Выводы.

Приведены исходные данные для разработки системы электроснабжения ремонтного участка ООО «Газпромнефть Энергосистемы», г. Ноябрьск. Согласно технической документации по электроснабжению ремучастка составлен его генеральный план, приведена таблица с параметрами энергопотребления цехов. Далее согласно этим систематизированным данным, выполняется проектирование СЭС рассматриваемого ремучастка.

2 Разработка системы электроснабжения участка

2.1 Расчет нагрузок

«Суммарные среднесменные нагрузки цехов и других производственных участков определяются с помощью коэффициентов спроса активной мощности нагрузок.

Электрические нагрузки по участкам определяются по формулам:

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

где K_c – коэффициент спроса;

P_y – нагрузка, кВт» [18].

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi}, \quad (3)$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (4)$$

Нагрузки цеха №1, по (1-4):

$$P_p = 0,3 \cdot 398 = 119,4 \text{ кВт},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{1 - 0,82^2}}{0,82} = 0,7,$$

$$Q_p = 119,4 \cdot 0,7 = 83,34 \text{ квар},$$

$$S_p = \sqrt{119,4^2 + 83,34^2} = 145,61 \text{ кВА}.$$

Нагрузки по ремуучастку в целом рассчитаны в таблице 2.

Таблица 2 – Определение нагрузок

Участки	P _p , кВт	Q _p , квар	S _p , кВА
Цех №1	119,4	83,34	145,61
Котельная	14,7	11,03	18,38
Хранилище	3,6	1,74	4
Цех №2	71,6	53,7	89,5
Операторная	1,4	0,64	1,54
Проходная	1,6	0,77	1,78
СТО	11,6	8,4	14,32
Цех №3	35,6	26,7	44,5
Цех №4	39	34,39	52
∑	298,5	220,72	371,24

«Территория освещается автономным светодиодным освещением, потому ее осветительная нагрузка не учитывается» [10].

2.2 Компенсация реактивной мощности

«КРМ выполняется на шинах 0,4 кВ ТП, необходимая мощность компенсирующих устройств (КУ):

$$Q_{к.у.} = 0,9 \cdot P_p \cdot (tg\varphi - tg\varphi_k), \quad (5)$$

где P_p – активная нагрузка, кВт;

$tg\varphi$ – тангенс угла φ до КРМ;

$tg\varphi_k$ – нормативный тангенс угла φ » [1,8] .

$$Q_{к.у.} = 0,9 \cdot 298,5 \cdot (0,74 - 0,33) = 109,9 \text{ квар.}$$

«На шинах 0,4 кВ ТП будут установлены две автоматические установки компенсации реактивной мощности (АУКРМ) максимальной мощностью по 55 квар.

КРМ посчитана в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет КРМ

Показатели	cosφ	tgφ	Pp, кВт	Qp, квар	Sp, кВА
∑ на НН	0,8	0,74	298,5	220,72	371,24
КУ, квар	-	-	-	110	-
∑ на НН с КУ	0,94	0,37	298,5	110,72	318,37

Потери в трансформаторах:

$$\Delta P_m \approx 0,02 \cdot S_p; \quad (6)$$

$$\Delta P_m = 0,02 \cdot 318,37 = 6,37 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_m \approx 0,1 \cdot S_p; \quad (7)$$

$$\Delta Q_m = 0,1 \cdot 318,37 = 31,84 \text{ квар.}$$

Нагрузка ТП по стороне ВН, по (4):

$$S'_p = \sqrt{(298,5 + 6,37)^2 + (110,72 + 31,84)^2} = 336,55 \text{ кВА.}$$

Внешний вид АУКРМ – на рисунке 2.



Рисунок 2 – Внешний вид АУКРМ

Применение АУКРМ позволит обеспечить точный уровень КРМ при широком диапазоне изменения нагрузок ТП, исключить перекомпенсацию РМ, обеспечить мониторинг состояния и режимов работы компенсирующих устройств. Установка АУКРМ позволит снизить потребляемую реактивную и полную мощность; привести показатель коэффициента мощности $\cos\varphi$ сети 0,4 кВ до нормативного значения 0,92..0,95; снизить рабочие токи на вводе распределительного устройства низкого напряжения (РУНН) ТП» [12].

2.3 Подстанция и ее электрооборудование

«Ввиду наличия в составе нагрузок ТП потребителей 1 и/или 2 категорий надежности электроснабжения, устанавливается два силовых трансформатора, требуемая мощность:

$$S_m \geq K_{з.н.} \cdot S_{р.к.}, \quad (8)$$

где $K_{з.н.}$ – нормативный коэффициент загрузки;

$S_{р.к.}$ – нагрузка, кВА.

$$S_m \geq 0,7 \cdot 318,37 = 222,9 \text{ кВА.}$$

Устанавливается 2×ТМГ12-250 по 250 кВА» [16].

«Коэффициент загрузки в аварийном режиме:

$$K_{з.ав.} = \frac{S_{р.к.}}{S_m}, \quad (9)$$

где S_m – номинальная мощность, кВА» [6].

$$K_{з.ав.} = \frac{318,37}{250} = 1,27 \leq 1,4.$$

Выбирается ТП марки 2КТПН-250/10/0,4.

«Подстанции 2КТПН-10/0,4 с коридорами обслуживания, мощностью 100-2500 кВА предназначены для приема электрической энергии трехфазного переменного тока частоты 50 Гц напряжением 6 или 10 кВ, преобразования в электрическую энергию 0,4 кВ и снабжения ею потребителей. Подстанции с коридорами обслуживания предназначены для энергоснабжения промышленных объектов, жилых комплексов, общественных зданий, населенных пунктов, сельскохозяйственных предприятий, стройплощадок, кустов скважин газовых и нефтяных месторождений. Подстанция КТПН имеет двери с каждой обслуживаемой стороны. Все двери подстанции снабжены внутренними речными замками и петлями под навесной замок. Для вентиляции и охлаждения блоков

трансформаторов в дверях имеются жалюзи, исключающие попадание осадков в корпус подстанции.

Подстанция – комплектная, в стандартный комплект входит следующее оборудование:

- выключатели ВВ/TEL-10;
- разъединители РВ-10;
- трансформаторы тока ТПЛК-10 и ТШЛ-0,66;
- трансформаторы напряжения НАМИ-10;
- ограничители перенапряжения ОПН-10;
- предохранители ПКТ-103;
- автоматы ВА-52-39.

Силовые трансформаторы монтируются после размещения КТПН на месте» [17,20].

2.4 Расчет высоковольтной линии

«Рабочий ток КЛ 10 кВ:

$$I_p = \frac{S'_p}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n}, \quad (10)$$

где S'_p – нагрузка, кВА;

U_n – напряжение, кВ;

n – число цепей, шт.

$$I_p = \frac{336,55}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 9,72 \text{ А.}$$

Экономическое сечение жил:

$$F_{\text{эк}} = \frac{I_p}{j_{\text{эк}}}, \quad (11)$$

где $j_{\text{эк}}$ – экономическая плотность тока, А/мм².

$$F_{\text{эк}} = \frac{9,72}{1,4} = 6,9 \text{ мм}^2.$$

Принимаем кабель АПвП-3×16 мм².

$$I_{\text{ав}} = \frac{336,55}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1} = 19,43 \text{ А}.$$

Допустимый ток кабеля:

$$I'_{\text{доп}} = I_{\text{доп}} \cdot K_{\text{нов}} \cdot K_{\text{ср}} \cdot K_{\text{нон}}, \quad (12)$$

где $I_{\text{доп}}$ – паспортный ток, А;

$K_{\text{нов}}$, $K_{\text{ср}}$, $K_{\text{нон}}$ – коэффициенты недогруженности КЛ, среды и групповую прокладку.

$$I'_{\text{доп}} = 75 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 0,93 = 94,16 \text{ А} > I_{\text{ав}}.$$

Потери напряжения в КЛ:

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L \cdot 100}{U_{\text{н}}} (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi), \quad (13)$$

где I_p – максимальный ток КЛ, А;

L – длина КЛ, км;

r_0 , x_0 – удельные сопротивления, Ом/км» [16].

