

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 Проектирование системы электроснабжения ремонтно-инструментального цеха

Обучающийся

Б.Э. Айвазян

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., А.А. Андреев

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

Тольятти 2025

Аннотация

Энергоэффективность системы электроснабжения определяется еще на стадии проектирования. Причем, система электроснабжения должна быть рационально спроектирована для каждого отдельно взятого потребителя.

Объектом исследования работы является ремонтно-инструментальный цех.

Предметом исследования работы является система электроснабжения ремонтно-инструментального цеха.

Цель работы заключается в разработке системы электроснабжения ремонтно-инструментального цеха с учетом нагрузки оборудования и требований к надежности.

Для этого сначала необходимо выполнить анализ исходных данных и основных требований к системе электроснабжения объекта проектирования, затем выполнить расчет нагрузок и токов короткого замыкания, по результатам которых выбрать оборудования для системы электроснабжения, а также выполнить расчет системы заземления.

Данная ВКР содержит пояснительную записку объемом 55 страниц, дополняемой 12 таблицами, 7 рисунками, а также 6 чертежами формата А1

Содержание

Введение	4
1 Общие сведения об объекте проектирования	6
1.1 Исходные данные	6
1.2 Требования к системе электроснабжения	8
2 Расчет системы электроснабжения	13
2.1 Расчет системы освещения	13
2.2 Расчет силовых нагрузок.....	18
2.3 Компенсация реактивной мощности	22
2.4 Выбор силовых трансформаторов	24
2.5 Выбор кабельных линий	25
2.6 Расчет токов КЗ.....	30
2.7 Выбор и проверка оборудования	36
3 Расчет заземления	47
Заключение	51
Список используемых источников.....	53

Введение

Современная энергетика сталкивается с комплексными вызовами, требующими системного подхода к их решению. Ключевым направлением развития отрасли является обеспечение постоянного роста производственных мощностей при одновременном сокращении сроков реализации новых энергетических проектов. Особое внимание уделяется модернизации существующих объектов, оптимизации капитальных вложений и повышению эффективности производственных процессов с акцентом на безопасность труда [20].

Промышленность занимает лидирующие позиции в потреблении электроэнергии, поглощая более шестидесяти процентов всего производимого в стране энергоресурса.

Электричество стало универсальным источником, приводящим в действие производственные механизмы, обеспечивающим освещение и автоматизацию технологических процессов. В некоторых производственных процессах электрическая энергия выступает единственным возможным энергоносителем, что подчеркивает её незаменимость в современной промышленности [19].

Электроэнергетика представляет собой фундаментальную основу технического прогресса, без которой невозможно представить нормальное функционирование ни экономической, ни социальной сферы общества. Являясь ключевой составляющей инфраструктуры, она обеспечивает жизнедеятельность всех отраслей народного хозяйства.

В современных условиях роль электрической энергии в жизни человека невозможно переоценить.

Эффективность работы систем электроснабжения промышленных объектов напрямую зависит от качества их проектирования, при этом важнейшим требованием к энергетической инфраструктуре остается обеспечение бесперебойного и надежного электроснабжения потребителей.

Объектом исследования работы является ремонтно-инструментальный цех.

Предметом исследования работы является система электроснабжения ремонтно-инструментального цеха.

Цель работы заключается в разработке системы электроснабжения ремонтно-инструментального цеха с учетом нагрузки оборудования и требований к надежности.

Для этого сначала необходимо выполнить анализ исходных данных и основных требований к системе электроснабжения объекта проектирования, затем выполнить расчет нагрузок и токов короткого замыкания, по результатам которых выбрать оборудования для системы электроснабжения, а также выполнить расчет системы заземления.

1 Общие сведения об объекте проектирования

1.1 Исходные данные

Объектом исследования работы является ремонтно-инструментальный цех.

Предметом исследования работы является система электроснабжения ремонтно-инструментального цеха.

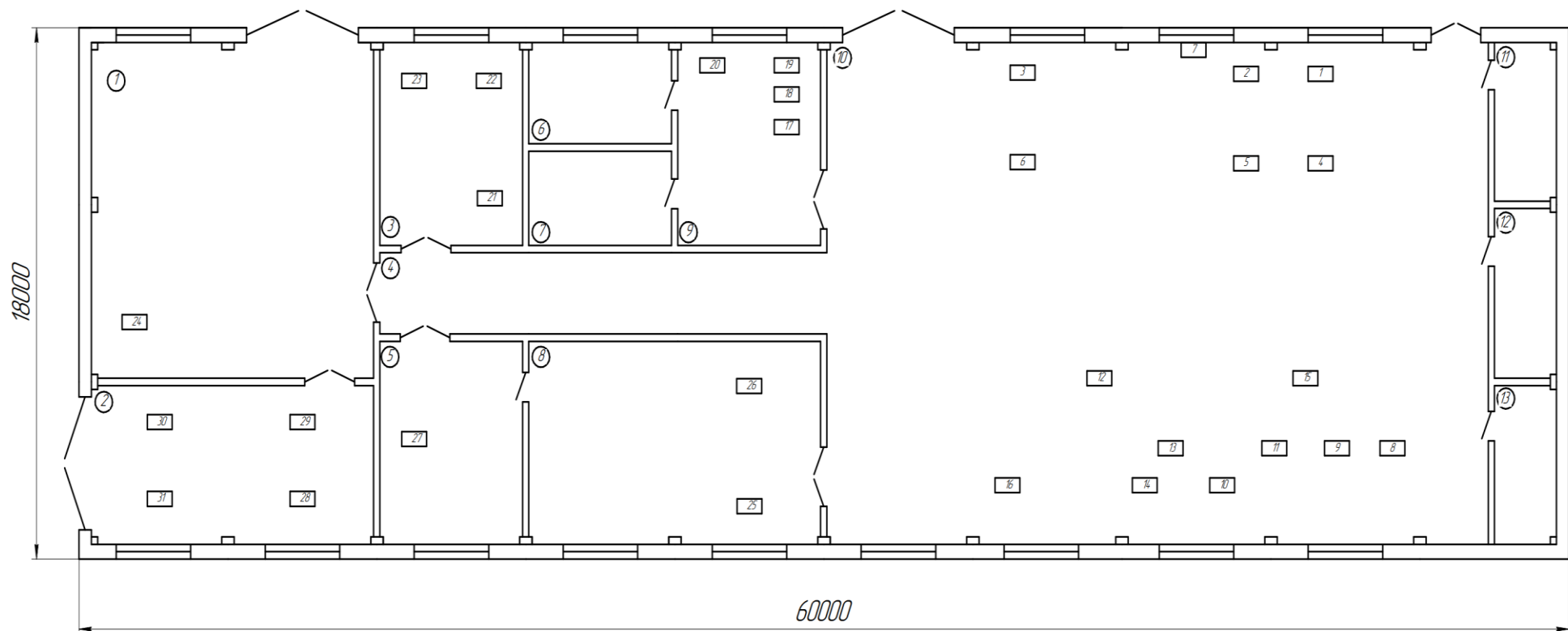
Ремонтно-инструментальный цех (далее цех) предназначен для создания, поддержания и ремонта инструмента, а также для проведения ремонта оборудования и технического обслуживания.

К основным функциям цеха относятся:

- выпуск различных инструментов, предназначенных для использования в производственных процессах;
- ремонт и обслуживание специализированного инструмента и оборудования, что позволяет свести к минимуму простои в производстве;
- проведение необходимых настроек инструментов для их оптимальной работы;
- проверка и контроль состояния инструмента и оборудования, чтобы гарантировать безопасность и высокое качество производимых изделий;
- разработка новых технологий и методов, которые могут помочь улучшить производственные процессы.

Электроснабжение цеха осуществляется от цеховой ТП 10/0,4 кВ, расположенной в 0,8 км от ПС 35/10 кВ.

План цеха с расстановкой оборудования представлен на рисунке 1.



1 – строгальный станок; 2, 3, 5, 6 – токарный станок; 4, 12, 31 – фрезерный станок; 7 – шлифовальный станок; 8, 9 – трубогиб; 10, 11, 13, 19, 22 – сверлильный станок; 14 – пресс; 15, 20, 23 – заточный станок; 16 – насос; 17, 18 – электрическая печь; 21 – молот кузнечный; 24 – гильотина; 25, 26, 27 – установка для поверки приборов учета; 28 – шлифовальный станок; 29, 30 – деревообрабатывающий станок.

Рисунок 1 – Расстановка оборудования

Электрооборудование ремонтно-инструментального цеха в соответствии с планом представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Электрооборудование ремонтно-инструментального цеха

№ на плане	Наименование электрооборудования	Мощность, кВт
1	Строгальный станок	5,0
2, 3	Токарный станок	8,8
4, 12	Фрезерный станок	10,3
5	Токарный станок	10,2
6	Токарный станок	15,8
7	Шлифовальный станок	1,5
8, 9	Трубогиб	4,5
10	Сверлильный станок	2,9
11	Сверлильный станок	4,8
13	Сверлильный станок	4,6
14	Пресс	2,7
15, 20, 23	Заточный станок	2,5
16	Насос	4,0
17, 18	Электрическая печь	14,0
19, 22	Сверлильный станок	0,75
21	Молот кузнечный	6,5
24	Гильотина	21,0
25, 26, 27	Установка для поверки приборов учета	2,5
28	Шлифовальный станок	3,2
29	Деревообрабатывающий станок	12,0
30	Деревообрабатывающий станок	6,5
31	Фрезерный станок	4,5

Основными потребителями электроэнергии в производственном корпусе являются электродвигатели станков, освещение, а также различные коммунально-бытовые нагрузки.

1.2 Требования к системе электроснабжения

При проектировании схем электроснабжения и электрических соединений подстанций необходимо обеспечить оптимальный баланс между надежностью системы и экономичностью решения. Это достигается путем

минимизации количества используемого электрооборудования и проводников при сохранении требуемого уровня резервирования и надежности электроснабжения [9].

Для достижения максимальной эффективности системы и снижения эксплуатационных затрат будет проведен комплексный подход, включающий:

- точный расчет электрических нагрузок;
- анализ расположения всех электроприемников;
- выбор оптимальной схемы подключения конечных распределительных устройств;
- проектирование рациональной системы питания производственного оборудования;
- организацию эффективного подключения щитов освещения и других электроустановок.

Такой подход позволит создать надежную и экономичную систему электроснабжения с оптимальными потерями электроэнергии и минимальными затратами на эксплуатацию.

В современной практике проектирования промышленных предприятий применяются три основных типа схем электроснабжения:

- радиальная схема;
- магистральная схема;
- смешанная схема.

Радиальная схема характеризуется следующими особенностями:

- каждое ВРУ потребителей имеет отдельную линию от КТП;
- количество отходящих магистралей от КТП равно количеству ВРУ потребителей;
- ток в линии равен току того потребителя, к которому подходит линия;
- мощность линии соответствует мощности РП.

