

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: «Разработка системы электроснабжения группы производственных цехов ООО  
«Промтехнология», г. Москва»

Студент

Э.И. Кукуляк

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.В. Бычков

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2024

## Аннотация

Выпускная квалификационная работа 48 страниц, 7 рисунков, 12 таблиц, 20 источников.

Ключевые слова: предприятие, цех, производственный участок, электроснабжение, потребитель, нагрузка, питание, оборудование, надежность.

Выполняется разработка системы электроснабжения группы производственных цехов.

Объект исследования – группа производственных цехов ООО «Промтехнология», г. Москва.

Предмет исследования: электроснабжение производственных цехов.

Цель работы: разработка системы электроснабжения согласно всем актуальным требованиям к ее технико-эксплуатационным характеристикам и показателям.

Актуальность темы работы. В связи с ростом спроса на свою продукцию, ООО «Промтехнология», г. Москва увеличивает объемы производства, для чего также планирует постройку группы дополнительных производственных цехов, которые будут расположены на отдельной огороженной территории. Для запуска производства на данной группе производственных цехов, потребуется обеспечить ее качественное и надежное электроснабжения, для чего необходимо разработать систему электроснабжения согласно всем актуальным требованиям к ее технико-эксплуатационным характеристикам.

Содержание ВКР: характеристика производства, исходные данные, проектирование электроснабжения группы производственных цехов, релейная защита и автоматика, расчет заземления и молниезащиты.

## Содержание

Введение.....	4
1 Исходные данные .....	7
1.1 Характеристика производства .....	7
1.2 Генеральный план территории, характеристики производственных цехов .....	9
2 Проектирование электроснабжения группы производственных цехов .....	13
2.1 Определение электрических нагрузок .....	13
2.2 Выбор силовых трансформаторов ТП 10/0,4 кВ.....	16
2.3 Компенсация реактивной мощности, определение полной нагрузки ЗРУ 10 кВ .....	20
2.4 Расчет распределительной сети, выбор кабелей и аппаратов защиты линий .....	23
2.5 Расчет токов КЗ .....	27
2.6 Электрооборудование ЗРУ 10 кВ .....	32
2.7 Релейная защита и автоматика .....	36
2.8 Расчет заземляющего устройства ТП 10/0,4 кВ, молниезащита ТП .....	37
2.9 Расчет заземляющего устройства ЗРУ 10 кВ .....	40
2.10 Расчет молниезащиты ЗРУ 10 кВ .....	43
Заключение .....	46
Список используемых источников.....	47

## Введение

Электроснабжение является ключевым элементом в функционировании любого промышленного предприятия (ПП). От его надежности и эффективности зависит стабильность работы предприятия, а также безопасность персонала и окружающей среды. В связи с этим, вопросы электроснабжения промышленных объектов всегда находятся в центре внимания специалистов и руководителей. Проблемы электроснабжения ПП связаны с их спецификой и особенностями эксплуатации. Предприятия обычно потребляют большое количество электроэнергии, что требует мощных источников питания, развитой системы распределения и надежного электроснабжения. Используются различные виды оборудования, которые требуют различных параметров электроснабжения (напряжение, частота, ток). Системы электроснабжения (СЭС) предприятий состоят из большого количества элементов (подстанции, распределительные устройства, кабельные линии), что делает их сложными и уязвимыми для сбоев и аварий. Оборудование чувствительно к отклонениям параметров электроэнергии (колебаниям напряжения, частоты, несимметрии фаз), что может привести к его сбою или выходу из строя. Промышленные объекты должны быть оборудованы резервными источниками питания на случай аварийных ситуаций, а также системами автоматического управления и контроля электроснабжения для обеспечения надежности и безопасности работы.

В связи с расширением производства постоянно строятся новые производственные объекты, включая группы производственных цехов, которые затем вводятся в эксплуатацию, увеличивая объемы производства и экономическую выгоду организации. Современные промышленные цеха, как правило, оборудованы высокотехнологичными автоматизированными и роботизированными комплексными производственными линиями с высокоточными электроприводами и сервоприводами, под управлением микропроцессорной электроники, использование которых требует высокого

качества и надежности электроснабжения. Низкие показатели качества электроэнергии способны вызвать сбои производственного процесса, массовый брак продукции и порчу дорогостоящих элементов оборудования. Недостаточная надежность СЭС чревата долговременными простоями оборудования и высокими финансовыми и репутационными потерями для организации.

Основными проблемами электроснабжения промышленных предприятий являются высокая стоимость электроэнергии и необходимость снижения энергоемкости производства; устаревание СЭС и необходимость их модернизации; риски аварий и нарушений электроснабжения, связанные с износом оборудования и неблагоприятными погодными условиями. Перспективы развития электроснабжения связаны с внедрением новых технологий и решений, таких как использование возобновляемых источников энергии, интеллектуальных систем управления и мониторинга, а также развитие распределенных систем генерации и хранения электроэнергии. Электроснабжение объектов предприятий – сложная и ответственная задача, требующая учета множества факторов и особенностей. Решение проблем и обеспечение надежного и эффективного электроснабжения является ключевым условием успешного функционирования и развития современных предприятий.

Высокая энергоэффективность является одним из ключевых факторов, учитываемых при проектировании современных систем электроснабжения. Для предприятий высокая энергоэффективность СЭС обеспечивает снижение себестоимости продукции, снижение капитальных и эксплуатационных затрат в СЭС и повышение прибыльности ПП в целом. Обеспечение высокой экологичности электроснабжения также является важной и неотъемлемой задачей при разработке СЭС, улучшая экологическую обстановку на объектах предприятия и около них, повышая мотивацию рабочих и персонала и снижая профессиональные экологические риски для них.

В данной ВКР выполняется разработка системы электроснабжения группы производственных цехов ООО «Промтехнология», г. Москва.

Актуальность темы работы. В связи с ростом спроса на свою продукцию, ООО «Промтехнология», г. Москва увеличивает объемы производства, для чего также планирует постройку группы дополнительных производственных цехов, которые будут расположены на отдельной огороженной территории. Цеха будут оборудованы высокотехнологичными автоматизированными и роботизированными комплексными производственными линиями с высокоточными электроприводами и сервоприводами, под управлением микропроцессорной электроники, использование которых требует высокого качества и надежности электроснабжения. В целом, для запуска производства на данной группе производственных цехов, потребуется обеспечить ее качественное и надежное электроснабжения, для чего необходимо разработать СЭС согласно всем актуальным требованиям к ее технико-эксплуатационным характеристикам.

Объект исследования – группа производственных цехов ООО «Промтехнология», г. Москва.

Предмет исследования: электроснабжение производственных цехов.

Цель работы: разработка системы электроснабжения согласно всем актуальным требованиям к ее технико-эксплуатационным характеристикам и показателям.

Задачи работы:

- систематизировать и проанализировать исходные данные по объекту и потребителям электроэнергии;
- выполнить проектирование электроснабжения группы производственных цехов.

Практическая значимость работы заключается в последующей реализации СЭС на данном объекте, вводе группы производственных цехов в эксплуатацию.

## **1 Исходные данные**

### **1.1 Характеристика производства**

ООО «Промтехнология», г. Москва – это крупное промышленное предприятие, которое выпускает оружие и боеприпасы, взрывчатые вещества, ножевые изделия и столовые приборы, специализированные изделия из кожи и аксессуары одежды, а также другие виды продукции для военного и гражданского сектора экономики.

Технология производства оружия и боеприпасов – это сложный и ответственный процесс, который включает в себя множество этапов. В производстве используются различные металлы, такие как свинец, латунь, медь и сталь, которые поставляются в виде слитков, проволоки или листов. Основной этап производства – придание металлу необходимой формы и формирование гильз и пуль. Металлические заготовки проходят через специальные прессы, где им придают форму стаканов или шайб. Затем автоматизированные токарные станки нарезают углубления под капсюли и формируют кольцевые проточки для экстракторов оружия. После этого заготовки нагревают и пропускают через станок, который обжимает дульце гильзы и придаёт ей окончательную форму нужного диаметра. Затем гильзы попадают в специальный бак с химическим раствором, где они очищаются и шлифуются. Готовые гильзы с установленными капсюлями поступают на линию загрузки пороха, где проходят ещё одну проверку размера, диаметра и отсутствия брака. После загрузки пороха происходит установка и обжатие пули в гильзе. После всех проверок патроны поступают в цех упаковки, где их автоматически укладывают в коробки. На предприятии ООО «Промтехнология» данная продукция изготавливается в специализированных группах производственных цехов, размещенных на отдельных огороженных и охраняемых территориях. Производственные процессы обеспечивают современные высокотехнологичные

автоматизированные и роботизированные линии с микропроцессорным управлением, а также станки с частотно-программным управлением (ЧПУ).

Взрывчатые вещества (ВВ) также производятся в большом объеме на предприятии. Основными компонентами выпускаемых эмульсионных ВВ являются высококонцентрированный раствор аммония азотнокислого и жидкие нефтепродукты различных видов. Оборудование для производства включает в себя специализированные химические производственные установки и замкнутые полностью автоматизированные производственные линии. В составе групп производственных цехов имеются свои лаборатории для контроля качества выпускаемой продукции.

Специализированные изделия из кожи и аксессуары одежды (оружейные чехлы, кобура различных типов и видов, патронаши, ножны и т.д.) занимают значительную долю продукции предприятия. Технологический процесс может быть простым или сложным в зависимости от количества деталей и сложности конструкции изделия. Используется как ручной труд, так и работа автоматизированного оборудования, имеется большой парк специализированных швейных машин и оборудования для обработки шкур животных.