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 19,43 \cdot 0,41 \cdot 100}{10000} (1,94 \cdot 0,906 + 0,102 \cdot 0,424) = 0,25 \% < 5 \%.$$

Потери менее допустимых 5 %.

2.5 Расчет распределительной сети

Схема распределительной сети выбирается согласно требованиям технической документации по СЭС и требованиям ПУЭ. «Для обеспечения возможности индивидуального отключения ПУ для удобства обслуживания и вывода оборудования в ремонт, а также точной селективной работы автоматических выключателей, защищающих линии распределительной сети используется радиальная схема электроснабжения. Электроснабжение участков первой и второй категории обеспечивается по двухцепным кабельным линиям; третьей категории – по одноцепным» [13].

Расчет для КЛ до цеха №1.

«Наибольший ток КЛ:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (14)$$

где S_p – нагрузка, кВА;

U_n – напряжение, кВ.

$$I_p = \frac{145,6}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 221,2 \text{ А.}$$

Выбирается кабель АВБШВ-4×70+1×35, $I_{\text{доп}} = 230 \text{ А.}$

По формуле (13):

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 221,2 \cdot 0,015 \cdot 100}{380} (0,42 \cdot 0,82 + 0,082 \cdot 0,49) = 0,5 \% < 5 \%$$

Выбор кабелей – в таблице 4.

Таблица 4 – Выбор кабелей

Участок	Ip, А	АВБШв, сечение, мм ²	Idоп, А	ΔU, %
1	221,2	4×70+1×35	230	0,5
2	39,9	5×6	55	1,3
3	20,3	5×2,5	27	1,4
4	136,0	4×35+1×25	165	1,0
5	35,0	3×4	36	1,1
6	40,4	3×6	55	1,2
7	54,4	5×6		2,7
8	67,6	5×10	75	1,2
9	79,0	5×16	90	1,1

Суммарные потери напряжения до наиболее удаленного от ТП участка №3, с учетом потерь в КЛ 10 кВ до ТП:

$$\sum \Delta U_{л.уд.} = 0,25 + 1,4 = 1,65 \% < 5 \%$$

Потери менее допустимых 5 %.

Схема электрической сети – на рисунке 3» [8].

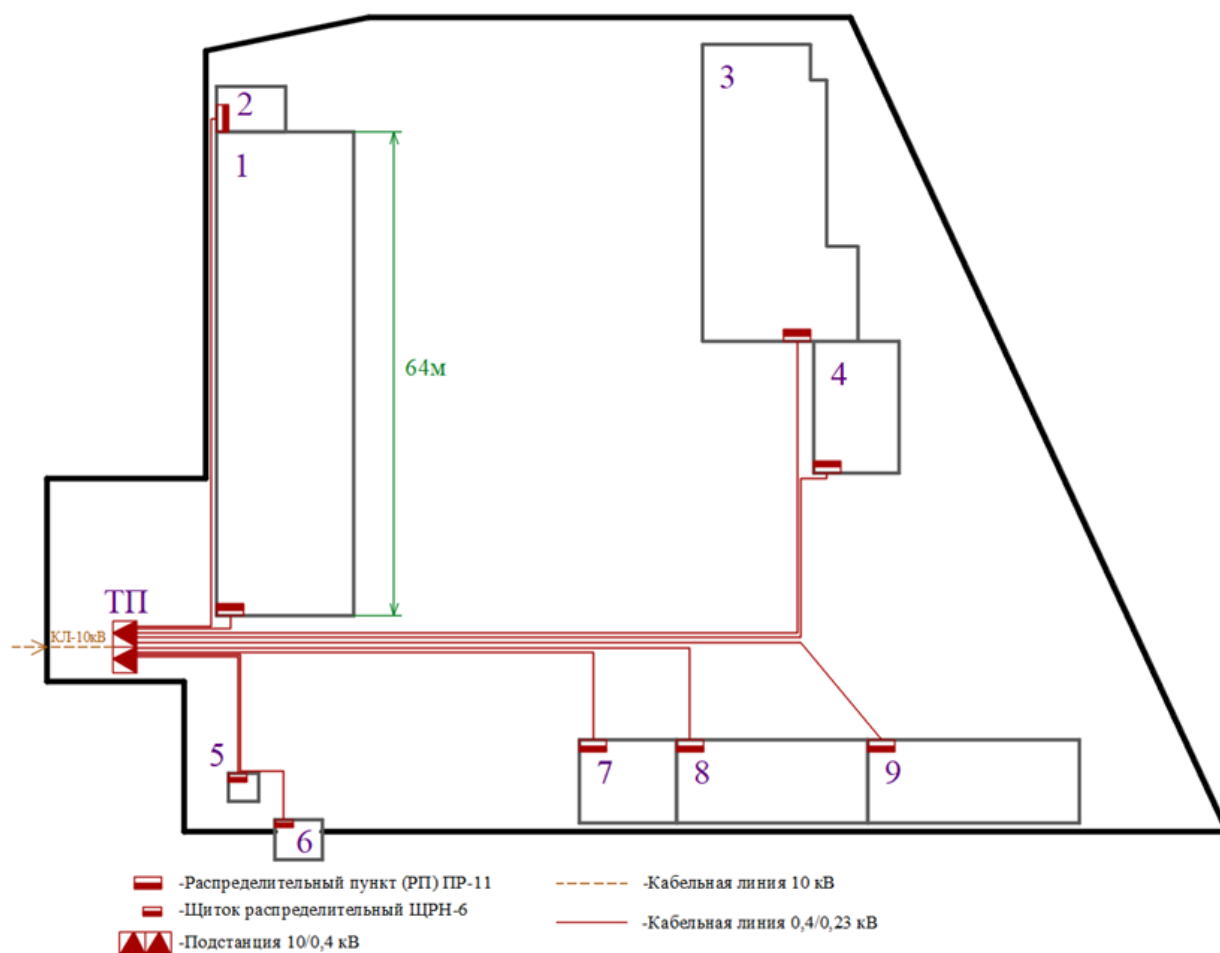


Рисунок 3 – Схема электрической сети

«Выбранные кабели соответствуют требованиям по рабочим и послеаварийным режимам. ТП смещена в юго-западную часть территории, в сторону источника питания, данное расположение ТП обеспечит снижение длины питающей высоковольтной КЛ и потерь электроэнергии и напряжения в ней. Также расположение ТП не будет мешать производственному процессу предприятия, передвижению автотранспорта и габаритных грузов. Кабели в траншеях под землей будут надежно защищены от возможных механических повреждений, также будет исключены риски электротравм персонала от КЛ» [8].

2.6 Определение токов КЗ

Схемы для расчета на стороне 10 кВ – на рисунке 4.

