

Аннотация

В выпускной квалификационной работе бакалавра спроектирована система электроснабжения насосной станции производства изопрена химического предприятия. Выполнен расчет ожидаемых максимальных нагрузок в целом по станции и определены номинальные токи отдельных электроприемников.

В работе произведен выбор числа и типа силовых трансформаторов цеховой комплектной трансформаторной подстанции по методу приведённых затрат.

Выбрана и обоснована схема электроснабжения насосной станции и произведен выбор защитно-коммутационной аппаратуры.

Определены значения токов короткого замыкания в расчетных точках и проведена проверка выбранного электрооборудования на стойкость к токам короткого замыкания.

Выполнен расчет защитного заземления корпуса и защиты от попадания молний.

Выпускная квалификационная работа бакалавра выполнена в объеме 60 страниц, содержит 7 таблиц, 3 рисунка и 6 чертежей формата А1.

Содержание

Введение	4
1 Краткая характеристика объекта проектирования	6
2 Определение ожидаемых электрических нагрузок	8
2.1 Приведение однофазных нагрузок к условной трёхфазной мощности... ..	8
2.2 Приведение мощностей 3-фазных электроприёмников к длительному режиму	10
2.3 Расчёт электропотребления без учёта освещения.....	10
2.4 Расчёт освещения	19
2.5 Расчёт электропотребления с учётом освещения.....	24
3 Выбор числа и мощности трансформаторов цеховых трансформаторных подстанций с учётом компенсации реактивной мощности.....	28
3.1 Расчёт мощности одного трансформатора.....	28
3.2 Трансформатор ТМГ – 1600.....	29
3.3 Трансформатор ТМГ – 2500.....	33
4 Выбор и обоснование схемы внутрицехового электроснабжения.....	37
5 Выбор электрооборудования схемы внутреннего электроснабжения	39
6 Расчёт токов короткого замыкания.....	47
7 Проверка выбранных автоматических выключателей и проводников	54
7.1 Проверка автоматических выключателей	54
7.2 Проверка кабельных линий	55
8 Расчет заземления	56
Заключение.....	58
Список использованных источников.....	59

Введение

По ПУЭ потребителем ЭЭ называется отдельный электроприемник или их группа, размещающиеся на определенной территории и объединенные общим для них технологическим процессом [1-3].

Электроэнергетика является критической в плане жизнеобеспечения отраслью промышленности и обладает своими особенностями функционирования, которые отличают ее от остальных отраслей промышленности.

Первой особенностью электроэнергетики является неразрывность и малое время между процессами производства, распределения и потребления электроэнергии.

Второй особенностью является относительно высокая скорость протекания переходных процессов в системе электроснабжения. Переходные процессы могут происходить в тысячные доли секунды. Эти процессы вызваны короткими замыканиями (КЗ), включениями и отключениями оборудования, резкими изменениями нагрузки, нарушениями устойчивости в электроэнергосистеме.

Третьей особенностью является обеспечение ЭЭ всех отраслей промышленности, которые различаются применяемой технологией производства продукции, используемыми методами преобразования электроэнергии в другие виды энергии и широким разнообразием применяемых ЭП.

Эти перечисленные особенности энергетики приводят к необходимости выполнения специальных требований к системе электроснабжения предприятия:

- 1) скорость протекания переходных процессов приводит к необходимости использования в системе электроснабжения предприятия специальных автоматических устройств, целью применения которых является

передача необходимого количества и приемлемого качества электроэнергии от источника питания к потребителям;

2) особенности технологического процесса на различных промышленных предприятиях приводят к разным применяемым проектным решениям в системе электроснабжения предприятия;

3) современный технологический процесс на промышленном предприятии обладает высокой динамичностью, обусловленной постоянным усовершенствованием старых и применением новых методов производства, внедрением нового оборудования, переналадкой технологического процесса, связанной с постоянным изменением и улучшением производимой продукции.

Целью бакалаврской работы является разработка надежной системы электроснабжения насосной станции.

Задачи бакалаврской работы:

1. Определение расчетных ожидаемых электрических нагрузок;
2. Выбор числа и мощности силовых трансформаторов цеховой КТП;
3. Выбор проводников и электрооборудования;
4. Определение токов короткого замыкания и проверка выбранного оборудования.

1 Краткая характеристика объекта проектирования

Насосная станция является частью технологического процесса производства изопрена.

Насосная станция получает электроснабжение от главной понизительной подстанции завода по кабельной ЛЭП напряжением 6 кВ.

Потребители насосной станции по надежности электроснабжения относятся к 1 категории. Количество рабочих смен – 2. Основными потребителями являются пять мощных автоматизированных насосных агрегатов.

Производственный корпус состоит из двух помещений с размерами $A \times B \times H = 103,44 \times 18 \times 8$ м и $A \times B \times H = 42 \times 24 \times 13,2$ м.

Перечень электрооборудования насосной станции и вспомогательных помещений представлен в таблице 1.

Мощность электрооборудования указана для одного электроприёмника.

Таблица 1 – Перечень электрооборудования насосной станции и вспомогательных помещений

№	Наименование электрооборудования	Мощность, кВт	Примечания
1,2	Вентиляторы ВЦ 4-70-5,6	5	
3	Сверлильный станок KSB 50 CNC	3,4	
4	Заточный станок ЗД642Е	2,2	1-фазный
5	Токарно-револьверный станок 1П371	22	1-фазный
6	Фрезерный станок Optimum MT200	10	
7	Круглошлифовальный станок RSM 500 В CNC (Fagor)	5,5	
8	Резьбонарезной станок Super-Ego 891	8	

Продолжение таблицы 1

№	Наименование электрооборудования	Мощность, кВт	Примечания
9-11	Электронагреватели отопительные Warmos-IV-15	15,5	
12	Кран мостовой ВБИ	30,8	ПВ=25%
13-17	ЭД вакуумных насосов 4ВВН2-3	8	
18-22	Электродвигатели задвижек АИРЕ 71 С2	1,2	1-фазный
23-27	Насосные агрегаты	630	
28	Щит сигнализации	1,1	1-фазный
29, 30	Вспомогательные насосы	9,5	

2 Определение ожидаемых электрических нагрузок

Нахождение расчетной нагрузки по средней потребляемой мощности за наиболее загруженную смену и коэффициенту максимума (расчетному коэффициенту) [2, 4-9].

Метод является наиболее точным, применяется для определения расчетной электрической нагрузки на всех ступенях системы электроснабжения, но только при наличии исходных сведений о каждом ЭП.

2.1 Приведение однофазных нагрузок к условной трёхфазной мощности

Так как 1-фазные электроприёмники в данном варианте имеют малую мощность, то объединим их в группы для упрощения расчёта и уменьшения электропотребления, сверлильный станок объединим с заточным станком, а электродвигатели задвижек – со щитом сигнализации.

Сверлильный станок подключаем в пару фаз АВ, заточный станок подключаем в пару фаз АС.

Определяем мощности фаз:

$$P_A = \frac{P_{AB} + P_{AC}}{2} \quad (1)$$

$$P_A = \frac{3,4 + 2,2}{2} = 2,8 \text{ кВт};$$

$$P_B = \frac{P_{BC} + P_{AB}}{2}$$

$$P_B = \frac{0 + 3,4}{2} = 1,7 \text{ кВт};$$

$$P_C = \frac{P_{AC} + P_{BC}}{2}$$

$$P_C = \frac{2,2 + 0}{2} = 1,1 \text{ кВт}.$$

Затем находим величину неравномерности:

$$H = \frac{P_{ф.наиб} - P_{ф.наим}}{P_{ф.наим}} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$H = \frac{2,8 - 1,1}{1,1} \cdot 100\% = 154\% .$$

Так как величина неравномерности больше 15%, то величина условной мощности равна:

$$P_{усл} = 3 \cdot P_{ф.наиб} \quad (3)$$

$$P_{усл} = 3 \cdot 2,8 = 8,4 \text{ кВт.}$$

Электродвигатели задвижек подключаем по две штуки в пары фаз АВ и АС, а одну штуку в пару фаз ВС, щит сигнализации подключаем в пару фаз ВС.

Определяем мощности фаз:

$$P_A = \frac{P_{AB} + P_{AC}}{2} \quad (4)$$

$$P_A = \frac{2,4 + 2,4}{2} = 2,4 \text{ кВт;}$$

$$P_B = \frac{P_{BC} + P_{AB}}{2}$$

$$P_B = \frac{2,3 + 2,4}{2} = 2,35 \text{ кВт;}$$

$$P_C = \frac{P_{AC} + P_{BC}}{2}$$

$$P_C = \frac{2,4 + 2,3}{2} = 2,35 \text{ кВт.}$$

Затем находим величину неравномерности:

$$H = \frac{P_{\text{ф.наиб}} - P_{\text{ф.наим}}}{P_{\text{ф.наим}}} \cdot 100\% \quad (5)$$

$$H = \frac{2,4 - 2,35}{2,35} \cdot 100\% = 2\% .$$

Так как величина неравномерности меньше 15%, то величина условной мощности равна:

$$P_{\text{усл}} = P_A + P_B + P_C \quad (6)$$

$$P_{\text{усл}} = 2,4 + 2,35 + 2,35 = 7,1 \text{ кВт.}$$

2.2 Приведение мощностей 3-фазных электроприёмников к длительному режиму

Кран мостовой:

$$P_n = S_{\text{наст}} \cdot \sqrt{ПВ} \quad (7)$$

$$P_n = 30,8 \cdot \sqrt{0,25} = 15,4 \text{ кВт.}$$

2.3 Расчёт электропотребления без учёта освещения

2.3.1 Вентиляция:

Определяем суммарную мощность:

$$P_{H\Sigma} = P_H \cdot n \quad (8)$$

$$P_{H\Sigma} = 5 \cdot 2 = 10 \text{ кВт,}$$

где n - число ЭП.

