

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 производственной базы ООО «Жигулевское  
автотранспортное предприятие»

Обучающийся

Д.С. Гладченко

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, Ю.В. Черненко

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

Тольятти 2022

## Аннотация

Выпускная квалифицированная работа состоит из 44 с., 12 рис., 9 табл., 20 источников.

Ключевые слова: проектирование, электроснабжение, нагрузка, потребитель, линия, ток, напряжение, мощность, охрана труда, релейная защита, заземляющее устройство.

Проектируется электроснабжение производственной базы ООО «Жигулевское автотранспортное предприятие».

Объект исследования: производственная база ООО «ЖАТП».

Предмет исследования: электроснабжение базы.

Цель работы: разработка проекта системы электроснабжения (СЭС) для надежного электроснабжения производственных участков.

Актуальность работы: в ближайшее время, для обеспечения нужд предприятия будет построена новая производственная база, для которой требуется разработать систему электроснабжения. Производственное оборудование базы включает в себя большое число электроприемников (асинхронные электроприводы, станки, преобразователи, технологические линии, сварочные инверторы и т.д.), эксплуатация которых требует качественного и надежного питания от электрической сети.

Содержание работы включает вопросы: характеристика предприятия и производственной базы, проектирование электроснабжения базы, охрана труда и окружающей среды.

## Содержание

Введение.....	4
1 Исходные данные .....	5
1.1 Анализ действующей схемы.....	5
1.2 Характеристика базы .....	5
2 Проектирование электроснабжения базы.....	8
2.1 Электрические нагрузки.....	8
2.2 Выбор устройств КРМ.....	9
2.3 Выбор подстанции .....	11
2.4 Питающая линия 10 кВ.....	13
2.5 Распределительная сеть до 1 кВ .....	15
2.6 Расчет режимов КЗ.....	18
2.7 Аппараты защиты КЛ распределительной сети .....	27
2.8 Релейная защита питающей линии 10 кВ.....	30
2.9 АВР питания котельной .....	33
3 Охрана труда и безопасность .....	36
3.1 Обеспечение безопасности.....	36
3.2 Расчет заземляющего устройства подстанции.....	38
Заключение .....	42
Список используемых источников.....	43

## Введение

Проектируется электроснабжение производственной базы ООО «Жигулевское автотранспортное предприятие» (ООО «ЖАТП»).

На предприятии имеется собственный автопарк, состоящий из автобусов и микроавтобусов различной вместимости, а также легковых и грузовых автомобилей.

Для обслуживания и ремонта автотранспорта, а также других обеспечения других нужд предприятия имеется собственная производственная база, на территории которой расположены цеха и вспомогательные здания.

В связи с увеличением объема автопарка и соответствующих видов работ, в скором времени планируется постройка дополнительной производственной базы, аналогичной по своей структуре и оборудованию действующей. Для вводимой в эксплуатацию новой базы необходимо спроектировать ее электроснабжение.

Цель работы: разработка проекта СЭС для надежного электроснабжения производственных участков.

Задачи работы:

- выполнить расчет электрических нагрузок;
- выбрать устройства КРМ;
- выбрать подстанцию и силовые трансформаторы;
- выбрать кабели питающей КЛ до ТП и распределительной сети 0,4 кВ;
- рассчитать режимы КЗ;
- выбрать аппаратуру защиты электрической сети;
- рассмотреть охрану труда и безопасность, спроектировать заземляющее устройство подстанции.

## **1 Исходные данные**

### **1.1 Анализ действующей схемы**

Действующая однолинейная схема электроснабжения производственной базы (ПБ) (действующей в настоящее время ПБ) представлена 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» [19].

В связи с увеличением объема автопарка и соответствующих видов работ, в скором времени планируется рядом с действующей ПБ постройка дополнительной ПБ, аналогичной по своей структуре и оборудованию действующей ПБ, для которой в данной работе будет проектироваться система электроснабжения (СЭС).

### **1.2 Характеристика базы**

Подстанция 10/0,4 кВ, обеспечивающая базу электроснабжением, питается от распределительного устройства (РУ) 10 кВ энергосистемы.

Генплан территории производственной базы (ПБ) – на рисунке 1.

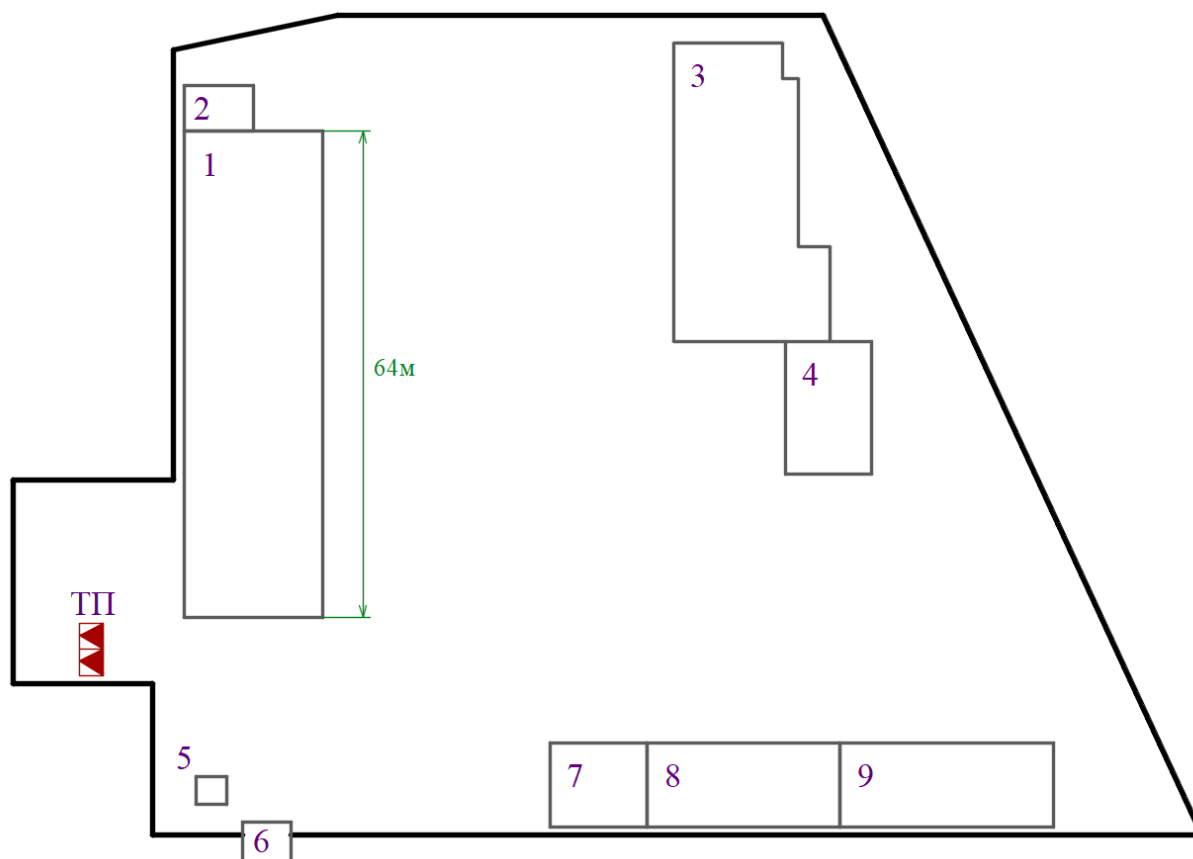


Рисунок 1 – Генплан территории

Электрические нагрузки базы включают в себя электроприемники, расположенные в 9 производственных участках (ПУ), которые являются административными, производственными, хозяйственными или вспомогательными постройками. Электроснабжение ПУ будет осуществляться от ТП 10/0,4 кВ, расположенной в юго-западной части территории.

