

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 литейно-механического завода

Обучающийся

А.Ф. Акопджанян

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.п.н., доцент, М.Н. Третьякова

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

Тольятти 2024

Аннотация

В выпускной квалификационной работе (ВКР) на тему «Проектирование системы электроснабжения литейно-механического завода» рассматривается разработка решений по созданию надёжной и энергоэффективной системы электроснабжения предприятия по изготовлению трубопроводной запорной и регулирующей арматуры с полным производственным циклом.

Объектом исследования в представленной работе является литейно-механический завод (ЛМЗ) на территории Нижегородской области.

Предметом исследования является система электроснабжения литейно-механического завода.

Цель исследования заключается в разработке решений по созданию надёжной и энергоэффективной системы электроснабжения литейно-механического завода.

Таким образом, при выполнении выпускной квалификационной работы будут решены следующие задачи:

- сбор общих сведений об объекте исследования;
- обоснование схемы электроснабжения;
- расчёт актуальной нагрузки производства;
- выбор силовых трансформаторов подстанции;
- выбор линий электроснабжения;
- выбор оборудования системы электроснабжения.

Данная работа изложена на 60 листах, графическая часть имеет 6 чертежей, формата А1, список используемых источников и используемой литературы включает в себя 30 наименований.

Содержание

Введение.....	5
1 Краткая характеристика объекта электроснабжения Семёновского ЛМЗ.....	6
1.1 Геологическая и климатическая характеристика местности расположение ЛМЗ	6
1.2 Характеристика направления деятельности ЛМЗ	7
1.3 Краткая характеристика технологического цикла ЛМЗ	8
1.4 Технические характеристика производственных зданий и сооружений	9
2 Расчёт ожидаемых электрических нагрузок.....	11
2.1 Электрическая мощность, потребляемая заводским оборудованием	11
2.2 Потребление электроэнергии для освещения производственных помещений.....	15
2.3 Построение картограммы электрических нагрузок	20
2.4 Расчёт нагрузок подключённых к шинам распределительных устройств	24
3 Расчёт числа и установленной мощности трансформаторов на подстанции	28
3.1 Выбор трансформаторов	28
3.2 Расчет и выбор компенсирующего устройства	29
4 Электрическая схема электроснабжения	34
4.1 Выбор и обоснование схемы	34
4.2 Выбор распределительных шин и проводников	37
4.3 Выбор автоматических выключателей	40
5 Расчёт значений токов коротких замыканий.....	41
5.1 Токи короткого замыкания в точке К1	43
5.2 Токи короткого замыкания в точке К2	44
5.3 Токи короткого замыкания в точке К3	45

5.4 Проверка коммутационного оборудования по результатам расчетов токов короткого замыкания.....	46
6 Релейная защита трансформаторов ТМ-400/10/0,4	47
7 Расчет заземления зданий и сооружений объекта	49
8 Молниезащита производственного здания.....	51
Заключение	55
Список используемой литературы	57

Введение

Электроэнергия для электроснабжения потребителей промышленного предприятия передаётся от главной понижающей подстанции (ГПП), классом напряжения 10 кВ с дальнейшей её преобразования в трансформаторной подстанции (ТП) предприятия или цехов для понижения напряжения до уровня 0,4 кВ с целью дальнейшей передачи электроприемникам (ЭП).

Проектирование системы электроснабжения (СЭС) предприятия является комплексной задачей, позволяющей расчётами электрических нагрузок, выбором компенсирующих устройств и устройств защиты, выбором источника питания и оборудования системы электроснабжения обеспечить нормальные условия функционирования предприятия и его развитие за счёт обеспечения качественной электрической энергией всех ЭП в том числе перспективных [2].

Цель работы – повышение энергоэффективности и надёжности системы электроснабжения литейно-механического завода (ПАО «Литейно-механический завод») и обеспечение подключения новых потребителей в связи с увеличением производственных мощностей указанного предприятия, за счёт реконструкции системы электроснабжения литейно-механического завода и выбора современного электрооборудования СЭС предприятия соответствующим всем требованиям нормативно-технической документации (НТД) Российской Федерации.

Задачи выпускной квалифицированной работы:

- «составить схему электроснабжения; рассчитать электрические нагрузки электроприемников (ЭП);
- выбрать компенсирующие устройства (КУ) и трансформаторы;
- выбрать источник питания; выбрать электрооборудования СЭС, выполнить расчёты токов короткого замыкания (КЗ) и параметрирование микропроцессорных устройств РЗА, устанавливаемых на питающей ГПП» [6].

1 Краткая характеристика объекта электроснабжения Семёновского ЛМЗ

1.1 Геологическая и климатическая характеристика местности расположение ЛМЗ

ЛМЗ расположен в Нижегородской области в зоне умеренно континентального климата. Средняя годовая температура воздуха 4 °С. За год выпадает около 500 – 600 мм осадков, две трети которых выпадает в виде дождя. Среднегодовая скорость ветра составляет 3 – 4 м/с.

Расчётные климатические и геологические условия района расположения ЛМЗ указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Расчётные климатические и геологические условия района

Наименование	Значение
T _{макс} воздуха °С	(+39)
T _{мин} воздуха °С	(-40)
T _{ср} воздуха °С	(+4)
Относительная влажность воздуха %	80,0
Продолжительность зимнего периода, N _з , суток	200
Продолжительность летнего периода, N _л , суток	165
Степень загрязнения изоляции оборудования	I
Район по ветру	III (650 Па)
Район по гололёду	III (20 мм)
Средняя скорость ветра, м/с	4,0
Район по грозовой деятельности, час	от 10 до 20
Район по пляске проводов	II
Грунт	Песчаный

Зима в Нижегородской области продолжается с начала ноября до конца марта в среднем 120 дней со среднемесячной температурой от минус 4 °С до минус 10 °С. Абсолютные минимальные температуры воздуха достигает минус 40 °С и с максимума до 6 °С. Снежный покров лежит от 150 до 160 дней с высотой до 75 см. Среднемесячные скорости ветра составляет 3,5 – 4,5 м/с.