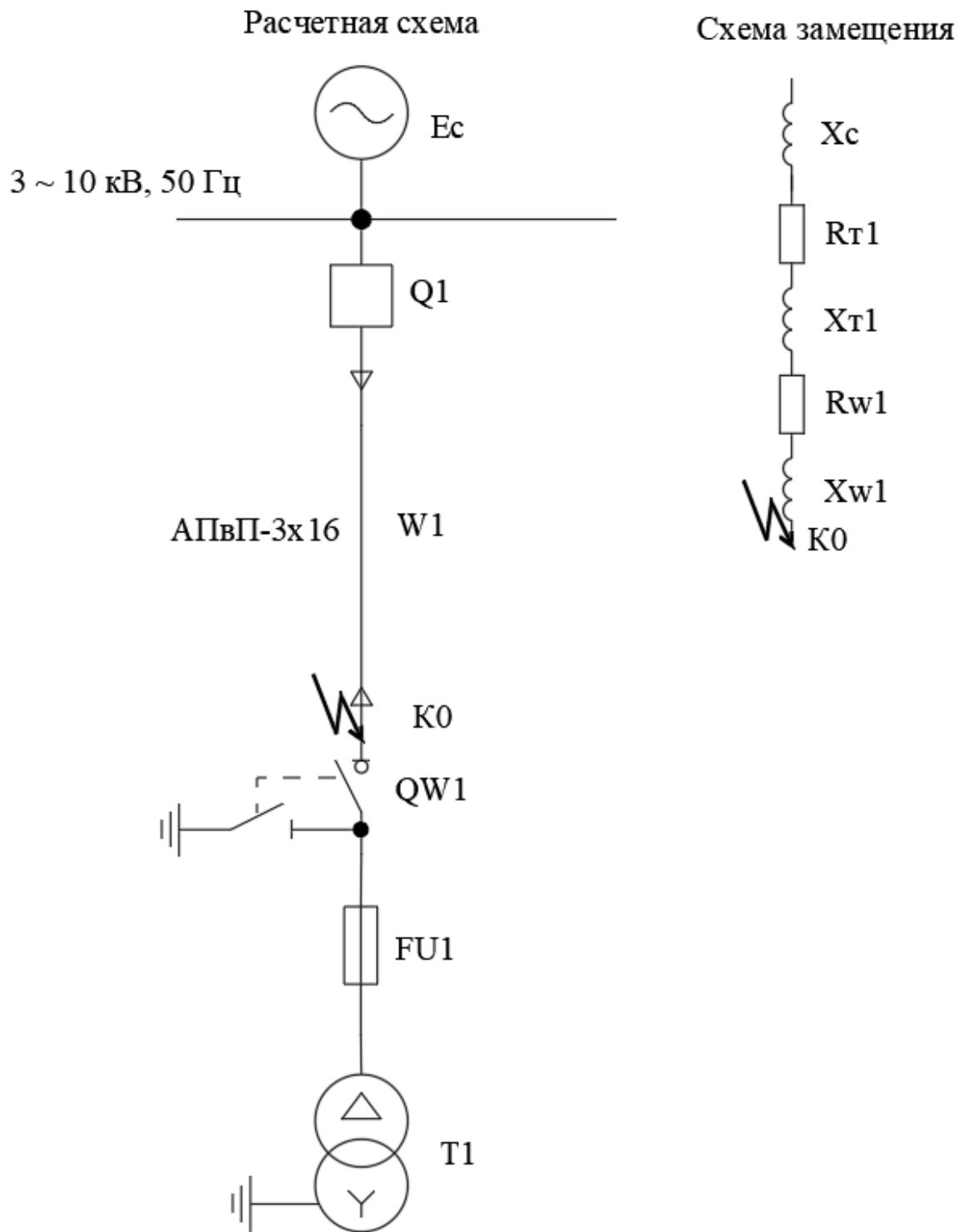


Рисунок 4 – Расчетные схемы

Значения токов короткого замыкания на стороне 10 кВ используются для определения уставок релейной защиты и автоматики, а также ее проверки по чувствительности.

«Значение трехфазного тока КЗ в начале КЛ 10 кВ, согласно данным по предприятию: $I_{кз.ГПП}^{(3)} = 9,295$ кА.

Сопротивление системы:

$$X_c = \frac{U_k}{\sqrt{3} \cdot I_{кз.ГПП}^{(3)}}, \quad (15)$$

где U_k – напряжение КЗ, кВ.

$$X_c = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 9,295} = 0,646 \text{ Ом.}$$

Сопротивления КЛ 10 кВ:

$$X_{w1} = x_0 \cdot L_{w1}, \quad (16)$$

где L_{w1} – длина КЛ, км.

$$X_{w1} = 0,102 \cdot 0,41 = 0,041 \text{ Ом;}$$

$$R_{w1} = r_0 \cdot L_{w1}, \quad (17)$$

$$R'_{w1} = 1,94 \cdot 0,41 = 0,78 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление до точки К0:

$$Z_{к0} = \sqrt{R_{к0}^2 + X_{к0}^2}, \quad (18)$$

$$Z_{к0} = \sqrt{0,78^2 + (0,646 + 0,041)^2} = 1,039 \text{ Ом.}$$

Трехфазный ток КЗ:

$$I_k^{(3)} = \frac{U_k}{\sqrt{3} \cdot Z_k}, \quad (19)$$

где U_k – напряжение КЗ, кВ;

Z_k – полное сопротивление цепи, Ом» [8].

$$I_{k0}^{(3)} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,039} = 5,83 \text{ кА.}$$

«Ударный ток КЗ:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_k^{(3)}, \quad (20)$$

где K_y – ударный коэффициент.

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 5,83 = 14,85 \text{ кА.}$$

Двухфазный ток КЗ:

$$I_k^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_k^{(3)}, \quad (21)$$

$$I_k^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 5,83 = 5,05 \text{ кА.}$$

Расчет токов КЗ на вводе РП цеха №1.

Расчетные схемы – на рисунке 5.