Ввиду роста спроса на ножевые изделия и столовые приборы, ООО «Промтехнология» увеличивает объемы производства, для чего также планирует постройку специализированной группы дополнительных производственных цехов, которые будут расположены на отдельной огороженной территории. Технология производства ножевых изделий и столовых приборов включает следующие этапы:

- резка нержавеющей стали: станок режет сырьё (стали 13/0, 18/0 и 18/8) на размеры, соответствующие различным видам посуды (ложки, ножи, вилки);
- прокатка элементов для придания им необходимой толщины;
- изделия формируются с использованием специальных форм;

- тиснение, на этом этапе создаются узоры на ручках столовых приборов и лезвиях ножей;
- полировка всего края столовых приборов и ножей завершает процесс изготовления;
- двойная полировка, этот этап обеспечивает дополнительную яркость и гладкость поверхности;
- профессиональная депарафинизация водой и ультразвуковым аппаратом удаляет остатки промышленной пыли;
- готовые изделия упаковываются согласно требованиям заказчика.

Цеха будут оборудованы высокотехнологичными автоматизированными и роботизированными комплексными производственными линиями с высокоточными электроприводами и сервоприводами, под управлением микропроцессорной электроники, использование которых требует высокого качества и надежности электроснабжения. В целом, для запуска производства на данной группе производственных цехов, потребуется обеспечить ее качественное и надежное электроснабжения, для чего необходимо разработать систему электроснабжения согласно всем актуальным требованиям к ее технико-эксплуатационным характеристикам.

## **1.2 Генеральный план территории, характеристики производственных цехов**

Планируемая к постройке группа производственных цехов (ГПЦ) ООО «Промтехнология», г. Москва будет расположена на отдельной огороженной и охраняемой территории. Помимо основных производственных цехов на территории также будут расположены вспомогательные производственные участки, обеспечивающие администрирование, хранение материалов и продукции, а также другие вспомогательные функции.

Генплан территории ГПЦ показан на рисунке 1.

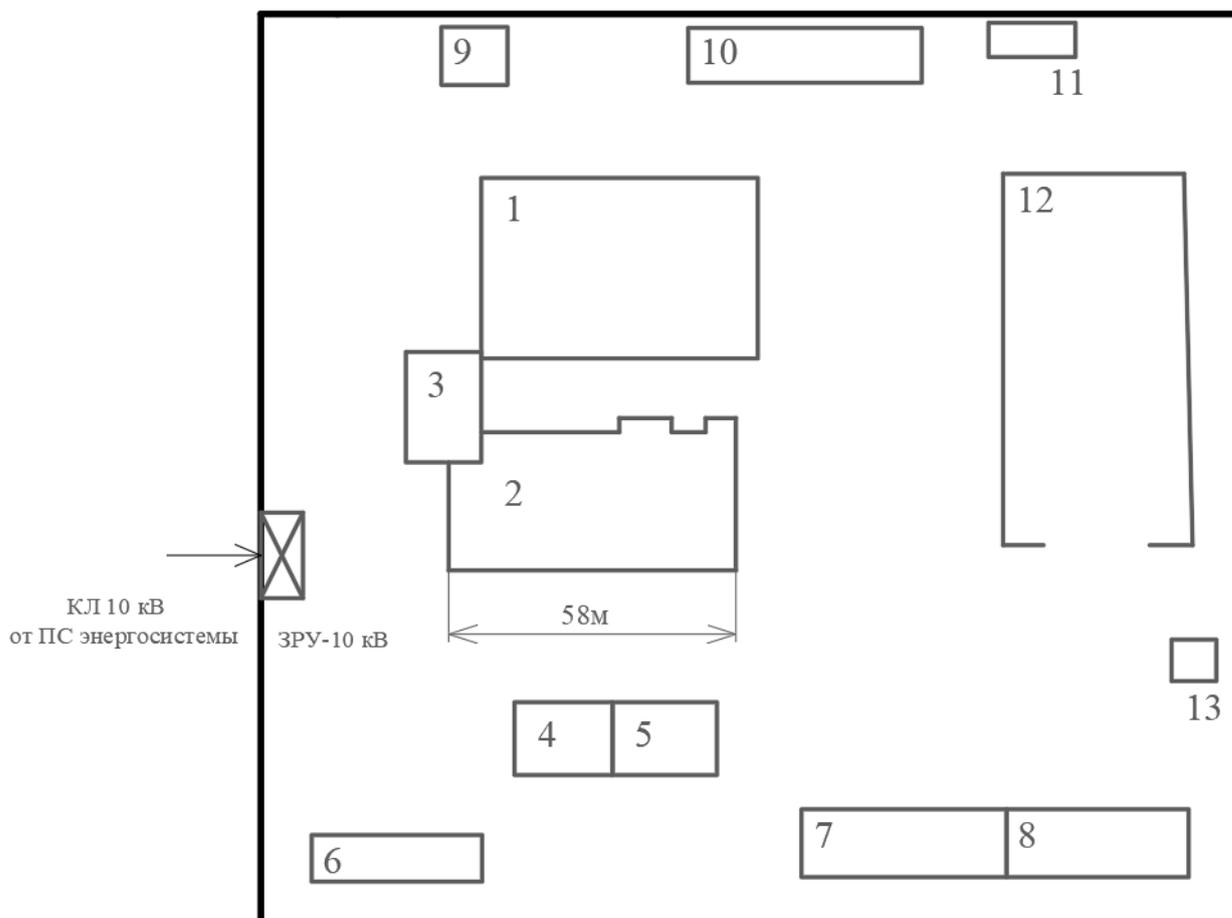


Рисунок 1 – Генплан территории группы производственных цехов

Всего на территории будет расположено шесть основных производственных цехов, два закрытых и один открытый склады, хранилище, административно-бытовой корпус (АБК), гараж, контрольно-пропускной пункт (КПП). Общее питание производственных участков будет обеспечиваться от закрытого распределительного устройства (ЗРУ) 10 кВ, расположение которого показано на генплане.

Перечень производственных участков (ПУ), суммарные номинальные нагрузки установленного электрооборудования (ЭО), коэффициенты мощности и спроса нагрузок приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень производственных участков

№ на генплане	Участки	$\Sigma P_{ном}$ , кВт	cosφ	Kс
1	Цех №1	780	0,86	0,5
2	Цех №2	820	0,88	0,6
3	АБК	120,4	0,92	0,35
4	Цех №3	92	0,87	0,35
5	Склад	20,1	0,9	0,25
6	Хранилище	14,2	0,89	0,2
7	Склад	16,1	0,9	0,25
8	Цех №4	59,2	0,87	0,55
9	Цех №5	63,4	0,86	0,65
10	Гараж	29,6	0,85	0,2
11	Цех №6	44,8	0,90	0,65
12	Открытый склад	35,4	0,87	0,2
13	Контрольно-пропускной пункт	14,9	0,92	0,5

Производственные цеха обеспечивают основные технологические процессы по выпуску продукции. Склады обеспечивают хранение сырья и материалов. Хранилище обеспечивает хранение готовой продукции. АБК выполняет административно-бытовые функции. Контрольно-пропускной пункт обеспечивает контроль вывоза товаров и ввоза сырья и материалов, а также контроль допуска на территорию объекта в целом. ЗРУ группы производственных цехов будет запитано от подстанции (ПС) 110/10 кВ по кабельной линии длиной 1,2 км. От ЗРУ будет отходить две КЛ 10 кВ до автобазы предприятия, длина КЛ 0,521 км. Категории надёжности электроснабжения (КНЭ) участков приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Категории надёжности электроснабжения участков

№ на генплане	Наименование участков	КНЭ
1	Цех №1	1
2	Цех №2	1
3	АБК	3
4	Цех №3	2
5	Склад	3
6	Хранилище	3
7	Склад	3
8	Цех №4	2
9	Цех №5	2
10	Гараж	3
11	Цех №6	2
12	Открытый склад	3
13	Контрольно-пропускной пункт	2

Основные производственные цеха №1 и №2 относятся к первой КНЭ ввиду обеспечения производственных процессов высокотехнологичными производственными линиями с высокоточными электроприводами и сервоприводами, под управлением микропроцессорной электроники, перерывы электроснабжения которых чреваты массовым браком продукции и порчей очень дорогостоящего оборудования [10].

Вывод. Рассмотрены основные характеристики производства предприятия. Составлен генеральный план территории, систематизированы характеристики производственных цехов и вспомогательных зданий, которые также классифицированы по категориям требуемой надёжности электроснабжения.

## 2 Проектирование электроснабжения группы производственных цехов

### 2.1 Определение электрических нагрузок

Электрические нагрузки – это нагрузки, создаваемые включёнными в сеть электроприёмниками. Они выражаются в единицах тока или мощности. Нагрузки могут быть спокойными симметричными, несимметричными, резкими и нелинейными. Специфические нагрузки включают резкие, нелинейные и несимметричные. Специфические нагрузки создаются работой электродуговых печей, полупроводниковых преобразовательных установок и сварочных установок. Они влияют на электросети промышленных предприятий и сельскохозяйственных объектов. При определении электрических нагрузок учитываются мощность, режим работы системы электроснабжения, характер нагрузки и возможные перерывы в электроснабжении [1]. Среднесменные нагрузки цехов промышленных предприятий целесообразно рассчитывать методом коэффициента спроса активной нагрузки.