Весна в области короткая с среднемесячной температурой воздуха 9 °С. Сход снежного покрова происходит в апреле. Количество осадков составляет 80 мм. Средняя скорость ветра 3 – 4 м/с.

Лето короткое, начинается в конце мая с продолжительностью 70 – 90 дней со среднемесячной температурой +19 °С. Максимальная дневная температура повышается до плюс 33 °С, а иногда до плюс 40 °С. Наибольшее количество осадков, 80 мм приходится на июль. Средние месячные скорость ветра составляют 3 м/с.

Осень начинается с заморозков после перехода среднесуточной температуры воздуха через 15 °С в сторону понижения в конце августа. Средняя месячная температура составляет 10 °С. Безморозный период длится в среднем 120 дней. В целом за осенний сезон выпадает 130 мм осадков. Среднемесячная скорости ветра составляют 3 – 4 м/с. Вегетационный период – продолжительностью 160 – 175 дней.

1.2 Характеристика направления деятельности ЛМЗ

ПАО «Литейно-механический завод» представляет из себя российское самостоятельное предприятие по изготовлению трубопроводной запорной и регулирующей арматуры, включающий в себя полный производственный цикл, который состоит из разработки, проектирования с дальнейшим изготовлением и продажи изделия конечному потребителю.

Основным направлением деятельности ЛМЗ является производство и поставка литых чугунных задвижек с пропускным рабочим давлением от 0,6 до 1,6 МПа с ручным или электрическим приводом, а также шаровых литых кранов на рабочее давление от 1,6 до 2,5 МПа, дисковых затворов поворотного исполнения на рабочее давление 1,6 МПа. Ежемесячный выпуск запорной арматуры составляет от 9000 до 11000 штук, которые широко используются при транспортировке газа, воды, пара, воздуха, нефти, мазута, масел. Кроме трубопроводной запорной арматуры предприятие занимается производством

чугунных отливок выполненные по чертежам заказчика для автомобилей и к сельскохозяйственному оборудованию.

На сегодняшний день ЛМЗ современное и успешно развивающиеся российское предприятие, одним из приоритетных направлений которого является качество выпускаемой продукции.

ЛМЗ включает в себя 3 основных цеха:

- литейный цех (литейное производство);
- механо-сборочные цеха № 1 и № 2 (механо-сборочное производство);
- три вспомогательных участка: энерго-механический, транспортный, хозяйственно-строительный, а также складское хозяйство.

На данный момент на предприятии работает 240 человек.

1.3 Краткая характеристика технологического цикла ЛМЗ

Серийное производство запорной арматуры – процесс, который включает в себя производственные циклы с контролем каждой операции для выдерживания высокого конечного качества изделий, за которое несёт ответственность компания.

Производство запорной арматуры состоит из этапов производства и включает в себя:

- закупка сырья и литых заготовок, с временным складирование и плановым пополнением запасов сырья;
- переработка сырья в заготовки с последующей металлообработкой деталей с использованием программируемых ленточных пил револьверных станков, ЧПУ согласно техническим чертежам;
- сборка запорной арматуры, которая включает в себя сварные работы, сборку всех деталей в готовое изделие «(на этом этапе детали доводятся до конечного сборочного вида, проверяются на точность геометрии, соответствие чертежам, шероховатость и проходят первичную отбраковку)»;

- приёмо-сдаточные испытания включает в себя гидравлическое и пневматическое испытания на герметичность запорного устройства и работоспособность;
- антикоррозийная обработка (гальваника), с последующей покраской продукции (при необходимости) согласно спецификации поставки, окраска в фирменные цвета заказчика;
- маркировка готовой продукции с применением лазерной гравировкой;
- консервация готовой продукции и её складирование.

На всех этапах производства ведётся контроль ОТК на соответствие чертежам и стандартам, контроль качества и соответствия поступающего сырья.

1.4 Технические характеристика производственных зданий и сооружений

Семёновский ЛМЗ состоит из группы технологических и административных зданий общей площадью 9000 м².

Технические характеристики зданий и помещений указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики производственных зданий

Наименование здания и сооружения	S помещения, м ²		Высота помещения, м	
	техническое	админ.	техническое	админ.
Литейный цех (литейное производство)	1008	72	12	3
Механо-сборочные цех № 1 (механо-сборочное производство)	1440	288	12	3
Механо-сборочные цех № 2 (механо-сборочное производство)	1360	320	10	3
Хозяйственно-строительный корпус	400	36	8	3,5
Складское хозяйство	1400	80	10	3
Главное административное здание	-	1800	-	3
Гараж	840	80	6	3

План размещения производственных зданий на территории завода показан на рисунке 1.