Категории надежности электроснабжения ПУ:

- 1 категория: котельная;
- 2 категория: цеха, склад, гараж;
- 3 категория: сторожка, КПП.

Характеристики электропотребления по ПУ – в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики электропотребления участков

№ цеха (по рисунку 1)	Участки	$P_n$ , кВт	$K_c$	$\cos\phi$
1	Цех ТО и ремонта автотранспорта	419,6	0,28	0,86
2	Котельная	19,9	0,69	0,79
3	Склад	14,9	0,25	0,89
4	Цех ДВС	183,7	0,36	0,90
5	Сторожка	7,2	0,15	0,95
6	КПП	7,9	0,15	0,95
7	Гараж	33,1	0,38	0,78
8	Цех трансмиссий	91,2	0,35	0,79
9	Механический цех	139,6	0,26	0,77

#### Выводы.

Приведен анализ однолинейной схемы электроснабжения действующей производственной базы, по результатам которого можно отметить, что общая структура СЭС, в целом, соответствует требованиям к электроснабжению потребителей по надежности и безопасности эксплуатации. Однако, можно отметить устаревшее электрооборудование (ЭО): масляные выключатели, вентильные разрядники, силовые трансформаторы неэнергоэффективной марки ТМ, автоматические выключатели устаревших типов, кабели с бумажной изоляцией. Кроме того, за долгий период эксплуатации электрические нагрузки ПУ базы изменились и на данный момент сечения жил кабелей от ТП до ПУ не являются оптимальными. Согласно проектной документации по базе систематизированы исходные данные для проектирования СЭС вводимой в эксплуатацию базы, недостатки схемы электроснабжения действующей ПБ будут учтены при проектировании новой СЭС.

## 2 Проектирование электроснабжения базы

### 2.1 Электрические нагрузки

«Для расчета актуальных электрических нагрузок цехов (производственных участков) используется метод коэффициента спроса активной мощности нагрузок.

Формулы для расчета электрических нагрузок по цехам:

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

где  $K_c$  – коэффициент спроса активной мощности;

$P_y$  – активная нагрузка электроприемников, кВт» [6].

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

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

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

Для участка №1, по (1-4):

$$P_p = 0,28 \cdot 419,6 = 117,488 \text{ кВт},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{1 - 0,86^2}}{0,86} = 0,593,$$

$$Q_p = 117,488 \cdot 0,593 = 69,713 \text{ квар},$$

$$S_p = \sqrt{117,488^2 + 69,713^2} = 136,614 \text{ кВА}.$$

Нагрузки ПУ по базе рассчитаны в таблице 2.



Таблица 2 – Расчет нагрузок участков

Участки	$P_y$ , кВт	$K_c$	$tg\varphi$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА
Цех ТО и ремонта автотранспорта	419,6	0,28	0,593	117,488	69,713	136,614
Котельная	19,9	0,69	0,776	13,731	10,656	17,381
Склад	14,9	0,25	0,512	3,725	1,908	4,185
Цех ДВС	183,7	0,36	0,484	66,132	32,029	73,480
Сторожка	7,2	0,15	0,329	1,08	0,35	1,14
КПП	7,9	0,15	0,329	1,185	0,39	1,25
Гараж	33,1	0,38	0,802	12,578	10,09	16,13
Цех трансмиссий	91,2	0,35	0,776	31,92	24,77	40,41
Механический цех	139,6	0,26	0,829	36,296	30,08	47,14
$\Sigma$	917,1	0,31	0,520	284,135	179,991	336,347

«Освещение территории будет обеспечиваться автономными светодиодными светильниками с солнечными панелями, нагрузка освещения территории не учитывается» [19].

## 2.2 Выбор устройств КРМ

«Компенсация реактивной мощности (КРМ) производится до нормативного значения коэффициента мощности  $\cos\varphi = 0,95$ . Требуемая мощность компенсирующих устройств (КУ) определяется по формуле:

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

где  $P_p$  – активная расчетная мощность нагрузки, кВт;

$tg\varphi$  – тангенс угла  $\varphi$  до компенсации;

$tg\varphi_k$  – нормативный тангенс угла  $\varphi$  (соответствует нормативному  $\cos\varphi = 0,95$ )» [7].

$$Q_{к.у.} = 0,9 \cdot 284,135 \cdot (0,633 - 0,33) = 77,6 \text{ квар.}$$

На шинах 0,4 кВ ТП будут установлены две автоматические установки компенсации реактивной мощности (АУКРМ) по 40 квар.

КРМ посчитана в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет КРМ

Показатели	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА
$\Sigma$ на НН	0,845	0,633	284,135	179,991	336,347
КУ, квар	-	-	-	80	-
$\Sigma$ на НН с КУ	0,943	0,352	284,135	99,991	301,216

Потери в трансформаторах:

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

$$\Delta P_m = 0,02 \cdot 301,216 = 6,024 \text{ кВт};$$

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

$$\Delta Q_m = 0,1 \cdot 301,216 = 30,122 \text{ квар.}$$

Нагрузка ТП по стороне ВН, по (4):

$$S'_p = \sqrt{(284,135 + 6,024)^2 + (99,991 + 30,122)^2} = 317,997 \text{ кВА.}$$

«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» [8].

### 2.3 Выбор подстанции

«Если в состав нагрузок ТП входят потребители 1 и/или 2 категорий надежности электроснабжения, устанавливается два силовых трансформатора.

Требуемая мощность трансформаторов с учетом КРМ:

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

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

$S_{р.к.}$  – расчетная нагрузка, кВА» [11].

$$S_m \geq 0,7 \cdot 301,216 = 210,85 \text{ кВА.}$$

Устанавливается 2хТМГ12-250 по 250 кВА.

«Коэффициент загрузки в аварийном режиме:

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

где  $S_m$  – номинальная мощность трансформатора, кВА» [13].

$$K_{з.ав.} = \frac{301,216}{250} = 1,2 \leq 1,4.$$

Выбирается ТП марки 2КТПН-250/10/0,4.

«Комплектные трансформаторные 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.

Данная подстанция является комплектной, в стандартный комплект входит следующее электрооборудование:

- вакуумные выключатели серии ВВ/TEL – 10/630;
- разъединители серии РВ-10-400;
- опорные изоляторы ИОЭЛ-10;
- трансформаторы тока ТПЛК-10-30/5,
- контрольный кабель КВВГнг-LS-5х2,5 мм<sup>2</sup>;
- трансформаторы напряжения НАМИ-10-95;
- ограничители перенапряжения серии ОПН-10;
- предохранители ПКТ-103/20;
- автоматические выключатели ВА-52-39;
- трансформаторы тока ТШЛ-0,66-600/5.