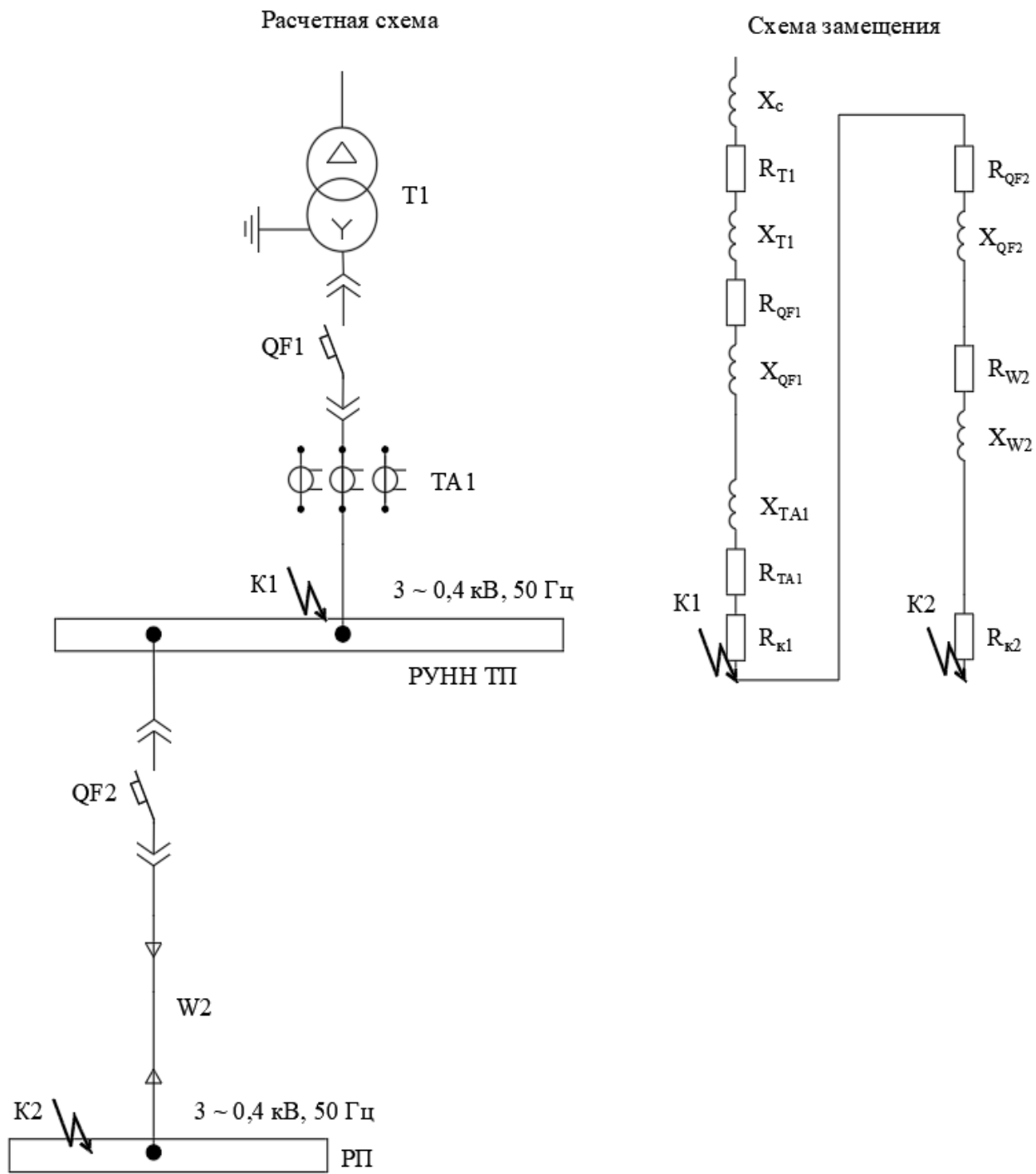


Рисунок 5 – Расчетные схемы

Сопротивление системы:

$$X'_c = \frac{U_k}{\sqrt{3} \cdot I_{к.з.К0}^{(3)}}, \quad (22)$$

где U_k – напряжение КЗ, кВ;

$I_{к.з.К0}^{(3)}$ – трехфазный ток КЗ в точке К0 (на стороне 10 кВ ТП), кА»

[15].

$$X'_c = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 5,83} = 1,039 \text{ Ом.}$$

«Сопротивление приводится к ступени 0,4 кВ:

$$X_c = X'_c \cdot \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}}, \quad (23)$$

$$X_c = 1039 \cdot \frac{0,4}{10,5} = 39,589 \text{ мОм.}$$

Сопротивления линии W2:

$$R_{W2} = r_0 \cdot L_{W2}, \quad (24)$$

где $L_{\text{кЛ}}$ – длина КЛ, м» [15].

$$R_{W2} = 0,158 \cdot 19,84 = 3,134 \text{ мОм;}$$

$$X_{W2} = x_0 \cdot L_{W2}, \quad (25)$$

$$X_{W2} = 0,0599 \cdot 19,84 = 1,19 \text{ мОм.}$$

«Переходные сопротивления: $R_{\text{кЛ}} = 0,0034 \text{ мОм}$; $R_{\text{к2}} = 0,85 \text{ мОм}$.

Активные сопротивления элементов:

- силового трансформатора: 9,4 мОм;
- выключателя на вводе 0,4 кВ ТП: 0,06 мОм;
- трансформатора тока на вводе 0,4 кВ ТП: 0,07 мОм.

$$R_{\text{э1}} = R_{\text{Т1}} + R_{\text{QF1}} + R_{\text{ТА1}} + R_{\text{к1}}, \quad (26)$$

$$R_{\text{э1}} = 9,4 + 0,06 + 0,07 + 0,0034 = 9,58 \text{ мОм.}$$

Индуктивные сопротивления элементов:

- силового трансформатора: 27,2 мОм;
- выключателя на вводе 0,4 кВ ТП: 0,06 мОм;
- трансформатора тока на вводе 0,4 кВ ТП: 0,07 мОм.

$$X_{\text{э1}} = X_{\text{Т}} + X_{\text{QF1}} + X_{\text{ТА1}}, \quad (27)$$

$$X_{\text{э1}} = 27,2 + 0,07 + 0,07 = 27,34 \text{ мОм.}$$

Активное сопротивление выключателя на фидере к РП: 0,112 мОм.

$$R_{\text{э2}} = R_{\text{QF2}} + R_{\text{W2}} + R_{\text{к2}}, \quad (28)$$

$$R_{\text{э2}} = 0,112 + 3,134 + 0,85 = 4,096 \text{ мОм.}$$

Индуктивное сопротивление выключателя на фидере к РП: 0,13 мОм»
[16].

$$X_{\text{э2}} = X_{\text{QF2}} + X_{\text{W2}}, \quad (29)$$

$$X_{\text{э2}} = 0,13 + 1,19 = 1,32 \text{ мОм.}$$

«Сопротивления до точек КЗ:

$$R_{\text{к1}} = R_{\text{э1}}, \quad (30)$$

$$R_{\text{к1}} = 9,58 \text{ мОм,}$$

$$X_{\text{к1}} = X_{\text{с}} + X_{\text{э1}}, \quad (31)$$

$$X_{k1} = 39,589 + 27,34 = 66,929 \text{ мОм},$$

$$Z_{k1} = \sqrt{9,58^2 + 66,929^2} = 67,611 \text{ мОм},$$

$$R_{k2} = R_{\text{э1}} + R_{\text{э2}}, \quad (32)$$

$$R_{k2} = 9,58 + 4,096 = 13,676 \text{ мОм},$$

$$X_{k2} = X_c + X_{\text{э1}} + X_{\text{э2}}, \quad (33)$$

$$X_{k2} = 39,589 + 27,34 + 1,32 = 68,249 \text{ мОм},$$

$$Z_{k2} = \sqrt{13,676^2 + 68,249^2} = 69,606 \text{ мОм}.$$

Токи КЗ в точке К1, по (19,20):

$$I_{k1}^{(3)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 67,611 \cdot 10^{-3}} = 3,42 \text{ кА},$$

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 1,3 \cdot 3,42 = 6,28 \text{ кА}.$$

Сопротивления петли фаза-ноль:

– для линии W2:

$$R_{\text{нW2}} = 2 \cdot r_0 \cdot L_{W2}, \quad (34)$$

$$R_{\text{нW2}} = 2 \cdot 0,221 \cdot 14,18 = 6,267 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{нW2}} = x_{0\text{н}} \cdot L_{W2}, \quad (35)$$

$$X_{\text{нW2}} = 0,319 \cdot 14,18 = 4,52 \text{ мОм}.$$

– до точек К1, К2:

$$R_{\text{н1}} = R_{k1}, \quad (36)$$

$$X_{\text{н1}} = 2 \cdot X_c, \quad (37)$$

$$X_{\text{н1}} = 2 \cdot 39,539 = 79,177 \text{ мОм},$$

$$Z_{\pi 1} = \sqrt{0,0034^2 + 79,177^2} = 79,18 \text{ мОм},$$

$$R_{\pi 2} = R_{\kappa 1} + R_{\pi W 2} + R_{\kappa 2}, \quad (38)$$

$$R_{\pi 2} = 0,0034 + 6,267 + 0,85 = 7,12 \text{ мОм},$$

$$X_{\pi 2} = X_{\pi W 2} + 2 \cdot X_c, \quad (39)$$

$$X_{\pi 2} = 4,52 + 2 \cdot 39,539 = 83,697 \text{ мОм},$$

$$Z_{\pi 2} = \sqrt{7,12^2 + 83,697^2} = 83,999 \text{ мОм}.$$

Однофазный ток КЗ в точке К1:

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{\pi} + \frac{Z_{\text{т}}^{(1)}}{3})}, \quad (40)$$

где $U_{\text{л}}$ – линейное напряжение, кВ;

$Z_{\text{т}}^{(1)}$ – однофазное сопротивление трансформатора, мОм» [15].

$$I_{\kappa 1}^{(1)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot (79,18 + \frac{312}{3}) \cdot 10^{-3}} = 1,26 \text{ кА}.$$

«Результаты расчетов – в таблице 5.