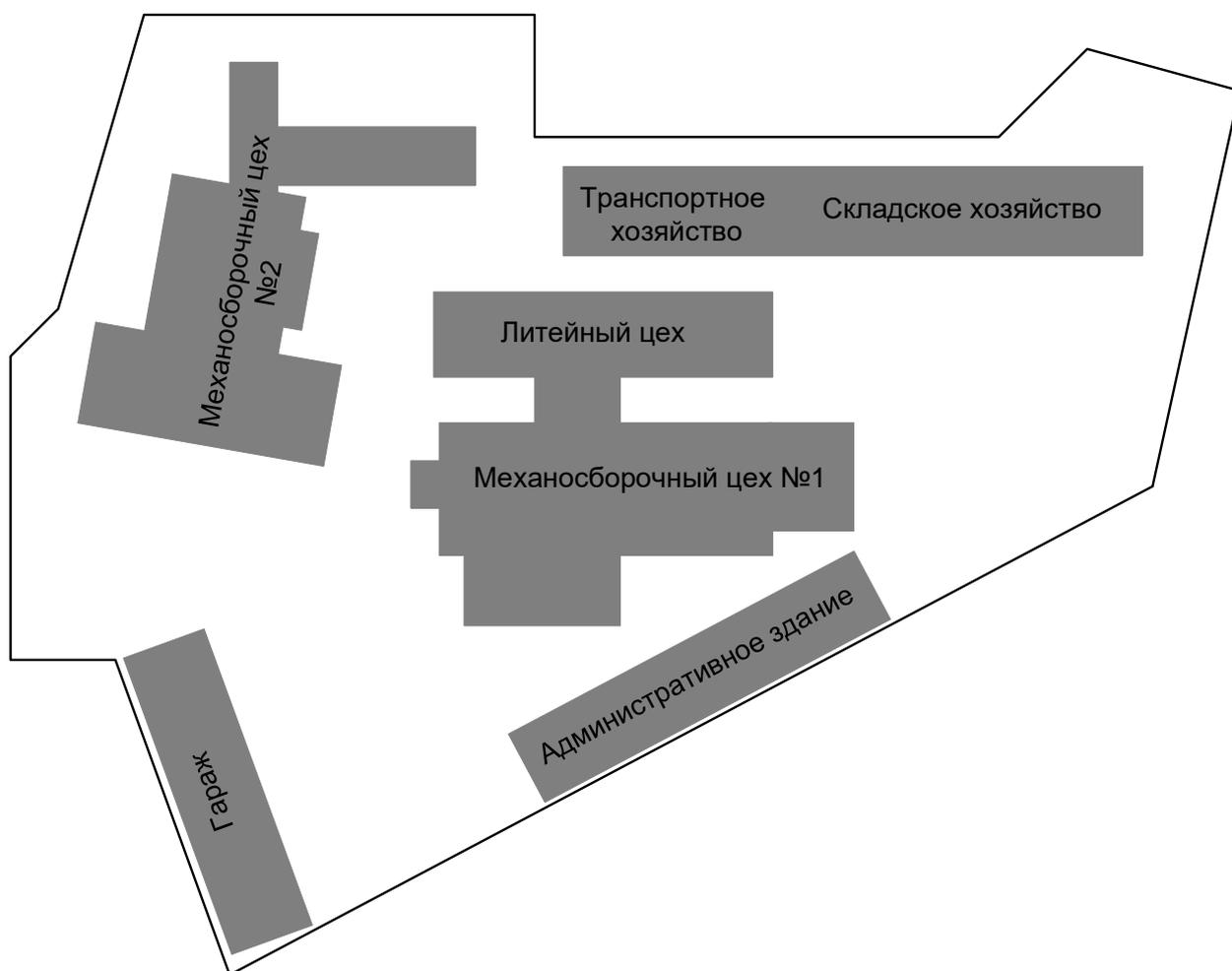


Рисунок 1 – План размещения производственных зданий и сооружений

Все производственные помещения должны иметь электрическое освещение, соответствующее требованиям санитарных норм.

Выводы к главе 1.

Приведена краткая характеристика района расположения литейно-механического завода. Собраны сведения о специфике производства, занимаемой площади цехов и административных, технологических помещений. Приведён состав цехов завода, обозначена категории надёжности электроснабжения.

2 Расчёт ожидаемых электрических нагрузок

2.1 Электрическая мощность, потребляемая заводским оборудованием

При расчёте потребляемой мощности электропотребления оборудованием примем для расчёта мощность равной номинальной паспортной мощности каждого электропотребителя.

Полная мощность, потребляемая из сети, определяется с учётом реактивной мощности [4].

Для единичного электроприёмника потребляемую мощность рассчитываем согласно выражениям (1), (2), (3).

$$P_p = P_n \quad (1)$$

$$Q_p = P_n \times \operatorname{tg} \varphi_n, \quad (2)$$

$$S_p = \frac{P_p + Q_p}{\cos \varphi_n} = \frac{P_n}{\cos \varphi_n}. \quad (3)$$

где P_n – номинальная активная мощность единичного электроприёмника;

$\cos \varphi_n$ – номинальный коэффициент мощности единичного электроприёмника;

P_p, Q_p, S_p – активная, реактивная и полная номинальные расчётные мощности единичного электроприёмника.

Электрическую мощность, потребляемую электропотребителем, рассчитываем с учётом потерь электроэнергии. Потери электроэнергии происходят в электродвигателях, который определяется как КПД двигателя и определяем как:

$$P_d = \frac{P_p}{\eta} \quad (4)$$

где η – КПД двигателя указан в справочной литературе или технической литературе на данное электрооборудование.

Также в расчётах учитываем потери электроэнергии в питающих кабельных линиях или шинопроводах, которые зависят от активного сопротивления проводника и рассчитываем согласно выражению (5) [10].

$$P_k = \rho \times l, \quad (5)$$

где ρ – удельное сопротивление кабеля;

l – длина кабеля.

При точном расчёте энергопотребления учитываем коэффициент использования оборудования. С целью оценочного расчёта электрической нагрузки завода принимаем расчётный коэффициент использования равный 1, и считаем, что всё оборудование работает в номинальном режиме [11].

При расчётах примем допущения:

– средний коэффициент мощности $\cos\varphi_n = 0.8$;

– средний КПД электроприёмников $\eta = 0,96$;

Номинальную (паспортную) активную мощность основных электроприёмников завода, для дальнейших расчётов заносим в таблицу 3.

В таблице 3 представлены следующие величины: P – активная мощность электроприёмника; n – количество электроприёмников; P_Σ – суммарная активная нагрузка группы электроприёмников; $P_{\text{потр}}$ – потребляемая из сети активная мощность электроприёмника.

Таблица 3 – Паспортные данные потребления энергии оборудованием механосборочного цеха №1

Наименование электрооборудования	п, шт	P, кВт	P _Σ , кВт	КПД	P _{ПОТР} , кВт
Электрическая печь сопротивления	2	30	60	0,9	66,7
Электрическая печь индукционная	3	32	96	0,8	120,0
Электродуговая печь	3	48	144	0,8	180,0
Кран мостовой	4	40	160	0,8	200,0
Плоско-шлифовальный станок	2	5	10	0,85	11,8
Радиально-сверлильный станок	2	16,2	32,4	0,85	38,1
Вертикально-сверлильный станок	2	8	16	0,85	18,8
Токарно-револьверный станок	6	25	150	0,85	176,5
Станок с ЧПУ	4	17	68	0,85	80,0
Координатно-расточный станок	2	8	16	0,8	20,0
Станок лазерной гравировки	2	4,5	9	0,9	10,0
Вентиляционная установка	4	10	40	0,8	50,0
Итого			801,4		971,8

Определяем реактивную и полную мощности электроприёмников согласно выражению (7) [12].