«Активные, реактивные и полные нагрузки цехов:

$$P_c = K_c \cdot P_{ном}, \quad (1)$$

где  $K_c$  – коэффициент спроса нагрузки;

$P_{ном}$  – номинальная нагрузка, кВт.

$$Q_c = P_c \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2}. \quad (3)$$

Для цеха №1, по (1-3):

$$P_c = 0,5 \cdot 780 = 390 \text{ кВт},$$

$$Q_c = 390 \cdot 0,59 = 231,41 \text{ квар},$$

$$S_c = \sqrt{390^2 + 231,41^2} = 453,49 \text{ кВА}.$$

Результаты расчетов сведены в таблице 3» [3].

Таблица 3 – Электрические нагрузки, расчеты

Участки	$\Sigma P_{ном}$ , кВт	tgφ	Kc	Нагрузки		
				Pc, кВт	Qc, квар	Sc, кВА
Цех №1	780	0,59	0,5	390	231,41	453,49
Цех №2	820	0,54	0,6	492	265,55	559,09
АБК	120,4	0,43	0,35	42,14	17,95	45,80
Цех №3	92	0,57	0,35	32,2	18,25	37,01
Склад	20,1	0,48	0,25	5,025	2,43	5,58
Хранилище	14,2	0,51	0,2	2,84	1,45	3,19
Склад	16,1	0,48	0,25	4,025	1,95	4,47
Цех №4	59,2	0,57	0,55	32,56	18,45	37,43
Цех №5	63,4	0,59	0,65	41,21	24,45	47,92
Гараж	29,6	0,62	0,2	5,92	3,67	6,96
Цех №6	44,8	0,48	0,65	29,12	14,10	32,36
Открытый склад	35,4	0,57	0,2	7,08	4,01	8,14
Контрольно-пропускной пункт	14,9	0,43	0,5	7,45	3,17	8,10

«Активная и реактивная нагрузка освещения по участкам рассчитывается методом удельной мощности:

$$P_{po} = P_0 \cdot K_{co} \cdot F, \quad (4)$$

где  $P_0$  – удельная мощность, Вт/м<sup>2</sup>;

$K_{co}$  – коэффициент спроса освещения;

$F$  – площадь здания, м<sup>2</sup>.

$$Q_{po} = P_{po} \cdot tg\varphi, \quad (5)$$

Освещение обеспечивается светодиодными светильниками» [17]. Светодиодное освещение – это современный и эффективный способ обеспечения качественного и комфортного освещения в различных сферах жизни. Оно основано на использовании светодиодов – полупроводниковых приборов, излучающих свет при прохождении через них электрического тока. Светодиоды потребляют значительно меньше электроэнергии по сравнению с традиционными источниками света, такими как лампы накаливания и люминесцентные лампы [4].

«Для ПУ №1 по (4,5):

$$P_{po} = 3,8 \cdot 0,85 \cdot 2050,8 = 6,62 \text{ кВт},$$

$$Q_{po} = 6,624 \cdot 0,33 = 2,19 \text{ квар.}$$

С освещением нагрузки:

$$P_p' = 390 + 6,62 = 396,62 \text{ кВт},$$

$$Q_p' = 231,4 + 2,19 = 233,6 \text{ квар},$$

$$S_p' = \sqrt{396,62^2 + 233,6^2} = 460,3 \text{ кВА.}$$

Нагрузки ПУ сведены в таблице 4» [14].

Таблица 4 – Нагрузки участков с учетом освещения

Цеха	$P_p'$ , кВт	$Q_p'$ , квар	$S_p'$ , кВА
Цех №1	396,62	233,60	460,30
Цех №2	497,14	267,25	564,42
АБК	43,34	18,35	47,07
Цех №3	33,15	18,56	37,99
Склад	5,44	2,57	6,01
Хранилище	3,27	1,60	3,64
Склад	4,78	2,20	5,26
Цех №4	34,39	19,06	39,32
Цех №5	41,77	24,64	48,50
Гараж	7,12	4,06	8,20
Цех №6	29,56	14,25	32,81
Открытый склад	12,22	5,71	13,49
Контрольно-пропускной пункт	7,73	3,27	8,40
$\Sigma$ по цехам	1116,53	615,11	1274,76
Территория	5,44	1,80	5,73
Всего	1121,98	616,90	1280,39

Электроснабжение участков обеспечивается с учетом данных расчетных нагрузок.

## 2.2 Выбор силовых трансформаторов ТП 10/0,4 кВ

«Питание цехов распределяется по ТП с учетом:

- расположения цехов;

- обеспечения минимальной суммарной длины линий;
- величины нагрузок цехов;
- инфраструктуры территории;
- расположения ЗРУ;
- требований проектной документации;
- требований по категориям надежности питания;
- индивидуальным требованиям заказчика.

Оптимальная мощность трансформаторов ТП:

$$S_o \geq \frac{\sum S_p}{\beta \cdot N}, \quad (6)$$

где  $\sum S_p$  – нагрузка, кВА;

$\beta$  – нормативный коэффициент загрузки;

$N$  – число трансформаторов, шт» [6].

Энергосберегающие трансформаторы являются эффективным решением для снижения потерь электроэнергии и обеспечения потребителей качественной электроэнергией [13].

«Допустимая к передаче в сеть 0,4 кВ реактивная мощность (РМ):

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{н.т.})^2 - P_p^2}, \quad (7)$$

где  $S_{н.т.}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$P_p$  – активная нагрузка, кВт.

Требуемая для компенсации РМ:

$$Q_{0,4} = Q_p - Q_1, \quad (8)$$

где  $Q_p$  – реактивная нагрузка, квар.

Остаточное значение РМ:

$$Q_{HH} = Q_p - Q_{БК} \quad (9)$$

Для ТП-1, по (6):

$$S_o \geq \frac{615,50}{0,7 \cdot 2} = 440 \text{ кВА}$$

Устанавливается два ТМГ12-630/10» [7].

Энергосберегающие силовые трансформаторы ТМГ12 – это инновационные устройства, разработанные компанией «Минский электротехнический завод имени В. И. Козлова». Они представляют собой герметичные масляные трансформаторы, соответствующие классу энергоэффективности Х2К1 [19]. Особенностью трансформаторов является низкий уровень потерь короткого замыкания и холостого хода, что обеспечивает высокую энергоэффективность. Кроме того, они соответствуют специальным рекомендациям Европейского комитета электротехнической стандартизации (CENELEC). Трансформаторы используются в энергетической, нефтегазовой, промышленной и строительной отраслях и в процессе эксплуатации практически не требуют обслуживания, так как их баки заполнены маслом [12]. Для удобства наблюдения за уровнем масла трансформаторы оснащены яркими маслоуказателями поплавкового типа. Перед запуском в работу трансформаторы проходят предпусковые испытания в соответствии с нормативными правилами. По запросу покупателя трансформаторы могут быть укомплектованы контактными зажимами НН и транспортными роликами.

Выбор трансформаторов приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Выбор трансформаторов ТП

№ ТП	Нагрузка, № ПУ	So, кВА	St, кВА
ТП-1	1,3,9,10,11,12, освещ. терр.	440	630
ТП-2	2,4,5,6,7,8,13	475	630

«Расчет КРМ на ТП-1 по (7,8):

$$Q_1 = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 536,09^2} = 700,38 \text{ квар,}$$

$$Q_{0,4} = 302,4 - 700,38 = -398 \text{ квар.}$$

КРМ не требуется. Коэффициент загрузки трансформатора в аварийном режиме:

$$K_n = \frac{S_{p.комт.}}{S_{н.т.}}, \quad (10)$$

$$K_n = \frac{615,5}{630} = 0,98 \leq 1,4.$$

Расчет КРМ на ТП – в таблице 6» [8].

Таблица 6 – Расчет КРМ на ТП

№ ТП	Q <sub>0,4</sub> , квар	K <sub>п</sub>
ТП-1	-398	0,98
ТП-2	-345	1,06

ТП выбираются комплектные 2КТПН-10/0,4.

Комплектные трансформаторные подстанции (КТП) – это многофункциональные установки, состоящие из распределительных приборов, трансформатора и комплектных узлов. Они выполняют функции снижения напряжения при приёме и передаче электрического тока из высоковольтных линий 6–10 кВ в бытовые сети 0,4 кВ (380 В). Кроме того, КТП осуществляют учёт электроэнергии и защищают сети от аварийных ситуаций, таких как короткое замыкание и перегрузки. Каждая часть оборудования КТП изготавливается на заводе и поставляется на место монтажа в виде отдельных элементов, которые затем собираются в единую конструкцию. Стандартное оборудование включает распределительное устройство, силовые трансформаторы, автоматизированное управление и защиту, а также дополнительную технику. Для вывода оборудования из строя или подключения под напряжение во время профилактического обслуживания или при аварийных ситуациях используются коммутационные устройства, такие как автоматические выключатели. Они работают в автоматическом режиме и отключают аварийные ситуации, обеспечивая безопасность работы КТП. Комплектные трансформаторные подстанции являются важным элементом системы электроснабжения, обеспечивая надёжное и бесперебойное питание различных объектов.

### **2.3 Компенсация реактивной мощности, определение полной нагрузки ЗРУ 10 кВ**

Компенсация реактивной мощности будет проводится на шинах ЗРУ 10 кВ. «Для расчета нагрузки ЗРУ необходимо учесть потери в цеховых ТП. Потери активной и реактивной мощности в трансформаторах:

$$\Delta P_m = \frac{\Delta P_k}{n} \cdot \frac{P_p^2 + Q_p^2}{S_n^2} + n \cdot \Delta P_{xx}, \quad (11)$$

где  $\Delta P_k$  – потери КЗ, кВт;

$n$  – число трансформаторов, шт;

$S_n$  – номинальная мощность, кВА;

$\Delta P_{xx}$  – потери ХХ, кВт.

$$\Delta Q_m = \frac{U_\kappa}{n \cdot 100} \cdot \frac{P_p^2 + Q_p^2}{S_n^2} + \frac{n \cdot I_{xx}}{100} \cdot S_n, \quad (12)$$

где  $U_\kappa$  – напряжение КЗ, %;

$I_{xx}$  – ток ХХ, %.