Установка силовых трансформаторов осуществляется после размещения КТПН на месте установки» [16].

## 2.4 Питающая линия 10 кВ

«Рабочий ток КЛ 10 кВ:

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

где  $S'_p$  – расчетная мощность ТП, кВА;

$U_n$  – напряжение линии, кВ;

$n$  – число цепей, шт» [14].

$$I_p = \frac{317,997}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 9,18 \text{ A.}$$

«Экономическое сечение жилы кабеля:

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

где  $j_{\text{эк}}$  – экономическая плотность тока, А/ мм<sup>2</sup>» [7].

$$F_{\text{эк}} = \frac{9,18}{1,4} = 6,6 \text{ мм}^2.$$

Принимаем кабель АПвП-3х16 мм<sup>2</sup>.

$$I_{\text{ав}} = \frac{317,997}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1} = 18,36 \text{ А}.$$

«Допустимый ток кабеля с учетом условий прокладки:

$$I'_{\text{дон}} = I_{\text{дон}} \cdot K_{\text{нов}} \cdot K_{\text{сп}} \cdot K_{\text{пон}}, \quad (12)$$

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

$K_{\text{нов}}$ ,  $K_{\text{сп}}$ ,  $K_{\text{пон}}$  – коэффициенты, учитывающие недогруженность КЛ, среду и групповую прокладку» [18].

$$I'_{\text{дон}} = 75 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 0,93 = 94,163 \text{ А} > I_{\text{ав}}.$$

«Потери напряжения в КЛ:

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

где  $I_p$  – максимальный ток КЛ, А;

$L$  – длина КЛ, км;

$r_0, x_0$  – удельные сопротивления кабеля, Ом/км» [17].

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 18,36 \cdot 0,402 \cdot 100}{10000} (1,94 \cdot 0,915 + 0,102 \cdot 0,404) = 0,23 \% < 5 \%$$

Потери напряжения не превышают допустимые.

## 2.5 Распределительная сеть до 1 кВ

«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 кабельным линиям; 3-ей категории – по одноцепным» [19].

Расчет для КЛ до ПУ №1.

«Наибольший ток линии:

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

где  $S_p$  – расчетная нагрузка, кВА;

$U_n$  – напряжение линии, кВ» [14].

$$I_p = \frac{136,614}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 207,57 \text{ A.}$$

Выбирается кабель АВБШв с  $I_{доп} = 230 \text{ A}$  [18].

По формуле (13):

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 207,57 \cdot 0,01418 \cdot 100}{380} (0,42 \cdot 0,86 + 0,082 \cdot 0,51) = 0,484 \% < 5 \%$$

Выбор кабелей – в таблице 4.

Таблица 4 – Выбор кабелей

№ участка (на генплане, по рисунку 1)	Ip, А	сечение АВШв, мм <sup>2</sup>	Idоп, А	ΔU, %
1	207,57	4·70+1·35	230	0,484
2	38,27	30	55	1,132
3	25,44	12,5	27	1,688
4	111,64	4·25+1·16	130	1,006
5	34,45	12	34	0,982
6	37,80	18	55	1,028
7	64,48	50	75	1,836
8	61,39			1,036
9	71,62			1,481

Суммарные потери напряжения до наиболее удаленного от ТП потребителя (ПУ №3), с учетом потерь в КЛ 10 кВ до ТП:

$$\sum \Delta U_{л.уд.} = 0,23 + 1,688 = 1,918 \% < 5 \%$$

Схема электрической сети – на рисунке 3.



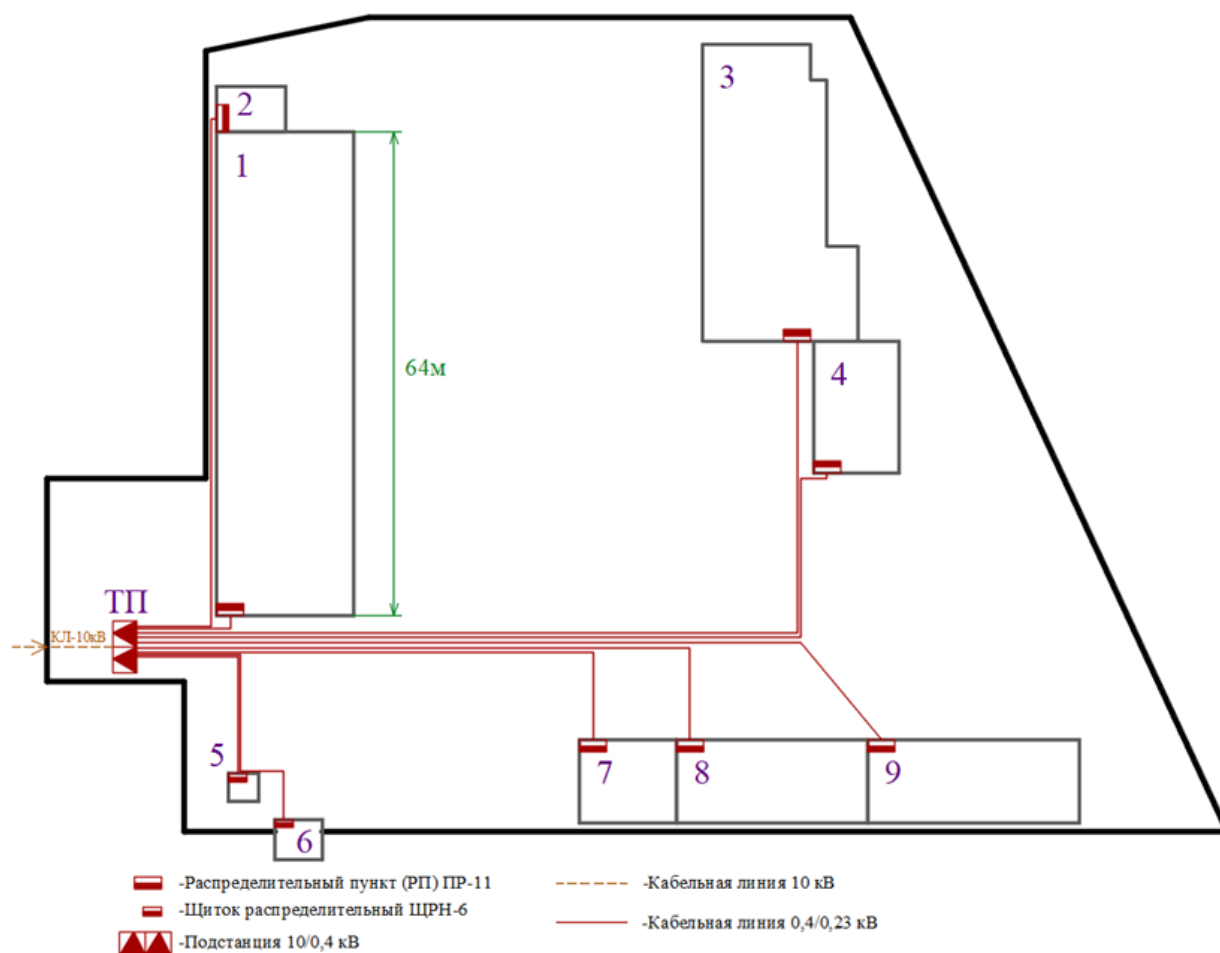


Рисунок 3 – Схема электрической сети

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.