Радиальная схема имеет свои преимущества и недостатки:

- высокая надежность электроснабжения;
- простота эксплуатации;

- возможность отключения отдельных линий без нарушения работы других потребителей;
- высокая стоимость материалов и оборудования.

Магистральная схема характеризуется следующими особенностями:

- ВРУ цехов соединяются последовательно между собой;
- от КТП отходит только одна магистраль;
- ток в линии равен сумме токов всех цехов, подключенных к данной магистрали;
- такая схема позволяет сократить количество линий и оборудования.

Преимущества магистральной схемы:

- экономичность за счет сокращения количества линий и оборудования;
- компактность размещения;
- меньшие затраты на монтаж и обслуживание.

Смешанная схема представляет собой комбинацию первых двух типов и включает в себя элементы как радиального, так и магистрального электроснабжения.

Такая схема применяется для оптимизации системы электроснабжения и позволяет использовать преимущества обоих типов схем.

Выбор конкретной схемы электроснабжения зависит от:

- технико-экономических расчетов;
- планировки производственных помещений;
- категории надежности электроснабжения;
- распределения электрических нагрузок;
- перспектив развития производства.

Преимущества смешанной схемы:

- оптимальное сочетание надежности и экономичности;
- гибкость в организации электроснабжения;
- возможность адаптации под конкретные условия производства.

Для снижения общей протяженности распределительной сети и сокращению затрат на ее монтаж, электроснабжение будет выполнено по смешанной схеме.

В современных системах электроснабжения для защиты электрических сетей используются автоматические выключатели, которые существенно превосходят предохранители по своим эксплуатационным характеристикам. Их отличает более удобное конструктивное исполнение и простота в обслуживании, а также возможность одновременного отключения всех фаз в случае работы с трехфазными электроприемниками.

«Значительным преимуществом современных автоматических выключателей является использование корпусов из реактопластов, обладающих высокой термостойкостью» [14].

«В отличие от устаревших выключателей с корпусами из полистирола, способных выдерживать температуры лишь до 70 градусов, новые материалы не плавятся и демонстрируют повышенную устойчивость к возгоранию» [14].

По уровню надежности электроснабжения потребители классифицируются как относящиеся ко второй категории.

В системе электроснабжения применяется схема заземления TN-S, которая полностью соответствует всем требованиям по надежности и электробезопасности при распределении электроэнергии.

Выбор данной системы обусловлен расположением трансформаторной подстанции ТП-10/0,4 кВ непосредственно рядом с производственным цехом.

На стороне 0,4 кВ реализована система с глухозаземленной нейтралью, обеспечивающая быстрое отключение аварийных участков благодаря работе защитной автоматики.

«На стороне 10 кВ применяется схема с изолированной нейтралью, что оправдано небольшими значениями токов короткого замыкания и отсутствием необходимости мгновенного отключения линий. Важным преимуществом такой системы является возможность продолжения работы сети при

возникновении однофазного замыкания, что существенно повышает надежность электроснабжения» [14].

Все электроприемники спроектированы с учетом климатического исполнения УХЛ4, что предполагает их эксплуатацию в условиях умеренного и холодного климата внутри помещений с системой искусственного климата.

Электрооборудование здания имеет минимальную степень защиты IP20, обеспечивающую защиту от случайного контакта пальцев с токоведущими частями и предотвращающую попадание посторонних предметов диаметром более 50 миллиметров. При этом специальная защита от влаги в конструкции не предусмотрена.

Выводы по разделу 1.

В данном разделе были рассмотрены основные требования по электроснабжению цеха. Приведена краткая характеристика цеха, составлен план размещения основного электрооборудования и приведены электрические параметры потребителей цеха для дальнейшего расчета нагрузок.

2 Расчет системы электроснабжения

2.1 Расчет системы освещения

«Освещение рабочего места является важным компонентом условий труда каждого сотрудника. Хотя при организации производственных процессов оно выступает как вспомогательный элемент, его роль в обеспечении эффективной работы невозможно переоценить. Качество освещения напрямую влияет на зрительную работоспособность сотрудников и уровень их утомляемости, что, в свою очередь, отражается на производительности труда, количестве производственного брака и безопасности рабочих процессов» [14].

Недостаточное или некачественное освещение создает серьезные риски для здоровья работников. В офисных и учебных помещениях это приводит к повышенной утомляемости сотрудников, частым головным болям и снижению общей работоспособности. В производственных условиях ситуация еще более критична – плохое освещение может стать причиной серьезных травм при работе с технологическим оборудованием, особенно когда работники вынуждены постоянно оценивать степень риска в условиях недостаточной видимости.

«Ключевая цель производственного освещения – создание оптимальных условий для зрительного восприятия. Для достижения этой цели необходима правильно спроектированная осветительная система, которая должна учитывать специфику зрительной работы на конкретном рабочем месте» [14].

Только при таком подходе можно обеспечить безопасность труда и высокую эффективность производственных процессов.

Расчет освещения будет выполнен на примере помещения №10.

«Высота подвеса светильников определяется по формуле» [23]:

$$h_p = h - (h_c + h_{pn}), \quad (1)$$

$$h_p = 5 - (1,5 + 1,5) = 5 \text{ м.}$$

«где h – высота помещения;

h_c – расстояние от светильников до перекрытия;

h_{pn} – высота расчетной поверхности над полом» [23].

«Для помещений, имеющих большую длину, индекс можно рассчитать по следующей формуле» [23]:

$$i = \frac{A \cdot B}{h_p \cdot (A + B)}, \quad (2)$$

$$i = \frac{27 \cdot 18}{5 \cdot (27 + 18)} \approx 2.$$

«где B – ширина помещения;

h – высота подвеса светильников» [23].

«Далее для расчетов принимаются коэффициенты отражения $P_n \% = 70$, $P_c \% = 50$, $P_p \% = 30$ » [23].

«После чего, по индексу помещения и коэффициента отражения принимаем коэффициент использования $\eta = 0,62$ » [22].

«Для производственных помещений принят светильник TL-PROM LINE RUS 65, для бытовых – светильник TL-PROM LINE RUS 17» [22].

Технические характеристики светодиодных светильников TD-Promo 270 Вт приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики светодиодных светильников

Параметр	TL-PROM LINE RUS 65	TL-PROM LINE RUS 17
Мощность, кВт	0,064	0,016
Световой поток, лм	10672	2668
Тип кривой света	Д	Д
$\cos\varphi/\text{tg}\varphi$	0,98/0,20	0,98/0,20

«Требуемое количество светильников» [22]:

$$n = \frac{E \cdot k_3 \cdot S \cdot z}{\Phi \cdot \eta}, \quad (3)$$

$$n = \frac{300 \cdot 1,3 \cdot 486 \cdot 1,15}{10672 \cdot 0,62} = 33 \text{ шт.}$$

«где E – нормируемая освещённость, 300 Лк;

S – площадь освещения, 486 м²;

k – коэффициент запаса;

Z – поправочный коэффициент, 1,15;

Φ – световой поток лампы, лм;

η – коэффициент использования» [23].

«Для равномерного освещения принимаем количество светильников $N=35$ » [23].

«Средняя освещенность определяется по формуле» [22]:

$$E = \frac{\Phi \cdot \eta \cdot n}{k_3 \cdot S \cdot z}. \quad (4)$$

$$E = \frac{10672 \cdot 0,62 \cdot 35}{1,3 \cdot 486 \cdot 1,15} = 369 \text{ лк.}$$

«Общая активная мощность системы освещения помещений цеха определяется по формуле» [22]:

$$P_{\text{осв.}} = n \cdot P_{\text{л}}, \quad (5)$$

$$P_{\text{осв.}} = 35 \cdot 0,064 = 2,2 \text{ кВт.}$$

«где $P_{\text{л}}$ – мощность одной лампы, кВт (согласно таблице 2).

n – количество ламп, шт» [23].

«Общая реактивная мощность системы освещения помещений цеха определяется по формуле» [22]:

$$Q_{осв.} = P_{осв.} \cdot tg\varphi, \quad (6)$$

$$Q_{осв.} = 2,2 \cdot 0,20 = 0,5 \text{ квар.}$$

«где $tg\varphi$ – коэффициент мощности лампы (согласно таблице 2)» [23].

«Общая полная мощность системы освещения помещений цеха определяется по формуле» [22]:

$$S_{осв.} = \sqrt{P_{осв.}^2 + Q_{осв.}^2}. \quad (7)$$

$$S_{осв.} = \sqrt{2,2^2 + 0,5^2} = 2,3 \text{ кВА.}$$

«Значение силы тока системы освещения помещений цеха определяется по формуле» [22]:

$$I_{осв.} = \frac{S_{осв.}}{\sqrt{3} \cdot U_{л}}, \quad (8)$$

$$I_{осв.} = \frac{2,2}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 3,3 \text{ А.}$$

«где $U_{л}$ – линейное напряжение сети, кВ (в данном случае принимаем 0,4 кВ)» [23].

«Для остальных помещений расчет системы освещения выполняется аналогично» [23].

Результаты расчетов сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Выбор системы освещения

№	A, м	B, м	S, м ²	n, шт	N, шт	Тип светильника	Φ _{св} , ЛК	P _{св} , кВт	E _{ср} , ЛК	P _{осв} , кВт	Q _{осв} , квар	S _{осв} , кВА	I _{св} , А
1	12	12	144	10	12	TL-PROM LINE RUS 65	10672	0,064	369	0,8	0,2	0,8	1,1
2	12	6	72	5	6	TL-PROM LINE RUS 65	10672	0,064	369	0,4	0,1	0,4	0,6
3	6	7,5	45	3	4	TL-PROM LINE RUS 65	10672	0,064	393	0,3	0,1	0,3	0,4
4	18	3	54	5	6	TL-PROM LINE RUS 17	2668	0,016	123	0,1	0,0	0,1	0,1
5	6	7,5	45	3	4	TL-PROM LINE RUS 65	10672	0,064	393	0,3	0,1	0,3	0,4
6	6	3,8	22,5	2	3	TL-PROM LINE RUS 17	2668	0,016	148	0,0	0,0	0,0	0,1
7	6	3,8	22,5	2	3	TL-PROM LINE RUS 17	2668	0,016	148	0,0	0,0	0,0	0,1
8	12	7,5	90	6	8	TL-PROM LINE RUS 65	10672	0,064	393	0,5	0,1	0,5	0,8
9	6	7,5	45	3	4	TL-PROM LINE RUS 65	10672	0,064	393	0,3	0,1	0,3	0,4
10	27	18	486	33	35	TL-PROM LINE RUS 65	10672	0,064	319	2,2	0,5	2,3	3,3
11	3	6	18	4	5	TL-PROM LINE RUS 17	2668	0,016	307	0,1	0,0	0,1	0,1
12	3	6	18	4	5	TL-PROM LINE RUS 17	2668	0,016	307	0,1	0,0	0,1	0,1
13	3	6	18	4	5	TL-PROM LINE RUS 17	2668	0,016	307	0,1	0,0	0,1	0,1
Итого:										5,1	1,0	5,2	7,5

План расстановки светильников приведен на рисунке 2.