По таблице определяем коэффициент использования и коэффициент мощности для данного ЭП, $K_{\dot{E}} = 0,7$, $\cos \phi = 0,8 \Rightarrow \operatorname{tg} \phi = 0,75$.

Вычисляем активную и реактивную мощности смены:

$$P_{CM} = P_{H\Sigma} \cdot K_{II} \quad (9)$$

$$P_{CM} = 10 \cdot 0,7 = 7 \text{ кВт},$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot \operatorname{tg} \phi$$

$$Q_{CM} = 7 \cdot 0,75 = 5,25 \text{ квар.}$$

2.3.2 Сверлильный и заточный станки:

Суммарную мощность мы определили для объединённых станков и она равна: $P_{H\Sigma} = 8,4$ кВт.

По таблице определяем коэффициент использования и коэффициент мощности для данных ЭП, $K_{II} = 0,13$, $\cos \phi = 0,47 \Rightarrow \operatorname{tg} \phi = 1,87$.

Вычисляем активную и реактивную мощности смены:

$$P_{CM} = P_{H\Sigma} \cdot K_{II} \quad (10)$$

$$P_{CM} = 8,4 \cdot 0,13 = 1,1 \text{ кВт},$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot \operatorname{tg} \phi$$

$$Q_{CM} = 1,1 \cdot 1,87 = 2,06 \text{ квар.}$$

2.3.3 Токарно-револьверный станок:

Определяем суммарную мощность:

$$P_{H\Sigma} = P_H \cdot n \quad (11)$$

$$P_{H\Sigma} = 22 \cdot 1 = 22 \text{ кВт},$$

По таблице определяем коэффициент использования и коэффициент мощности для данного ЭП, $K_{II} = 0,14$, $\cos \phi = 0,47 \Rightarrow tg \phi = 1,88$.

Вычисляем активную и реактивную мощности смены:

$$P_{CM} = P_{H\Sigma} \cdot K_{II} \quad (12)$$

$$P_{CM} = 22 \cdot 0,14 = 3,08 \text{ кВт},$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot tg \phi \quad (13)$$

$$Q_{CM} = 3,08 \cdot 1,88 = 5,8 \text{ квар}.$$

2.3.4 Фрезерный станок:

Определяем суммарную мощность:

$$P_{H\Sigma} = P_H \cdot n \quad (14)$$

$$P_{H\Sigma} = 10 \cdot 1 = 10 \text{ кВт},$$

По таблице определяем коэффициент использования и коэффициент мощности для данного ЭП, $K_{II} = 0,14$, $\cos \phi = 0,49 \Rightarrow tg \phi = 1,78$.

Вычисляем активную и реактивную мощности смены:

$$P_{CM} = P_{H\Sigma} \cdot K_{II} \quad (15)$$

$$P_{CM} = 10 \cdot 0,14 = 1,4 \text{ кВт},$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot tg \phi$$

$$Q_{CM} = 1,4 \cdot 1,78 = 2,5 \text{ квар}.$$

2.3.5 Круглошлифовальный станок:

Определяем суммарную мощность:

$$P_{H\Sigma} = P_H \cdot n \quad (16)$$

$$P_{H\Sigma} = 5,5 \cdot 1 = 5,5 \text{ кВт},$$

По таблице определяем коэффициент использования и коэффициент мощности для данного ЭП, $K_H = 0,12$, $\cos \phi = 0,46 \Rightarrow tg \phi = 1,93$.

Вычисляем активную и реактивную мощности смены:

$$P_{CM} = P_{H\Sigma} \cdot K_H \quad (17)$$

$$P_{CM} = 5,5 \cdot 0,12 = 0,66 \text{ кВт},$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot tg \phi$$

$$Q_{CM} = 0,66 \cdot 1,93 = 1,27 \text{ квар}.$$

2.3.6 Резьбонарезной станок:

Определяем суммарную мощность:

$$P_{H\Sigma} = P_H \cdot n \quad (18)$$

$$P_{H\Sigma} = 8 \cdot 1 = 8 \text{ кВт},$$

По таблице определяем коэффициент использования и коэффициент мощности для данного ЭП, $K_H = 0,13$, $\cos \phi = 0,5 \Rightarrow tg \phi = 1,73$.

Вычисляем активную и реактивную мощности смены:

$$P_{CM} = P_{H\Sigma} \cdot K_H \quad (19)$$

$$P_{CM} = 8 \cdot 0,13 = 1,04 \text{ кВт},$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot tg \phi$$

$$Q_{CM} = 1,04 \cdot 1,73 = 1,8 \text{ квар}.$$

2.3.7 Электронагреватели отопительные:

Определяем суммарную мощность:

$$P_{H\Sigma} = P_H \cdot n \quad (20)$$

$$P_{H\Sigma} = 15,5 \cdot 3 = 46,5 \text{ кВт},$$

По таблице определяем коэффициент использования и коэффициент мощности для данного ЭП, $K_H = 0,75$, $\cos \phi = 1 \Rightarrow \operatorname{tg} \phi = 0$.

Вычисляем активную и реактивную мощности смены:

$$P_{CM} = P_{H\Sigma} \cdot K_H \quad (21)$$

$$P_{CM} = 46,5 \cdot 0,75 = 35 \text{ кВт},$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot \operatorname{tg} \phi$$

$$Q_{CM} = 35 \cdot 0 = 0 \text{ квар}.$$

2.3.8 Кран мостовой:

Определяем суммарную мощность:

$$P_{H\Sigma} = P_H \cdot n \quad (22)$$

$$P_{H\Sigma} = 15,4 \cdot 1 = 15,4 \text{ кВт},$$

По таблице определяем коэффициент использования и коэффициент мощности для данного ЭП, $K_H = 0,25$, $\cos \phi = 0,5 \Rightarrow \operatorname{tg} \phi = 1,73$.

Вычисляем активную и реактивную мощности смены:

$$P_{CM} = P_{H\Sigma} \cdot K_H \quad (23)$$

$$P_{CM} = 15,4 \cdot 0,25 = 3,85 \text{ кВт},$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (24)$$

$$Q_{CM} = 3,85 \cdot 1,73 = 6,67 \text{ квар.}$$

2.3.9 Электродвигатели вакуумных насосов:

Определяем суммарную мощность:

$$P_{H\Sigma} = P_H \cdot n \quad (25)$$

$$P_{H\Sigma} = 8 \cdot 5 = 40 \text{ кВт,}$$

По таблице определяем коэффициент использования и коэффициент мощности для данного ЭП, $K_H = 0,7$, $\cos \phi = 0,85 \Rightarrow \operatorname{tg} \phi = 0,62$.

Вычисляем активную и реактивную мощности смены:

$$P_{CM} = P_{H\Sigma} \cdot K_H \quad (26)$$

$$P_{CM} = 40 \cdot 0,7 = 28 \text{ кВт,}$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (27)$$

$$Q_{CM} = 28 \cdot 0,62 = 17,36 \text{ квар.}$$

2.3.10 Электродвигатели задвижек и щит сигнализации:

Суммарную мощность мы определили для объединённых задвижек и щита сигнализации, и она равна: $P_{H\Sigma} = 7,1$ кВт.

По таблице определяем коэффициент использования и коэффициент мощности для данных ЭП, $K_H = 0,9$, $\cos \phi = 0,83 \Rightarrow \operatorname{tg} \phi = 0,67$.

Вычисляем активную и реактивную мощности смены:

$$P_{CM} = P_{H\Sigma} \cdot K_H \quad (28)$$

$$P_{CM} = 7,1 \cdot 0,9 = 6,39 \text{ кВт,}$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (29)$$

$$Q_{CM} = 6,39 \cdot 0,67 = 4,28 \text{ квар.}$$

2.3.11 Насосные агрегаты:

Определяем суммарную мощность:

$$P_{H\Sigma} = P_H \cdot n \quad (30)$$

$$P_{H\Sigma} = 630 \cdot 5 = 3150 \text{ кВт,}$$

По таблице определяем коэффициент использования и коэффициент мощности для данного ЭП, $K_{II} = 0,7$, $\cos \phi = 0,85 \Rightarrow \operatorname{tg} \phi = 0,62$.

Вычисляем активную и реактивную мощности смены:

$$P_{CM} = P_{H\Sigma} \cdot K_{II} \quad (31)$$

$$P_{CM} = 3150 \cdot 0,7 = 2205 \text{ кВт,}$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (32)$$

$$Q_{CM} = 2205 \cdot 0,62 = 1367 \text{ квар.}$$

2.3.12 Вспомогательные насосы:

Определяем суммарную мощность:

$$P_{H\Sigma} = P_H \cdot n \quad (33)$$

$$P_{H\Sigma} = 9,5 \cdot 2 = 19 \text{ кВт,}$$

По таблице определяем коэффициент использования и коэффициент мощности для данного ЭП, $K_{II} = 0,7$, $\cos \phi = 0,85 \Rightarrow \operatorname{tg} \phi = 0,62$.