Для ТП-1, по (11,12):

$$\Delta P_m = \frac{6,75}{2} \cdot \frac{536,1^2 + 302,4^2}{630^2} + 2 \cdot 0,8 = 4,82 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_m = \frac{5,5}{2 \cdot 100} \cdot \frac{536,1^2 + 302,4^2}{630^2} + \frac{2 \cdot 0,7}{100} \cdot 630 = 25,36 \text{ квар}.$$

Нагрузка ТП с учетом потерь – в таблице 7» [20].

Таблица 7 – Нагрузка ТП с учетом потерь

№	$\Delta P$ , кВт	$\Delta Q$ , квар	$P_p + \Delta P$ , кВт	$Q_p + \Delta Q$ , квар
ТП-1	4,82	25,36	540,91	327,76
ТП-2	5,36	28,12	591,25	342,62
$\Sigma$	10,18	53,48	1132,16	670,38

«Реактивная и активная нагрузки ЗРУ:

$$Q_{10} = \Sigma Q_{HH} + \Sigma \Delta Q_m, \quad (13)$$

$$P_{\text{сумм}} = \sum P_p + \sum \Delta P_m, \quad (14)$$

где  $\sum Q_{\text{HH}}$ ,  $\sum P_p$  – нагрузки цехов, квар (кВт);

$\sum \Delta Q_m$ ,  $\sum \Delta P_m$  – потери мощности в ТП, квар (кВт).

$$Q_{10} = 616,9 + 25,36 = 670,38 \text{ квар},$$

$$P_{\text{сумм}} = 1121,98 + 10,18 = 1132,16 \text{ кВт}.$$

Требуемая мощность установок КРМ:

$$Q_{\text{кв}} / 2 = \frac{Q_{10} - Q_{\text{сист}} - Q_c}{2}, \quad (15)$$

где 2 – число секций шин, шт;

$Q_{\text{сист}}$ ,  $Q_c$  – РМ из энергосистемы и от синхронных двигателей, квар.

$$Q_{\text{сист}} = \alpha \cdot \sum P_p, \quad (16)$$

где  $\alpha$  – эквивалент нормативного  $\text{tg}\varphi=0,33$ .

$$Q_c = \frac{\alpha_m \cdot P_n \cdot \text{tg}\varphi_n}{\eta_n}, \quad (17)$$

где  $\alpha_m$  – допустимая перегрузка СД;

$P_n$  – номинальная мощность СД, кВт;

$\text{tg}\varphi_n$  – коэффициент РМ, соответствующий  $\cos\varphi$ ;

$\eta_n$  – КПД двигателя, о.е.» [20].

$$Q_{\text{кв}} / 2 = \frac{670,38 - 0,33 \cdot 1121,98 - 0}{2} = 300,13 \text{ квар}.$$

«Устанавливается две батареи УККРМ-10,5-150.

Нагрузки после КРМ:

$$Q_{pk} = 670,38 - 2 \cdot 150 = 370,38 \text{ квар},$$

$$P_{pk} = P_{сумм} = 1132,16 \text{ кВт}.$$

Полная нагрузка ЗРУ:

$$S_p = \sqrt{(k_{рма} \cdot P_{pk})^2 + (k_{рмр} \cdot Q_{pk})^2}, \quad (18)$$

где  $k_{рма}$  и  $k_{рмр}$  – коэффициенты разновременности» [20].

$$S_p = \sqrt{(0,9 \cdot 1132,16)^2 + (0,9 \cdot 370,38)^2} = 1072,08 \text{ кВА}.$$

Далее выбирается схема распределительной сети и марки кабелей.

#### **2.4 Расчет распределительной сети, выбор кабелей и аппаратов защиты линий**

Распределительная сеть (РС) предприятия – это совокупность линий электропередачи, которые передают электроэнергию от источника питания к потребителям (электрооборудованию), основные принципы проектирования РС:

- простота и масштабируемость;
- отсутствие перегрузок;
- обеспечение бесперебойного производственного процесса;
- безопасность.

Требования к РС включают соблюдение нормативных требований к источникам питания и сетям.

«Для распределительной сети выбирается смешанная схема, как обеспечивающая наилучшие технико-эксплуатационные показатели при минимальных капиталовложениях. Кабельные линии на 10 кВ выполняются кабелем АПвП и на 0,4 кВ кабелем АВБШв. Кабели прокладываются в траншеях под землей. План прокладки КЛ показан на чертеже 1 графической части» [15].

«Расчет для КЛ до ТП-1.

Наибольший ток линии:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n}, \quad (19)$$

где  $S_p$  – нагрузка участка, кВА;

$n$  – число цепей, шт.

$$I_p = \frac{632,46}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 18,3 \text{ А},$$

$$I_{ав} = \frac{632,46}{\sqrt{3} \cdot 10} = 36,5 \text{ А}.$$

Экономическое сечение жил:

$$F_{эк} = \frac{I_p}{j_{эк}}, \quad (20)$$

где  $j_{эк}$  – экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>.

$$F_{эк} = \frac{18,3}{1,4} = 13 \text{ мм}^2$$

Выбирается кабель АПвП 3·16 мм<sup>2</sup>,  $I_{дон} = 65$  А (с учетом условий прокладки). Выбор кабелей 10 кВ – в таблице 8» [15].

Таблица 8 – Выбор кабелей 10 кВ

КЛ	Иав, А	Сечение АПВП, мм <sup>2</sup>	Идоп, А
ЗРУ 10 кВ--ТП-1	36,5	16	65
ЗРУ 10 кВ--ТП-2	39,5	16	65

«Потери напряжения в линии:

$$\Delta U_n = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L \cdot 100}{U_n} (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi), \quad (21)$$

где  $I_p$  – расчетный ток, А;

$L$  – длина линии, км;

$r_0$  и  $x_0$  – удельные сопротивления, Ом/км;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности

$$\Delta U_n = \frac{\sqrt{3} \cdot 36,5 \cdot 0,076 \cdot 100}{400} (1,95 \cdot 0,855 + 0,11 \cdot 0,518) = 0,04 \% < 5 \%$$

Проверка КЛ 10 кВ – в таблице 9» [15].

Таблица 9 – Проверка КЛ 10 кВ

КЛ	го, Ом/км	хо, Ом/км	$\Delta U, \%$
ЗРУ 10 кВ--ТП-1	1,95	0,11	0,04
ЗРУ 10 кВ--ТП-2	1,95	0,11	0,01

Выбор кабеля 0,4 кВ до РПЗ.

«Расчётный ток, по (19):

$$I_p = \frac{47,07}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 67,9 \text{ А}$$

Принимаем кабель АВБШв 4x10 мм<sup>2</sup>,  $I_{доп} = 75 \text{ А}$ .

Потери напряжения в КЛ, по (21):

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 67,9 \cdot 0,01 \cdot 100}{380} (6,1 \cdot 0,873 + 0) = 0,87 \% < 5 \%$$

Выбор кабелей 0,4 кВ – в таблице 10» [15].

Таблица 10 – Выбор кабелей 0,4 кВ

КЛ	Сечение АВБШв, мм <sup>2</sup>	Идоп, А	Иав, А	ΔU, %
ТП1- РП3	4x10	75	67,9	0,87
ТП1- РП9			70,0	1,83
ТП1- РП10	4x4	42	11,8	0,72
ТП1- РП11	4x6	55	47,4	2,14
ТП1- РП12	4x4	42	19,5	1,31
ТП2- РП4	4x6	55	54,8	2,35
ТП2- РП5	4x4	42	8,7	1,49
ТП2- РП6			5,3	0,75
ТП2- РП7			7,6	1,20
ТП2- РП8	4x10	75	56,7	2,42
ТП2- РП13	4x4	42	12,1	1,28

Выбранные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) обладают рядом преимуществ:

- более высокая пропускная способность благодаря высокой допустимой длительной температуре;
- большая предельная температура при токах короткого замыкания;
- меньшая повреждаемость благодаря низкому удельному количеству повреждений;
- большой срок службы (более 50 лет по данным заводоизготовителей);
- лёгкие условия монтажа из-за меньших массы, диаметра и радиуса изгиба;
- возможность прокладки при отрицательных температурах без предварительного подогрева благодаря использованию полимерных материалов;
- отсутствие тяжёлой свинцовой или алюминиевой оболочки;
- меньшее время и стоимость монтажа из-за отсутствия жидких компонентов в конструкции;
- экологичность благодаря отсутствию утечки масла и загрязнения окружающей среды при повреждении;
- высокие диэлектрические свойства изоляции и отсутствие ограничений по разности уровней кабельной трассы.

## **2.5 Расчет токов КЗ**

Токи короткого замыкания определяются с учетом выбранной схемы электрической сети и марок кабелей.

«Далее, для проверки выбранного электрооборудования необходимо рассчитать токи короткого замыкания (КЗ) в местах установки электрооборудования» [18].

Схема замещения – на рисунке 2.