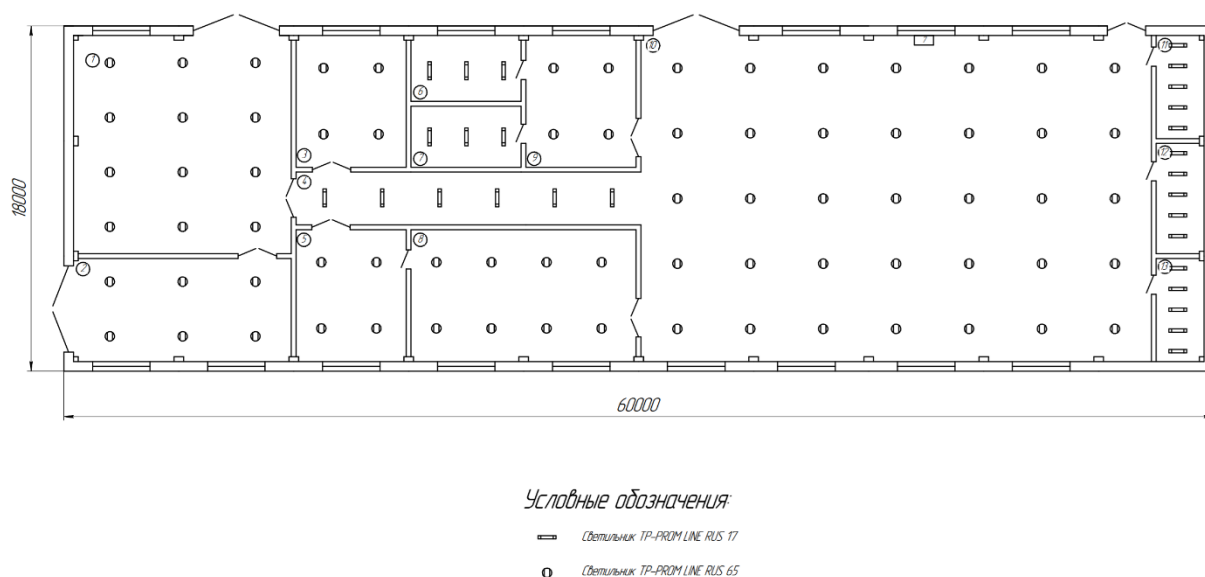


Рисунок 2 – План расстановки светильников

Нагрузка освещения будет разделена на два щита освещения ЩО-1 (помещения 1-9) и ЩО-2 (помещения 10-13).

2.2 Расчет силовых нагрузок

Далее будет выполнен расчет силовых нагрузок цеха [18].

Расчет нагрузок выполняется методом коэффициента использования. Согласно данному методу, расчетные нагрузки принимаются равными средним значениям нагрузок за наиболее загруженную смену.

«Далее для примера будет приведен расчет нагрузки для строгального станка 7703ГТ» [18].

«Сначала определяется средняя активная нагрузка оборудования за смену» [18]:

$$P_{CM} = P_H \cdot K_H, \quad (9)$$

$$P_{CM} = 5,5 \cdot 0,14 = 0,77 \text{ кВт.}$$

«где K_H – коэффициент использования электроприемников;

P_H – номинальная мощность электроприемников, кВт;

P_{CM} – средняя мощность электроприемников РП за смену, кВт»

[18].

«Среднесменная реактивная нагрузка» [18]:

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (10)$$

$$Q_{CM} = 0,77 \cdot 1,73 = 1,33 \text{ квар.}$$

«где $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент реактивной мощности» [18].

«Полная расчетная мощность оборудования определяется по формуле» [18]:

$$S_{CM} = \sqrt{P_{CM}^2 + Q_{CM}^2}. \quad (11)$$

$$S_{CM} = \sqrt{0,77^2 + 1,33^2} = 1,54 \text{ кВА.}$$

«Расчетная сила тока оборудования определяется согласно формуле» [18]:

$$I_{CM} = \frac{S_{CM}}{\sqrt{3} \cdot U_{Л}}. \quad (12)$$

$$I_{CM} = \frac{1,54}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 2,34 \text{ А.}$$

«Для остального электрооборудования расчет нагрузок выполняется аналогично» [18].

«Результаты расчетов нагрузки цеха методом коэффициента использования сведены в таблицу 4» [18].

Таблица 4 – Распределение нагрузки

№ на плане	Наименование оборудования	P _н , кВт	K _и	cosφ	tgφ	P _{см} , Вт	Q _{см} , квар	S _{см} , ВА	I, А
РП-1									
1	Строгальный станок	5,0	0,14	0,6	1,33	0,7	0,9	1,2	1,8
2	Токарный станок	8,8	0,14	0,45	1,98	1,2	2,4	2,7	4,2
3	Токарный станок	8,8	0,14	0,45	1,98	1,2	2,4	2,7	4,2
4	Фрезерный станок	10,3	0,14	0,58	1,40	1,4	2,0	2,5	3,8
5	Токарный станок	10,2	0,14	0,58	1,40	1,4	2,0	2,5	3,8
6	Токарный станок	15,8	0,14	0,45	1,98	2,2	4,4	4,9	7,5
7	Шлифовальный станок	1,5	0,14	0,45	1,98	0,2	0,4	0,5	0,7
Итого по РП-1		60,4	0,14	0,50	1,74	8,5	14,7	17,0	25,8
РП-2									
8	Трубогиб	4,5	0,15	0,65	1,17	0,7	0,8	1,0	1,6
9	Трубогиб	4,5	0,15	0,65	1,17	0,7	0,8	1,0	1,6
10	Сверлильный станок	2,9	0,15	0,65	1,17	0,4	0,5	0,7	1,0
11	Сверлильный станок	4,8	0,15	0,6	1,33	0,7	1,0	1,2	1,8
12	Фрезерный станок	7,3	0,15	0,6	1,33	1,1	1,5	1,8	2,8
13	Сверлильный станок	4,6	0,15	0,6	1,33	0,7	0,9	1,2	1,8
14	Пресс	2,7	0,15	0,6	1,33	0,4	0,5	0,7	1,0
15	Станок заточный	2,5	0,15	0,6	1,33	0,4	0,5	0,6	1,0
16	Насос	4,0	0,8	0,65	1,17	3,2	3,7	4,9	7,5
Итого по РП-2		37,8	0,22	0,63	1,24	8,3	10,2	13,1	20,0
РП-3									
17	Электрическая печь	14	0,8	0,8	0,75	11,2	8,4	14,0	21,3
18	Электрическая печь	14	0,8	0,8	0,75	11,2	8,4	14,0	21,3
19	Сверлильный станок	0,75	0,15	0,8	0,75	0,1	0,1	0,1	0,2
20	Станок заточный	4,0	0,2	0,6	1,33	0,6	0,8	1,0	1,5
Итого по РП-3		32,75	0,71	0,79	0,77	23,1	17,7	29,1	44,3
РП-4									
21	Молот кузнечный	6,5	0,2	0,7	1,02	1,3	1,3	1,9	2,8
22	Сверлильный станок	0,75	0,15	0,8	0,75	0,1	0,1	0,1	0,2

Продолжение таблицы 4

№ на плане	Наименование оборудования	P _н , кВт	Kи	cosφ	tgφ	P _{см} , Вт	Q _{см} , квар	S _{см} , ВА	I, А
23	Станок заточный	4,0	0,2	0,6	1,33	0,6	0,8	1,0	1,5
24	Гильотина HNS	21	0,15	0,6	1,33	3,2	4,2	5,3	8,0
Итого по РП-4		32,25	0,16	0,63	1,25	5,2	6,4	8,2	12,5
РП-5									
25	Установка для поверки приборов учета	2,5	0,18	0,5	1,73	0,5	0,8	0,9	1,4
26	Установка для поверки приборов учета	2,5	0,18	0,5	1,73	0,5	0,8	0,9	1,4
27	Установка для поверки приборов учета	2,5	0,18	0,5	1,73	0,5	0,8	0,9	1,4
28	Шлифовальный станок	3,2	0,21	0,6	1,33	0,7	0,9	1,1	1,7
29	Деревообрабатывающий станок	12	0,2	0,6	1,33	2,4	3,2	4,0	6,1
30	Деревообрабатывающий станок	6,5	0,2	0,6	1,33	1,3	1,7	2,2	3,3
31	Фрезерный станок	4,5	0,3	0,6	1,33	1,4	1,8	2,3	3,4
Итого по РП-5		33,7	0,21	0,58	1,41	7,1	10,0	12,2	18,6
Итого:		196,9				52,1	58,9	79,7	121,3

Характеристики нагрузки распределительных устройств приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики нагрузки распределительных устройств

Наименование оборудования	cosφ	tgφ	P _{см} , кВт	Q _{см} , квар	S _{см} , кВА	I, А
РП1	0,5	1,74	8,5	14,7	17	25,8
РП2	0,63	1,24	8,3	10,2	13,1	20
РП3	0,79	0,77	23,1	17,7	29,1	44,3
РП4	0,63	1,25	5,2	6,4	8,2	12,5
РП5	0,58	1,41	7,1	10	12,2	18,6
ЩО-1	0,98	0,2	2,6	0,5	2,7	3,9
ЩО-2	0,98	0,2	2,5	0,5	2,5	3,7
Итого:	0,68	1,05	57,3	60	84,8	128,8

Также, стоит отметить, что при проектировании важным этапом является расчет компенсации реактивной мощности, после которого выполняете расчет силовых трансформаторов.

Это техническое решение необходимо для оптимизации энергопотребления на промышленных объектах и позволяет устранить ряд эксплуатационных проблем, включая снижение потерь энергии в сетях и продление срока службы оборудования.

2.3 Компенсация реактивной мощности

«Расчет компенсации реактивной мощности производится следующим образом» [23]:

$$Q_{KP} = \alpha \cdot P \cdot (tg\varphi - tg\varphi_K), \quad (13)$$

$$Q_{KP} = 0,9 \cdot 57,3 \cdot (1,05 - 0,35) = 36,1 \text{ квар.}$$

«где α – коэффициент, учитывающий повышение коэффициента мощности естественным способом, принимается равным 0,9.

P – активная мощность, согласно таблице 5.

$tg\varphi$ – коэффициент реактивной мощности, согласно таблице 5.

$tg\varphi_K$ – требуемый коэффициент реактивной мощности, равный 0,35» [23].

«По расчетному значению выбрано устройство УКРМ мощностью 35 квар» [23].