Реактивную мощность вычислим по формуле (6).

Все полученные значения расчётных значений заносим в таблицу 5.

$$Q_i = P_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i = P_i \cdot \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_i)^2}}{\cos \varphi_i} \quad (6)$$

$$S_i = \frac{P_i}{\cos \varphi_i} \quad (7)$$

Коэффициент потребляемой мощности зависит от коэффициента использования $K_{из}$, этот параметр включаем в таблицу 4, согласно которому определим среднюю потребляемую мощность за рабочую смену.

Таблица 4 - Реактивная, полная, мощность электроприёмников в рабочей смене

Наименование электрооборудования	$P_{\text{потр.}}$ кВт	$K_{\text{и}}$	$\cos\varphi_i$	Q_i , кВАр	S_i , кВА	$P_{\text{i см.}}$ кВт	$Q_{\text{i см.}}$ кВАр
Электрическая печь сопротивления	66,7	0,75	0,95	21,9	70,2	50,0	16,4
Электрическая печь индукционная	120,0	0,7	0,8	90,0	150,0	84,0	63,0
Электродуговая печь	180,0	0,6	0,8	135,0	225,0	108,0	81,0
Кран мостовой	200,0	0,6	0,7	204,0	285,7	120,0	122,4
Плоско-шлифовальный станок	11,8	0,6	0,7	12,0	16,8	7,1	7,2
Радиально-сверлильный станок	38,1	0,6	0,7	38,9	54,5	22,9	23,3
Вертикально-сверлильный станок	18,8	0,6	0,7	19,2	26,9	11,3	11,5
Токарно-револьверный станок	176,5	0,6	0,7	180,0	252,1	105,9	108,0
Станок с ЧПУ	80,0	0,6	0,7	81,6	114,3	48,0	49,0
Координатно-расточный станок	20,0	0,1	0,5	34,6	40,0	2,0	3,5
Станок лазерной гравировки	10,0	0,4	0,9	4,8	11,1	4,0	1,9
Вентиляционная установка	50,0	0,7	0,8	37,5	62,5	35,0	26,3
Итого	971,8			859,7	1309,0	598,1	513,6

Потери электроэнергии в питающих кабельных линиях не должны превышать 5%, с учётом этого условия максимальную активную потребляемую мощность электроприёмника определяем согласно выражению (8).

$$S_{\text{д}} = \frac{S}{0,95} = \frac{1309}{0,95} = 1377 \text{ кВт.} \quad (8)$$

Потребляемую мощность для остальных производственных зданий и сооружений завода рассчитываем аналогичным методом и полученные расчётные данные заносим в таблицу 5.

Таблица 5 – Расчётная потребляемая мощность для зданий ЛМЗ

Наименование здания и сооружения	$S_{i\text{ см,}}$ кВА	$P_{i\text{ см,}}$ кВт	$Q_{i\text{ см,}}$ кВАр
Литейный цех и механо-сборочный цех № 1	1309,0	598,1	513,6
Механо-сборочный цех № 2 (механо-сборочное производство)	790,0	632	474
Хозяйственно-строительный корпус	240	192	144
Складское хозяйство	170	136	102
Главное административное здание	97,2	84,6	63,4
Гараж	230	184	138
Итого	2836,2	1826,7	1435

Для административных помещений расчётную нагрузку рассчитываем на основании укрупнённой удельной нагрузки, взятой из справочной литературы, где $P_{\text{общ.у.}}$ принимаем как $0,054 \text{ кВт/м}^2$, с $\cos\phi - 0,87$ [14].

2.2 Потребление электроэнергии для освещения производственных помещений

Важной составляющей энергозатрат предприятия является электрическое освещение производственных и бытовых помещений.

Необходимая освещённость каждого помещения должна соответствовать санитарным нормам и требованиям и зависит от его назначения.

Потребляемая мощность электрической энергии зависят от площади помещения, уровня освещённости и типа выбранных светильников. Нормы освещённости для производственных и административных помещений из нормативно-технической литературы (СНиП 23-05-95) [16].

Расчёты по определению необходимого количества светильников выполнялся с использованием программного комплекса DIALux 5.1 Light.

Для освещения литейного цеха и механо-сборочного цеха № 1, где выполняется основной этап производства, выбран светильник ДВО 2002 PRO светодиодного типа с номинальной мощностью 45 Вт и температурой

свечения 6500К и световым потоком 5400 лм. Внешний вид светильника показан на рисунке 2 и световой характеристикой, показанной на рисунке 3.



Рисунок 2 – Светильник ДВО 2002 PRO

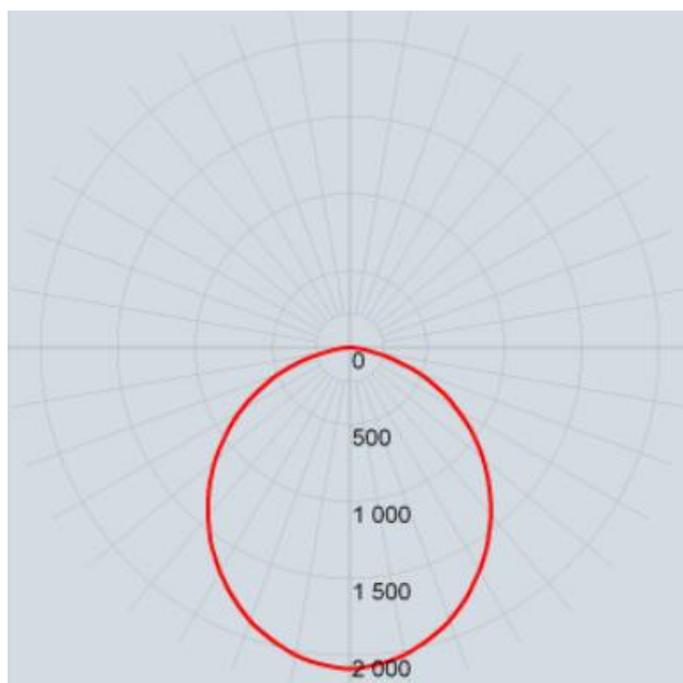


Рисунок 3 – Световая характеристика светильника ДВО 2001 PRO

Для освещения помещений административного здания и бытовых помещений цехов выбран светильник типа ДБО 5005 с номинальной мощностью 36 Вт и световым потоком 2400 лм. Внешний вид светильника показан на рисунке 4 и световой характеристикой, показанной на рисунке 5.