Вычисляем активную и реактивную мощности смены:

$$P_{CM} = P_{H\Sigma} \cdot K_{II} \quad (34)$$

$$P_{CM} = 19 \cdot 0,7 = 13,3 \text{ кВт},$$

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot \operatorname{tg}\phi \quad (35)$$

$$Q_{CM} = 13,3 \cdot 0,62 = 8,25 \text{ квар}.$$

2.3.13 Расчет суммарной величины нагрузки без учёта освещения:

Количество ЭП $n = 32$, суммарные мощности всех ЭП $P_{H\Sigma} = 3350$ кВт, суммарные активные мощности за смену всех ЭП $P_{CM} = 2308$ кВт, суммарные реактивные мощности за смену всех ЭП $Q_{CM} = 1426$ квар.

Групповой коэффициент использования:

$$K_{II.GP} = \frac{\sum P_{CM}}{\sum P_{H\Sigma}} \quad (36)$$

$$K_{II.GP} = \frac{2308}{3350} = 0,69 .$$

Групповой тангенс ϕ_{GP} :

$$\operatorname{tg}\phi_{GP} = \frac{\sum Q_{CM}}{\sum P_{CM}} \quad (37)$$

$$\operatorname{tg}\phi_{GP} = \frac{1426}{2308} = 0,62 .$$

Величина m :

$$m = \frac{P_{н.наиб}}{P_{н.наим}} \quad (38)$$

$$m = \frac{630}{1,1} > 3 .$$

Так как у нас $n \geq 5$, $K_{и.гп} \geq 0,2$, $m > 3$, то эффективное число ЭП найдем по формуле:

$$n_{\text{Э}} = \frac{2 \cdot \sum P_{H\Sigma}}{P_{H.макс}} \quad (39)$$

$$n_{\text{Э}} = \frac{2 \cdot 3350}{630} = 10,6 \approx 11 .$$

Коэффициент максимума определим по табличным значениям, в зависимости от значений $K_{и.гп}$ и $n_{\text{Э}}$, $K_M = 0,9$.

Расчётная активная мощность:

$$P_p = \sum P_{CM} \cdot K_M \quad (40)$$

$$P_p = 2308 \cdot 0,9 = 2077 \text{ кВт.}$$

Расчётная реактивная мощность:

$$Q_p = \sum Q_{CM} \quad (41)$$

$$Q_p = 1426 \text{ квар.}$$

Расчётная полная мощность:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (42)$$

$$S_p = \sqrt{2077^2 + 1426^2} = 2519 \text{ кВА.}$$

Расчётный ток:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H} \quad (43)$$

$$I_p = \frac{2519}{\sqrt{3} \cdot 380} = 3,83 \text{ кА.}$$

2.4 Расчёт освещения

2.4.1 Выбор типа светильника

Поскольку процесс производства изопрена относится к взрывоопасным, то в основных производственных помещениях выбираем светодиодный промышленный светильник ССП03-50 «Шмель» [10-12]. Светильник светодиодный стационарный предназначен для применения во взрывоопасных зонах класса 1 и 2 для освещения помещений промышленных зданий и наружного освещения.

Взрывозащищенные светодиодные светильники серии ССП03 предназначены для замены осесимметричных светильников, построенных на основе традиционных источников света: ламп накаливания мощностью от 100 до 500 ватт, ламп ДРЛ мощностью от 125 до 400 ватт и других аналогичных ламп.

Отличительными особенностями данных светильников является:

- Низкое энергопотребление;
- Работа в широком диапазоне температур: от минус 60 °С до плюс 50 °С;
- Устойчивость к вибрации и механическим воздействиям.

Внешний вид светильника приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид светодиодного промышленного светильника ССП03-50 «Шмель»

Технические характеристики светодиодного промышленного светильника ССП03-50 «Шмель»:

- Входное напряжение: AC90-264В, DC127-370В;
- Мощность 50Вт;
- Световой поток: 5000Лм;
- Светоотдача: >100Лм/Вт;
- Цветовая температура: 5000К;
- Индекс цветопередачи: 70;
- Коэфф. мощности: > 0,9;
- Коэфф. пульсации < 5 %;
- Масса светильника: 5кг;
- Габаритные размеры: 180мм(Ш) x 186мм(Д) x 264мм(В);
- Рабочая температура -60 °С ~ +50 °С.

2.4.2 Расчёт освещенности в насосной методом коэффициента использования

Определяем расчётную высоту подвеса светильника над рабочей поверхностью [12]:

$$h = H - h_p \quad (44)$$

$$h = 7 - 0,8 = 6,2 \text{ м.}$$

Находим величину оптимального пролёта:

$$L = h \cdot k_0 \quad (45)$$

$$L = 6,2 \cdot 1,2 = 7,44 \text{ м.}$$

Определяем число рядов светильников по ширине:

$$n_A = \frac{A}{L} \quad (46)$$

$$n_A = \frac{30}{7,44} \approx 5 .$$

Определим число рядов светильников по длине помещения:

$$n_B = \frac{B}{L} \quad (47)$$

$$n_B = \frac{30}{7,44} \approx 5 .$$

Определим общее число мест установки светильников:

$$N = n_A \cdot n_B \quad (48)$$

$$N = 5 \cdot 5 = 25 .$$

Найдем индекс помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} \quad (49)$$

$$i = \frac{30 \cdot 30}{6,2 \cdot 60} = 2,42 .$$

Находим число светильников:

$$n = \frac{E_n \cdot S \cdot k \cdot z}{F_n \cdot \eta} \quad (50)$$

$$n = \frac{100 \cdot 792 \cdot 1,5 \cdot 1,15}{5000 \cdot 0,94} = 29 .$$

Найдем мощность ламп всех светильников:

$$P = P_n \cdot n \quad (51)$$

$$P = 50 \cdot 29 = 1450 \text{ Вт.}$$

Проверим фактическую освещенность:

$$E_\phi = \frac{F_n \cdot n \cdot \eta}{S \cdot k \cdot z} \quad (52)$$

$$E_\phi = \frac{5000 \cdot 29 \cdot 0,94}{792 \cdot 1,5 \cdot 1,15} = 99,8 \text{ лк.}$$

Рассчитаем погрешность расчета:

$$E = \frac{E_n - E_{\phi}}{E_n} \cdot 100\% \quad (53)$$

$$E = \frac{|100 - 99.8|}{100} \cdot 100\% = 0,2\% .$$

Нормированная освещенность отличается от фактической менее чем на 5%.

2.4.3 Расчёт освещения в программе DIALux

В программе DIALux были рассчитаны освещенности для каждого помещения и выбраны светильники. Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчёта освещения в программе DIALux

Помещение	E, лк	P, кВт	cos φ	tg φ	Q, квар
1	2	3	4	5	6
Агрегатная	300	0,9	0,96	0,29	0,261
Венткамера	200	0,072	0,96	0,29	0,021
Бытовка	200	0,072	0,96	0,29	0,021
Начальник смены	300	0,33	0,96	0,29	0,096
Склад запчастей	100	0,072	0,96	0,29	0,021
Ремонтный участок	350	0,576	0,96	0,62	0,167
Машинный зал	300	7,02	0,85	0,62	4,351
Обслуживающий персонал	250	0,22	0,96	0,29	0,064
Щитовая	150	0,108	0,96	0,29	0,031
Итого		13			6

По результатам расчётов суммарная активная потребляемая мощность составила 13 кВт, а реактивная – 6 квар.

2.5 Расчёт электропотребления с учётом освещения

Расчётная полная мощность:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (54)$$

$$S_p = \sqrt{2090^2 + 1432^2} = 2534 \text{ кВА.}$$

Расчётный ток:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H} \quad (55)$$

$$I_p = \frac{2534}{\sqrt{3} \cdot 380} = 3,85 \text{ кА.}$$

Все полученные данные занесём в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты расчета электрических нагрузок

Наименование электроприемника	P_n , кВт	n, шт	$P_{н\Sigma}$, кВт	$K_{и}$	$\cos\phi$	$\operatorname{tg}\phi$	m	$P_{см}$, кВт	$Q_{см}$, квар	n_3	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , кА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Вентиляторы ВЦ 4-70-5,6	5	2	10	0,7	0,8	0,75		7	5,25						
Сверлильный станок KSB 50 CNC	3,4	1	8,4	0,13	0,47	1,87		1,1	2,06						
Заточный станок ЗД642Е	2,2	1													
Токарно-револьверный станок 1П371	22	1	22	0,14	0,47	1,88		3,08	5,8						
Фрезерный станок Optimum MT200	10	1	10	0,14	0,49	1,78		1,4	2,5						

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Круглошлифовальный станок RSM 500 B CNC (Fagor)	5,5	1	5,5	0,12	0,46	1,93		0,66	1,27						
Резьбонарезной станок Super-Ego 891	8	1	8	0,13	0,5	1,73		1,04	1,8						
Электронагреватели отопительные Warmos-IV-15	15,5	3	46,5	0,75	1	0		35	0						
Кран мостовой ВБИ	30,8	1	15,4	0,25	0,5	1,73		3,85	6,67						
ЭД вакуумных насосов 4ВВН2-3	8	5	40	0,7	0,85	0,62		28	17,36						
Электродвигатели задвижек АИРЕ 71 С2	1,2	5	7,1	0,9	0,83	0,67		6,39	4,28						
Щит сигнализации	1,1	1													
Насосные агрегаты	630	5	3150	0,7	0,85	0,62		2205	1367						

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Вспомогательные насосы	9,5	2	19	0,7	0,85	0,62		13,3	8,25						
Итого без освещения	630 /1,1	32	3350	0,69	-	0,62	>3	2308	1426	11	0,9	2077	1426	2519	3,83
Освещение												13	6		
Итого с освещением												2090	1432	2534	3,85

3 Выбор числа и мощности трансформаторов цеховых трансформаторных подстанций с учётом компенсации реактивной мощности

Число трансформаторов и питающих линий определяется в зависимости от категории надежности потребителей [2, 13-16]. При запасе на складе силовых трансформаторов или при наличии связей со стороны вторичного напряжения надежность электроснабжение потребителей II и III категории обеспечивают однотрансформаторные подстанции.