«Тангенс угла φ после установки компенсирующих устройств определяется по формуле» [23]:

$$tg\varphi_{факт} = tg\varphi - \frac{Q_{КУ}}{\alpha \cdot P}, \quad (14)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{факт}} = 1,05 - \frac{35}{0,9 \cdot 57,3} = 0,37.$$

«Косинус угла φ , после компенсации реактивной мощности составит» [23]:

$$\cos \varphi_{\text{факт}} = \cos(\operatorname{arctg}(\varphi_{\text{факт}})), \quad (15)$$

$$\cos \varphi_{\text{факт}} = 0,94.$$

«Уточненные значения реактивной мощности с учетом компенсации составит определяются по формуле» [23]:

$$Q_{KP} = P \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{факт}}, \quad (16)$$

$$Q_{KP} = 57,3 \cdot 0,37 = 20,6 \text{ квар.}$$

«Уточненные значения полной мощности с учетом компенсации определяются по формуле» [23]:

$$S_{\text{ТПНН}} = \sqrt{P^2 + Q_{KP}^2}, \quad (17)$$

$$S_{\text{ТПНН}} = \sqrt{57,3^2 + 20,6^2} = 60,9 \text{ кВА.}$$

«Расчетный ток определяется согласно формуле (12)» [18]:

$$I_P = \frac{60,9}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 87,9 \text{ А.}$$

«Благодаря компенсации реактивной мощности, полная мощность снизилась с 81,3 кВА до 60,9 кВА, а расчетный ток с 123,4 А до 87,9 А» [18].

2.4 Выбор силовых трансформаторов

«Сначала, определяется расчетная номинальная мощность силового трансформатора, необходимого к установке» [7]:

$$S_{\text{ном.тр}} = \frac{S_p}{k_3 \cdot N}, \quad (18)$$

$$S_{\text{ном.тр}} = \frac{200 + 60,9}{0,7 \cdot 2} = 186,4 \text{ кВА.}$$

«где S_p – полная расчетная мощность, кВА;

N – количество трансформаторов;

k_3 – коэффициент загрузки, для потребителей 2 категории $K_3 = 0,7$ » [7].

В трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ помимо нагрузки цеха планируется подключение дополнительного оборудования мощностью 200 кВА. Для обеспечения надежного электроснабжения и создания необходимого резерва было принято решение установить два силовых трансформатора ТМГ мощностью 250 кВА каждый [4].

«Значение силы тока на вводе 10 кВ трансформатора формуле» [7]:

$$I_{\text{трВН}} = \frac{S_{\text{ТР}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}}; \quad (19)$$

$$I_{\text{трВН}} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 13,7 \text{ А.}$$

«Значение силы тока на вводе 0,4 кВ трансформатора» [7]:

$$I_{\text{трНН}} = \frac{S_{\text{ТР}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}}}; \quad (20)$$

$$I_{mpHH} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 360,8 \text{ А.}$$

«Далее будет выбрано защитное и коммутационное оборудование подстанции» [18].

2.5 Выбор кабельных линий

«Для электроснабжения оборудования выбран кабель ПВ-3 одножильный» [2].

«Кабель выбираются по условию по допустимому току нагрева» [19]:

$$I_{доп} \geq I_{дог.}$$

Для электроснабжения станка строгального 7703ГТ выбран кабель ПВ-3 5(1х1,5). Проверка кабеля:

$$I_{доп} = 14 \text{ А} \geq I_{дог.} = 11,1 \text{ А}$$

«Для остальных электродвигателей кабельные линии выбираются аналогично. Результаты выбора кабельных линий 0,4 кВ, питающих электродвигатели приведены в таблице 6» [2].

Таблица 6 – Результаты выбора кабельных линий 0,4 кВ

№ на плане	Наименование электрооборудования	Идв, А	Сечение, мм ²	Идоп, А
1	Строгальный станок	11,1	ПВ-3 5(1×1,5)	14
2, 3	Токарный станок	14,9	ПВ-3 5(1×2,5)	22
		1,5	ПВ-3 5(1×1,5)	14
		0,7	ПВ-3 5(1×1,5)	14
		0,9	ПВ-3 5(1×1,5)	14
4, 12	Фрезерный станок	16,8	ПВ-3 5(1×2,5)	22
		4,9	ПВ-3 5(1×1,5)	14
		0,4	ПВ-3 5(1×1,5)	14

Продолжение таблицы 6

№ на плане	Наименование электрооборудования	Идв, А	Сечение, мм2	Идоп, А
5	Токарный станок	21	ПВ-3 5(1×2,5)	22
		0,4	ПВ-3 5(1×1,5)	14
		0,5	ПВ-3 5(1×1,5)	14
6	Токарный станок	29,3	ПВ-3 5(1×6)	35
		2,6	ПВ-3 5(1×1,5)	14
		0,7	ПВ-3 5(1×1,5)	14
7	Шлифовальный станок	2,5	ПВ-3 5(1×1,5)	14
8, 9	Трубогиб	8,1	ПВ-3 5(1×1,5)	14
10	Сверлильный станок	3,4	ПВ-3 5(1×1,5)	14
		2,1	ПВ-3 5(1×1,5)	14
		0,4	ПВ-3 5(1×1,5)	14
11	Сверлильный станок	6,7	ПВ-3 5(1×1,5)	14
		2,6	ПВ-3 5(1×1,5)	14
		0,7	ПВ-3 5(1×1,5)	14
13	Сверлильный станок	8,6	ПВ-3 5(1×1,5)	14
		0,4	ПВ-3 5(1×1,5)	14
14	Пресс	5,7	ПВ-3 5(1×1,5)	14
15, 20, 23	Заточный станок	5,2	ПВ-3 5(1×1,5)	14
16	Насос	10,1	ПВ-3 5(1×1,5)	14
17, 18	Электрическая печь	-	ПВ-3 5(1×1,5)	14
19, 22	Сверлильный станок	1,9	ПВ-3 5(1×1,5)	14
21	Молот кузнечный	16,8	ПВ-3 5(1×2,5)	22
24	Гильотина	42,5	ПВ-3 5(1×10)	45
25, 26, 27	Установка для поверки приборов учета	6,7	ПВ-3 5(1×1,5)	14
28	Шлифовальный станок	5,7	ПВ-3 5(1×1,5)	14
29	Деревообрабатывающий станок	21,0	ПВ-3 5(1×2,5)	22
30	Деревообрабатывающий станок	16,8	ПВ-3 5(1×2,5)	22
31	Фрезерный станок	8,6	ПВ-3 5(1×1,5)	14

Кабельные линии от ВРУ до оборудования проверяются по допустимым потерям напряжения [3].

Действительные потери в кабеле:

$$\Delta U = \frac{x \cdot Q + r \cdot P}{U_n}, \quad (21)$$

«где r – активное сопротивление кабеля, мОм;

x – индуктивное сопротивление кабеля, мОм

P – активная мощность электроприемника, кВт;

Q – реактивная мощность электроприемника, кВАр;

U_n – номинальное напряжение, В» [2].

«Для подключения электрооборудования к распределительным щитам выбран пятижильный кабель ВВГнг» [2].

«Проверка по допустимому току нагрева» [2]:

$$I_{дон} = 19 A \geq I_{дов.} = 12,7 A.$$

«Сопротивление кабельной линии» [2]:

$$r = r_0 \cdot l; \quad (22)$$

$$r = 12,3 \cdot 0,1 = 1,23 \text{ Ом};$$

$$x = x_0 \cdot l; \quad (23)$$

$$x = 0,126 \cdot 0,1 \approx 0,01 \text{ Ом}.$$

«Согласно формуле (21) потери составят» [2]:

$$\Delta U = \frac{0,01 \cdot 9,5 + 1,23 \cdot 5,5}{380} = 0,018 \text{ В}.$$

«Для остального оборудования расчеты выполняются аналогично» [2].

«Результаты проверки кабельных линий 0,4 кВ приведены в таблице 7» [2].

Таблица 7 – Результаты проверки кабельных линий 0,4 кВ

№ на плане	Электрооборудование	cosφ	sinφ	P _{см} , кВт	Q _{см} , квар	I, А	Сечение, мм ²	I _{доп} , А	R, Ом	X, Ом	ΔU, В
РП-1											
1	Строгальный станок	0,6	0,80	5	6,7	12,7	5×1,5	19	1,23	0,01	0,018
2	Токарный станок	0,45	0,89	8,8	17,5	29,7	5×6	42	0,74	0,01	0,016
3	Токарный станок	0,45	0,89	8,8	17,5	29,7	5×6	42	0,74	0,01	0,016
4	Фрезерный станок	0,58	0,81	10,3	14,5	27,0	5×6	42	0,74	0,01	0,015
5	Токарный станок	0,58	0,81	10,2	14,3	26,7	5×6	42	0,31	0,01	0,009
6	Токарный станок	0,45	0,89	15,8	31,4	53,3	5×10	58	0,18	0,01	0,008
7	Шлифовальный станок	0,45	0,89	1,5	3,0	5,1	5×1,5	19	1,23	0,01	0,003
Итого по РП-1		0,5	0,87	60,4	104,6	183,5	5×70	196	0,03	0,01	0,005
РП-2											
8	Трубогиб	0,65	0,76	4,5	5,3	10,5	5×1,5	19	1,23	0,01	0,013
9	Трубогиб	0,65	0,76	4,5	5,3	10,5	5×1,5	19	1,23	0,01	0,013
10	Сверлильный станок	0,65	0,76	2,9	3,4	6,8	5×1,5	19	1,23	0,01	0,005
11	Сверлильный станок	0,6	0,80	4,8	6,4	12,2	5×1,5	19	1,23	0,01	0,01
12	Фрезерный станок	0,6	0,80	7,3	9,7	18,5	5×2,5	25	0,74	0,01	0,015
13	Сверлильный станок	0,6	0,80	4,6	6,1	11,6	5×1,5	19	1,23	0,01	0,013
14	Пресс	0,6	0,80	2,7	3,6	6,8	5×1,5	19	1,23	0,01	0,007
15	Станок заточный	0,6	0,80	2,5	3,3	6,3	5×1,5	19	1,23	0,01	0,007
16	Насос	0,65	0,76	4	4,7	9,4	5×1,5	19	1,23	0,01	0,016
Итого по РП-2		0,63	0,78	37,8	46,6	91,2	5×25	104	0,05	0,09	0,015
РП-3											
17	Электрическая печь	0,8	0,60	14	10,5	26,6	5×6	42	0,74	0,01	0,029
18	Электрическая печь	0,8	0,60	14	10,5	26,6	5×6	42	0,74	0,01	0,029
19	Сверлильный станок	0,8	0,60	0,75	0,6	1,4	5×1,5	19	1,23	0,01	0,002
20	Станок заточный	0,6	0,80	4	5,3	10,1	5×1,5	19	1,23	0,01	0,007
Итого по РП-3		0,79	0,61	32,75	25,4	63,0	5×25	104	0,18	0,01	0,016