Далее требуется рассчитать режимы КЗ.

## 2.6 Расчет режимов КЗ

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

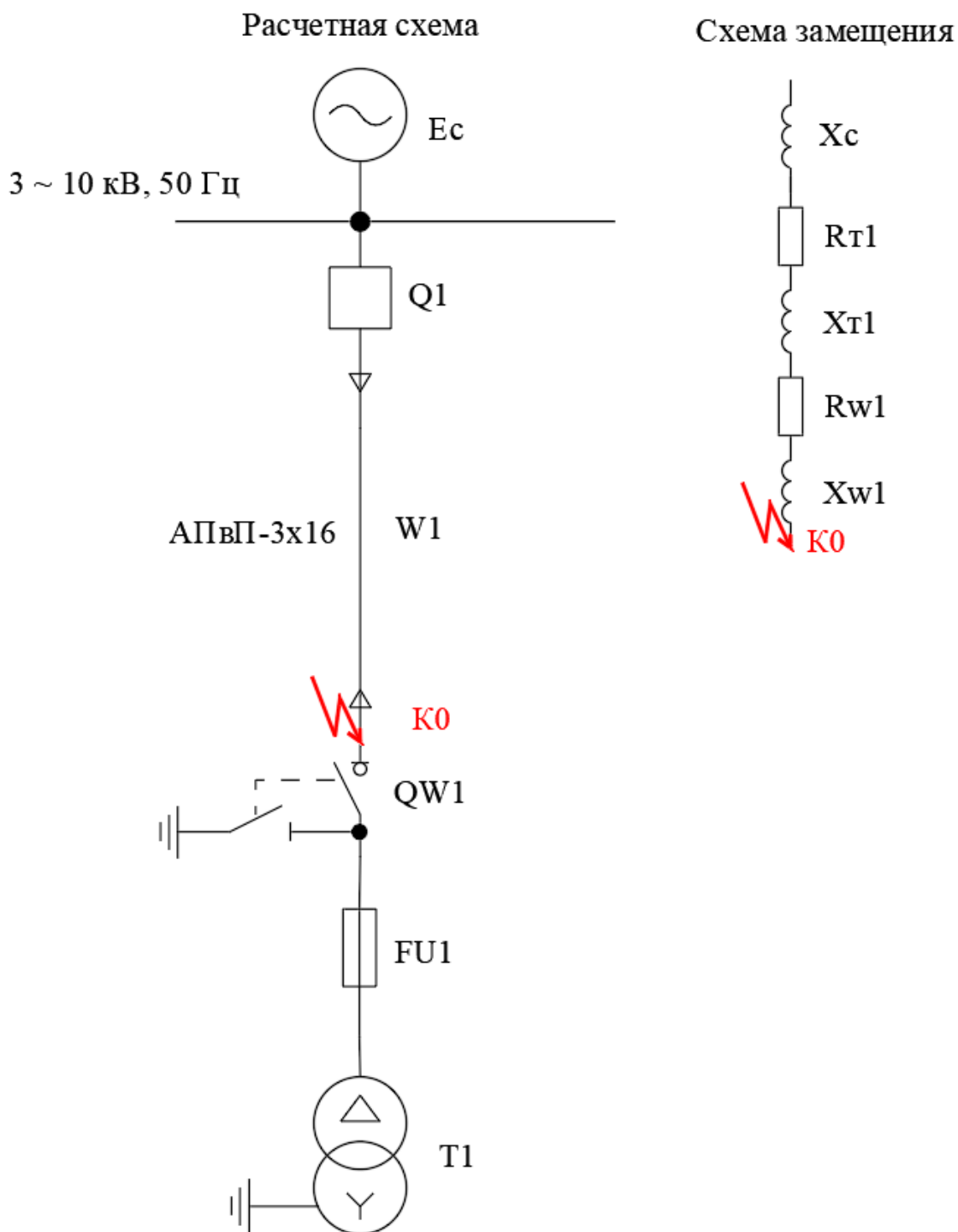


Рисунок 4 – Расчетные схемы

«Значение трехфазного тока КЗ в начале КЛ 10 кВ (выключатель 10 кВ ГПП), согласно данным по предприятию:  $I_{к.з.ГПП}^{(3)} = 9,295$  кА» [19].

«Сопротивление системы:

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

где  $U_k$  – напряжение КЗ, кВ» [12].

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

«Сопротивления КЛ 10 кВ:

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

где  $L_{w1}$  – длина КЛ, км» [12].

$$X_{w1} = 0,102 \cdot 0,402 = 0,041 \text{ Ом;}$$

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

$$R'_{w1} = 1,94 \cdot 0,402 = 0,78 \text{ Ом.}$$

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» [12].

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

«Ударный ток КЗ:

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

где  $K_y$  – ударный коэффициент» [12].

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

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.