Если преобладают потребители I и II категорий, то используют двухтрансформаторные подстанции.

При определении номинальной мощности трансформаторов исходят:

- из расчетной нагрузки;
- из числа часов использования максимума нагрузки;
- из перспективы развития предприятия (роста нагрузки).

При выходе из строя одного из трансформаторов или линии, согласно ПУЭ, второй можно перегружать на 40 % в течение 5 суток по 6 часов в сутки.

3.1 Расчёт мощности одного трансформатора

Исходные данные:

$$P_{P\Sigma} = 2090 \text{ кВт}, Q_{P\Sigma} = 1432 \text{ квар}, S_{P\Sigma} = 2534 \text{ кВА}.$$

Так как потребители, получающие питание от трансформаторной подстанции по надежности электроснабжения относятся к 1 и 2 категории, то принимаем количество трансформаторов равным 2, а также коэффициент загрузки принимаем равным 0,7.

Рассчитаем мощность одного трансформатора:

$$S_{HTP} = \frac{P_P}{K_3 \cdot N_T} \quad (56)$$

$$S_{HTP} = \frac{2090}{0,7 \cdot 2} = 1493 \text{ кВА.}$$

Рассмотрим трансформаторы ТМГ – 1600 и ТМГ – 2500 и выберем наиболее экономичный.

3.2 Трансформатор ТМГ – 1600

Характеристики трансформатора:

$$U_K = 5,5\% , P_{XX} = 3,3 \text{ кВт}, P_{K3} = 16,5 \text{ кВт}, i_O = 1,2\% I_H , \Delta P_T' = 11,4 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_T' = 62,3 \text{ квар.}$$

Потери в трансформаторе:

$$\Delta P_T = N_T \cdot \Delta P_T' \quad (57)$$

$$\Delta P_T = 2 \cdot 11,4 = 22,8 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_T = N_T \cdot \Delta Q_T' \quad (58)$$

$$\Delta Q_T = 2 \cdot 62,3 = 124,6 \text{ квар.}$$

Расчетная нагрузка корпуса с учётом потерь в трансформаторах:

$$P_p = P_{p\Sigma} + \Delta P_T \quad (59)$$

$$P_p = 2090 + 23 = 2113 \text{ кВт},$$

$$Q_p = Q_{p\Sigma} + \Delta Q_T \quad (60)$$

$$Q_p = 1432 + 125 = 1557 \text{ квар.}$$

Реактивная мощность в часы минимума нагрузки:

$$Q_{\min} = 0,5 \cdot Q_p \quad (61)$$

$$Q_{\min} = 0,5 \cdot 1557 = 779 \text{ квар}$$

1. Экономически обоснованные значения реактивной мощности в часы максимума энергосистемы:

$$Q'_{\text{Э1}} = Q_P - 0,7 \cdot Q_{\text{CD}} \quad (62)$$

$$Q'_{\text{Э1}} = 1557 - 0,7 \cdot 0 = 1557 \text{ квар},$$

$$Q''_{\text{Э1}} = \alpha \cdot P_P \quad (63)$$

$$Q''_{\text{Э1}} = 0,28 \cdot 2113 = 592 \text{ квар}.$$

Из-за пониженного напряжения в часы максимальных нагрузок принимаем меньшее из значений: $Q''_{\text{Э1}} = 592$ квар.

2. Экономически обоснованные значения реактивной мощности в режиме наименьших нагрузок:

$$Q'_{\text{Э2}} = Q_{\min} + Q_K \quad (64)$$

$$Q'_{\text{Э2}} = 779 + 0 = 779 \text{ квар},$$

$$Q''_{\text{Э2}} = Q_{\min} - Q_{\text{KD}} = Q_{\min} - (Q_P - Q_{\text{Э1}}) \quad (65)$$

$$Q''_{\text{Э2}} = 779 - (1557 - 592) = -186 \text{ квар}.$$

Из-за повышенного напряжения в часы минимальных нагрузок принимаем значение мощности: $Q'_{\text{Э2}} = 779$ квар.

3. Суммарная мощность компенсирующих устройств:

$$Q_{\text{ку. max}} = 1,1 \cdot Q_P - Q_{\text{Э1}} \quad (66)$$

$$Q_{\text{ку. max}} = 1,1 \cdot 1557 - 592 = 1221 \text{ квар},$$

$$Q_{\text{ку. min}} = Q_{\min} - Q_{\text{Э2}} \quad (67)$$

$$Q_{\text{ку. min}} = 779 - 779 = 0 .$$

Реактивная мощность, которая должна быть передана из сети 6 кВ в сеть напряжением до 1 кВ и не должна компенсироваться:

$$Q_{\text{ЭН}} = Q_{\text{Э1}} - (Q_P - Q_{P\Sigma}) \quad (68)$$

$$Q_{\text{ЭН}} = 592 - (1557 - 1432) = 467 \text{ квар.}$$

Реактивная мощность, которая может быть передана из сети 6 кВ в сеть напряжением до 1 кВ:

$$Q_T = \sqrt{(N_T \cdot K_3 \cdot S_{\text{ном}})^2 - P_{P\Sigma}^2} \quad (69)$$

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 2090^2} = 806 \text{ квар.}$$

Мощность КУ, устанавливаемых на стороне до 1кВ:

$$Q_{\text{ку.н}} = Q_{P\Sigma} - Q_T \quad (70)$$

$$Q_{\text{ку.н}} = 1432 - 806 = 626 \text{ квар.}$$

Мощность КУ, которые могут быть установлены на стороне 6 кВ:

$$Q_{\text{ку.6}} = Q_{\text{ку. max}} - Q_{\text{ку.н}} \quad (71)$$

$$Q_{\text{ку.6}} = 1121 - 626 = 495 \text{ квар.}$$

Применение конденсаторных батарей на высокой стороне нецелесообразно.

Принимая, что РМ равномерно распределена между трансформаторами, принимаем к установке:

2 регулируемых КУ типа УК-0,38-320Н мощностью 320 квар каждая и общей установленной мощностью 640 квар.

Затраты на установку КТП с трансформаторами ТМГ-1600:

$$\alpha = 116,19 \text{ руб/кВт}, \quad \beta = 0,27 \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч}, \quad T_M = 4500 \text{ ч}, \quad T_P = 8760 \text{ ч},$$

$$\Delta P_{XX} = 3,3 \text{ кВт}, \quad P_{K3} = 16,5 \text{ кВт}.$$

Рассчитаем составляющие коэффициенты для определения затрат на установку КТП:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10000}\right)^2 \cdot T_P \quad (72)$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4500}{10000}\right)^2 \cdot 8760 = 2886 \text{ ч},$$

$$C_0 = \left(\frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2}\right) \cdot T_P \quad (73)$$

$$C_0 = \left(\frac{116,19}{4500} + 0,27 \cdot 10^{-2}\right) \cdot 8760 = 249,83 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год},$$

$$C = \left(\frac{\alpha}{T_M} + \beta \cdot 10^{-2}\right) \cdot \tau \quad (74)$$

$$C = \left(\frac{116,19}{4500} + 0,27 \cdot 10^{-2}\right) \cdot 2886 = 82,3 \text{ руб/кВт} \cdot \text{год},$$

$$C \cdot \Delta P_T = C_0 \cdot \Delta P_{XX} + C \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{K3} \quad (75)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 249,83 \cdot 3,3 + 82,3 \cdot 0,7^2 \cdot 16,5 = 1489 \text{ руб/год},$$

$$K_{ТП} = 726 \text{ тыс.руб.}$$

Общие затраты на установку КТП и БК:

$$З_{Общие} = E \cdot (K_{III} \cdot N_T + K_{KV} \cdot N_{KV}) + \frac{C \cdot \Delta P_T}{1000} \cdot N_T \quad (76)$$

$$З_{Общие} = 0,223 \cdot (726 \cdot 2 + 118 \cdot 2) + \frac{1489}{1000} \cdot 2 = 379,4 \text{ тыс.руб.}$$

3.3 Трансформатор ТМГ – 2500

Характеристики трансформатора:

$$U_K = 5,5\% , P_{XX} = 4,6 \text{ кВт}, P_{K3} = 24 \text{ кВт}, i_O = 1\% I_H , \Delta P_T' = 16,4 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_T' = 92,4 \text{ квар.}$$

Потери в трансформаторе:

$$\Delta P_T = N_T \cdot \Delta P_T' \quad (77)$$

$$\Delta P_T = 2 \cdot 16,4 = 32,8 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_T = N_T \cdot \Delta Q_T' \quad (78)$$

$$\Delta Q_T = 2 \cdot 92,4 = 184,8 \text{ квар.}$$

Расчетная нагрузка корпуса с учётом потерь в трансформаторах:

$$P_p = P_{p\Sigma} + \Delta P_T \quad (79)$$

$$P_p = 2090 + 33 = 2123 \text{ кВт},$$

$$Q_p = Q_{p\Sigma} + \Delta Q_T \quad (80)$$

$$Q_p = 1432 + 185 = 1617 \text{ квар.}$$

Реактивная мощность в часы минимума нагрузки:

$$Q_{\min} = 0,5 \cdot Q_p \quad (81)$$

$$Q_{\min} = 0,5 \cdot 1617 = 809 \text{ квар.}$$

1. Экономически обоснованные значения реактивной мощности в часы максимума энергосистемы:

$$Q'_{\text{Э1}} = Q_P - 0,7 \cdot Q_{\text{CD}} \quad (82)$$

$$Q'_{\text{Э1}} = 1617 - 0,7 \cdot 0 = 1617 \text{ квар,}$$

$$Q''_{\text{Э1}} = \alpha \cdot P_P \quad (83)$$

$$Q''_{\text{Э1}} = 0,28 \cdot 2130 = 596 \text{ квар.}$$

Из-за пониженного напряжения в часы максимальных нагрузок принимаем меньшее из значений: $Q''_{\text{Э1}} = 596$ квар.