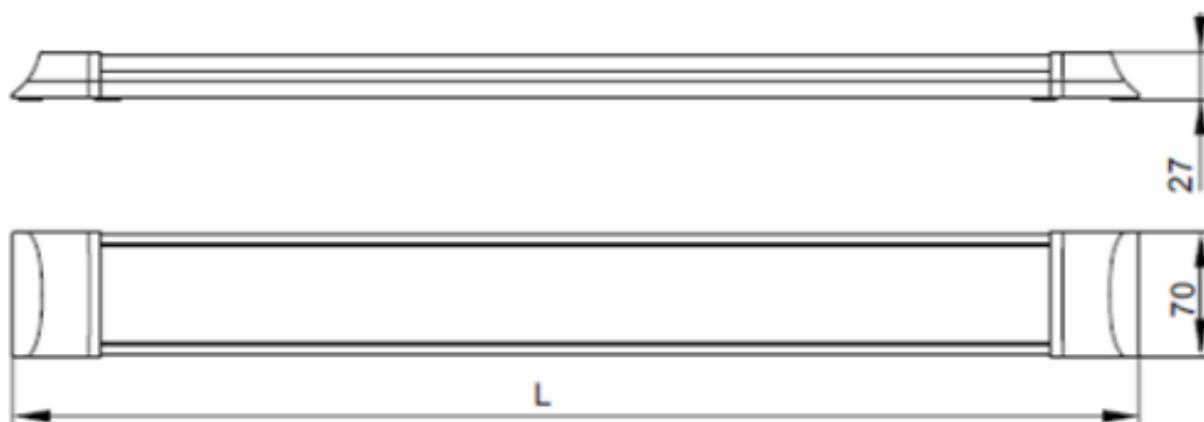


Рисунок 4 – ДБО 5004 светодиодный 36Вт

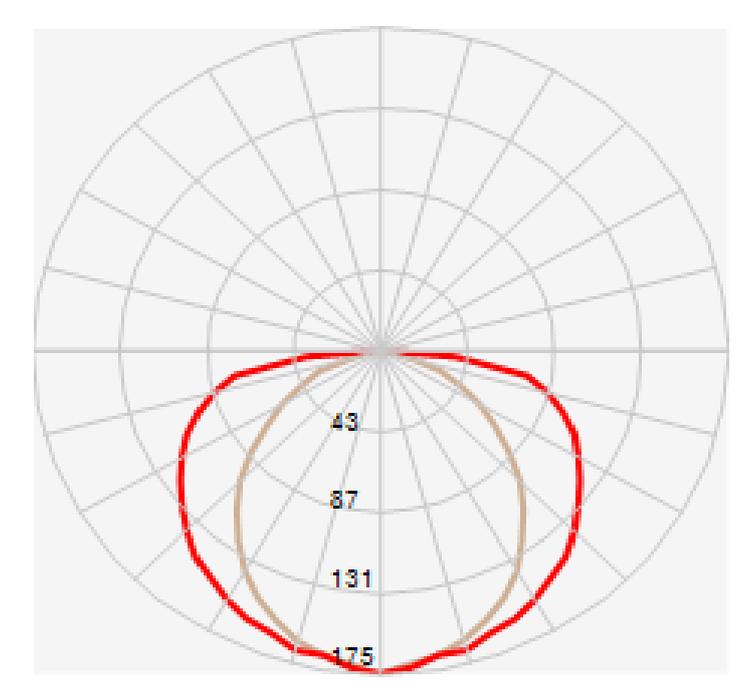


Рисунок 5 – Световая характеристика светильника ДБО 5004

Выбранные светодиодные светильники серии ДБО предназначены для работы в однофазной электросети переменного тока с напряжением 230 В и частотой 50 Гц и соответствуют всем требованиям ГОСТ ИЕС 60598-2-1.

Данные светильники применяются для внутреннего освещения жилых и общественных, производственных помещений.

Расчётное количество светильников для установки внутри производственного помещения, выполняем по методу коэффициента использования [17].

Определим площадь помещения, которое необходимо осветить по выражению (9).

$$S = a \times b. \quad (9)$$

где S – площадь освещения, м²;

a – длина помещения, м;

b – ширина помещения, м.

Коэффициенты отражения света от пола, стен и потолка принимаем при расчёте соответственно равными 30%, 50%, 80%.

Расчётное количество светильников определяем по выражению 10:

$$K = \frac{E \times S \times K_3}{\eta \times \Phi_{л}}, \quad (10)$$

где E – требуемая освещённость;

S – площадь освещённости;

K_3 – коэффициент запаса;

η – коэффициент использования;

$\Phi_{л}$ – световой поток.

Активную мощность, потребляемую системой освещения, рассчитываем по выражению (11):

$$P_{\text{осв}} = \sum K_i \times P_i, \quad (11)$$

Реактивная мощность системы освещения рассчитываем по выражению (12).

$$Q_{\text{осв}} = P_{\text{осв}} \times \text{tg}\varphi, \quad (12)$$

Реактивная мощность системы освещения рассчитываем по выражению (13)

$$S_{\text{осв}} = \frac{P_{\text{осв}}}{\cos\varphi}. \quad (13)$$

Расчётные данные выбранных светильников, технические характеристики помещений, указанных в таблице 6, вносим в программу DIALux.