Таблица 5 – Токи КЗ

Точка КЗ	$I_{\kappa}^{(3)}$, кА	$I_{\kappa}^{(1)}$, кА
К1	3,42	1,26
К2	3,15	1,17

Расчет токов КЗ на вводах РП/ЩРН цехов – в таблице 6.

Таблица 6 – Токи КЗ в сети 0,4 кВ

№ цеха	$I_{к^{(3)}}$, кА	$I_{к^{(1)}}$, кА
1	3,15	1,17
2	0,8	0,4
3	0,2	0,1
4	2,0	1,1
5	- (однофазн. КЛ)	0,8
6		1,3
7	2,3	1,3
8	2,1	1,1
9	1,8	1,0

Термически стойкое сечение жил:

$$F_T = I_{кЗ}^{(3)} \cdot \sqrt{t_{II}} / K_T, \quad (41)$$

где $I_{кЗ}^{(3)}$ – ток трехфазного КЗ, кА

t_{II} – время КЗ срабатывания защиты, с;

K_T – температурный коэффициент» [6].

«Для КЛ до цеха №1:

$$F_T = 3150 \cdot \sqrt{0,03} / 95 = 5,7 \text{ мм}^2 < 70 \text{ мм}^2.$$

Проверка КЛ – в таблице 7.

Таблица 7 – Проверка КЛ

№ цеха	АВБШв, сечение	Стер, мм ²
1	4·70+1·35	5,7
2	5·6	1,5
3	5·2,5	0,4
4	4·35+1·25	3,6
5	3·4	2,6
6	3·6	4,4
7	5·6	4,2
8	5·10	3,8
9	5·16	3,3
КЛ 10 кВ	АПвП-3·16	11,6

КЛ термически устойчивы» [6].

2.7 Защита линий до 1 кВ

«Выбор автоматических выключателей (АВ) проводится:

- по напряжению:

$$U_{ном} > U_c, \quad (42)$$

- по току теплового расцепителя (ТР)» [19]:

$$I_{т.р.} > 1,1 \cdot I_p, \quad (43)$$

Для КЛ к цеху №1:

$$U_{\text{ном}} = 400 \geq 400 \text{ В};$$

$$1,1 \cdot 207,57 = 228,3 \text{ А};$$

$$I_{\text{т.р.}} = 250 > 228,3 \text{ А}.$$

Выбирается ВА-52-39/250, уставка ТР 250 А. Выбор АВ – в таблице 8.

Таблица 8 – Выбор автоматов

№ цеха	Авт. выкл.	I _{ном} , А
1	ВА-52-39	250
2	ВА-51-35	50
3		25
4		160
5		40
6		50
7		63
8		80
9		100

АВ проверяются в режиме КЗ:

– по коммутационной способности (ПКС):

$$\text{ПКС} > i_y, \text{ кА.} \quad (44)$$

– по чувствительности:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к}}^{(1)}}{I_{\text{эм.р.}}} > 1,1. \quad (45)$$

где $I_{\text{к}}^{(1)}$ – ток однофазного КЗ, кА.

Пример проверки АВ для ПУ №1.

$$\text{ПКС} = 25 > 5,79 \text{ кА};$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{1170}{960} = 1,2 > 1,1.$$

Проверка АВ аналогична, результаты – в таблице 9.

Таблица 9 – Проверка автоматов

№ цеха	Авт. выкл.	ПКС, кА	Іэм.р., А	Кч
1	ВА-52-39	25	750	1,6
2	ВА-51-35	500	350	2,2
3		225	100	2,0
4		1440	640	2,3
5		400	280	4,1
6		450	350	4,8
7		504	441	3,7
8		720	560	2,7
9		900	700	2

Выбранные АВ удовлетворяют требованиям.

Внешний вид АВ – на рисунке 6.

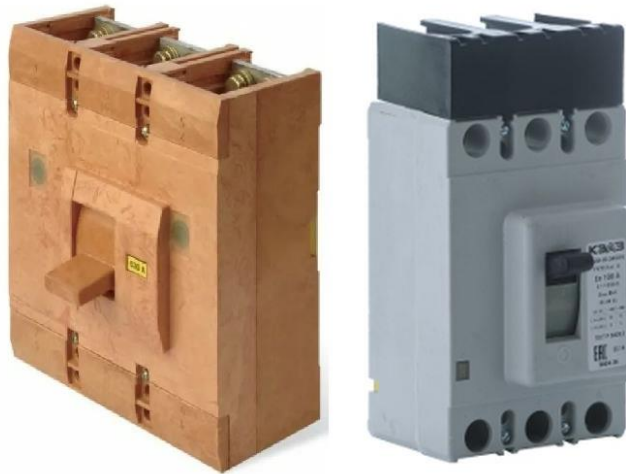


Рисунок 6 – Автоматические выключатели

Далее рассмотрим микропроцессорную релейную защиту (РЗ).

2.8 Защита высоковольтной линии

РЗ будут обеспечивать терминалы Сириус-2МЛ-02, внешний вид – на рисунке 7.



Рисунок 7 – Терминал Сириус-2МЛ-02

Схема защиты – на рисунке 8.