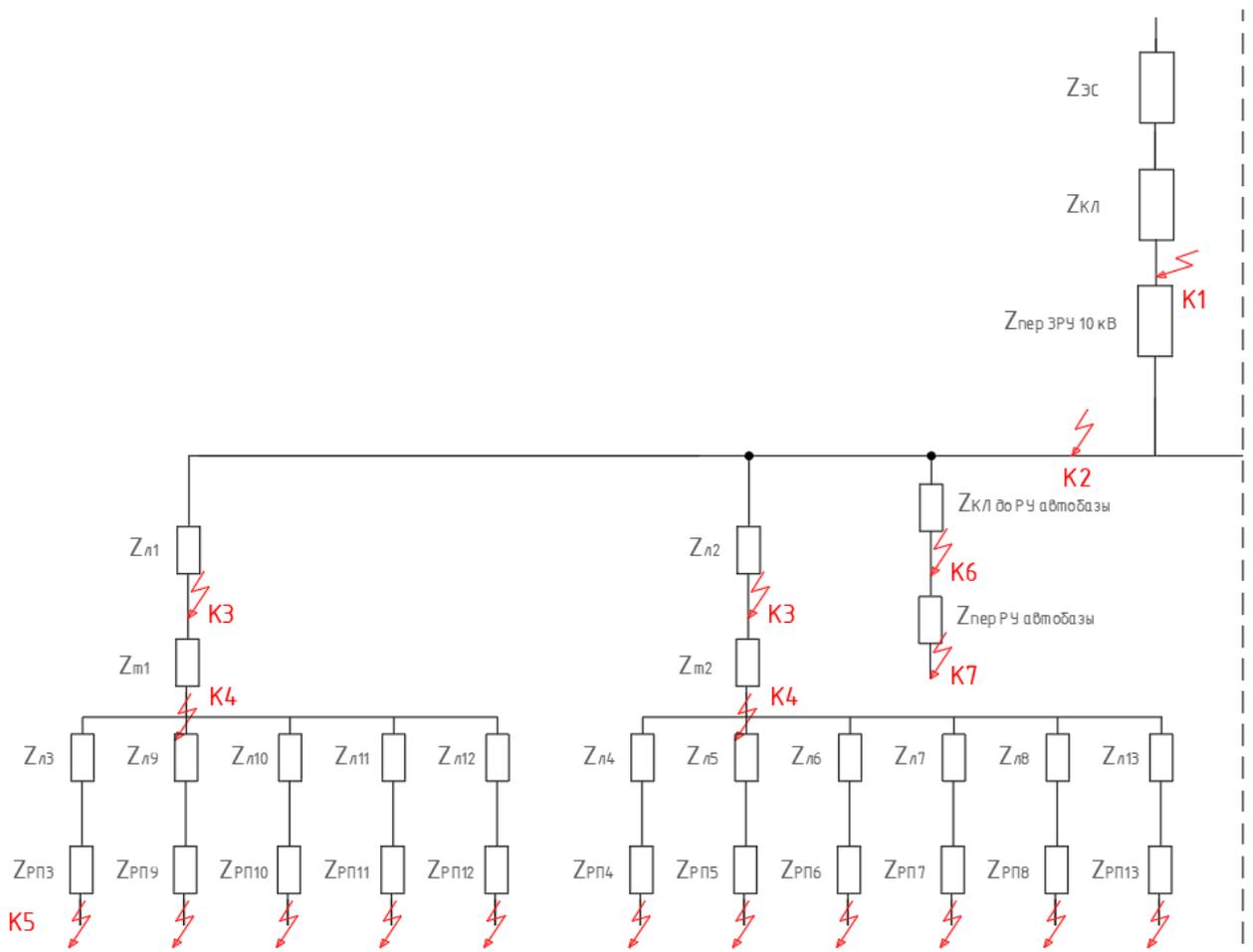


Рисунок 2 – Схема замещения

«Полное сопротивление цепи К3:

$$z = \sqrt{\left(\Sigma r^{\circ}\right)^2 + \left(\Sigma x^{\circ}\right)^2}, \quad (22)$$

где  $\Sigma r^{\circ}$ ,  $\Sigma x^{\circ}$  – активное и индуктивное сопротивления цепи, Ом.

Сопротивления трансформаторов:

$$R_m = \Delta P_{\kappa} \cdot U_{н.в.}^2 / (S_n^2 \cdot 1000), \quad (23)$$

где  $\Delta P_{\kappa}$  – потери КЗ, кВт;

$U_{н.в.}$  – напряжение ВН, кВ;

$S_n$  – номинальная мощность, кВА.

$$Z_m = \Delta U_{\kappa} / 100 \cdot U_{н.в}^2 / S_n, \quad (24)$$

где  $\Delta U_{\kappa}$  – потери напряжения КЗ, %» [18].

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} \quad (25)$$

«Токи трехфазного, двухфазного и однофазного КЗ:

$$I'' = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot z}, \quad (26)$$

$$I_{\kappa 3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I'', \quad (27)$$

$$I_{\kappa 3}^{(1)} = 0,55 \cdot I''. \quad (28)$$

Ударный ток КЗ:

$$I_y = I'' \sqrt{1 + 2(\kappa_y - 1)^2}, \quad (29)$$

где  $\kappa_y$  – ударный коэффициент.

$$\kappa_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}, \quad (30)$$

где  $T_a$  – постоянная апериодической слагающей, с.

$$T_a = \sum X / 314 \sum R \quad (31)$$

Сопротивление энергосистемы:

$$X_C = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{к.ЭС}}}, \quad (32)$$

где  $I_{\text{к.ЭС}}$  – трехфазный ток КЗ в начале ЛЭП, кА» [9].

$$X_C = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 11,214} = 541 \text{ мОм}$$

«Пример расчета для стороны 0,4 кВ ТП-1.

Сопротивления элементов:

– трансформатора ТП, по (23-25):

$$R_m = \frac{6750 \cdot 10,5^2}{630^2} = 1,875 \text{ Ом},$$

$$Z_m = \frac{5,5 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 0,63^2} = 9,625 \text{ Ом},$$

$$X_m = \sqrt{9,625^2 - 1,875^2} = 9,441 \text{ Ом}.$$

– КЛ 10 кВ» [18]:

$$R_{\text{вл}} = 0,62 \cdot 1,2 = 0,744 \text{ Ом},$$

$$X_{\text{вл}} = 0,09 \cdot 1,2 = 0,108 \text{ Ом}.$$

«Эквивалентные сопротивления цепи:

$$\Sigma r = R_{\text{ЛЭП}} + R'_{(\text{ГПП-ТП})} + R_{\text{м.ТП}}, \quad (33)$$

$$\Sigma r = 744 + 171 + 1875 = 2790 \text{ мОм},$$

$$\Sigma x = X_C + X_{\text{ЛЭП}} + X'_{(\text{ГПП-ТП})} + X_{\text{м.ТП}}, \quad (34)$$

$$\Sigma x = 541 + 108 + 14 + 9441 = 10103 \text{ мОм},$$

$$z = \sqrt{2790^2 + 10103^2} = 11022 \text{ мОм.}$$

По формулам (28–32):

$$I'' = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 11022} = 0,55 \text{ кА,}$$

$$T_a = 10103 / (314 \cdot 2790) = 0,0115,$$

$$\kappa_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0115}} = 1,42,$$

$$I_y = 0,55 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,42 - 1)^2} = 0,64 \text{ кА,}$$

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 0,55 = 0,476 \text{ кА,}$$

$$I_{кз}^{(1)} = 0,55 \cdot 0,550 = 0,303 \text{ кА.}$$

Результаты расчетов – в таблице 11» [18].

Таблица 11 – Результаты расчетов токов КЗ

место КЗ	$I''$ ,кА	$I_y$ ,кА	$I^{(2)}$ кз,кА	$I^{(1)}$ кз,кА
шины 0,4 кВ ТП-1	0,550	0,640	0,476	0,303
шины 0,4 кВ ТП-2	0,551	0,650	0,477	0,303
шины 10 кВ ТП-1	3,629	4,304	3,143	1,996
шины 10 кВ ТП-2	3,720	4,431	3,221	2,046
РПЗ	0,549	0,637	0,476	0,302
РП9	0,549	0,641	0,475	0,302
РП10	0,539	0,595	0,466	0,296
РП11	0,544	0,620	0,471	0,299
РП12	0,531	0,582	0,459	0,292
РП4	0,549	0,633	0,475	0,302

Продолжение таблицы 11

место КЗ	$I''_{,кА}$	$I_y,кА$	$I^{(2)}_{кз,кА}$	$I^{(1)}_{кз,кА}$
РП5	0,543	0,616	0,470	0,299
РП6	0,544	0,621	0,471	0,299
РП7	0,536	0,587	0,464	0,295
РП8	0,547	0,632	0,474	0,301
РП13	0,541	0,609	0,469	0,298
Точка К2 (шины 10 кВ ЗРУ)	4,527	5,305	3,920	2,490
Точка К1 (ввод ЗРУ 10 кВ)	4,691	5,579	4,062	2,580
Точка К6 (ввод РУ 10 кВ автобазы)	4,062	4,854	3,518	2,234
Точка К7 (шины 10 кВ РУ 10 кВ автобазы)	3,939	4,728	3,411	2,166

С учетом токов КЗ выбирается ЭО для ЗРУ.

## 2.6 Электрооборудование ЗРУ 10 кВ

Высоковольтные выключатели и разъединители — это коммутационные аппараты, предназначенные для управления потоками электрической энергии в высоковольтных сетях. Они используются для включения и отключения токов нагрузки, а также для создания видимого разрыва электрической цепи при проведении ремонтных работ и переключений. Разъединители предназначены для создания видимого разрыва электрической цепи без снятия напряжения. Они используются для проведения ремонтных работ и переключений в сетях.