Таблица 6 – Технические характеристики производственных помещений

Наименование здания и сооружения	S помещения, м ² .		Освещённость	
	тех-кое	админ-ное	тех-кое	админ-ное
Литейный цех (литейное производство)	1008	72	300	200
Механо-сборочные цех № 1 (механо-сборочное производство)	1440	288	500	200
Механо-сборочные цех № 2 (механо-сборочное производство)	1360	320	500	200
Хозяйственно-строительный корпус	400	36	300	200
Складское хозяйство	1400	80	150	200
Главное административное здание	0	1800	-	200
Гараж	840	80	300	200

Полученные результаты для дальнейших расчётов приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Энергозатраты на освещение

Наименование здания и сооружения	Р свет., Вт		кол-во свет., шт.		$\sum P_{\text{осв.}}$, кВт	$\sum S_{\text{осв.}}$, кВА
	тех-кое	админ-ное	тех-кое	админ-ное		
Литейный цех (литейное производство)	45	12	152	14	7	7
Механо-сборочные цех № 1 (механо-сборочное производство)	45	12	220	60	10	11
Механо-сборочные цех № 2 (механо-сборочное производство)	45	12	206	64	10	11
Хозяйственно-строительный корпус	36	12	160	8	6	6
Складское хозяйство	36	12	212	16	8	8
Главное административное здание	12	12		360	4	4
Гараж	36	12	130	16	5	5
Итого					50	53

В результате расчётов получена активная мощность. При расчёте полной мощности, потребляемой светильниками, принимаем $\cos\varphi = 0.95$ и рассчитываем по выражению (14), (15).

$$S_{\text{осв}} = \frac{P_{\text{осв}}}{\cos\varphi}. \quad (14)$$

$$S_{\text{осв п}} = S_{\text{осв}} \times 1,05. \quad (15)$$

Также при расчёте учтём потери в кабельной линии равные 5 %.

2.3 Построение картограммы электрических нагрузок

Для определения места расположение центра нагрузок завода, построим картограмму электрических нагрузок [18].

Расчётные данные активной электрической мощности, потребляемой электрооборудованием и осветительными приборами производственных зданий и административного корпуса приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Активная электрическая мощность, потребляемая цехами завода

Наименование здания и сооружения	Мощность, потр. оборудованием, кВт	Мощность, потребляемая для освещения, кВт	Общая потребляемая мощность, кВт
Литейный цех и механо-сборочные цех № 1	1309,0	185	1494
Механо-сборочные цех № 2 (механо-сборочное производство)	790,0	105,7	895,7
Хозяйственно-строительный корпус	240	61,6	301,6
Складское хозяйство	170	823,6	993,6
Главное административное здание	97,2	45,5	142,7
Гараж	230	51	281
Итого	2836,2	531,8	3368

При построении картограммы нагрузок вычисляем корень из потребляемой мощности каждого цеха и рисуем круги, диаметр которых пропорционален $\sqrt{P_i}$.

Определяем координаты центра нагрузок завода согласно выражениям (17).

$$x_c = \frac{\sum_i P_i x_i}{\sum_i P_i}; \quad y_c = \frac{\sum_i P_i y_i}{\sum_i P_i}. \quad (17)$$

где $\sum_i P_i$ – суммарная мощность;

x_i и y_i – координаты i -го потребителя.

Все полученные значения заносим в таблицу 9 и отображаем на рисунке 6.

Таблица 9 – Координаты условного центра электрических нагрузок

Наименование здания и сооружения	Общая потребляемая мощность, кВт	x_i	y_i
Литейный цех и механо-сборочные цех № 1	1494	130	80
Механо-сборочные цех № 2	895,7	70	110
Хозяйственно-строительный корпус	301,6	140	120
Складское хозяйство	993,6	180	120
Главное административное здание	142,7	145	45
Гараж	281	65	30
Центр нагрузок		126	95

На рисунке 6 представим картограмму нагрузок.

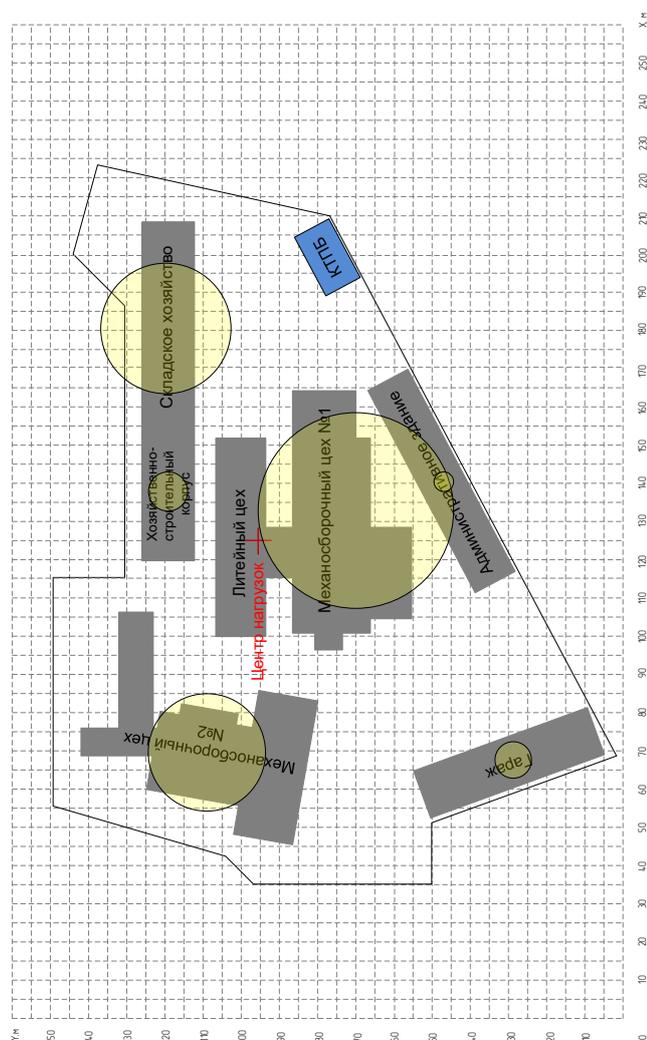


Рисунок 6 – Картограмма нагрузок

Выбираем место для размещения трансформаторной подстанции с учётом рассчитанного центра электрической нагрузки и места расположения зданий завода со смещением в сторону питающей линии электропередач. Наиболее оптимальным местом размещения силовых трансформаторов является рядом с Административным зданием со стороны источника питания и главными воротами, что даст беспрепятственный доступ к ТП для технического обслуживания.