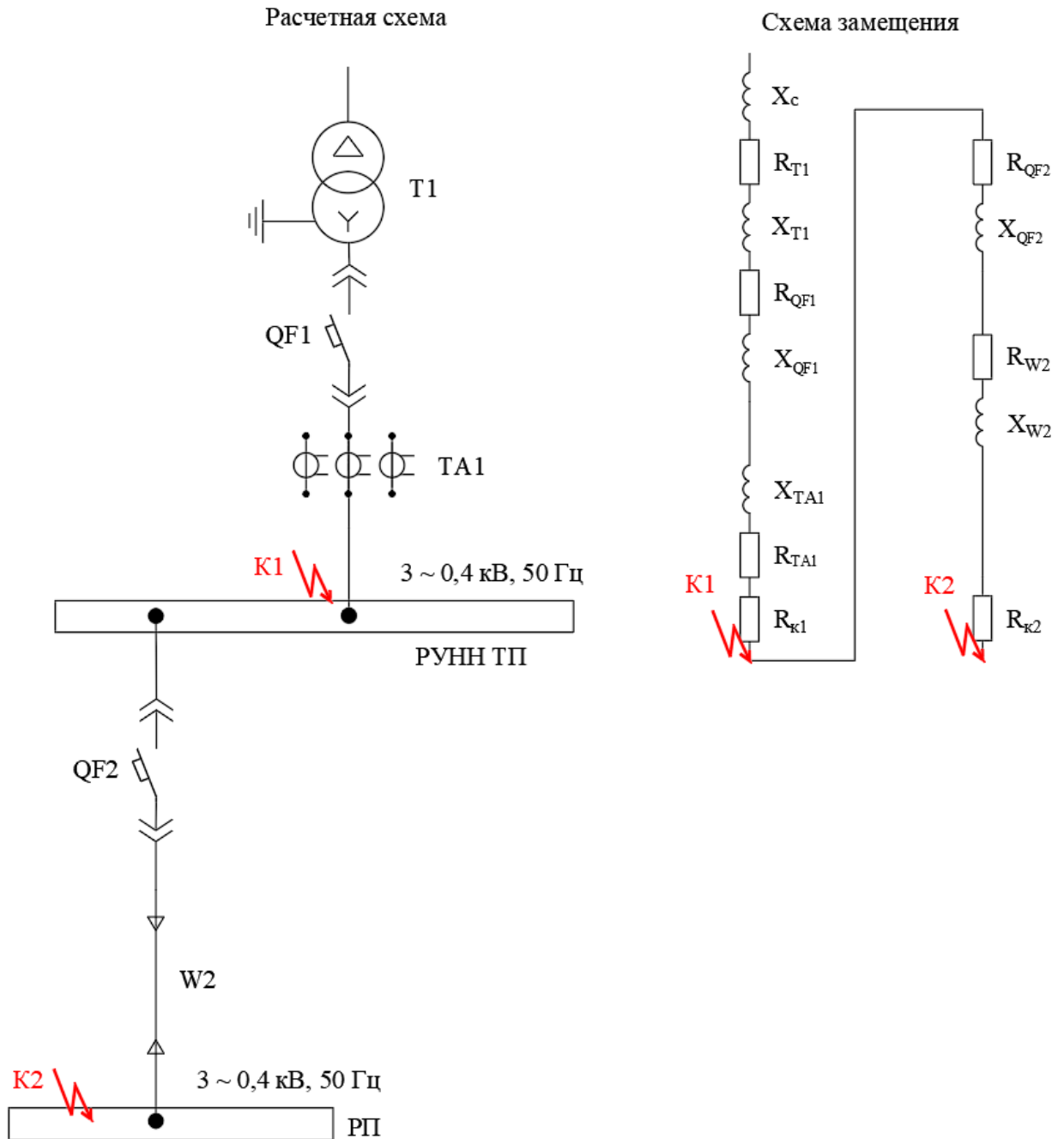


Рисунок 5 – Расчетные схемы

«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»  
[12].

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

Сопротивление приводится к ступени 0,4 кВ:

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

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

«Сопротивления линии W2:

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

где  $L_{кЛ1}$  – длина КЛ, м» [12].

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

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

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

«Переходные сопротивления:  $R_{к1} = 0,0034 \text{ мОм; } R_{к2} = 0,85 \text{ мОм.}$

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.

$$R_{\partial 1} = R_{T1} + R_{QF1} + R_{TA1} + R_{к1}, \quad (26)$$

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

Индуктивные сопротивления элементов:

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

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

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

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»  
[5].

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

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

Сопротивления до точек КЗ:

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

$$R_{\text{к1}} = 9,58 \text{ мОм,}$$

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

$$X_{\text{к1}} = 39,589 + 27,34 = 66,929 \text{ мОм,}$$

$$Z_{\text{к1}} = \sqrt{9,58^2 + 66,929^2} = 67,611 \text{ мОм,}$$

$$R_{к2} = R_{\text{э1}} + R_{\text{э2}}, \quad (32)$$

$$R_{к2} = 9,58 + 4,096 = 13,676 \text{ мОм},$$

$$X_{к2} = X_c + X_{\text{э1}} + X_{\text{э2}}, \quad (33)$$

$$X_{к2} = 39,589 + 27,34 + 1,32 = 68,249 \text{ мОм},$$

$$Z_{к2} = \sqrt{13,676^2 + 68,249^2} = 69,606 \text{ мОм}.$$

Токи КЗ в точке К1, по (19, 20):

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 67,611 \cdot 10^{-3}} = 3,42 \text{ кА},$$

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

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:

$$R_{\text{н1}} = R_{к1}, \quad (36)$$

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

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

$$Z_{\text{н1}} = \sqrt{0,0034^2 + 79,177^2} = 79,18 \text{ мОм},$$

$$R_{\text{н2}} = R_{к1} + R_{\text{нW2}} + R_{к2}, \quad (38)$$



$$R_{n2} = 0,0034 + 6,267 + 0,85 = 7,12 \text{ мОм},$$

$$X_{n2} = X_{nw2} + 2 \cdot X_c, \quad (39)$$

$$X_{n2} = 4,52 + 2 \cdot 39,539 = 83,697 \text{ мОм},$$

$$Z_{n2} = \sqrt{7,12^2 + 83,697^2} = 83,999 \text{ мОм}.$$

«Однофазный ток КЗ в точке К1:

$$I_K^{(1)} = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3} \cdot (Z_n + \frac{Z_T^{(1)}}{3})}, \quad (40)$$

где  $U_\Delta$  – линейное напряжение, кВ;

$Z_T^{(1)}$  – однофазное сопротивление трансформатора, мОм» [4].

$$I_{K1}^{(1)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot (79,18 + \frac{312}{3}) \cdot 10^{-3}} = 1,26 \text{ кА}.$$

Результаты расчетов – в таблице 5.

Таблица 5 – Токи КЗ

Точка КЗ	$I_K^{(3)}$ , кА	$i_y$ , кА	$I_K^{(1)}$ , кА
К1	3,42	6,28	1,26
К2	3,15	5,79	1,17

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

Таблица 6 – Токи КЗ в сети 0,4 кВ

№ цеха, ввод РП/ЩРН	$I_{к^{(3)}}$ , кА	$i_y$ , кА	$I_{к^{(1)}}$ , кА
1	3,15	5,79	1,17
2	0,87	1,61	0,77
3	0,24	0,44	0,20
4	2,08	3,83	1,48
5	- (однофазн. КЛ)	2,67	1,15
6		4,64	1,68
7	2,45	4,51	1,65
8	2,18	4,01	1,53
9	1,88	3,45	1,38

«Термически стойкое к токам КЗ сечение жил кабелей:

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

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

$t_{II}$  – приведенное время КЗ (срабатывания релейной защиты для КЛ 10 кВ и автоматов для КЛ 0,4 кВ), с;

$K_T$  – температурный коэффициент» [15].

Для КЛ до цеха №1:

$$F_T = 3150 \cdot \sqrt{0,03} / 95 = 5,74 \text{ мм}^2 < 70 \text{ мм}^2.$$

Проверка КЛ – в таблице 7.

Таблица 7 – Проверка КЛ

№ цеха	АВБШв, сечение	Стер, мм <sup>2</sup>
1	4·70+1·35	5,74
2	5·6	1,59
3	5·2,5	0,44
4	4·25+1·16	3,79
5	3·4	2,10
6	3·6	3,06
7	5·10	4,47
8		3,97
9		3,43
КЛ 10 кВ	АПвП-3·16	12.89

КЛ термически устойчивы.

## 2.7 Аппараты защиты КЛ распределительной сети

«Выбор автоматических выключателей (АВ) проводится по условиям:

- по напряжению:

$$U_{ном} > U_c, \quad (42)$$

- по току теплового расцепителя (ТР)» [8]:

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

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	$1,1 \cdot I_p, \text{А}$	Авт. выкл.	$I_{\text{ном}}, \text{А}$
1	228,3	ВА-52-39	250
2	42,1	ВА-51-35	50
3	28,0		32
4	122,8		160
5	37,9		40
6	41,6		50
7	70,9		80
8	67,5		
9	78,8		

«АВ проверяются в режиме КЗ:

- по коммутационной способности (ПКС):

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

- по чувствительности срабатывания:

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

где  $I_{\text{к}}^{(1)}$  – ток однофазного КЗ, кА» [8].