2. Экономически обоснованные значения реактивной мощности в режиме наименьших нагрузок:

$$Q'_{\text{Э2}} = Q_{\text{min}} + Q_K \quad (84)$$

$$Q'_{\text{Э2}} = 809 + 0 = 809 \text{ квар,}$$

$$Q''_{\text{Э2}} = Q_{\text{min}} - Q_{\text{KD}} = Q_{\text{min}} - (Q_P - Q_{\text{Э1}}) \quad (85)$$

$$Q''_{\text{Э2}} = 809 - (1617 - 596) = -212 \text{ квар.}$$

Из-за повышенного напряжения в часы минимальных нагрузок принимаем значение мощности: $Q'_{\text{Э2}} = 809$ квар.

3. Суммарная мощность компенсирующих устройств:

$$Q_{\text{ку.max}} = 1,1 \cdot Q_P - Q_{\text{Э1}} \quad (86)$$

$$Q_{\text{ку.max}} = 1,1 \cdot 1617 - 596 = 1183 \text{ квар,}$$

$$Q_{\text{ку.min}} = Q_{\text{min}} - Q_{\text{Э2}} \quad (87)$$

$$Q_{\text{ку.min}} = 809 - 809 = 0 .$$

Реактивная мощность, которая должна быть передана из сети 6 кВ в сеть напряжением до 1 кВ и не должна компенсироваться:

$$Q_{ЭН} = Q_{Э1} - (Q_P - Q_{P\Sigma}) \quad (88)$$

$$Q_{ЭН} = 596 - (1617 - 1432) = 411 \text{ квар.}$$

Реактивная мощность, которая может быть передана из сети 6 кВ в сеть напряжением до 1 кВ:

$$Q_T = \sqrt{(N_T \cdot K_3 \cdot S_{ном})^2 - P_{P\Sigma}^2} \quad (89)$$

$$Q_T = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 2500)^2 - 2090^2} = 2807 \text{ квар.}$$

Мощность КУ, устанавливаемых на стороне до 1кВ:

$$Q_{ку.н} = Q_{P\Sigma} - Q_T \quad (90)$$

$$Q_{ку.н} = 1432 - 2807 = -1375 = 0 \text{ квар.}$$

Мощность КУ, которые могут быть установлены на стороне 6 кВ:

$$Q_{ку.в} = Q_{ку.маx} - Q_{ку.н} \quad (91)$$

$$Q_{ку.в} = 1183 - 0 = 1183 \text{ квар.}$$

Применение конденсаторных батарей на высокой стороне целесообразно. Принимая, что РМ равномерно распределена между трансформаторами, принимаем к установке:

2 регулируемых КУ типа УКРП576 6,3 мощностью 450 квар каждая и общей установленной мощностью 900 квар.

Общие затраты на КУ и на установку КТП с трансформаторами ТМГ-2500:

$$C \cdot \Delta P_T = C_0 \cdot \Delta P_{XX} + C \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{K3} \quad (92)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 249,83 \cdot 4,6 + 82,3 \cdot 0,7^2 \cdot 24 = 2117 \text{ руб/год,}$$

$$K_{ТП} = 1459,5 \text{ тыс.руб.}$$

$$Z_{Общие} = E \cdot (K_{ТП} \cdot N_T + K_{КУ} \cdot N_{КУ}) + \frac{C \cdot \Delta P_T}{1000} \cdot N_T \quad (93)$$

$$Z_{Общие} = 0,223 \cdot (1459,5 \cdot 2 + 487,6 \cdot 2) + \frac{2117}{1000} \cdot 2 = 872,6 \text{ тыс.руб.}$$

По наименьшим приведенным затратам выбираем комплектную трансформаторную подстанцию с трансформаторами ТМГ-1600 кВА.

4 Выбор и обоснование схемы внутрицехового электроснабжения

Цеховые сети трехфазного переменного тока с номинальным напряжением до 1 кВ выполняются по схемам: радиальной, магистральной или использующей элементы этих двух сетей, т.е. смешанной сети [2, 16-19].

Радиальные схемы внутрицехового электроснабжения позволяют обеспечить высокую надежность электроснабжения потребителей электроэнергии, удобны при эксплуатации, в них с достаточной легкостью применяются элементы автоматики. Радиальные сети выполняются проводами или кабелями.

Недостатки радиальных схем следующие: большие капитальные затраты на установку РП, проводку кабелей и проводов; трудность перестановки оборудования.

По радиальным схемам выполняются сети внутреннего электроснабжения насосных или компрессорных станций, сети в пыльных и опасных по коррозии помещениях, сети пожаро- и взрывоопасных производств.

Магистральные схемы внутрицехового электроснабжения используются для питания силовых электроприемников и осветительных установок, равномерно распределенных по площади цеха, а также группы электроприемников, относящихся к одной технологической линии. Таким образом, одна магистральная линия запитывает ряд распределительных шкафов и крупные электроприемники цеха.

Особенности магистральных сетей [2]:

1. Пониженная надежность по сравнению с радиальными схемами электроснабжения.
2. Стоимость сооружения сети ниже, чем у радиальных, из-за меньшего количества используемого электрооборудования.
3. Позволяют использовать новые системы шинопроводов с высокой заводской готовностью.

4. Большие токи КЗ, чем в радиальных сетях, но меньшие потери напряжения по сравнению с радиальными.

Учитывая особенности магистральных и радиальных сетей, а также характер производства, условия окружающей среды и другие условия для питания электроприемников выбираем радиальную схему электроснабжения.

5 Выбор электрооборудования схемы внутреннего электроснабжения

К коммутационным аппаратам относится достаточно широкий спектр электрооборудования, с помощью которого осуществляется включение/отключение как основных токовых цепей, так и цепей управления [2, 5-6, 13-14, 20].

Для коммутации основных токовых цепей наряду с автоматическими выключателями используются рубильники, переключатели, контакторы, магнитные пускатели и т. п.

Для коммутации цепей управления используются различные реле как мгновенного действия, так и реле с выдержкой времени на замыкание и размыкание контактов, кнопки и ключи (переключатели) управления и пр. Аппаратура для коммутации цепи управления может содержать аппарат для цепи управления совместно с дополнительными устройствами. Указанный аппарат может включать в себя ряд коммутационных элементов вместе с механизмом передачи усилия для переключения. Коммутационный элемент в своей основе может быть полупроводниковым или контактным.

Выбор при проектировании аппаратов из рассматриваемой группы определяется следующими основными параметрами:

- номинальным напряжением и потребляемым током катушек;
- коммутационной способностью контактов или выходных полупроводниковых цепей (номинальное напряжение, номинальный ток коммутируемой цепи);
- для реле с выдержкой времени - диапазоном выдержки времени.

Не менее важными факторами являются способ установки аппарата (под винт, на DIN-рейку) и присоединение проводов (переднее, заднее).

Расчёт производится по формулам из 1 пункта. Результаты расчетов заносим в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчета электрических нагрузок по РП

Наименование электроприемника	P_n , кВт	n, шт	$P_{н\Sigma}$, кВт	$K_{и}$	$\cos\phi$	$\operatorname{tg}\phi$	m	$P_{см}$, кВт	$Q_{см}$, квар	n_3	K_M	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	I_p , кА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
РП 1															
Вентиляторы ВЦ 4-70-5,6	5	2	10	0,7	0,8	0,75		7	5,25						
Сверлильный станок KSB 50 CNC	3,4	1	8,4	0,13	0,47	1,87		1,1	2,06						
Заточный станок ЗД642Е	2,2	1													
Токарно-револьверный станок 1П371	22	1	22	0,14	0,47	1,88		3,08	5,8						
Фрезерный станок Optimum MT200	10	1	10	0,14	0,49	1,78		1,4	2,5						

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Круглошлифовальный станок RSM 500 В CNC (Fagor)	5,5	1	5,5	0,12	0,46	1,93		0,66	1,27						
Резьбонарезной станок Super-Ego 891	8	1	8	0,13	0,5	1,73		1,04	1,8						
Электронагреватели отопительные Warmos-IV-15	15,5	3	46,5	0,75	1	0		35	0						
Кран мостовой ВБИ	30,8	1	15,4	0,25	0,5	1,73		3,85	6,67						
Насосные агрегаты	630	1	630	0,7	0,85	0,62		441	273,4						
Итого по РП 1	630 /2,2	13	755,8	0,65	-	0,6	>3	494,1	298,8	3	1,43	706,6	328,6	779	1,18
РП 2															
Насосные агрегаты	630	2	1260	0,7	0,85	0,62		882	546,8						
Щит сигнализации	1,1	1	0,95	1	0,85	0,62		0,95	0,6						