«Условия выбора выключателей:

$$U_{ном} \geq U_{раб}, \text{ кВ,}$$

$$I_{ном} \geq I_{раб}, \text{ кВ},$$

$$I_{ном.откл} \geq I_{к}, \text{ кА},$$

где  $I_{ном.откл}$  – ток отключения, кА;

$I_{к}$  – ток трехфазного КЗ, кА.

$$i_{пр.с} \geq i_{у}, \text{ кА},$$

где  $i_{пр.с}$  – сквозной ток КЗ, кА;

$i_{у}$  – ударный ток КЗ, кА.

$$I_m^2 \cdot t_m \geq B_{к}, \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

где  $I_m$  – ток термической стойкости, кА;

$t_m$  – время протекания тока, с;

$B_{к}$  – тепловой импульс, кА<sup>2</sup>·с.

Условия выбора разъединителей:

$$U_{н.апт.} \geq U_{н.уст.},$$

$$I_{н.апт.} \geq I_{раб.мах.},$$

$$I_{тер.}^2 \cdot t_{тер.} \geq B_{к},$$

$$i_{дин} \geq i_{у}.$$

Выбор аппаратов – в таблице 12» [11].

Таблица 12 – Выбор коммутационных аппаратов

Параметры	По расчету	По паспорту, ВВ/TEL-10/630	По паспорту, РВ-10/400
U <sub>ном</sub> , кВ	10	10	10
I <sub>ном</sub> , А	68,9	630	400
I <sub>н.откл.</sub> , кА	4,7	31,5	20
B <sub>к</sub> , кА <sup>2</sup> ·с	2.75	3600	1200
i <sub>дин</sub> , кА	5,6	40	40

«Выбор ОПН.

Для защиты оборудования со стороны 10 кВ устанавливаются ОПН-10/11,5-10/400-УЗ» [11].

ОПН состоят из полупроводниковых элементов с нелинейным сопротивлением, например, вилитовых дисков, и защитной изоляции. Важнейший элемент ограничителя – варистор, который выполняет функцию нелинейного переменного резистора. При нормальном напряжении сопротивление варистора велико, но при возникновении перенапряжения оно резко снижается, позволяя току пройти через ограничитель и уйти в землю, тем самым снижая напряжение до безопасного уровня.

Выбор трансформаторов тока и напряжения.

«Согласно напряжениям в местах установки и полученным расчетным токам выбираем трансформаторы тока (ТТ): на фидерах 10 кВ: ТПЛК10-50...100/5; на вводах ЗРУ 10 кВ: ТПЛК10-150/5.

Проверка ТТ в режиме КЗ.

По динамической стойкости:  $i_{дин} = 74,5 \text{ кА} \geq i_{уд} = 5,6 \text{ кА},$

По термической стойкости:  $I_m^2 \cdot t_m = 2900 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_k = 2,75 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}..$

Условия выбора трансформаторов напряжения (ТН).

$$U_{ном} \geq U_{уст},$$

$$S_{ном} \geq S_{2\Sigma}.$$

Принимаем ТН типа НАМИ-10-95.

$$U_{н.шт.} = 10 \text{ кВ} \geq U_{н.уст.} = 10 \text{ кВ},$$

$$S_{ном} = 200 \text{ ВА} \geq S_{2\Sigma} = 43 \text{ ВА}.$$

ТТ и ТН проходят проверку» [11].

Ячейки КРУ (комплектных распределительных устройств) состоят из четырёх изолированных отсеков: релейного, выкатного элемента, сборных шин и кабельных присоединений. В релейном отсеке размещаются устройства защиты, управления и автоматики, а также аппаратура вспомогательных цепей. В отсеке выкатного элемента находится выдвижной

элемент с механизмами блокировки и направляющими. В отсеке сборных шин располагаются шины, соединяющие шкафы секции РУ, а в отсеке кабельных соединений – трансформаторы тока, заземлитель и другие компоненты.

Выбираются КРУ К-204ЭП/630 А, внешний вид – на рисунке 3.



Рисунок 3 – Ячейка КРУ

Выбранные ячейки КРУ имеют современную модульную конструкцию, встроенную мнемосхему состояний элементов и усиленную изоляцию токоведущих частей.

## 2.7 Релейная защита и автоматика

Релейная защита и автоматика – это комплекс устройств, предназначенный для быстрого автоматического выявления и отделения повреждённых элементов электроэнергетической системы в аварийных ситуациях. Она обеспечивает нормальную работу всей системы. Релейная защита (РЗ) непрерывно контролирует состояние всех элементов и реагирует на возникновение повреждений и ненормальных режимов, воздействуя на силовые выключатели для размыкания токов повреждения (короткого замыкания). Автоматический ввод резерва питания (АВР) выполняется на шинах 0,4 кВ производственных участков первой категории надежности электроснабжения, АВР выполняется на терминалах Сириус-АВР.

«РЗ КЛ 10 кВ выполняется на терминалах Сириус-2Л-02, схема РЗ – на чертеже 5 графической части. Схема оперативных цепей релейной защиты питающей линии 10 кВ – на чертеже 6 графической части.

Внешний вид терминалов РЗ – на рисунке 4.



Рисунок 4 – Внешний вид терминалов РЗ

Уставки защит задаются программно» [2].

Микропроцессорная РЗА обладает улучшенными показателями быстродействия, чувствительности и надёжности по сравнению с устройствами на электромеханических реле. Данный тип РЗА имеет множество сервисных функций, таких как самодиагностика, регистрация и осциллографирование сигналов, а также возможность интеграции в АСУТП объекта энергетики.

## 2.8 Расчет заземляющего устройства ТП 10/0,4 кВ, молниезащита ТП

Система заземления необходима для обеспечения безопасности людей, корректной работы электрических устройств, безопасной эксплуатации оборудования и эффективной работы молниезащиты.

«Удельное сопротивление грунта для электродов:

$$\rho_p = \rho \cdot K_c, \quad (35)$$

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

$K_c$  – коэффициент сезонности» [5].

$$\rho_{pв} = 100 \cdot 1,1 = 110 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$\rho_{pг} = 100 \cdot 1,4 = 140 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

«Для вертикальных электродов (ВЭ) используем угловую сталь 50x50 мм, для горизонтального электрода (ГЭ) – полосовую сталь 50x5 мм.

Сопротивление растеканию для одного ВЭ:

$$R_{овэ} = \frac{\rho_{pв}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right], \quad (36)$$

где  $l$  – длина ВЭ, м;

$d$  – приведенный диаметр, м;

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

$$d = 0,95 \cdot b, \quad (37)$$

где  $b$  – ширина уголка, м» [5].

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

$$t = 3/2 + 0,8 = 2,3 \text{ м},$$

$$R_{овэ} = \frac{110}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot 3}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) \right] = 63,105 \text{ Ом}.$$

«Расчетное число ВЭ:

$$n' = R_{овэ} / R_n, \quad (38)$$

где  $R_n$  – допустимое сопротивление ЗУ, Ом» [5].

$$n' = 63,105 / 4 = 15,8 \approx 16 \text{ шт}$$

«Длина ГЭ:

$$l_z = 1,05 \cdot a \cdot n', \quad (39)$$

где  $a$  – расстояние между ВЭ, м.

$$a = l_{пер} / n', \quad (40)$$

где  $l_{пер}$  – периметр здания ТП, м» [5].

$$l_{пер} = 2 \cdot (7,65 + 8,76) = 32,82 \text{ м},$$

$$a = 32,82 / 16 = 2,05 \text{ м,}$$

$$l_2 = 1,05 \cdot 2,05 \cdot 16 = 34,44 \text{ м.}$$

«План заземления ТП показан на рисунке 5.