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	Иэм.р., А	Кч
1	ВА-52-39	25	960	1,2
2	ВА-51-35	500	350	2,2
3		288	128	1,6
4		1440	640	2,3
5		400	280	4,1
6		450	350	4,8
7		640	560	2,9
8		720	560	2,7
9		900	700	2,0

Выбранные АВ удовлетворяют требованиям.

Внешний вид АВ – на рисунке 6.

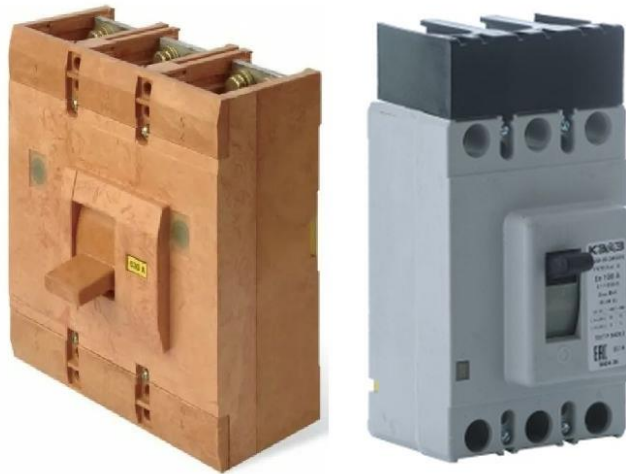


Рисунок 6 – Автоматические выключатели

Далее рассмотрим микропроцессорную релейную защиту (РЗ).

## 2.8 Релейная защита питающей линии 10 кВ

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



Рисунок 7 – Терминал Сириус-2МЛ-02

Схема защиты – на рисунке 8.

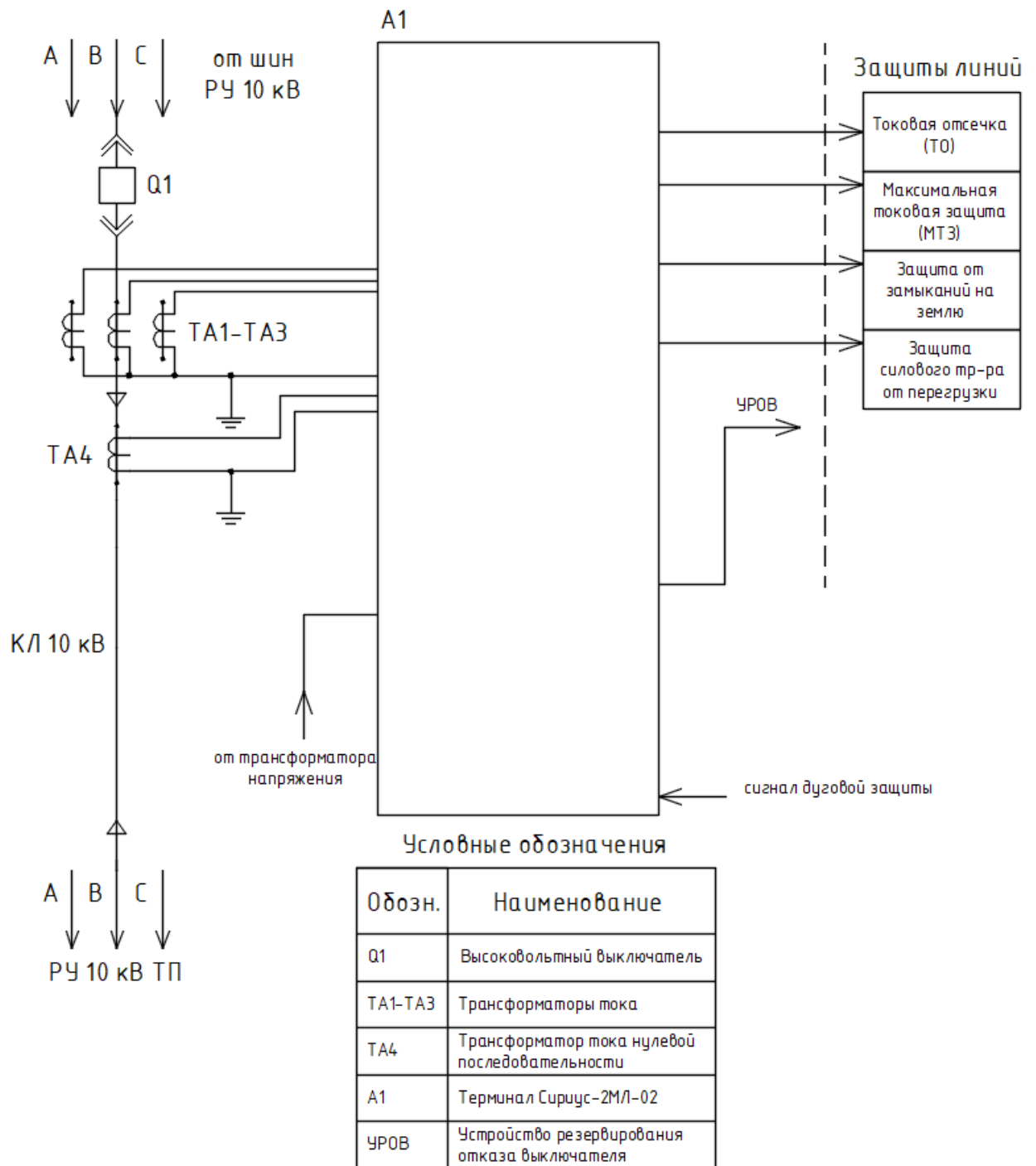


Рисунок 8 – Схема защиты КЛ 10 кВ

«Токовая отсечка (ТО):

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

где  $K_{отс}$  – коэффициент отстройки» [1].

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

«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» [1]:

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

$$I_{C3} \geq \frac{1,1 \cdot 1,18}{0,935} \cdot 20,23 = 28,084 \text{ А.}$$

$$k_u = \frac{5050}{28,084} = 179,9 \geq 1,5.$$

«Ток срабатывания реле:

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

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

$n_T$  – коэффициент трансформации ТТ» [4].

$$I_{CP} = 28,084 \cdot \frac{1}{30/5} = 4,681 \text{ А.}$$



«Ток срабатывания защиты от замыканий на землю:

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

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 линии, км» [4].