Продолжение таблицы 7

№ на плане	Электрооборудование	cosφ	sinφ	P _{см} , кВт	Q _{см} , квар	I, А	Сечение, мм ²	Идоп, А	R, Ом	X, Ом	ΔU, В
РП-4											
21	Молот кузнечный	0,7	0,71	6,5	6,6	14,1	5×2,5	25	0,74	0,01	0,015
22	Сверлильный станок	0,8	0,60	0,75	0,6	1,4	5×1,5	19	1,23	0,01	0,002
23	Станок заточный	0,6	0,80	4	5,3	10,1	5×1,5	19	1,23	0,01	0,007
24	Гильотина HNS	0,6	0,80	21	28,0	53,2	5×10	58	0,18	0,01	0,012
Итого по РП-4		0,63	0,78	32,25	39,8	77,8	5×25	104	0,05	0,09	0,015
РП-5											
25	Установка для поверки приборов учета	0,5	0,87	2,5	4,3	7,6	5×1,5	19	1,23	0,01	0,01
26	Установка для поверки приборов учета	0,5	0,87	2,5	4,3	7,6	5×1,5	19	1,23	0,01	0,01
27	Установка для поверки приборов учета	0,5	0,87	2,5	4,3	7,6	5×1,5	19	1,23	0,01	0,01
28	Шлифовальный станок	0,6	0,80	3,2	4,3	8,1	5×1,5	19	1,23	0,01	0,007
29	Деревообрабатывающий станок	0,6	0,80	12	16,0	30,4	5×6	42	0,74	0,01	0,016
30	Деревообрабатывающий станок	0,6	0,80	6,5	8,7	16,5	5×2,5	25	0,74	0,01	0,015
31	Фрезерный станок	0,6	0,80	4,5	6,0	11,4	5×1,5	19	1,23	0,01	0,013
Итого по РП-5		0,58	0,81	33,7	47,3	88,3	5×25	104	0,05	0,09	0,016

2.6 Расчет токов КЗ

Ток короткого замыкания (КЗ) – это чрезвычайно высокая сила тока, которая может возникнуть в электрической сети за доли секунды при нарушении нормального режима работы.

Расчет токов КЗ необходим для:

- выбора параметров срабатывания релейной защиты;
- учета как максимальных, так и минимальных значений токов КЗ;
- обеспечения необходимой чувствительности защитных устройств;
- проверки соответствия оборудования условиям работы сети;
- корректной настройки защитных устройств.

Также в [17] отмечается, что при расчетах необходимо учитывать:

- изменение сопротивления трансформаторов с РПН;
- действительные коэффициенты трансформации;
- влияние различных элементов сети на величину тока КЗ;
- необходимость обеспечения надежной работы всей электрической системы.

Таким образом, основной целью расчета токов КЗ является обеспечение надежной и безопасной работы электрической сети, защита оборудования и предотвращение возможных аварийных ситуаций [11].

Расчет токов КЗ начинается с составления расчетной, которая представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Расчетная схема

Схема замещения представлена на рисунке 4.

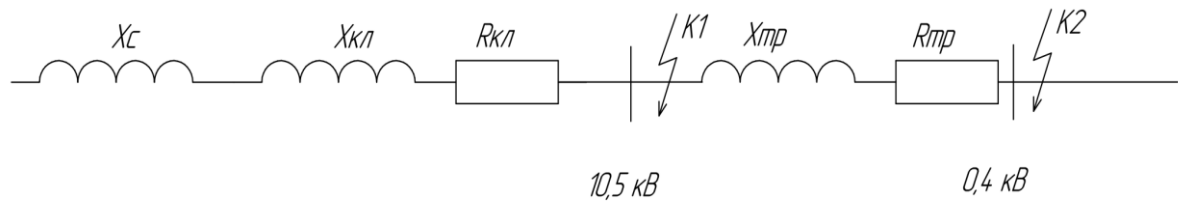


Рисунок 4 – Схема замещения

«Анализ будет проведен для двух точек короткого замыкания – K1 и K2. Точка K1 находится на 10 кВ шинах распределительного устройства РУ-10 кВ, при этом базовое напряжение составит 10,5 кВ. Точка K2 расположена на 0,4 кВ шинах распределительного устройства РУ-0,4 кВ, и базовое напряжение здесь составит 380 В» [14].

«Значение тока короткого замыкания на шинах РУ-10 кВ ПС 35/10 кВ составляет 7,03 кА» [14].

«Для определения тока КЗ необходимо найти сопротивление до точки КЗ» [14].

«Сопротивление в точке K1 будут складываться из сопротивления системы и сопротивления кабельной линии от ПС 35/10 кВ до ТП 10/0,4 кВ. Так как активной сопротивлением значительно ниже индуктивного, им можно пренебречь. Индуктивное сопротивление системы определяется по формуле» [14]:

$$X_c = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot I_c}, \quad (24)$$

$$X_c = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 7,03} = 0,86 \text{ Ом.}$$

«где I_c – значение тока КЗ в центре питания, кА» [18].

«Активное и индуктивное сопротивления кабельной линии определяется по формулам (25) и (26)» [14]:

$$R_{KL} = r_0 \cdot l, \quad (25)$$

$$R_{KL} = 1,24 \cdot 0,8 = 0,992 \text{ Ом},$$

$$X_{KL} = x_0 \cdot l, \quad (26)$$

$$X_{KL} = 0,099 \cdot 0,8 = 0,079 \text{ Ом}.$$

«где r_0 – удельное активное сопротивление, Ом/км;

x_0 – удельное индуктивное сопротивление, Ом/км;

l – протяженность кабельной линии, км» [18].

«Суммарное реактивное сопротивление до точки К1 определяется по формуле» [14]:

$$X_{K1} = X_C + X_{KL}, \quad (27)$$

$$X_{K1} = 0,862 + 0,079 = 0,941 \text{ Ом}.$$

«где X_{K1} – результирующее реактивное сопротивление до точки К1, Ом;

X_C – реактивное сопротивление системы, Ом;

X_{KL} – реактивное сопротивление кабельной линии, Ом» [18].

«Суммарное активное сопротивление до точки К1 определяется формулой» [14]:

$$R_{K1} = R_{KL}, \quad (28)$$

$$R_{K1} = 0,992 \text{ Ом}.$$

«где R_{K1} – суммарное активное сопротивление до точки К1, Ом;

R_{KL} – активное сопротивление кабельной линии от ПС 35/10 кВ до ТП 10/0,4 кВ, Ом» [18].

«Полное сопротивление до точки К1 определяется формулой» [14]:

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2}. \quad (29)$$

$$Z_{K1} = \sqrt{0,992^2 + 0,941^2} = 1,367 \text{ Ом.}$$

«Сила тока на стороне 10,5 кВ силового трансформатора составляет 13,7 А. В качестве кабельной линии выбран кабель марки АСБ 3×25, который имеет максимально допустимый длительный ток 91 А. Длина кабельной линии составляет 0,8 км» [14].

«Значение установившегося тока трехфазного короткого замыкания определяется по формуле» [14]:

$$I_K^{(3)} = \frac{U_\delta}{\sqrt{3} \cdot Z_\Sigma}, \quad (30)$$

$$I_{K1}^{(3)} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,367} = 4,435 \text{ кА.}$$

«где Z_Σ – полное сопротивление до точки К3» [18].

«Значение ударного тока К3 определяется по формуле» [14]:

$$i_{y\delta} = \sqrt{2} \cdot I_K^{(3)} \cdot K_{y\delta}, \quad (31)$$

$$i_{y\delta} = \sqrt{2} \cdot 4,435 \cdot 1,8 = 11,29 \text{ кА.}$$

«где $K_{y\delta}$ – ударный коэффициент, равный 1,8 для секции шин 10 кВ и 1,3 для секции шин 0,4 кВ» [18].

«Значение мощности короткого замыкания определяется по формуле» [18]:

$$S_K = \sqrt{3} \cdot I_K \cdot U_{\phi}. \quad (32)$$

$$S_{K1} = \sqrt{3} \cdot 4,435 \cdot 10,5 = 80,657 \text{ кВА}.$$

После выполнения расчетов для первой точки короткого замыкания производится аналогичный расчет для точки К2.

Определение параметров сопротивлений всех элементов цепи осуществляется на основе составленной схемы замещения (рисунок 4).

«Для трансформатора ТМГ мощностью 250 кВА установлены следующие значения сопротивлений:

- активное сопротивление составляет 9,4 мОм;
- индуктивное сопротивление равно 27,2 мОм» [18].

«Эти параметры являются важными исходными данными для дальнейшего расчета токов короткого замыкания в сети» [18].

«Эквивалентное активное сопротивление до точки К1, приведенное к базисному уровню напряжения в точке К2» [18]:

$$R'_{K1} = R_{K1} \cdot \left(\frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 2}}\right)^2, \quad (33)$$

$$R_{K2} = 0,992 \cdot \left(\frac{0,38}{10,5}\right)^2 = 1,299 \text{ мОм},$$

«Эквивалентное индуктивное сопротивление до точки К1, приведенное к базисному уровню напряжения в точке К2» [18]:

$$X'_{K1} = X_{K1} \cdot \left(\frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 2}}\right)^2, \quad (34)$$

$$X_{K2} = 0,941 \cdot \left(\frac{0,38}{10,5}\right)^2 = 1,232 \text{ мОм}.$$

«Активное и индуктивное сопротивления до точки К2 определяются по формулам» [18]:

$$R_{K2} = R'_{K1} + R_{TP}, \quad (35)$$

$$R_{K2} = 1,299 + 9,4 = 10,699 \text{ Ом.}$$

$$X_{K2} = X'_{K1} + X_{TP}, \quad (36)$$

$$X_{K2} = 1,232 + 27,2 = 28,432 \text{ мОм.}$$

«где X'_{K1} – эквивалентное индуктивное сопротивление до точки К1, приведенное к базисному уровню напряжения в точке К2;
 R'_{K1} – эквивалентное активное сопротивление до точки К1, приведенное к базисному уровню напряжения в точке К2» [18].

«Полное сопротивление определяется по формуле» [18]:

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2}, \quad (37)$$

$$Z_{K2} = \sqrt{10,699^2 + 28,432^2} = 30,378 \text{ мОм.}$$

Для расчета тока трехфазного КЗ на шинах 0,4 кВ ТП 10/0,4 кВ необходимо использовать формулу (30):

$$I_K = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 30,378} = 7,222 \text{ кА.}$$

«Согласно формуле (31), значение ударного тока КЗ на шинах 0,4 кВ ТП-10/0,4 кВ составит» [14]:

$$i_{y0} = \sqrt{2} \cdot 1,3 \cdot 7,222 = 13,277 \text{ Ом.}$$

«Согласно формуле (32), значение мощности короткого замыкания на шинах 0,4 кВ ТП-10/0,4 кВ составит» [14]:

$$S_{K1} = \sqrt{3} \cdot 7,222 \cdot 0,38 = 4,753 \text{ кВА.}$$

Таким образом, на шинах 10 кВ ТП-10/0,4 кВ ток трехфазного КЗ составил 4,435 кА, ударный ток КЗ – 11,29 кА.