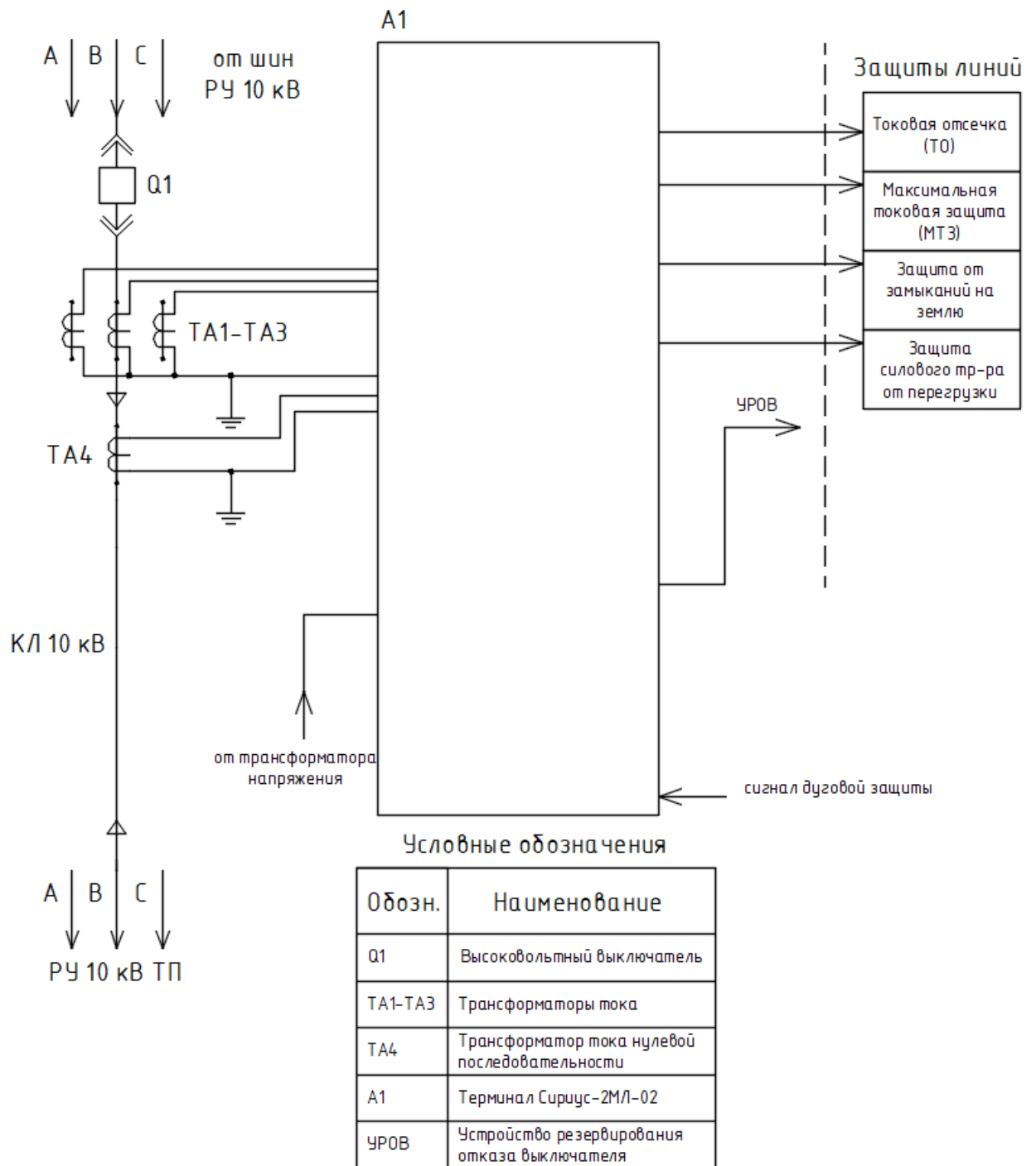


Рисунок 8 – Схема защиты КЛ 10 кВ

«Токовая отсечка (ТО):

$$I_{C3} \geq K_{отс} \cdot I_{НОМ.Т} , \quad (46)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки.

$$I_{C3} \geq 5 \cdot 0,014 = 0,072 \text{ кА.}$$

МТЗ:

$$I_{C3} \geq \frac{K_H \cdot K_{C3}}{K_B} \cdot I_{р.макс} , \quad (47)$$

где $I_{р.макс}$ – расчетный ток КЛ, А.

Чувствительность:

$$k_u = \frac{I_K^{(2)}}{I_{C3}} , \quad (48)$$

$$I_{C3} \geq \frac{1,1 \cdot 1,18}{0,935} \cdot 19,43 = 26,97 \text{ А.}$$

$$k_u = \frac{5050}{26,97} = 187 \geq 1,5.$$

Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = I_{C3} \cdot \frac{k_{cx}}{n_T} , \quad (49)$$

где $k_{cx} = 1$ – коэффициент схемы ТТ;

n_T – коэффициент трансформации ТТ.

$$I_{CP} = 26,97 \cdot \frac{1}{30/5} = 4,5 \text{ А.}$$

Ток срабатывания защиты от замыканий на землю:

$$I_{C.3} \geq K_{omc} \cdot k_B \cdot I_C, \quad (50)$$

где k_B – коэффициент броска ёмкостного тока;

I_C – ёмкостный ток, А.

$$I_C = I_{CO} \cdot L, \quad (51)$$

где I_{CO} – ёмкостный ток кабеля, А/км;

L – длина КЛ, км» [2,4,7].

$$I_C = 0,55 \cdot 0,41 = 0,23 \text{ А}$$

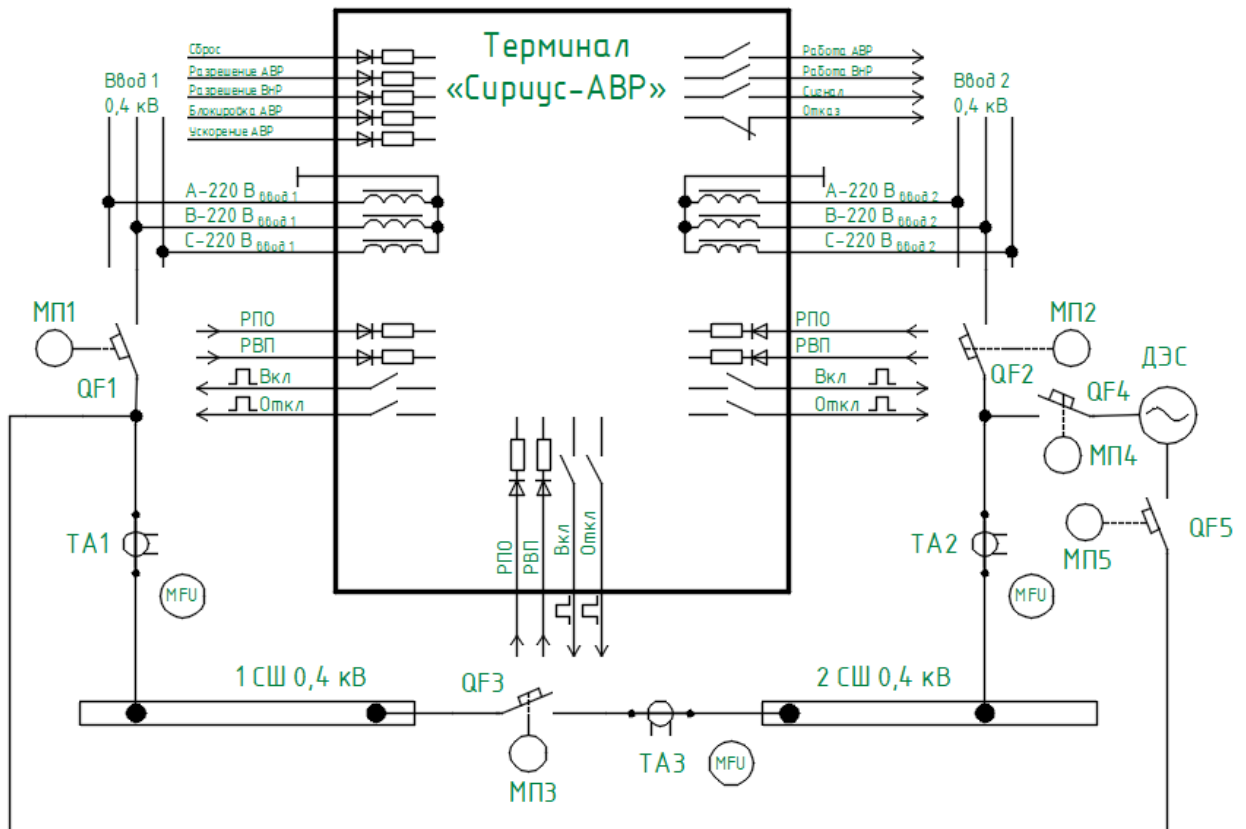
$$I_{C.3} \geq 1,2 \cdot 2,5 \cdot 0,23 = 0,69 \text{ А}$$

2.9 Автоматический ввод резерва питания

«АВР предназначен для автоматического переключения питания ответственных потребителей на резервный источник при пропадании либо несоответствии норме показателей качества питания с основного источника. Для обеспечения дистанционного управления и контроля состояния, вводные и секционный автоматические выключатели на вводе 0,4 кВ и секционной перемычке выбираются с электромагнитным приводом. Терминал Сириус-АВР обеспечивает автоматический ввод резервного источника при пропадании напряжения на одном из питающих вводов и автоматическое восстановление схемы нормального режима питания. В нормальном режиме работы питание подается на оба ввода 0,4 кВ, секционный выключатель отключен. При пропадании напряжения на одном из вводов, АВР отключает выключатель этого ввода (QF1 или QF2) и включает секционный выключатель (QF3). После проведения необходимых ремонтно-восстановительных работ и появлении питания на втором вводе 0,4 кВ,

терминал АВР автоматически восстанавливает схему нормального режима питания, включая выключатель ввода (QF1 или QF2) и отключая секционный выключатель (QF3).