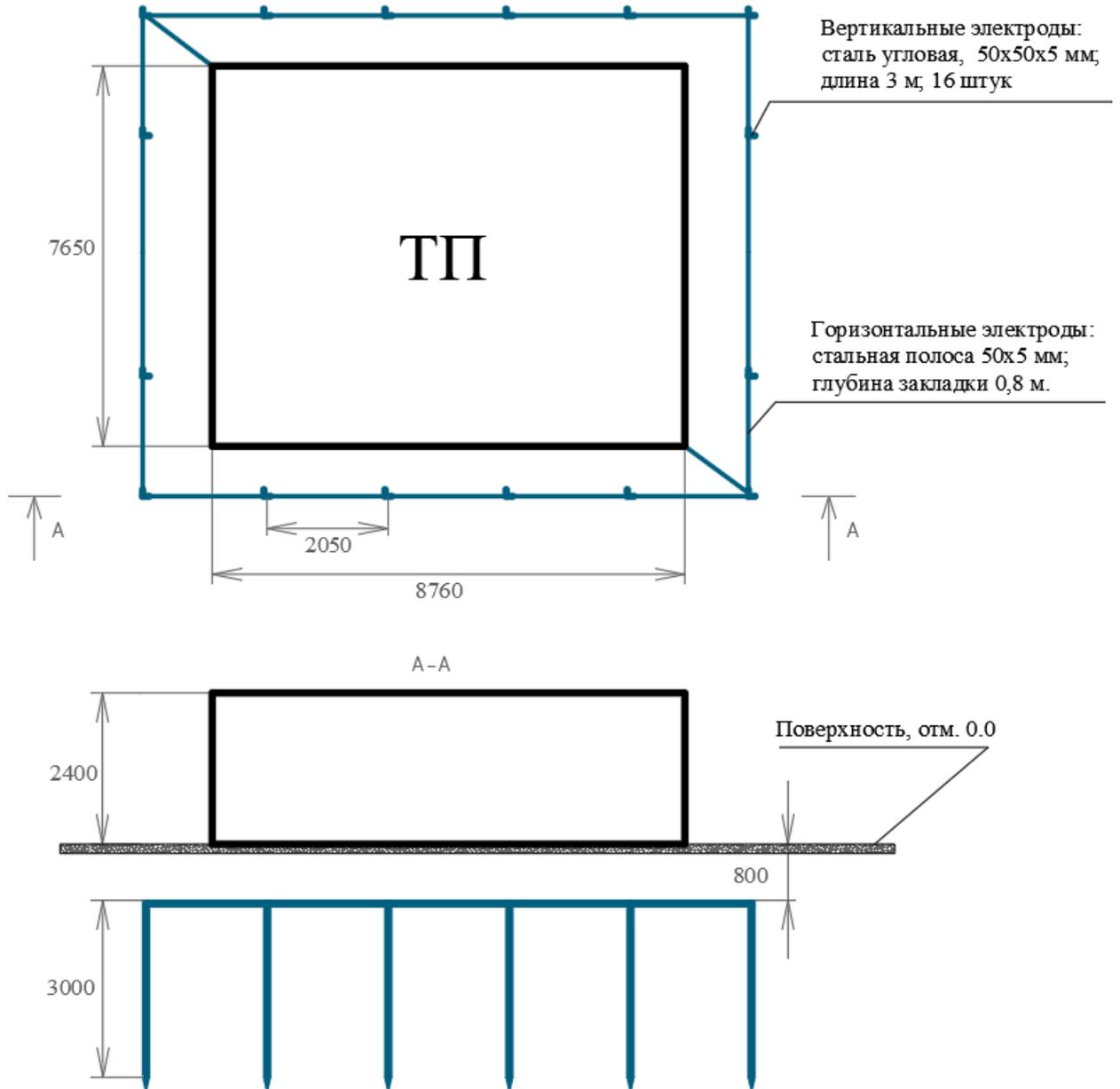


Рисунок 5 – План заземления цеховых ТП

Сопротивление растеканию ГЭ:

$$R_{\text{зз}} = \frac{\rho_{\text{pz}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{l^2}{d \cdot t}\right), \quad (41)$$

$$d = 0,5 \cdot b, \quad (42)$$

где  $b$  – ширина полосы, м» [5].

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

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

$$R_{\text{зз}} = \frac{140}{2 \cdot 3,14 \cdot 34,44} \cdot \ln\left(\frac{34,44^2}{0,025 \cdot 0,825}\right) = 2,947 \text{ Ом}.$$

«Сопrotивление ЗУ:

$$R_{\text{зп}} = \frac{R_{\text{обз}} \cdot R_{\text{зз}}}{R_{\text{обз}} \cdot \eta_6 \cdot n + R_{\text{зз}} \cdot \eta_2}, \quad (43)$$

где  $\eta_6$ ,  $\eta_2$  – коэффициенты использования ВЭ и ГЭ» [5].

$$R_{\text{зп}} = \frac{63,105 \cdot 2,947}{63,105 \cdot 0,51 \cdot 16 + 2,947 \cdot 0,3} = 3,609 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$$

Молниезащита ТП обеспечивается штатным полностью металлическим корпусом, напрямую соединенным с системой заземления. Дополнительные мероприятия по молниезащите не нужны [16].

## 2.9 Расчет заземляющего устройства ЗРУ 10 кВ

«На стороне 10 кВ – максимально допустимое сопротивление контура заземления (но не более 10 Ом), согласно ПУЭ:

$$R_3 \leq \frac{250}{I_3}, \quad (44)$$

где  $I_3$  – расчётный ток замыкания на землю, А.

Расчётный ток замыкания на землю:

$$I_3 = \frac{U \cdot L}{10}, \quad (45)$$

где  $U$  – линейное напряжение, кВ;

$L$  – суммарная длина присоединенных линий 10 кВ, км.

$$I_3 = \frac{10,5 \cdot 3,442}{10} = 3,614 \text{ А},$$

$$R_3 \leq \frac{250}{3,614} = 69,2 \text{ Ом}.$$

С учетом того, что ЗУ будет использоваться и для оборудования 0,4 кВ, принимается максимально допустимое сопротивление 4 Ом» [18].

По формулам (37-44):

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

$$t = 3,5 / 2 + 0,8 = 2,55 \text{ м},$$

$$R_{\text{овз}} = \frac{330}{2 \cdot 3,14 \cdot 3,5} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot 3,5}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot 2,55 + 3,5}{4 \cdot 2,55 - 3,5} \right) \right] = 47,402 \text{ Ом},$$

$$n' = 47,402 / 4 \approx 12 \text{ шт},$$

$$l_{\text{неп}} = 2 \cdot (12,6 + 5,6) = 36,4 \text{ м},$$

$$a = 36,4 / 12 = 3,03 \text{ м},$$

$$l_2 = 1,05 \cdot 3,03 \cdot 12 = 38,18 \text{ м},$$

$$R_{23} = \frac{420}{2 \cdot 3,14 \cdot 38,18} \cdot \ln \left( \frac{38,18^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 2,839 \text{ Ом},$$

$$R_{zp} = \frac{47,402 \cdot 2,839}{47,402 \cdot 0,41 \cdot 44 + 2,839 \cdot 0,21} = 3,704 \text{ Ом} \leq 4 \text{ Ом}.$$

Схема заземления ЗРУ показана на рисунке 6.

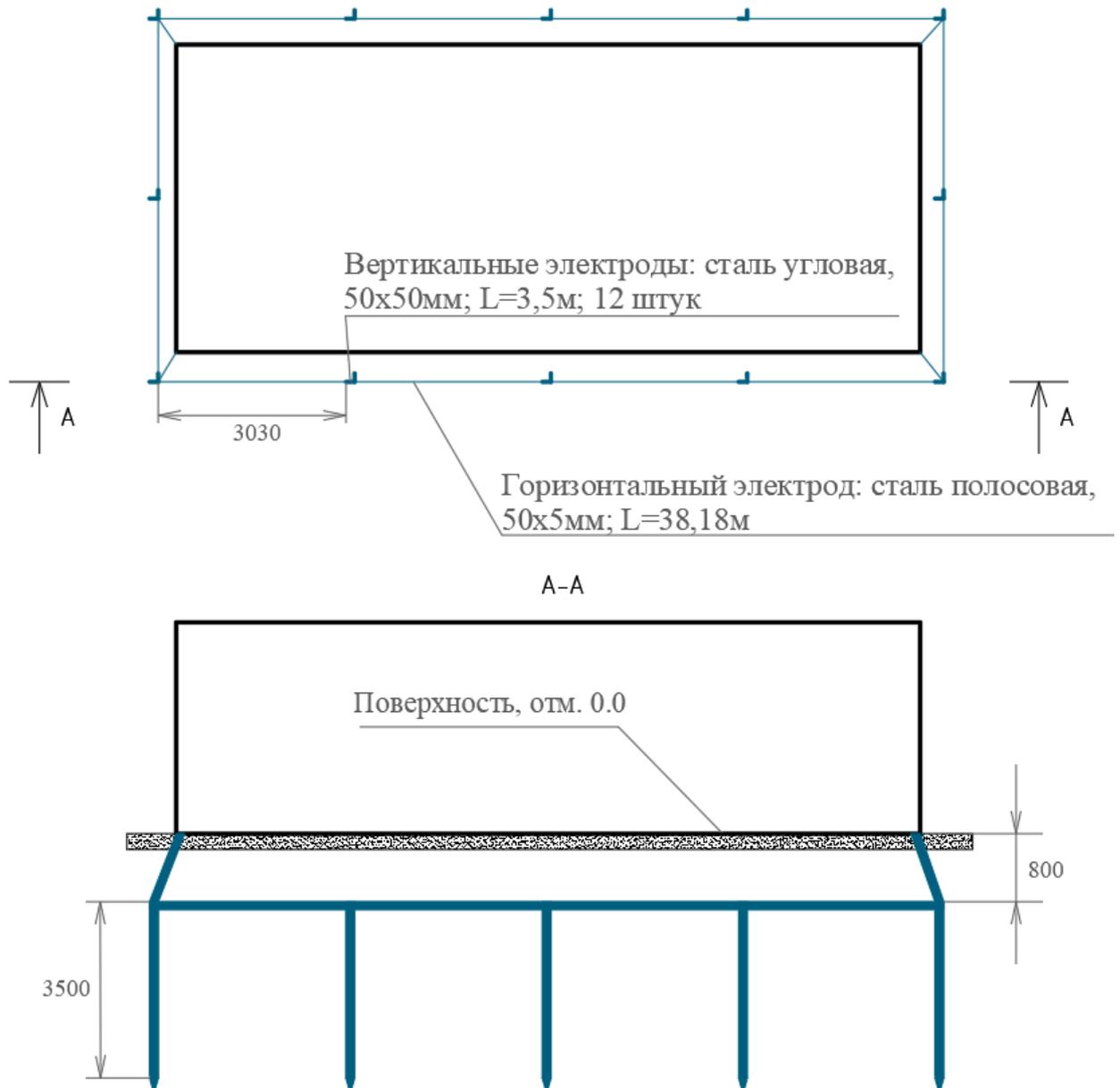


Рисунок 6 – Схема заземления ЗРУ

Сопротивление всех ЗУ менее предельно допустимого значения.