На шинах 0,4 кВ ТП-10/0,4 кВ ток трехфазного КЗ составил 7,222 кА, ударный ток КЗ – 13,277 кА.

2.7 Выбор и проверка оборудования

Для управления асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором устанавливаются магнитные пускатели.

При выборе магнитных пускателей для электродвигателей должно соблюдаться условие [25]:

$$I_{нп} \geq I_{н\delta}. \quad (38)$$

Сила тока электродвигателя рассчитывается по формуле:

$$I_{\delta\delta} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta}. \quad (39)$$
$$I_{\delta\delta} = \frac{5,5}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,88 \cdot 0,857} = 11,1 \text{ А.}$$

Тогда, по условию (38), для электродвигателя АИР 100 L2 выбран пускатель ПМЛ-2100 с номинальным током 25 А:

$$I_{нп} = 25 \geq I_{н\partial} = 11,1.$$

Условие выполняется, таким образом, пускатель ПМЛ-2100 с номинальным током 25 А для электродвигателя АИР 100 L2 может быть принят к установке.

Для остальных электродвигателей выбор магнитных пускателей проведен аналогично.

«Тепловое реле выбирает исходя из номинального тока двигателя из соотношения» [25]:

$$I_{нэ} \geq I_{н\partial}. \quad (40)$$

Тогда, по условию (40), для электродвигателя АИР 100 L2 выбрано тепловое реле ПМЛ-2100 с номинальным током 25 А:

$$I_{нп} = 25 \geq I_{н\partial} = 11,1.$$

Условие выполняется, таким образом, тепловое реле ПМЛ-2100 с номинальным током 25 А для электродвигателя АИР 100 L2 может быть принят к установке.

Таблица 8 – Результаты выбора магнитных пускателей и тепловых реле

№ на плане	Наименование электрооборудования	Р, кВт	Марка ЭД	Инд, А	Марка теплового реле	Инэ, А	Марка пускателя	Инп, А
1	Строгальный станок	5,5	АИР 100 L2	11,1	РТЛ-1016	14	ПМЛ-2100	25
2, 3	Токарный станок	7,5	АИР 112 M2	14,9	РТЛ-1022	25	ПМЛ-2100	25
		0,37	АИР 80 A8	1,5	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10
		0,18	АИР 62 A6	0,7	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10
		0,25	АИР 63 B6	0,9	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10
4, 12	Фрезерный станок	7,5	АИР 132 S4	16,8	РТЛ-1022	25	ПМЛ-2100	25
		2,2	АИР 80 B2	4,9	РТЛ-1010	6	ПМЛ-1100	10
		0,12	АИР 56 A4	0,4	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10
5	Токарный станок	11	АИР 132 M2	21	РТЛ-1022	25	ПМЛ-2100	25
		0,12	АИР 56 A4	0,4	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10
		0,125	АИР 63 B6	0,5	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10
6	Токарный станок	15	АИР 160 S4	29,3	РТЛ-2053	32	ПМЛ-3500	40
		1,1	АИР 71 B2	2,6	РТЛ-1008	4	ПМЛ-1100	10
		0,18	АИР 62 A6	0,7	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10
7	Шлифовальный станок	1	АИР 71 B2	2,5	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10
8, 9	Трубогиб	4	АИР 100 L2	8,1	РТЛ-1014	10	ПМЛ-1100	10
10	Сверлильный станок	1,5	АИР 80 A2	3,4	РТЛ-1008	4	ПМЛ-1100	10
		0,75	АИР 71 A2	2,1	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10
		0,12	АИР 56 A4	0,4	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10
11	Сверлильный станок	3	АИР 100 S4	6,7	РТЛ-1014	10	ПМЛ-1100	10
		1,1	АИР 71 B2	2,6	РТЛ-1008	4	ПМЛ-1100	10
		0,18	АИР 62 A6	0,7	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10
13	Сверлильный станок	4	АИР 100 L4	8,6	РТЛ-1014	10	ПМЛ-1100	10
		0,12	АИР 56 A4	0,4	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10

Продолжение таблицы 8

№ на плане	Наименование электрооборудования	Р, кВт	Марка ЭД	Инд, А	Марка теплового реле	Инэ, А	Марка пускателя	Инп, А
14	Пресс	2,2	АИР 100 L6	5,7	РТЛ-1010	6	ПМЛ-1100	10
15, 20, 23	Заточный станок	2	АИР 100 L6	5,2	РТЛ-1010	6	ПМЛ-1100	10
16	Насос	5	АИР 100 L2	10,1	РТЛ-1022	25	ПМЛ-2100	25
17, 18	Электрическая печь	15	-	-	-	-	-	-
19, 22	Сверлильный станок	0,75	АИР 71 A2	1,9	РТЛ-1007	2,5	ПМЛ-1100	10
21	Молот кузнечный	7,5	АИР 132 S4	16,8	РТЛ-1022	25	ПМЛ-2100	25
24	Гильотина	22	АИР 180 S4	42,5	РТЛ-2063	100	ПМЛ-4100	63
25, 26, 27	Установка для поверки приборов учета	3	АИР 100 S4	6,7	РТЛ-1014	10	ПМЛ-1100	10
28	Шлифовальный станок	2,2	АИР 100 L6	5,7	РТЛ-1010	6	ПМЛ-1100	10
29	Деревообрабатывающий станок	8,2	АИР 132 M2	15,7	РТЛ-1022	25	ПМЛ-2100	25
30	Деревообрабатывающий станок	7,5	АИР 132 S4	16,8	РТЛ-1022	25	ПМЛ-2100	25
31	Фрезерный станок	4	АИР 100 L4	8,6	РТЛ-1014	10	ПМЛ-1100	10

Для распределения электроэнергии выбраны пункты распределительные серии ПР-8501.

Распределительные пункты ПР-8501 выполняют функцию ввода и распределения электроэнергии в электрических сетях. Они защищают электрооборудование от повреждений при перегрузках и коротких замыканиях, а также позволяют управлять электрическими цепями, включая и отключая их до шести раз за сутки. Кроме того, эти устройства предназначены для запуска асинхронных электродвигателей в промышленных установках [8].

При организации коммутации электрической сети с использованием автоматических выключателей, для защиты отходящих линий от магистральных шинопроводов, а также в трансформаторных подстанциях, используются автоматические выключатели серии ВА.

«Номинальные токи автомата I_{HA} и его расцепителей I_{HP} выбирают по длительному расчетному току линии, согласно формулам (41) и (42)» [16]:

$$I_{HA} \geq I_{ДЛ}, \quad (41)$$

$$I_{HP} \geq I_{ДЛ} \quad (42)$$

«Ток срабатывания (отсечки) электромагнитного расцепителя проверяется по максимальному кратковременному току линии» [16]:

$$I_{CPЭ} \geq 1,25 \cdot I_{KP} \quad (43)$$

«При выборе автоматического выключателя для одного электродвигателя в качестве $I_{ДЛ}$ принимается его номинальный ток I_n , а в качестве I_{KP} – пусковой ток $I_{ПУСК}$ » [16].

В таблице 9 приведены результаты выбора автоматических выключателей согласно условиям (41)-(43).

Таблица 9 – Результаты выбора автоматических выключателей

№ на плане	Наименование электрооборудования	Инд, А	Икр, А	Марка АВ	Ина, А	Инр, А	Исрз, А
РП-1							
1	Строгальный станок	15,9	119,1	ВА 51-25	25	16	160
2	Токарный станок	24	179,7	ВА 51-25	25	25	250
3	Токарный станок	24	179,7	ВА 51-25	25	25	250
4	Фрезерный станок	28,3	212,6	ВА 51-35	100	31,5	400
5	Токарный станок	32,5	243,5	ВА 51-35	100	50	400
6	Токарный станок	47	352,5	ВА 51-35	100	50	400
7	Шлифовальный станок	2,9	21,7	ВА 51-25	25	6,3	63
РП-2							
8	Трубогиб	8,9	66,6	ВА 51-25	25	10	100
9	Трубогиб	8,9	66,6	ВА 51-25	25	10	100
10	Сверлильный станок	6,8	51,3	ВА 51-25	25	8	80
11	Сверлильный станок	12,4	92,7	ВА 51-25	25	16	160
12	Фрезерный станок	28,3	212,6	ВА 51-35	100	31,5	400
13	Сверлильный станок	11,9	89,2	ВА 51-25	25	16	160
14	Пресс	4,9	36,6	ВА 51-25	25	6,3	63
15	Станок заточный	4,4	33,3	ВА 51-25	25	6,3	63
16	Насос	9	67,7	ВА 51-25	25	10	100
РП-3							
17	Электрическая печь	22,8	170,9	ВА 51-25	25	25	250
18	Электрическая печь	22,8	170,9	ВА 51-25	25	25	250
19	Сверлильный станок	2,2	16,2	ВА 51-25	25	6,3	63
20	Станок заточный	4,4	33,3	ВА 51-25	25	6,3	63
РП-4							
21	Молот кузнечный	21,7	162,4	ВА 51-25	25	25	250
22	Сверлильный станок	2,2	16,2	ВА 51-25	25	6,3	63
23	Станок заточный	4,4	33,3	ВА 51-25	25	6,3	63
24	Гильотина HNS	48,9	366,4	ВА 51-35	100	50	400
РП-5							
25	Установка для поверки приборов учета	7,2	54,1	ВА 51-25	25	8	80
26	Установка для поверки приборов учета	7,2	54,1	ВА 51-25	25	8	80
27	Установка для поверки приборов учета	7,2	54,1	ВА 51-25	25	8	80
28	Шлифовальный станок	4,9	36,6	ВА 51-25	25	6,3	63
29	Деревообрабатывающий станок	31,8	238,2	ВА 51-35	100	50	400
30	Деревообрабатывающий станок	21,7	162,4	ВА 51-25	25	25	250
31	Фрезерный станок	11,5	86,6	ВА 51-25	25	16	160

В распределительных устройствах на напряжение 10 кВ применяются шкафы высоковольтного ввода типа ШВВ-10. Данные шкафы предназначены для коммутации трехфазных электрических сетей с изолированной нейтралью.

Основные характеристики ШВВ-10:

- выносные вводы для комплектных трансформаторных подстанций внутренней установки
- климатическое исполнение: УЗ
- тип сети: трехфазная с изолированной нейтралью

Для распределительных устройств на напряжение 0,4 кВ в КТП и ВРУ производственного корпуса выбраны панели серии ЩО-01.

Основные характеристики ЩО-01:

- номинальное напряжение 380/220 В;
- частота 50 Гц;
- тип сети с глухозаземленной нейтралью;
- конструкция: сварная из листогнутых профилей.