Схема АВР 0,4 кВ – на рисунке 9.



Зона	Поз. обозн.	Обозначение	Кол.	Примечание
		Автоматические выключатели		
	QF1..QF5	ВА-57-35	5	
		Трансформаторы тока		
	ТА1..ТА3	ТШЛ-0,66-У3	9	
	МП1..МП5	Привод выключателя	5	

Рисунок 9 – Схема АВР 0,4 кВ котельной

Уставка АВР:

$$U_{C.P} = 0,7 \cdot U_{НОМ}, \quad (52)$$

где $U_{НОМ}$ – напряжение сети, В.

$$U_{C.P0,4} = 0,7 \cdot 380 = 266 \text{ В.}$$

Вторая уставка:

$$U'_{C.P} = (0,6 \div 0,65) \cdot U_{НОМ}, \quad (53)$$

$$U'_{C.P0,4} = (0,6 \div 0,65) \cdot 380 = 228 \div 247 \text{ В.}$$

Время срабатывания АВР:

$$t_{C.P.ABP} = t_1 + \Delta t, \quad (54)$$

где t_1 – время срабатывания АВ, с;

Δt – ступень селективности, с» [4].

$$t_{C.P.ABP} = 0,05 + 0,5 = 0,55 \text{ с.}$$

Предлагаемая однолинейная схема СЭС ремонтного участка приведена на Листе 2 графической части.

Выводы.

Согласно актуальным нагрузкам потребителей производственных цехов и других зданий рассчитаны нагрузки в целом по ремучастку, в соответствии с которыми, спроектирована система электроснабжения ремучастка и выбрано ее электрооборудование от отечественных производителей и поставщиков. Выбраны кабели СЭС и защитное оборудование линий.

3 Безопасность и охрана труда

3.1 Обеспечение охраны труда

«Обеспечение охраны труда (ОТ) и техники безопасности (ТБ) при монтаже, эксплуатации, обслуживании, ремонте СЭС выполняется согласно ГОСТ 12.0.004-2015, который устанавливает основные требования.

ОТ на предприятии осуществляется организационными и техническими мероприятиями. В целом за организацию и обеспечение охраны труда отвечает специальная служба охраны труда (СОТ), являющаяся самостоятельным структурным подразделением предприятия. Персонал СОТ включает штат специалистов по ОТ.

Организационные мероприятия по обеспечению безопасности:

- оформление работ нарядом, допуском или распоряжением;
- надзор во время работы;
- оформление окончания работы.

Технические мероприятия по защите от электротравм при обслуживании ТП:

- исключено попадание атмосферных осадков;
- защитные блокировки;
- достаточный уровень освещенности;
- доступ в помещения ТП ограничен;
- для цепей индикации, сигнализации и управления используется напряжение до 42 В;
- индикация напряжения на вводах и выводах КСО и ячеек 0,4 кВ.

Необходимо проводить инструктажи и проверки по работе с оборудованием и использованию СИЗ. На производственных участках предусмотрена установка плакатов по ТБ, ОТ и СИЗ, пример плаката приведен на рисунке 10» [9,11].



Рисунок 10 – Информационный плакат по СИЗ

Пример плаката по электробезопасности – на рисунке 11.



Рисунок 11 – Плакат по электробезопасности

3.2 Проектирование заземления

Размеры, материал и форма электродов выбираются согласно указаниям ГОСТ Р 58882-2020:

- для вертикальных электродов: сталь угловая горячекатаная, размер 3000x50x5 мм;
- для горизонтального электрода: сталь полосовая горячекатаная, размер 50x5 мм [5,14].

«Удельное сопротивление грунта для вертикальных (ВЭ) и горизонтальных (ГЭ) электродов:

$$\rho_p = \rho \cdot K_c, \quad (55)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом · м;

K_c – коэффициент сезонности.

$$\rho_{p6} = 2000 \cdot 1,1 = 2200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$\rho_{p2} = 2000 \cdot 1,4 = 2800 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Сопротивление растеканию для одного ВЭ:

$$R_{\text{овэ}} = \frac{\rho_{p6}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right] \quad (56)$$

где l – длина, м;

d – приведенный диаметр, м;

t – расстояние от поверхности до центра ВЭ, м.

$$d = 0,95 \cdot b, \quad (57)$$

где b – ширина уголка, м.

Для одного ВЭ, по (56,57):

$$d = 0,95 \cdot 0,05 = 0,0475 \text{ м}$$

$$t = 3/2 + 0,8 = 2,3 \text{ м}$$

$$R_{\text{овэ}} = \frac{2200}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 3}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) \right] = 60,962 \text{ Ом}$$

Расчетное число ВЭ:

$$n' = R_{\text{овэ}} / R_n \quad (58)$$

где R_n – допустимое сопротивление ЗУ, Ом.

$$n' = 60,962 / 4 = 15,2 \approx 16 \text{ шт}$$

Длина ГЭ:

$$l_z = 1,05 \cdot a \cdot n' \quad (59)$$

где a – расстояние между ВЭ, м.

$$a = l_{\text{пер}} / n' \quad (60)$$

где $l_{\text{пер}}$ – периметр здания ТП, м» [13].

$$l_{\text{пер}} = 2 \cdot (9,97 + 7,62) = 35,18 \text{ м}$$

$$a = 35,18 / 16 = 2,2 \text{ м}$$

$$l_z = 1,05 \cdot 2,2 \cdot 16 = 36,96 \text{ м}$$

«Сопротивление растеканию ГЭ:

$$R_{\text{зз}} = \frac{\rho_{\text{пз}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{d \cdot t} \right) \quad (61)$$

где l – длина, м;

d – расчетный диаметр, м;

t – расстояние от поверхности до центра ГЭ, м.

$$d = 0,5 \cdot b, \quad (62)$$

где b – ширина полосы, м.

Для ГЭ, по (61,62):

$$d = 0,5 \cdot 0,05 = 0,025 \text{ м}$$

$$t = 0,05 / 2 + 0,8 = 0,825 \text{ м}$$

$$R_{\text{зз}} = \frac{2800}{2 \cdot 3,14 \cdot 36,96} \cdot \ln \left(\frac{36,96^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 2,757 \text{ Ом}$$

Итого сопротивление ЗУ:

$$R_{\text{зп}} = \frac{R_{\text{обз}} \cdot R_{\text{зз}}}{R_{\text{обз}} \cdot \eta_6 \cdot n + R_{\text{зз}} \cdot \eta_2} \quad (63)$$

где η_6 , η_2 – коэффициенты использования ВЭ и ГЭ.

$$R_{\text{зп}} = \frac{60,962 \cdot 2,757}{60,962 \cdot 0,51 \cdot 16 + 2,757 \cdot 0,3} = 3,792 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$$

Сопротивление не будет превышать допустимое.