Для дальнейших расчётов определим, что на заводе присутствуют потребители I и II категории надёжности, в связи с этим применяем к расчёту двухтрансформаторную схему питания и распределим потребителей электроэнергии поровну на каждый трансформатор для равномерного распределения нагрузки [19].

Полученные расчётные данные распределения потребителей Литейно-механосборочном цех № 1 занесены в таблицу 10.

Таблица 10 – Распределение электроприёмников по секциям в щитовой литейно-механосборочном цехе № 1

1 С-0,4				2 С-0,4			
Электроприёмники	S потр, кВА	n, шт.	№ ШРА	Электроприёмники	S, кВА	n, шт.	№ ШРА
Электрическая печь сопротивления	66,7	2	1	Электродуговая печь	180	3	2
Электрическая печь индукционная	120	3		Токарно-револьверный станок	176,5	6	4
Станок с ЧПУ	200	4	3	Радиально-сверлильный станок	38,1	2	6
				Плоско-шлифовальный станок	11,8	2	
Вертикально-сверлильный станок	18,8	2		Координатно-расточный станок	20	2	
				Станок лазерной гравировки	10	2	
Кран мостовой	80	4	5	Вентиляционная установка	50	4	8

Аналогичным образом выполним распределение потребителей производственных цехов по секциям между трансформаторами в КТПБ.

2.4 Расчёт нагрузок подключённых к шинам распределительных устройств

Для правильного выбора распределительных шин выполним расчёт электроэнергии, распределяемой каждым ШРА [20].

Максимальную мощность определяем сумма нормативных мощностей всех электроприёмников, если бы они были включены одновременно [18].

Сменную мощность рассчитываем с учётом реальной загрузки оборудования. Вычисления выполняем по выражениям 18, 19, 20, 21 для потребителей, подключённых к ШРА1:

$$P_{Н(ШРА1)} = \sum P_{ГР} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 186,7 \text{ кВт.} \quad (18)$$

$$P_{СМ(ШРА1)} = \sum P_{СМ(1)} + P_{СМ(2)} + P_{СМ(3)} + P_{СМ(4)} + P_{СМ(5)} = 143 \text{ кВт.} \quad (19)$$

$$Q_{СМ(ШРА1)} = \sum Q_{СМ(1)} + Q_{СМ(2)} + Q_{СМ(3)} + Q_{СМ(4)} + Q_{СМ(5)} = 74 \text{ кВАр.} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} S_{СМ(ШРА1)} &= \sqrt{\sum P_{СМ(ШРА1)}^2 + \sum Q_{СМ(ШРА1)}^2} = \\ &= \sqrt{134^2 + 79,4^2} = 155,7 \text{ кВА} \end{aligned} \quad (21)$$

Коэффициент использования электроэнергии для ШРА1 вычислим по выражению (22).

$$K_{и\text{ ср}} = \frac{\sum P_{СМ(ШРА1)}}{\sum P_{Н(ШРА1)}} = \frac{134}{186,7} = 0,72 \quad (22)$$

Определим эффективное число электроприемников.

$$m = \frac{P_{Н.нб}}{P_{Н.нм}} = \frac{32}{30} = 1,07 \quad (23)$$

где m – показатель силовой сборки в группе электроприёмников.

Так как при расчёте $m < 3$, то эффективное число электроприемников находим по формуле $n_э = n = 5$.

Коэффициент максимума активной нагрузки вычислим по выражению 24.

$$K_M = 1 + \frac{1,5}{\sqrt{n_э}} \times \sqrt{\frac{1 - K_{и.ср}}{K_{и.ср}}} = 1 + \frac{1,5}{\sqrt{5}} \times \sqrt{\frac{1 - 0,72}{0,72}} = 1,4 \quad (24)$$

Рассчитаем коэффициент максимума реактивной нагрузки, используя эмпирическое правило: если $n_э \leq 10$, то $K'_M = 1.1$, а если $n_э > 10$, то $K'_M = 1$.

Поскольку $n_э = 6$, $K'_M = 1.1$.

Максимальная активную нагрузку на ШРА1 составит:

$$P_{Mcm(ШРА1)} = K_M \cdot P_{cm(ШРА1)} = 1,4 \times 134 = 187,6 \text{ кВт.} \quad (25)$$

Максимальную реактивную нагрузку на ШРА1 рассчитаем как:

$$Q_{Mcm(ШРА1)} = K_M \cdot Q_{cm(ШРА1)} = 1,4 \times 79,4 = 111,6 \text{ кВт.} \quad (25)$$

Максимальная полная нагрузка на ШРА1:

$$S_{Mcm(ШРА1)} = \sqrt{P_{Mcm(ШРА1)}^2 + Q_{Mcm(ШРА1)}^2} = 227,4. \quad (27)$$

$$\cos\varphi = \frac{P_{cm(ШРА1)}}{S_{cm(ШРА1)}} = \frac{187,6}{218,1} = 0,86. \quad (28)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q_{cm(ШРА1)}}{S_{cm(ШРА1)}} = \frac{111,16}{218,1} = 0,5. \quad (29)$$

Аналогичным образом выполняем расчёты для других остальных ШРА и полученные расчётные значения заносим в таблицу 10.

Максимальные токовые значения определим по выражению (30).

$$I_{M(\text{ШРА})} = \frac{S_{M(\text{ШРА})}}{\sqrt{3} \times U}, \quad (30)$$

$$I_{M(\text{ШРА1})} = \frac{218,1}{\sqrt{3} \times 0,4} = 315 \text{ А.}$$

Результаты расчётов занесём в таблицу 11.

Таблица 11 – Результаты расчёта нагрузок на ШРА

№ ШРА	P _н , кВт	P _{см} , кВт	Q _{см} , кВАр	S _{см} , кВА	m	K _{и.ср.}	K _м	P _{м.см.} , кВт	Q _{м.см.} , кВАр	S _{м.см.} , кВА	cosφ	tgφ	I _м , А
1С-0,4													
1	186,7	134	79,4	155,7	1,1	0,72	1,4	187,6	111,16	218,1	0,86	0,5	315
3	98,8	59,3	60,5	84,7	2,1	0,6	1,5	88,95	90,75	127,1	0,70	0,7	183
5	200	120	122,4	171,4	1	0,6	1,6	192	195,84	274,3	0,70	0,7	396
2С-0,4													
2	180	108	81	135	1	0,6	1,7	183,6	137,7	229,5	0,80	0,6	331
4	176,5	105,9	108	151,3	1	0,6	1,5	158,85	162	226,9	0,70	0,7	327
6	79,9	35,9	35,9	51,2	3,6	0,45	1,6	57,44	57,497	81,3	0,71	0,7	117
8	50	35	26,3	43,8	1	0,7	1,5	52,5	39,45	65,7	0,80	0,6	95

Результаты расчётов на шинах низкого напряжения питающих трансформаторов представлены в таблице 12 и 13.