План распределительной сети ремонтно-инструментального цеха приведен на рисунке 5.

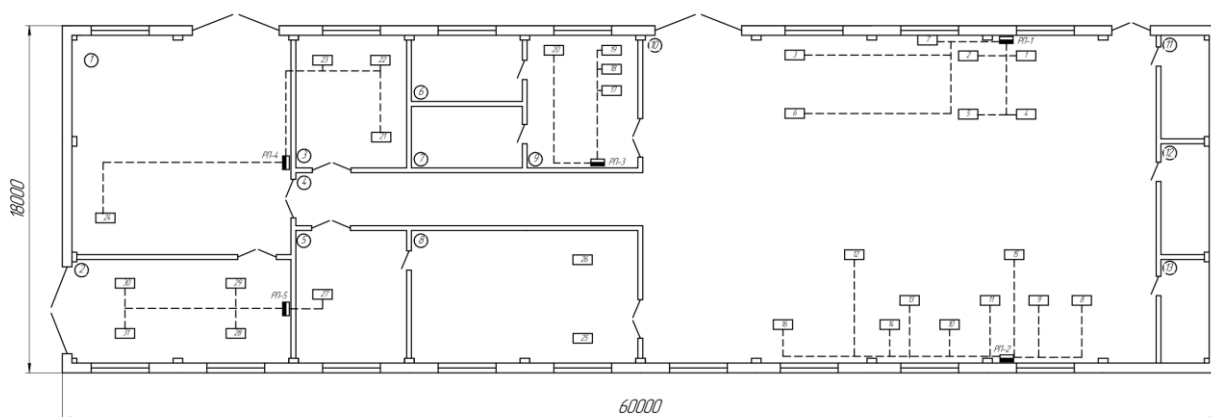


Рисунок 5 – План распределительной сети

Перечень панелей РУ-0,4 кВ ТП-10/0,4 кВ приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Перечень панелей ВРУ-0,4 кВ

Номер панель	Тип панели	Номер ячейки	Назначение ячейки
1	ЩО-01-49	1	Ввод
2	ЩО-01-08	2	Сторонняя нагрузка
		3	Сторонняя нагрузка
3	ЩО-01-08	4	Ремонтно-инструментальный цех
		5	Резерв
4	ЩО-01-70	6	Секционная панель
5	ЩО-01-08	7	Сторонняя нагрузка
		8	Сторонняя нагрузка
6	ЩО-01-08	9	Ремонтно-инструментальный цех
		10	Резерв
7	ЩО-01-49	11	Ввод

«Выключатели нагрузки проверяются рядом условий» [12].

«Проверка выключателя нагрузки по номинальному напряжению» [12]:

$$U_{уст} \leq U_{ном}; \quad (43)$$

$$U_{уст} = 10 \text{ кВ} \leq U_{ном} = 10 \text{ кВ}.$$

«Проверка выключателя нагрузки по номинальному току» [5]:

$$I_{расч} \leq I_{ном}; \quad (44)$$

$$I_{трВН} = 13,7 \text{ А} \leq I_{ном} = 630 \text{ А}.$$

«Проверка выключателя нагрузки по отключающей способности выполняется по условию» [5]:

$$I_{КЗ}^{(3)} \leq I_{откл.ном}. \quad (45)$$

$$I_{КЗ}^{(3)} = 4,435 \text{ кА} \leq I_{откл.ном} = 40 \text{ кА}.$$

«Условия выполняются» [5].

«Далее выбираются предохранители 10 кВ. Выбирается предохранитель ПКТ-101-10-16-31,5» [21].

«Проверка предохранителя по номинальному напряжению» [5]:

$$U_{уст} \leq U_{ном}; \quad (46)$$

$$U_{уст} = 10 \text{ кВ} \leq U_{ном} = 10 \text{ кВ}.$$

«Проверка предохранителя по номинальному току» [5]:

$$I_{трВН} \leq I_{ном}; \quad (47)$$

$$I_{трВН} = 13,7 \text{ А} \leq I_{ном} = 16 \text{ А}.$$

«Проверка предохранителя по отключающей способности» [5]:

$$I_{КЗ}^{(3)} = 4,435 \text{ кА} \leq I_{откл.ном} = 31,5 \text{ кА}.$$

«Условия выполняются» [5].

«Для коммутации электрической сети вводной панели ЩО-01-49 выбран автоматический выключатель ВА57-39 с номинальным током 630 А» [1].

«Условие выбора разъединителя приведена в таблице 11» [1].

Таблица 11 – Условие выбора автоматического выключателя

Параметры	Расчетные данные	Условие	Паспортные данные
Номинальное напряжение, кВ	0,4	$\leq$	0,4
Номинальный ток, А	360,8	$\leq$	630

«Для измерения силы тока в вводной панели ЩО-01-49 выбран трансформатор тока Т-0,66 500/5» [13].

«Условие выбора трансформаторов тока Т-0,66 приведена в таблице 12» [13].

Таблица 12 – Условие выбора трансформаторов тока Т-0,66

Параметры	Расчетные данные	Условие	Паспортные данные
Номинальное напряжение, кВ	0,4	$\leq$	0,4
Номинальный ток, А	360,8	$\leq$	500

Однолинейная схема электроснабжения после реконструкции приведена на рисунке 6.

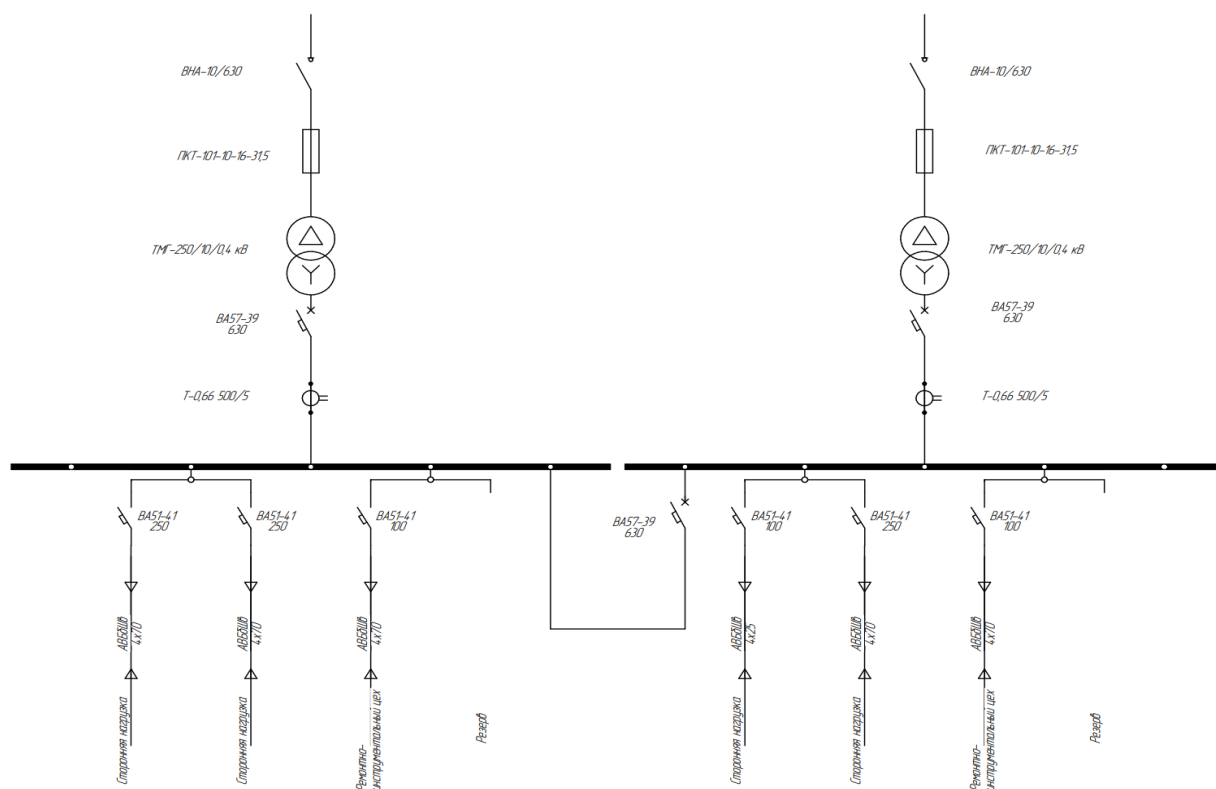


Рисунок 6 – Однолинейная схема электроснабжения после реконструкции

Выводы по разделу 2.

В системе освещения объекта использованы два типа светильников:

- для производственных помещений – TL-PROM LINE RUS 65 (мощность 64 Вт, световой поток 10672 лм);

- для бытовых помещений - TL-PROM LINE RUS 17 (мощность 16 Вт, световой поток 2668 лм).

Электроснабжение освещения организовано через два щита освещения:

- ЩО-1 обслуживает помещения 1-9;
- ЩО-2 обслуживает помещения 10-13.

По результатам расчета силовых нагрузок выбраны трансформаторы ТМГ-250/10/0,4.

Для компенсации реактивной мощности установлены два устройства УКРМ со следующими параметрами:

- полная мощность 15 квар;
- напряжение 0,4 кВ.

После чего выполнен расчет токов КЗ.

Затем выполнен расчет кабельных линий. Для электроснабжения оборудования выбран кабель ПВ-3 пятижильный. Для подключения электрооборудования к распределительным щитам выбран пятижильный кабель ВВГнг.

После чего выбраны устройства защиты.

Для распределения электроэнергии выбраны пункты распределительные серии ПР-8501.

В составе встроенной цеховой трансформаторной подстанции применены шкафы ШВВ-10 кВ.

Для распределительных устройств применены панели серии ЩО-01.

3 Расчет заземления

Система заземления обычно состоит из заземляющих стержней, пластин или сетки, изготовленной из токопроводящих материалов, таких как медь или оцинкованная сталь. Эти компоненты устанавливаются под землей и подключаются к трансформатору и другому оборудованию подстанции. Размеры заземляющих проводов должны соответствовать потенциальным токам короткого замыкания, а все соединения должны быть надежно закреплены для обеспечения надежной работы.

Кроме того, система заземления должна быть спроектирована таким образом, чтобы выдерживать различные условия окружающей среды, включая колебания температуры и коррозию. Регулярные испытания и техническое обслуживание необходимы для обеспечения того, чтобы система заземления оставалась эффективной в течение длительного времени. Это включает периодические измерения сопротивления для подтверждения того, что сопротивление заземления находится в допустимых пределах [24].

Также важно интегрировать систему заземления с молниезащитой и соблюдать соответствующие стандарты и предписания. Правильное заземление трансформаторной подстанции не только повышает безопасность за счет снижения риска поражения электрическим током и повреждения оборудования, но и способствует повышению надежности электроснабжения за счет минимизации переходных перенапряжений и обеспечения эффективной работы защитных устройств. Таким образом, эффективная система заземления является основополагающим аспектом проектирования и эксплуатации трансформаторных подстанций, вносящим решающий вклад в безопасность и надежность электрической инфраструктуры.