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Вспомогательные насосы	9,5	2	19	0,7	0,85	0,62		13,3	8,25						
Итого по РП 2	630 /1,1	5	1287, 5	0,7	-	0,62	>3	897,8	559,1	4	1,29	1158	615	1311	1,99
РП 3															
Насосные агрегаты	630	2	1260	0,7	0,85	0,62		882	546,8						
ЭД вакуумных насосов 4ВВН2-3	8	5	40	0,7	0,85	0,62		28	17,36						
Электродвигатели задвижек АИРЕ 71 С2	1,2	5	7,2	0,85	0,8	0,75		6,12	4,59						
Итого по РП 3	630 /1,2	12	1307, 2	0,7	-	0,62	>3	916,1 2	568,7 5	4	1,29	1181, 8	625,6	1337	2,03

По результатам расчётов выберем электрооборудование схемы внутреннего электроснабжения:

- система: мощность короткого замыкания $S_K = 100$ мВА, $U_{HH} = 0,4$ кВ;
- трансформатор: ТМГ - 1600/6,3, схема соединений обмоток Д/Y₀, $S_H = 1600$ кВА, $U_{BH} = 6,3$ кВ, $U_K = 5,5$ %, $\Delta P_{K3} = 16,5$ кВт, $\Delta P_{XX} = 3,3$ кВт;
- трансформатор тока ТА1: $I_H = 3,85$ кА, поэтому выбираем трансформатор тока класса точности 0,5 с сопротивлениями $r_{TA1} = 0,05$ мОм, $x_{TA1} = 0,07$ мОм, коэффициентом трансформации $k_{TA1} = 4000 / 5$;
- автоматический выключатель АВ1: $I_H = 4$ кА, сопротивление катушки и контакта $r_{KB1} = 0,1$ мОм, $x_{KB1} = 0,05$ мОм;
- трансформатор тока ТА2: $I_H = 2$ кА, поэтому выбираем трансформатор тока класса точности 0,5 с сопротивлениями $r_{TA1} = 0,05$ мОм, $x_{TA2} = 0,07$ мОм, коэффициентом трансформации $k_{TA2} = 2000 / 5$;
- автоматический выключатель АВ2: $I_H = 2$ кА, сопротивление катушки и контакта $r_{KB2} = 0,13$ мОм, $x_{KB2} = 0,07$ мОм;
- кабельная линия КЛ1: $I_H = 2$ кА, $l_{KL1} = 45$ м, $r_{YD1} = 0,16$ мОм/м, $x_{YD1} = 0,055$ мОм/м;
- автоматический выключатель АВ3: $I_H = 1,6$ кА, сопротивление катушки и контакта $r_{KB3} = 0,14$ мОм, $x_{KB3} = 0,08$ мОм;
- кабельная линия КЛ2: $I_H = 1,069$ кА, $l_{KL2} = 9$ м, $r_{YD2} = 0,256$ мОм/м, $x_{YD2} = 0,056$ мОм/м.

Рассчитаем ток в линиях идущих к ЭП и выберем автоматические выключатели и кабели, используя формулу:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \phi} ,$$

где P_H - номинальная мощность одного ЭП, U_H - номинальное напряжение одного ЭП, $\cos \phi$ - коэффициент мощности ЭП.

Результаты расчетов токов для каждого ЭП и выбранного для него оборудования приведём в таблице 5.

Таблица 5 – Номинальные токи ЭП и выбор оборудования

Наименование ЭП	I _н , А	Кабельная линия			Автоматический выключатель			
		Тип	r _{уд} , МОм/м	X _{уд} , МОм/м	I _н , А	Тип	r _{кв} , МОм	X _{кв} , МОм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вентилятор ВЦ 4-70-5,6	9,5	ВБбШнг(А) 3x4	9,61	0,092	12	ВА-СЭЩ- ТD100	7	4,5
Сверлильный станок KSB 50 CNC	27	ВБбШнг(А) 3x4	9,61	0,092	32	ВА-СЭЩ- ТD100	7	4,5
Заточный станок ЗД642Е								
Токарно- револьверный станок 1П371	71	ВБбШнг(А) 3x16	2,4	0,078	100	ВА-СЭЩ- ТD100	7	4,5
Фрезерный станок Optimum MT200	31	ВБбШнг(А) 3x4	9,61	0,092	32	ВА-СЭЩ- ТD100	7	4,5
Круглошлифовальный станок RSM 500 В CNC (Fagor)	18	ВБбШнг(А) 3x4	9,61	0,092	20	ВА-СЭЩ- ТD100	7	4,5
Резьбонарезной станок Super-Ego 891	24	ВБбШнг(А) 3x4	9,61	0,092	32	ВА-СЭЩ- ТD100	7	4,5
Электронагреватели отопительные Warmos-IV-15	24	ВБбШнг(А) 3x4	9,61	0,092	32	ВА-СЭЩ- ТD100	7	4,5

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кран мостовой ВБИ	47	ВБбШнг(А) 3x6	9,61	0,092	50	ВА-СЭЩ- ТД100	7	4,5
ЭД вакуумных насосов 4ВВН2-3	14	ВБбШнг(А) 3x4	9,61	0,092	20	ВА-СЭЩ- ТД100	7	4,5
Электродвигатели задвижек АИРЕ 71 С2	2	ВБбШнг(А) 3x4	9,61	0,092	3,2	ВА-СЭЩ- ТД100	7	4,5
Щит сигнализации	2	ВБбШнг(А) 3x4	9,61	0,092	3,2	ВА-СЭЩ- ТД100	7	4,5
Насосные агрегаты	1069	3ВБбШнг(А) 3x150	0,256	0,056	1250	ВА-СЭЩ-В- АН-13Д	0,14	0,08
Вспомогательные насосы	17	ВБбШнг(А) 3x4	9,61	0,092	20	ВА-СЭЩ- ТД100	7	4,5
РП1	1180	3ВБбШнг(А) 3x185	0,208	0,056	1250	ВА-СЭЩ-В- АН-13Д	0,14	0,08
РП2	1990	4ВБбШнг(А) 3x240	0,16	0,055	2000	ВА-СЭЩ-В- АН-20Д	0,13	0,07
РП3	2030	5ВБбШнг(А) 3x185	0,208	0,056	2500	ВА-СЭЩ-В- АН-25Е	0,13	0,07
РУ	3850	-	-	-	4000	ВА-СЭЩ-В- АН-40G	0,1	0,05

6 Расчёт токов короткого замыкания

В данном пункте проведем расчет короткого замыкания для самого мощного электроприёмника – насосного агрегата. Короткое замыкание будет рассчитано для трёх точек: перед агрегатом, на распределительном пункте, на распределительном устройстве. Расчетная схема представлена на рисунке 2.

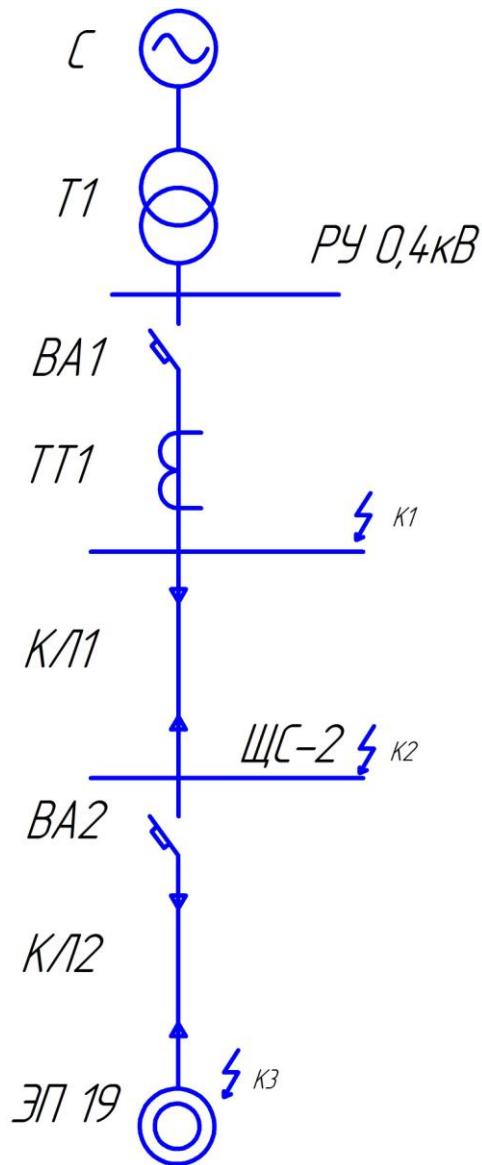


Рисунок 2 – Расчётная схема

Сопротивление системы [2, 6]:

$$x_c = \frac{U_{HH}^2}{S_K} \cdot 10^3 \quad (94)$$

$$x_C = \frac{0,4^2}{100} \cdot 10^3 = 1,6 \text{ мОм.}$$

Сопротивление трансформатора:

$$R_T = \frac{\Delta P_{K3} \cdot U_{HH}^2}{S_H^2} \cdot 10^6 \quad (95)$$

$$R_T = \frac{16,5 \cdot 0,4^2}{1600^2} \cdot 10^6 = 1,03 \text{ мОм,}$$

$$Z_T = \frac{\Delta P_{XX} \cdot U_{HH}^2}{S_H} \cdot 10^4 \quad (96)$$

$$Z_T = \frac{5,5 \cdot 0,4^2}{1600} \cdot 10^4 = 5,5 \text{ мОм,}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (97)$$

$$X_T = \sqrt{5,5^2 - 1,03^2} = 5,4 \text{ мОм.}$$

Сопротивление кабельных линий:

$$R_{КЛ1} = \frac{r_{yД1}}{4} \cdot l \quad (98)$$

$$R_{КЛ1} = \frac{0,16}{4} \cdot 45 = 1,8 \text{ мОм,}$$

$$X_{КЛ1} = \frac{x_{yД1}}{4} \cdot l \quad (99)$$

$$X_{КЛ1} = \frac{0,055}{4} \cdot 45 = 0,62 \text{ мОм,}$$

$$R_{КЛ2} = \frac{r_{yД2}}{3} \cdot l \quad (100)$$

$$R_{КЛ2} = \frac{0,256}{3} \cdot 9 = 0,768 \text{ мОм,}$$

$$X_{KL2} = \frac{x_{уд2}}{3} \cdot l \quad (101)$$

$$X_{KL2} = \frac{0,056}{3} \cdot 9 = 0,17 \text{ мОм.}$$

Составим схему замещения прямой последовательности (рисунок 3).

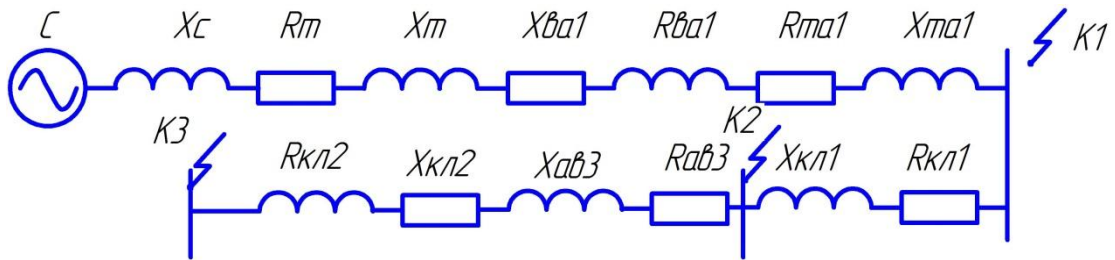


Рисунок 3 – Схема замещения прямой последовательности

По схеме определим суммарное сопротивление для каждой точки КЗ:

КЗ 3:

$$R_{\Sigma 3} = R_T + R_{TT1} + R_{KB1} + R_{TT2} + R_{KB2} + R_{KL1} + R_{KB3} + R_{KL3} \quad (102)$$

$$R_{\Sigma 3} = 1,03 + 0,05 + 0,1 + 0,05 + 0,13 + 1,8 + 0,14 + 0,768 = 4,068 \text{ мОм,}$$

$$X_{\Sigma 3} = X_C + X_T + X_{TT1} + X_{KB1} + X_{TT2} + X_{KB1} + X_{KL1} + X_{KB3} + X_{KL3} \quad (103)$$

$$X_{\Sigma 3} = 1,6 + 5,4 + 0,07 + 0,05 + 0,07 + 0,07 + 0,62 + 0,08 + 0,17 = 8,13 \text{ мОм,}$$

$$Z_{\Sigma 3}^{(3)} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2} \quad (104)$$

$$Z_{\Sigma 3}^{(3)} = \sqrt{4,068^2 + 8,13^2} = 9,1 \text{ мОм.}$$

КЗ 2:

$$R_{\Sigma 2} = R_T + R_{TT1} + R_{KB1} + R_{TT2} + R_{KB2} + R_{KL1} \quad (105)$$

$$R_{\Sigma 2} = 1,03 + 0,05 + 0,1 + 0,05 + 0,13 + 1,8 = 3,16 \text{ мОм},$$

$$X_{\Sigma 2} = X_C + X_T + X_{TT1} + X_{KB1} + X_{TT2} + X_{KB1} + X_{KЛ1} \quad (106)$$

$$X_{\Sigma 2} = 1,6 + 5,4 + 0,07 + 0,05 + 0,07 + 0,07 + 0,62 = 7,88 \text{ мОм},$$

$$Z_{\Sigma 2}^{(3)} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2} \quad (107)$$

$$Z_{\Sigma 2}^{(3)} = \sqrt{3,16^2 + 7,88^2} = 8,5 \text{ мОм}.$$

КЗ 1:

$$R_{\Sigma 1} = R_T + R_{TT1} + R_{KB1} \quad (108)$$

$$R_{\Sigma 1} = 1,03 + 0,05 + 0,1 = 1,18 \text{ мОм},$$

$$X_{\Sigma 1} = X_C + X_T + X_{TT1} + X_{KB1} \quad (109)$$

$$X_{\Sigma 1} = 1,6 + 5,4 + 0,07 + 0,05 = 7,12 \text{ мОм},$$

$$Z_{\Sigma 1}^{(3)} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2} \quad (110)$$

$$Z_{\Sigma 1}^{(3)} = \sqrt{1,18^2 + 7,12^2} = 7,22 \text{ мОм}.$$

Ток трёхфазного металлического КЗ для каждой точки:

$$I_{KM3}^{(3)} = \frac{U_{HH}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma 3}^{(3)}} \quad (111)$$

$$I_{KM3}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 9,1} = 25,4 \text{ кА},$$

$$I_{KM2}^{(3)} = \frac{U_{HH}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma 2}^{(3)}} \quad (112)$$

$$I_{KM2}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 8,5} = 27,2 \text{ кА},$$

$$I_{KM1}^{(3)} = \frac{U_{HH}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma 1}^{(3)}} \quad (113)$$

$$I_{KM1}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 7,22} = 32 \text{ кА}.$$

Ток трёхфазного дугового КЗ определяем с использованием снижающего коэффициента K_C (таблица 6).

Таблица 6 – Зависимость снижающего коэффициента от сопротивления цепи

Момент дугового замыкания	Начало процесса K_{C1}	Установившийся процесс K_{C2}
КЗ 3	0,64	0,55
КЗ 2	0,62	0,53
КЗ 1	0,61	0,51

Ток трёхфазного дугового КЗ:

КЗ 3:

$$I_{KD3}^{(3)} = I_{KM3}^{(3)} \cdot K_{C1} \quad (114)$$

$$I_{KD3}^{(3)} = 25,4 \cdot 0,64 = 16,26 \text{ кА},$$

$$I_{KM3}^{(3)} = I_{KM3}^{(3)} \cdot K_{C2} \quad (115)$$

$$I_{KM3}^{(3)} = 25,4 \cdot 0,55 = 13,97 \text{ кА}.$$

КЗ 2:

$$I_{KD2}^{(3)} = I_{KM2}^{(3)} \cdot K_{C1} \quad (116)$$

$$I_{КД2}^{(3)} = 27,2 \cdot 0,62 = 16,86 \text{ кА},$$

$$I_{КМ2}^{(3)} = I_{КМ2}^{(3)} \cdot K_{C2} \quad (117)$$

$$I_{КМ2}^{(3)} = 27,4 \cdot 0,53 = 14,42 \text{ кА}.$$

КЗ 1:

$$I_{КД1}^{(3)} = I_{КМ1}^{(3)} \cdot K_{C1} \quad (118)$$

$$I_{КД1}^{(3)} = 32 \cdot 0,61 = 19,52 \text{ кА},$$

$$I_{КМ1}^{(3)} = I_{КМ1}^{(3)} \cdot K_{C2} \quad (119)$$

$$I_{КМ1}^{(3)} = 32 \cdot 0,51 = 16,32 \text{ кА}.$$

Для нахождения ударного коэффициента найдем отношение суммарных индуктивных сопротивлений к активным, для каждого КЗ:

КЗ 3:

$$\frac{X_{\Sigma 3}}{R_{\Sigma 3}} = \frac{8,13}{4,068} = 2 \Rightarrow K_{вд1} = 1,2,$$

КЗ 2:

$$\frac{X_{\Sigma 2}}{R_{\Sigma 2}} = \frac{7,88}{3,16} = 2,5 \Rightarrow K_{вд2} = 1,25 ,$$

КЗ 1:

$$\frac{X_{\Sigma 1}}{R_{\Sigma 1}} = \frac{7,12}{1,18} = 6,03 \Rightarrow K_{вд1} = 1,58.$$

Рассчитаем ударный ток для каждой точки:

КЗ 3:

$$i_{уд3} = \sqrt{2} \cdot K_{уд3} \cdot I_{KM3}^{(3)} \quad (120)$$

$$i_{уд3} = \sqrt{2} \cdot 1,2 \cdot 25,4 = 43,1 \text{ кА},$$

КЗ 2:

$$i_{уд2} = \sqrt{2} \cdot K_{уд2} \cdot I_{KM2}^{(3)} \quad (121)$$

$$i_{уд2} = \sqrt{2} \cdot 1,25 \cdot 27,2 = 48,1 \text{ кА},$$

КЗ 1:

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot K_{уд1} \cdot I_{KM1}^{(3)} \quad (122)$$

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot 1,58 \cdot 32 = 71,5 \text{ кА}.$$

7 Проверка выбранных автоматических выключателей и проводников

7.1 Проверка автоматических выключателей

Были предварительно выбраны автоматы типа ВА-СЭЩ-В-АН-20D с номинальным током расцепителя 2000 А (от КТП до ЩС-2). Технические данные автоматического выключателя приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Технические данные автоматического выключателя типа ВА-СЭЩ-В-АН-20D

Тип выключателя	Номинальный ток выключателя, А	Номинальный ток расцепителя, А	Предельная коммутационная способность аппарата, кА	Ток динамической устойчивости аппарата, кА
ВА-СЭЩ-В-АН-20D	2000	2000	85	143

Проверка автомата будет выполнена по следующим условиям:

1) Отключающая способность:

$$I_{ПКС} \geq I_{н0\max}^{(3)}, \quad (123)$$
$$85 \geq 27,2.$$

2)Динамическая устойчивость:

$$I_{дин} \geq i_{уд\max}, \quad (124)$$
$$143 \geq 48,1.$$

Исходя из полученных результатов выбор автоматических выключателей был выполнен правильно.