$$I_C = 0,55 \cdot 0,402 = 0,221 \text{ А}$$

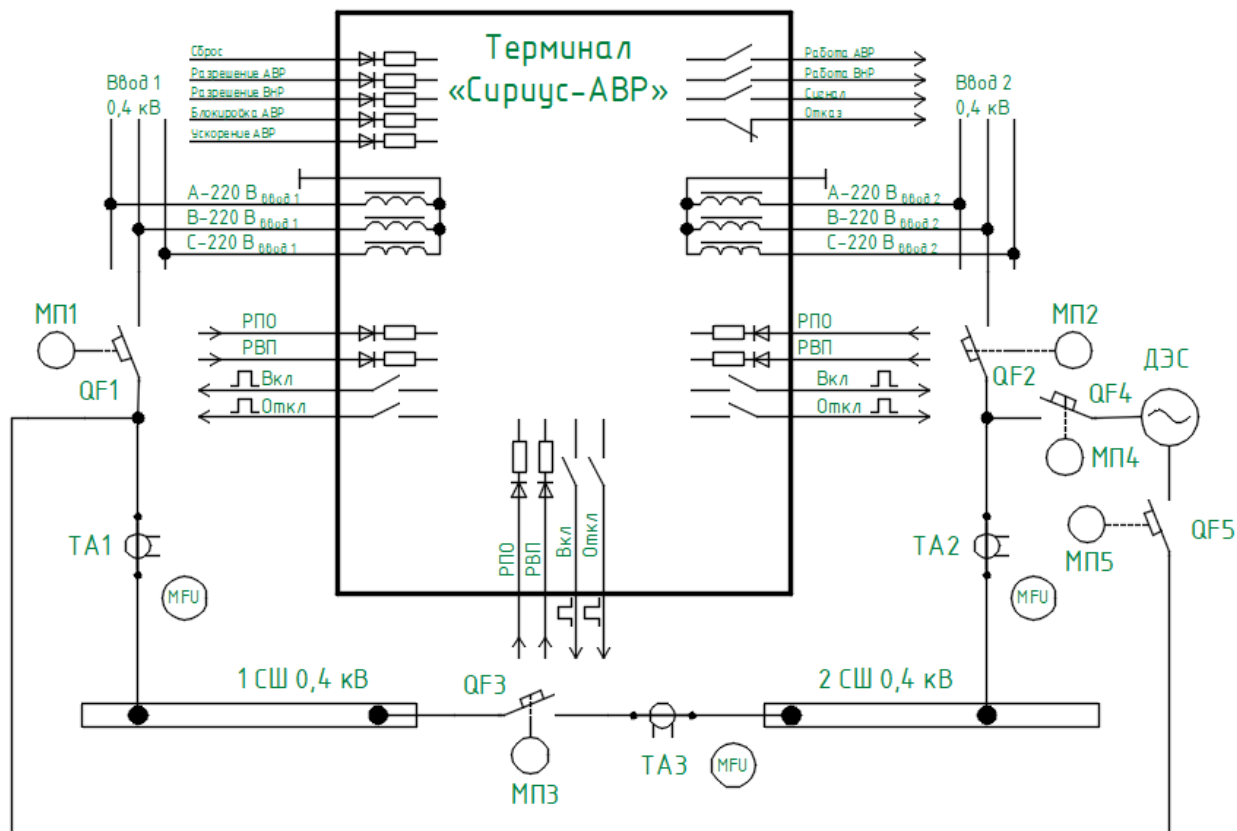
$$I_{C.з.} \geq 1,2 \cdot 2,5 \cdot 0,221 = 0,663 \text{ А}$$

## 2.9 АВР питания котельной

«АВР предназначен для автоматического переключения питания ответственных потребителей на резервный источник при пропадании либо несоответствии норм показателем 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 пускового органа минимального напряжения:

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

где  $U_{НОМ}$  – напряжение сети, В.

Напряжение срабатывания максимального реле напряжения» [8]:

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

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

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

«Время срабатывания пускового органа АВР:

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

где  $t_1$  – наибольшее время срабатывания АВ, с;

$\Delta t$  – ступень селективности, с» [8].

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

**Выводы.**

Определены ожидаемые электрические нагрузки по производственным участкам базы, на основании которых рассчитана КРМ и выбрана современная комплектная подстанция. Выбраны кабели питающей и распределительной сетей, выбрана аппаратура защиты электрических сетей на основе микропроцессорных терминалов РЗА и автоматических выключателей. С учетом расположения производственных участков и трансформаторной подстанции составлен план прокладки кабельных линий по территории базы.

## **3 Охрана труда и безопасность**

### **3.1 Обеспечение безопасности**

«Охрана труда (ОТ) и техника безопасности (ТБ) при монтаже, эксплуатации, обслуживании, ремонте системы электроснабжения обеспечиваются согласно ГОСТ 12.0.004-2015» [3].

«Обеспечение 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].



Рисунок 10 – Информационный плакат по СИЗ

Пример плаката по электробезопасности – на рисунке 11.



Рисунок 11 – Плакат по электробезопасности

### 3.2 Расчет заземляющего устройства подстанции

«Удельное сопротивление грунта для вертикальных и горизонтальных электродов:

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

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом · м;

$K_c$  – коэффициент сезонности.

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

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

Используем контурное заземляющее устройство (ЗУ).

Для вертикальных электродов (ВЭ) используем угловую сталь 50х50 мм, для горизонтального электрода (ГЭ) используем полосовую сталь 50х5 мм» [10],

«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 ВЭ, м;

$d$  – приведенный диаметр ВЭ, м;

$t$  – расстояние от поверхности до центра ВЭ, м.

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

где  $b$  – ширина уголка, м» [17].

Для одного ВЭ, по (56,57):

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

$$t = 3/2 + 0,8 = 2,3 \text{ м}$$

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

«Расчетное число ВЭ:

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

где  $R_n$  – допустимое сопротивление ЗУ, Ом» [11].

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

«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» [17].

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

$$a = 35,18 / 16 = 2,2 \text{ м}$$

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

«Сопротивление растеканию ГЭ:

$$R_{z3} = \frac{\rho_{pz}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{d \cdot t} \right) \quad (61)$$

где  $l$  – длина ГЭ, м;

$d$  – расчетный диаметр ГЭ, м;

$t$  – расстояние от поверхности до центра ГЭ, м.

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

где  $b$  – ширина полосы, м» [17].

Для ГЭ, по (61,62):

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

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

$$R_{23} = \frac{2800}{2 \cdot 3,14 \cdot 36,96} \cdot \ln \left( \frac{36,96^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 2,757 \text{ Ом}$$

«Итого сопротивление ЗУ:

$$R_{zp} = \frac{R_{063} \cdot R_{23}}{R_{063} \cdot \eta_6 \cdot n + R_{23} \cdot \eta_2} \quad (63)$$

где  $\eta_6$  – коэффициент использования ВЭ;

$\eta_2$  – коэффициент использования ГЭ.

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

Сопротивление не будет превышать допустимое.

Схема заземления ТП – на рисунке 12.