«Требуемое сопротивление заземляющего устройства» [10]:

$$R_{3y} \leq 4 \text{ Ом.}$$

«Расчетное сопротивление вертикального заземлителя – электрода, определяется формулой» [6]:

$$r_e = 0,27 \cdot \rho \cdot K_{сез}, \quad (48)$$
$$r_e = 0,27 \cdot 100 \cdot 1,7 = 45,9 \text{ Ом.}$$

«где ρ – удельное сопротивление грунта;

$K_{сез}$ – коэффициент сезонности» [6].

«Требуемое число вертикальных заземлителей без учета экранирования определяется по формуле» [6]:

$$N'_{B.P} = \frac{r_B}{R_{3Y}}, \quad (49)$$
$$N'_{B.P} = \frac{45,9}{4} = 11,475.$$

«где r_B – сопротивление одного вертикального электрода» [6].

Принято 12 вертикальных заземлителей – электродов.

«Требуемое число вертикальных заземлителей с учетом экранирования определяется по формуле» [6]:

$$N_{B.P} = \frac{N'_{B.P}}{\eta_B}, \quad (50)$$
$$N_{B.P} = \frac{12}{0,52} = 23,07 \text{ шт.}$$

«где η_B – коэффициент использования вертикального электрода» [6].

Принято 24 вертикальных заземлителей – электродов.

«Далее необходимо определить требуемый периметр контурного заземления по выражению» [6]:

$$L_{II} = (A + 2) \cdot 2 + (B + 2) \cdot 2 = 164 \text{ м.}$$

$$a = \frac{B'}{n - 1} = 5,3.$$

«С учетом полученных данных, значение сопротивления вертикального определяется по формуле» [6]:

$$R_B = \frac{r_B}{N_B \cdot \eta_B}, \quad (51)$$

$$R_B = \frac{45,9}{24 \cdot 0,52} = 3,67 \text{ Ом.}$$

«С учетом полученных данных, значение горизонтального электрода определяется по формуле» [6]:

$$R_\Gamma = \frac{0,366 \cdot K_{\text{сез}} \cdot \rho}{L} \cdot \lg \frac{2l^2}{bt}, \quad (52)$$

$$R_\Gamma = \frac{0,366 \cdot 1,7 \cdot 100}{128} \cdot \lg \frac{2 \cdot 128^2}{40 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7} = 2,94 \text{ Ом.}$$

«Фактическое значение заземляющего устройства определяется по формуле» [6]:

$$R_{3\Phi} = \frac{R_B \cdot R_\Gamma}{R_B + R_\Gamma}, \quad (53)$$

$$R_{3\Phi} = \frac{3,67 \cdot 2,94}{3,67 + 2,94} = \frac{10,78}{6,61} = 1,63 \text{ Ом.}$$

$$R_{3\Phi} = 1,63 \text{ Ом} \leq R_{3Y} = 4 \text{ Ом.}$$

Схема защитного заземления КТП 10/0,4 кВ приведена на рисунке 7.

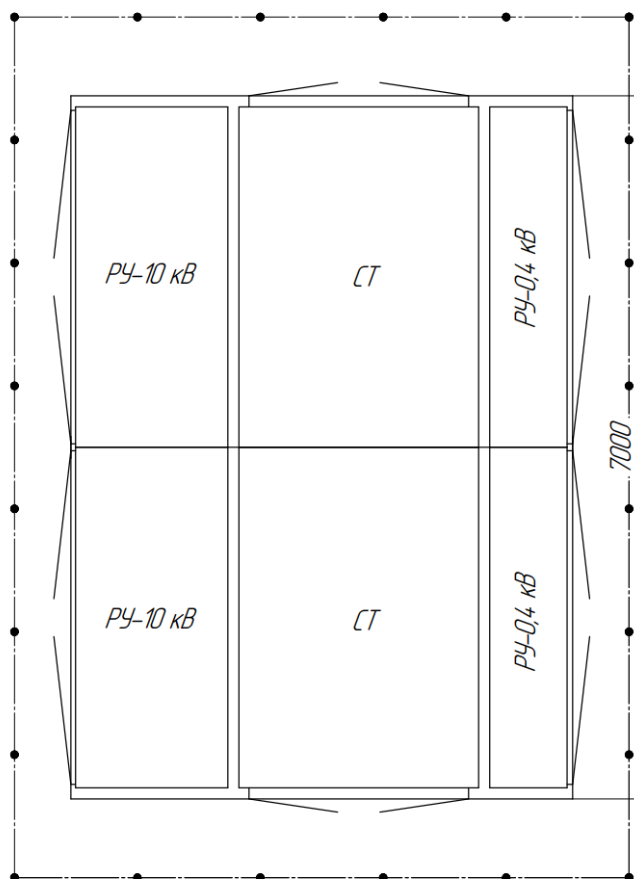


Рисунок 7 – Схема защитного заземления

Выводы по разделу 3.

Правильное заземление гарантирует, что электрическая энергия, получаемая при ударе молнии, эффективно отводится в землю, сводя к минимуму риск повреждения оборудования и возможность поражения электрическим током. Эта система заземления обычно состоит из стержней заземления, пластин или сети проводов, которые соединяют все основные компоненты подстанции, включая трансформаторы, распределительное устройство и линии электропередачи, с общей сетью заземления. По результатам расчетов выбрано 24 вертикальных заземлителей – электродов.

Заключение

При написании выпускной квалификационной работы разработан проект системы электроснабжения ремонтно-инструментального цеха.

Выпускная квалификационная работы разделена на три раздела.

Сначала выполнен расчет электрических нагрузок – нагрузок освещения и силовых.

В системе освещения объекта использованы два типа светильников:

- для производственных помещений – TL-PROM LINE RUS 65 (мощность 64 Вт, световой поток 10672 лм);
- для бытовых помещений – TL-PROM LINE RUS 17 (мощность 16 Вт, световой поток 2668 лм).

Электроснабжение освещения организовано через два щита освещения:

- ЩО-1 обслуживает помещения 1-9;
- ЩО-2 обслуживает помещения 10-13.

По результатам расчета силовых нагрузок выбраны трансформаторы ТМГ-250/10/0,4.

Для компенсации реактивной мощности установлены два устройства УКРМ со следующими параметрами:

- полная мощность 15 квар;
- напряжение 0,4 кВ.

После чего выполнен расчет токов КЗ.

Затем выполнен расчет кабельных линий. Для электроснабжения оборудования выбран кабель ПВ-3 одножильный. Для подключения электрооборудования к распределительным щитам выбран пятижильный кабель ВВГнг.

После чего выбраны устройства защиты.

Для распределения электроэнергии выбраны пункты распределительные серии ПР-8501.

В составе встроенной цеховой трансформаторной подстанции применены шкафы ШВВ-10 кВ.

Для распределительных устройств применены панели серии ЩО-01.

Затем выполнен расчет заземления. Правильное заземление гарантирует, что электрическая энергия, получаемая при ударе молнии, эффективно отводится в землю, сводя к минимуму риск повреждения оборудования и возможность поражения электрическим током. Эта система заземления обычно состоит из стержней заземления, пластин или сети проводов, которые соединяют все основные компоненты подстанции, включая трансформаторы, распределительное устройство и линии электропередачи, с общей сетью заземления.

По результатам расчетов выбрано 24 вертикальных заземлителей – электродов.

Список используемых источников

1. Булгаков, С. С. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / С.С. Булгаков – БСК, 2022. 51 с.
2. ГОСТ 31565-2012. Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности – М.: Стандартиформ. 2014.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартиформ, 2014. 19 с.
4. ГОСТ Р 54419-2011. Трансформаторы силовые. Руководство по нагрузке силового трансформатора. – М.: Стандартиформ, 2012. 28 с.
5. Кудрин, Б.И. Электроснабжение: Учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования / Б.И. Кудрин – М.: ИЦ Академия, 2018. 416 с.
6. Крючков, И. П., Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы / И.П. Крючков., Б.Н. Неклепаев – М.: Издат. дом «МЭИ», 2015. 544 с.
7. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности при эксплуатации электроустановок (ПОТ РМ-016-2001): (серия 17, норматив. док. по надзору в электроэнергетике) – М.: ОАО «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2016. 208 с.
8. Михайлов, Ю.М. Охрана труда при эксплуатации электроустановок / Ю.М. Михайлов – М.: Издательство «Альфа-Пресс», 2015. 224 с.
9. Ополева, Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения / Г.Н. Ополева – М.: Форум-ИНФРА, 2021. 480 с.
10. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. - 4-е изд., перераб. и доп. - М: Энергоатомиздат, 2017. 174 с.
11. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Госэнергонадзор Минэнерго России – М.: ЗАО «Энергосервис»,

2017. 29 с.

12. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) – М.: Альвис, 2018. 632 с.

13. Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. N 380 «О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии».

14. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебник / Л.Д. Рожкова, В.С. Козулин – М.: Издательский дом МЭИ, 2019. 573 с.

15. Рокотян, С.С. Справочник по проектированию электрических сетей. 3-е издание / С.С. Рокотян, И.М. Шапиро – М; Энергоатомиздат, 2021. 352 с.

16. Сибикин, Ю.Д. Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования промышленных предприятий и установок / Ю.Д. Сибикин – Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. 464 с.

17. Сибикин, Ю.Д. Электроснабжение / Ю.Д. Сибикин – Вологда: Инфра-Инженерия, 2017. 328 с.

18. Указания по расчету электрических нагрузок [Текст]: РТМ 36.18.32.4-92: утв. РАО ЕЭС России, 30.07.1992: ввод в действие с 01.01.1993. – М.: ЭНАС, 2003. 25 с.

19. Федоров, А.А. Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие / А.А. Федоров, Л.Е. Старкова – М.: Энергия, 2020. 345 с.

20. Фролов, Е.В. Проблемы управления процессами энергосбережения на предприятии / Е.В. Фролов – М.: Промышленность. 2018. 321 с.

21. Шевченко, Н.Ю. Проектирование системы электроснабжения цеха: учеб. пособие по выполнению курсового проекта / Н.Ю. Шевченко, К.Т. Бахтиаров – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2015. 104 с.

22. Шеховцов, В.П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов / В.П. Шеховцев – М.: Форум, 2024.– 158 с.

23. Шеховцов, В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения / В.П. Шеховцев – М.: НИЦ ИНФРА, 2024. 214 с.

24. Шеховцов, В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению / В.П. Шеховцев – М.: НИЦ ИНФРА, 2017. 136 с.

25. Шеховцов, В.П. Электрическое и электромеханическое оборудование / В.П. Шеховцев – М.: НИЦ ИНФРА, 2024. 407 с.