7.2 Проверка кабельных линий

Для расчета токов КЗ были предварительно выбраны кабельные линии, выполненные кабелем марки ВБбШнг(А). Выполним проверку выбранных кабелей на максимальную потерю напряжения. Потери напряжения определим по формуле:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I_P \cdot L}{U_n} \cdot (r_0 \cdot \cos \phi + x_0 \cdot \sin \phi) \cdot 100 , \quad (125)$$

Кабельная линия от КТП до ЩС-2:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot 1990 \cdot 0,008}{380} \cdot (0,16 \cdot 0,85 + 0,055 \cdot 0,53) \cdot 100 = 1,2\% .$$

Аналогичным образом проверяем остальные линии до электроприемников. По результатам расчетов максимальные потери напряжения в линиях не превышают 6%, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 32144-2013.

8 Расчет заземления

Принимаем вертикальные заземлители, выполненные уголком с размерами $50 \times 50 \times 5$ мм и длиной $l = 3$ м. Предварительно выбираем количество стержней равным 16 шт с расстоянием между соседними стержнями равным 6 м. Горизонтальные заземлители принимаем в виде стальных полос с размером 40×5 мм. Защищаемый объект располагается на супеске с $\rho_{зп} = 300$ Ом·м.

Найдем сопротивление стержневого электрода:

$$R_{\epsilon} = \frac{\rho \cdot K_{\epsilon}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\epsilon}} \left(\ln \frac{2 \cdot l_{\epsilon}}{d_{\epsilon}} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot h_{\epsilon} + l_{\epsilon}}{4 \cdot h_{\epsilon} - l_{\epsilon}} \right)$$
$$R_{\epsilon} = \frac{300 \cdot 1,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,0475} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2 + 0,0475}{4 \cdot 2 - 0,0475} \right) = 125,3 \text{ Ом},$$

Определяем необходимое количество электродов:

$$n' = \frac{R_{\epsilon}}{R_{з} \cdot \eta_{\epsilon}}$$
$$n' = \frac{125,3}{12 \cdot 0,6} = 17,36 = 18 \text{ шт},$$

Найдем длину соединительной полосы:

$$l_n = a \cdot n', \quad (126)$$

$$l_n = 18 \cdot 6 = 108 \text{ м},$$

Находим сопротивление соединительной полосы:

$$R_z = \frac{\rho \cdot K_z}{2 \cdot \pi \cdot l_n} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot l^2}{h_n \cdot b}\right), \quad (127)$$

$$R_z = \frac{300 \cdot 4}{2 \cdot 3,14 \cdot 108} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 108^2}{0,5 \cdot 0,05}\right) = 24,7 \text{ Ом},$$

Найдем действительное сопротивление растеканию горизонтального заземлителя с учетом коэффициента использования η_z :

$$R'_z = \frac{R_z}{\eta_z}, \quad (128)$$

$$R'_z = \frac{24,7}{0,32} = 77,2 \text{ Ом}.$$

Определим сопротивление растеканию вертикальных заземлителей с учетом горизонтального заземлителя:

$$R'_6 = \frac{R'_z \cdot R_3}{R'_z - R_3}, \quad (129)$$

$$R'_6 = \frac{77,2 \cdot 12}{77,2 - 12} = 14,2 \text{ Ом}.$$

Итоговое количество вертикальных заземлителей:

$$n'_6 = \frac{R_6}{\eta_6 \cdot R'_6}, \quad (130)$$

$$n'_6 = \frac{125,3}{0,6 \cdot 14,2} = 14,6 \approx 15 \text{ шт.}$$

Заключение

В данной бакалаврской работе мы рассчитали общие потребляемые мощность и ток насосной станции, обеспечивающей производство изопрена, $S_p = 2534$ кВА и $I_p = 3,85$ кА, соответственно. Выбрали светильники для освещения производственных помещений. Для помещения насосной выбрали светодиодные промышленные светильники ССП03-50 «Шмель».

Так как потребители насосной станции относятся к 1 и 2 категориям потребления, то устанавливаются два трансформатора. Было проведено экономическое сравнение двух вариантов трансформаторов. На основании этого сравнения было решено установить два трансформатора ТМГ-1600.

Для каждого ЭП станции был рассчитан потребляемый ток. По этому току было определено сечение и выбрана марка кабеля, через который будет проведен ток от РП к данному ЭП. Также по потребляемому току РП было определено сечение и провод, через который будет проведен ток от РУ к данному РП. В работе используется медный кабель марки ВБбШнг(А).

Также по потребляемым токам ЭП, РП и РУ были выбраны автоматические выключатели ко всем устройствам. Для насосного агрегата были рассчитаны токи трехфазного КЗ и ударные токи.

Выбранные автоматические выключатели были проверены на коммутационную способность и динамическую стойкость к токам КЗ.

Было рассчитано защитное заземление. В качестве заземлителей выбраны 16 вертикальных стержней и стальная соединительная полоса сечением 40x5 мм.

Список использованных источников

1. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы 6 и 7 издания с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2015 г. - 7-е изд., Литтерра, 2015.
2. Сивков, А.А. Основы электроснабжения. Учебное пособие / А.А. Сивков, Д.Ю. Герасимов, А.С. Сайгаш – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012.
3. Кудрин, Б.И. Электроснабжение: Учебник / Б.И. Кудрин – М.: Academia, 2015.
4. Вахнина, В.В. Системы электроснабжения. Электрон. учеб.-метод. пособие / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко - Тольятти: ТГУ, 2015.
5. Вахнина, В.В. Проектирование систем электроснабжения. Электрон. учеб.-метод. пособие / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко - Тольятти: ТГУ, 2016.
6. Сибикин, Ю.Д. Электроснабжение промпредприятий и установок. Учебное пособие / Ю.Д. Сибикин – Москва: Форум, 2015.
7. Указания по расчету электрических нагрузок. ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект» №358–90 от 1 августа 1993 г.
8. Hickey, R.B. Electrical Engineer's Portable Handbook / R.B. Hickey, B. Robert. – USA: McGraw-Hill Companies, 2012.
9. Tenemaza, P. State of Art, Reliability in Electrical Distribution Systems Based on Markov Stochastic Model / P. Tenemaza, I. Ortega. - IEEE Latin America Transactions, 14 (2), pp. 799-804, 2016.
10. Светильник «ССП03-50 Шмель» [Электронный ресурс] // Официальный сайт ПО «Электроточприбор» URL: http://etpribor.ru/product_info.php?products_id=151 (дата обращения: 15.04.2017).
11. Kim, H.-C. An AC-DC LED Driver with a Two-Parallel Inverted Buck Topology for Reducing the Light Flicker in Lighting Applications to Low-Risk Levels / H.-C. Kim, M.C. Choi, S. Kim, D.-K. Jeong. – IEEE Transactions on Power Electronics, 32 (5), pp. 3879-3891, 2017.

12. Гвоздев, С.М. Энергоэффективное электрическое освещение. Учебное пособие / С.М. Гвоздев, Д.И. Панфилов, Т.К. Романова – М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
13. Ополева, Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов. Учебное пособие / Г.Н. Ополева – Москва: Инфра-М, 2017.
14. Сибикин, Ю.Д. Пособие к курсовому и дипломному проектированию электроснабжения промышленных, сельскохозяйственных и городских объектов. Учебное пособие / Ю.Д. Сибикин – Москва: Форум, 2015.
15. Hase, Y. Handbook of Power System Engineering / Y. Hase. – England: John Wiley & Sons, 2011.
16. Стрельников, Н.А. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. пособие / Н.А. Стрельников. - Новосибирск : НГТУ, 2013.
17. Ковалев, И.Н. Электроэнергетические системы и сети: учебник / И. Н. Ковалев. - Москва : Учеб.-метод. центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015.
18. Шлейников, В.Б. Электроснабжение силовых электроприемников цеха промышленного предприятия: учеб. пособие / В.Б. Шлейников, Т.В. Сазонова. - Оренбург : ОГУ, 2012.
19. Chapman, S.J. Instructor's Manual to accompany Electric Machinery and Power System Fundamentals, Second Edition / S.J. Chapman – USA: McGraw-Hill, 2011.
20. Электроснабжение: выбор и проверка токоведущих частей и коммутационных аппаратов: метод. указания к практ. и курсов. работам / Липецкий государственный технический университет ; сост. Т.В. Синюкова. - Липецк: ЛГТУ, 2014.