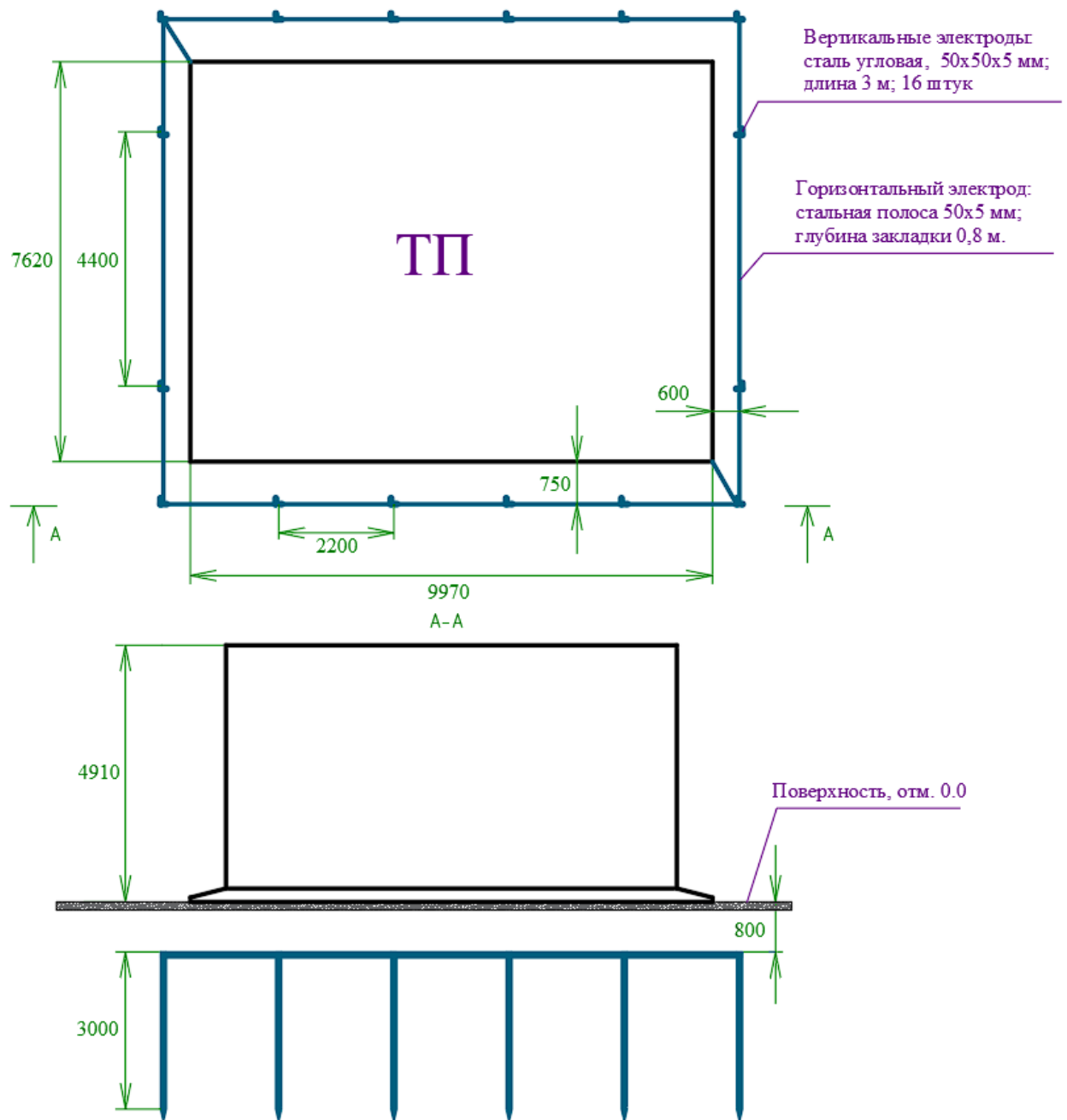


Рисунок 12 – Схема заземления ТП

Система заземления ТП обеспечивает безопасную эксплуатацию системы электроснабжения» [16].

Выводы.

Рассмотрены вопросы охраны труда и обеспечения безопасности при эксплуатации системы электроснабжения. Согласно требованиям ПУЭ спроектировано заземляющее устройства подстанции.

## Заключение

Спроектировано электроснабжение производственной базы ООО «ЖАТП».

Решены задачи:

- определены ожидаемые электрические нагрузки по участкам и всему объекту;
- рассчитаны нагрузки ТП 10/0,4 кВ, для компенсации излишней реактивной мощности выбраны установки АУКРМ;
- выбрана комплектная ТП марки 2КТПН-250/10/0,4 со штатным комплектным электрооборудованием и энергоэффективными силовыми трансформаторами;
- рассчитаны высоковольтная КЛ 10 кВ до ТП и сеть 0,4 кВ, выбраны кабели современных долговечных и высоконадежных марок с изоляцией из сшитого полиэтилена;
- рассчитаны токи КЗ, линии проверены по термической стойкости и потерям напряжения;
- выбрано оборудование защиты питающей линии (микропроцессорные терминалы Сириус-2МЛ-02) и распределительной сети (автоматические выключатели серии ВА и терминал Сириус-АВР на вводе 0,4 кВ котельной как потребителя 1 категории);
- рассмотрены вопросы охраны труда и обеспечения безопасности при эксплуатации системы электроснабжения. Согласно требованиям ПУЭ спроектировано заземляющее устройства подстанции.

Реализация электроснабжения базы согласно предлагаемому проекту обеспечит надежное электроснабжение потребителей согласно современным требованиям. Выбрано современное надежное и безопасное в эксплуатации оборудование.

## Список используемых источников

1. Андреев М.В. Релейная защита электроэнергетических систем: Учебное пособие. Томск : ТПУ, 2018. 167 с.
2. Гуревич, Ю.Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. М. : Лань, 2019. 408 с.
3. ГОСТ 12.0.004-2015. Система стандартов безопасности труда. М.: Лань, 2022. 45 с.
4. Дубинский Г.Н., Левин Л.Г. Наладка устройств электроснабжения напряжением свыше 1000 В. М. : Лань, 2019. 416 с.
5. Копылов И.П. Справочник по электрическим машинам. М.: Энергоатомиздат, 2020. 337 с.
6. Кудрин Б.И. Электроснабжение потребителей и режимы: Учебное пособие. М. : МЭИ, 2018. 412 с.
7. Куско А. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии. М. : Лань, 2018. 336 с.
8. Миллер Г. Р. Автоматизация в системах электроснабжения / Г.Р. Миллер. М. : Государственное энергетическое издательство, 2018. 176 с.
9. Охрана труда в энергетике: Учебник для техникумов / под ред. Князевского Б.А. М. : Лань, 2020. 376 с.
10. Полуянович, Н. К. Монтаж и наладка систем электроснабжения. М. : Лань, 2020. 400 с.
11. ПУЭ, издание 7. М. : Дрофа, 2022. 648 с.
12. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания/ М. : Дрофа, 2022. 69 с.
13. Твердохлебов К. И. Рекомендации по выбору проектных решений при разработке подстанций 10...500 кВ. М. : Лань,, 2020. 205 с.
14. Фролов Ю. М. Основы электроснабжения. М. : Лань, 2018. 480 с.

15. Хорольский В. Я. Надежность электроснабжения. М. : Форум, 2019. 128 с.
16. Хорольский В. Я. Эксплуатация систем электроснабжения. М.: Дрофа, 2018. 288 с.
17. Шеховцов В. П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. М. : Форум, 2019. 216 с.
18. Школа электрика. Сайт. [Электронный ресурс]. – <http://electricalschool.info/> (дата обращения: 05.09.2022).
19. Электроснабжение базы ООО «ЖАТП». Проектная документация. – Жигулевск, 2022. 205 с.
20. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. [Электронный ресурс]. – <https://docs.cntd.ru/> (дата обращения: 06.09.2022).