## 2.10 Расчет молниезащиты ЗРУ 10 кВ

Молниезащита закрытых распределительных устройств должна осуществляться в районах с высоким и средним числом грозových часов в год. Для этого можно использовать установку молниеотводов на зданиях.

«Исходя из небольшой относительной длины здания, принимаем тип молниезащиты: одиночный стержневой молниеотвод (МО) на крыше здания, в геометрическом центре защищаемой площади.

Так как МО будет установлен на крыше здания, то в данном случае достаточно рассчитать зону защиты на уровне крыши.

Радиус конуса защиты:

$$r_0 = 1,2 \cdot h, \quad (46)$$

где  $h$  – высота МО, м.

Высота конуса защиты:

$$h_0 = 0,85 \cdot h, \quad (47)$$

где  $h$  – высота МО, м.

Высоту МО подбираем эмпирически, так, чтобы обеспечивалась защищенность объекта:

$$\sqrt{(A/2)^2 + (B/2)^2} < r_0, \quad (48)$$

где  $A$  – длина здания, м;

$B$  – ширина здания, м.

Схема молниезащиты ЗРУ показана на рисунке 7.

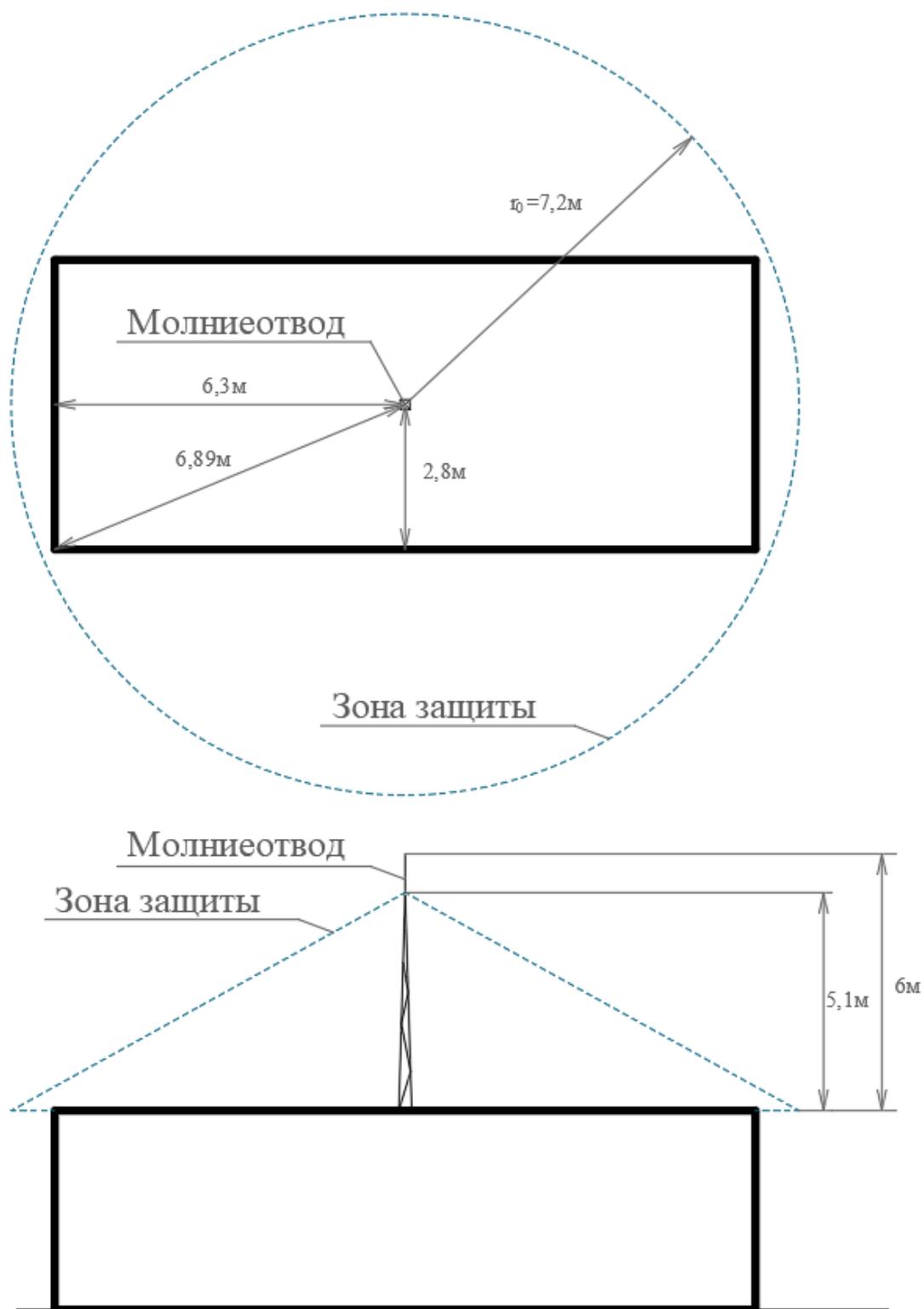


Рисунок 7 – Схема молниезащиты ЗРУ

Радиус и высота конуса защиты, по (46,47):

$$r_0 = 1,2 \cdot 6 = 7,2 \text{ м,}$$

$$h_0 = 0,85 \cdot 6 = 5,1 \text{ м.}$$

Проверка зоны защиты, по (48):

$$\sqrt{(12,6 / 2)^2 + (5,6 / 2)^2} < 7,2,$$

$$\sqrt{(6,3)^2 + (2,8)^2} < 7,2,$$

$$6,89 \text{ м} < 7,2 \text{ м.}$$

Защита обеспечивается» [18].

Вывод.

Определены электрические нагрузки производственных цехов и других вспомогательных участков. В целом по объекту электрические расчетные нагрузки составили 1121,98 кВт; 616,9 квар; 1280,39 кВА. Для ТП выбраны энергосберегающие трансформаторы серии ТМГ12, которые являются эффективным решением для снижения потерь электроэнергии и обеспечения потребителей качественной электроэнергией и комплектные трансформаторные подстанции, обеспечивающие высокую надежность и удобство эксплуатации электрооборудования. Составлен план кабельных трасс, выбраны кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Токи короткого замыкания определены с учетом выбранной схемы электрической сети и марок кабелей. По параметрам рабочих и аварийных режимов выбрано основное оборудование ЗРУ 10 кВ. Для безопасной и надежной работы СЭС спроектированы заземляющие устройства и системы молниезащиты цеховых подстанций и закрытого распределительного устройства, будет обеспечена стабильная работа СЭС и должный уровень электробезопасности.

## Заключение

Выполнена разработка системы электроснабжения группы производственных цехов ООО «Промтехнология», г. Москва. В связи с ростом спроса на свою продукцию, предприятие увеличивает объемы производства, для чего также планирует постройку группы дополнительных производственных цехов, которые будут расположены на отдельной огороженной территории. Для запуска производства на данной группе производственных цехов, потребуется обеспечить ее качественное и надежное электроснабжения, для чего предложена данная система электроснабжения, которая спроектирована согласно всем актуальным требованиям к ее технико-эксплуатационным характеристикам. Определены электрические нагрузки производственных цехов и других вспомогательных участков. Для подстанций выбраны энергосберегающие трансформаторы, которые являются эффективным решением для снижения потерь электроэнергии и обеспечения потребителей качественной электроэнергией и комплектные трансформаторные подстанции, обеспечивающие высокую надежность и удобство эксплуатации электрооборудования. Составлен план кабельных трасс, выбраны кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Токи короткого замыкания определены с учетом выбранной схемы электрической сети и марок кабелей. По параметрам рабочих и аварийных режимов выбрано основное оборудование ЗРУ 10 кВ. Для безопасной и надежной работы СЭС спроектированы заземляющие устройства цеховых подстанций и ЗРУ. Молниезащита ТП обеспечивается штатным полностью металлическим корпусом, напрямую соединенным с системой заземления. Дополнительные мероприятия по молниезащите не нужны

Для предложенной системы электроснабжения использованы передовые технические решения и современное электрооборудование отечественного производства, надежное и качественное питание электрической энергией объекта будет обеспечиваться.

## 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. Голов Р.С. Управление энергосбережением на промышленном предприятии : монография. М. : Дашков и К, 2023. 458 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. Кобозев В.А. Качество электроэнергии и энергоэффективность систем электроснабжения потребителей : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 356 с.
8. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: Учебное пособие. М. : Форум, 2022. 416 с.
9. Петухов Р.А. Электроснабжение : учебное пособие. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. 328 с.
10. Правила устройства электроустановок: действующие разделы 6-го и 7-го изданий. М. : ИНФРА-М, 2023. 832 с.
11. Сибикин Ю. Д. Современные электрические подстанции : учебное пособие. – 2-е изд., доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 417 с.
12. Сибикин М. Ю. Справочник электрика по ремонту электрооборудования промышленных предприятий. – 2-е изд., доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 262 с.
13. Сибикин Ю. Д. Технология энергосбережения : учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 336 с.

14. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение : учебное пособие. – 2-е изд., стер. М. : ИНФРА-М, 2023. 328 с.
15. Фризен В. Э. Расчет и выбор электрооборудования низковольтных распределительных сетей промышленных предприятий : учебное пособие. – 2-е изд., испр. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2021. 194 с.
16. Хорольский В.Я. Эксплуатация систем электроснабжения : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2021. 288 с.
17. Шеховцов В. П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2022. 158 с.
18. 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.
19. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению : учебное пособие. – 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2023. 136 с.
20. Щербаков Е.Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2023. 495 с.