Схема заземления ТП – на рисунке 12.

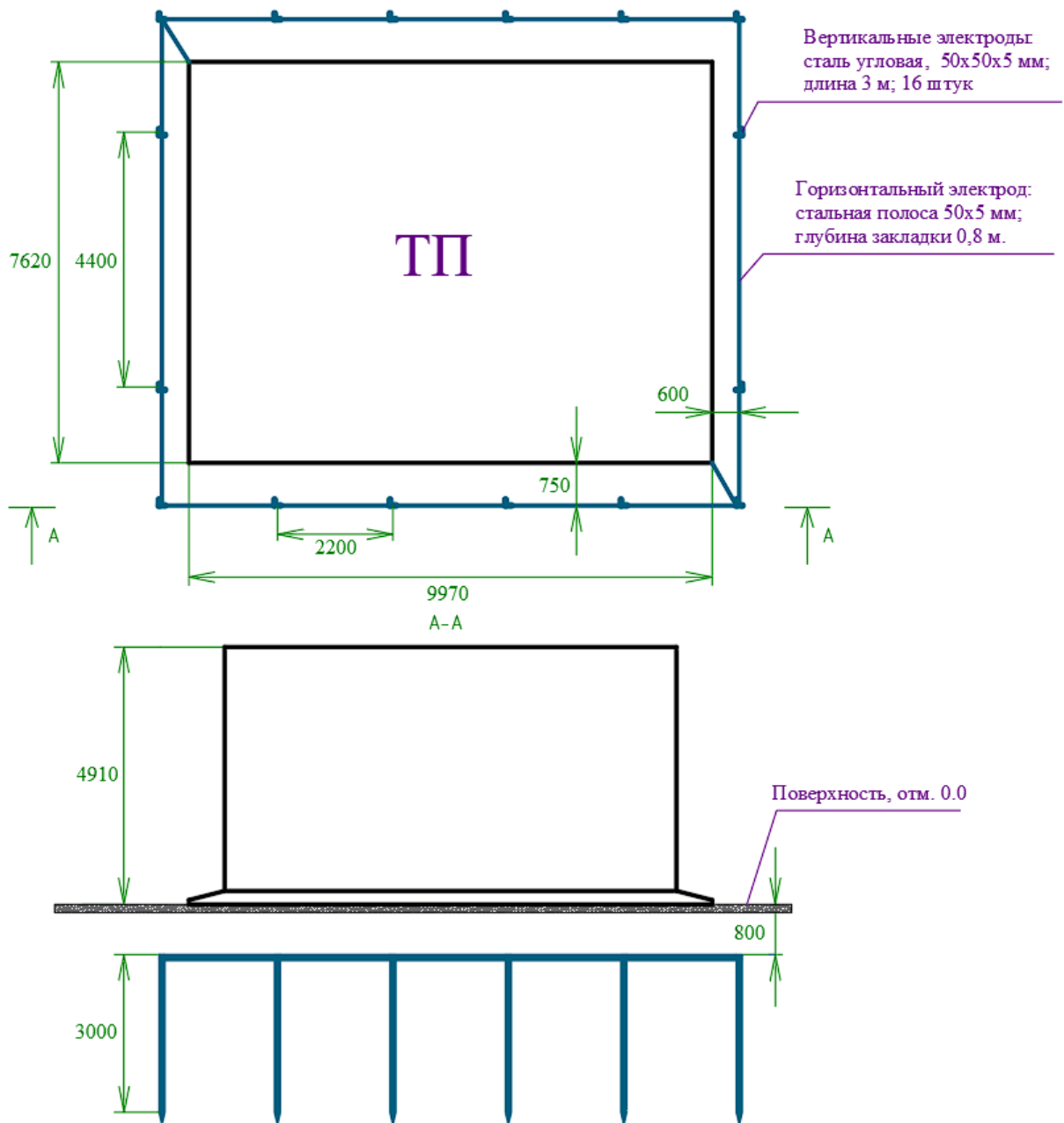


Рисунок 12 – Схема заземления ТП

Система заземления ТП обеспечивает безопасную эксплуатацию системы электроснабжения» [13].

Выводы.

Безопасность и охрана труда на предприятии обеспечиваются согласно актуальным нормативным техническим документам. Заземление на подстанции обеспечит надежную и безопасную эксплуатацию системы электроснабжения.

Заключение

Выполнена разработка системы электроснабжения ремонтного участка предприятия ООО «Газпромнефть Энергосистемы».

Решены задачи:

- проанализировано существующее электроснабжение ремонтного участка, выявлены значимые технико-эксплуатационные недостатки (устаревание и критический износ оборудования, низкие надежность и энергоэффективность) и предложены мероприятия по их устранению (установка и применение нового современного оборудования и материалов с высокими технико-эксплуатационными показателями);
- определены актуальные электрические нагрузки по отдельным цехам и зданиям (полные расчетные нагрузки составили от 1,54 кВА до 145,61 кВА) и по ремонтному участку в целом (расчетные нагрузки составили от 298,5 кВт, 220,72 квар, 371,24 кВА);
- обеспечена автоматическая компенсация реактивной мощности (на подстанции установлено две АУКРМ 0,4 кВ по 55 квар), повышение общей энергоэффективности СЭС (на подстанции установлены АУКРМ, энергоэффективные силовые трансформаторы марки ТМГ12-250);
- выбраны кабели и новое современное оборудование СЭС, с учетом актуальных электрических нагрузок;
- рассчитаны рабочие и аварийные режимы;
- рассчитана микропроцессорная релейная защита и автоматика, выбран терминалы серии Сириус;
- рассмотрены вопросы обеспечения охраны труда и безопасности, спроектировано заземление на подстанции.

Предложенная СЭС ремонтного участка обеспечит надежное энергоэффективное питание потребителей и рекомендована к реализации.

Список используемых источников

1. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений : учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2023. 415 с.
2. Бирюлин В.И. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
3. Бирюлин В.И. Электроснабжение промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 204 с.
4. Горемыкин С. А. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2023. 191 с.
5. Грунтович Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2023. 271 с.
6. Иванов С.Н. Надежность электроснабжения : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
7. Куксин А. В. Релейная защита электроэнергетических систем : учебное пособие. – М. : Инфра-Инженерия, 2021. 200 с.
8. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.
9. Монаков В. К. Электробезопасность: теория и практика : монография. – 2-изд. М. : Инфра-Инженерия, 2023. 184 с.
10. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: Учебное пособие. М. : Форум, 2022. 416 с.
11. Пасютина О. В. Охрана труда при технической эксплуатации электрооборудования : учебное пособие. – 4-е изд., стер. Минск : РИПО, 2021. 115 с.
12. Петухов Р.А. Электроснабжение : учебное пособие. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. 328 с.

13. Полуянович Н.К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. СПб. : Лань, 2023. 396 с.
14. Правила устройства электроустановок: действующие разделы 6-го и 7-го изданий. М. : ИНФРА-М, 2023. 832 с.
15. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания. М. : Издательство НЦ ЭНАС, 2002. 149 с.
16. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования : учебное пособие. – 3-е изд., испр. М. : ИНФРА-М, 2023. 214 с.
17. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению : учебное пособие. – 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2023. 136 с.
18. Щербаков Е.Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2023. 495 с.
19. Щербаков, Е. Ф. Электрические аппараты : учебное пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2022. 303 с.
20. Школа для электрика. Сайт. [Электронный ресурс]. – <http://electricalschool.info/> (дата обращения: 19.11.2023).