Таблица 12 – Мощность на ШНН питающих трансформаторов

P _{см} , кВт	Q _{см} , кВАр	S _{см} , кВА	P _м , кВт	Q _м , кВАр	S _м , кВА
598	514	788	921	794	1216

Таблица 13 – Результаты расчёта нагрузок для зданий завода

Наименование здания и сооружения	P_M , кВт	Q_M , кВАр	S_M , кВА
Литейный цех и механо-сборочный цех № 1	921	794	1216
Механо-сборочный цех № 2 (механо-сборочное производство)	632	474	790,0
Хозяйственно-строительный корпус	192	144	240
Складское хозяйство	136	102	170
Главное административное здание	84,6	63,4	97,2
Гараж	184	138	230
Итого	2149	1715	2749

При выполнении расчёта на шинах низкого напряжения питающих трансформаторов учтена максимальная и сменная мощность потребления электроэнергии.

Выводы по разделу 2.

Выполнены расчёты потребляемой мощности как для отдельного цеха, так и для суммарного потребления электроэнергии всего завода, включая осветительные приборы.

Выбраны светильники согласно уровню освещённости и определено их количество для создания освещённости, соответствующей нормативным требованиям.

Вычислена активная и реактивная потребляемая электрическая мощность, а также её потери в кабельных линиях. Определена суммарная мощность, потребляемая от сети.

Составлена картограмма нагрузок согласно которой определены координаты центра нагрузок на основании, которого определено место расположения подстанции.

Согласно расчётным данным составлена структурная схема электропитания, и распределены электроприёмники по секциям 0,4 кВ и ШРА для равномерного распределения нагрузки на трансформаторах

Расчитана токовая нагрузки и вычислены максимальные значения токов, проходящие через распределительные устройства.

3 Расчёт числа и установленной мощности трансформаторов на подстанции

3.1 Выбор трансформаторов

Промышленное предприятие относится ко II группе надёжности, поскольку длительный перерыв в электроснабжении может привести к большому количеству брака. Для электроснабжения промышленного предприятия, относящемуся ко второй группе надёжности, выбираем двухтрансформаторную подстанцию [21].

Предприятие располагается в городе и электроэнергию по кабелям с распределительной станции. Напряжение, поступающее на подстанцию, составляет 10кВ; оно преобразуется в 400 В.

Каждый из двух трансформатора на подстанции получает питание от отдельной секции главной понизительной подстанции, это сводит к минимуму вероятность одновременного прекращения электропитания по двум ветвям [13]. Мощность трансформаторов рассчитываем по формуле (31).

$$S_{Н.Т} = \frac{S_{общ}}{N \times K_3} = \frac{2749}{2 \times 0,72} = 1909 \text{ кВА} \quad (31)$$

В случае аварии или планового техобслуживания одного из трансформаторов – его электроприёмники подключаются к другому. При этом оставшийся трансформатор работает в режиме допустимой перегрузки.

Потери в трансформаторе вычислим по формулам (32), (33), (34).

$$\Delta P_T = 0,02 \times S_M = 0,2 \times 1909 = 382 \text{ кВт}, \quad (32)$$

$$\Delta Q_T = 0,01 \times S_M = 0,01 \times 1909 = 190 \text{ кВАр}, \quad (33)$$

$$\Delta S_T = \sqrt{\Delta P_T^2 + \Delta Q_T^2} = 427 \text{ кВА}. \quad (34)$$

Расчётную мощность с учётом потерь вычисляется по формуле (35).

$$S_T = 0,7(S_{M(\text{ШНН})} + \Delta S_T) = 0,7 \times (2749 + 427) = 2222. \quad (35)$$

где 0,7 – это коэффициент загрузки двух трансформаторной подстанции.

Выбираем трансформатор ТМГ (трансформатор масляный, герметичный) 2500 кВА 10/0,4 кВ со значением мощности ближайшим более высоким [22].

Технические характеристики силового выбранного трансформатора указаны в таблице 14.

Таблица 14 – Технические характеристики трансформатора ТМГ 2500 кВА 10/0,4 кВ

Номинальная мощность, кВА	2500
Номинальное напряжение ВН/НН, кВ	10 / 0,4
Схема и группа соединения обмоток	Y/Yн-0 Д/Yн-11
Потери холостого хода, кВт	4,6
Потери короткого замыкания, кВт	24,5
Ток холостого хода, %	1
Напряжение короткого замыкания, %	5,5

Выбранные трансформаторы предназначены для установки в РУ открытого и закрытого типа на трансформаторных подстанциях в городских и сельских электрических сетях, промышленных предприятиях. Отличительной особенностью данных трансформаторов является герметичное исполнение без применения расширительного бака.

3.2 Расчёт и выбор компенсирующего устройства

Для уменьшения реактивных потерь выбираем компенсирующее устройство. Для выбора оптимального компенсирующего устройства выполним расчёт активных и реактивных нагрузок, подключённых к каждому трансформатору. [23]

Для определения потерь электроэнергии в каждом трансформаторе применим расчётную мощность с учётом номинальной загрузки трансформаторов на 70 % и $\cos\varphi = 0,8$, $\operatorname{tg}\varphi = 0,75$ используя формулы (36), (37). [29]

$$\Delta P_T = P_{xx} + K_3^2 \times P_{кз}, \quad (36)$$

$$\Delta P_T = 4,6 + 0,8^2 \times 24,5 = 20,3 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_T = (i_0 + K_3^2 \times U_{кз}) \times \frac{S_H}{100}, \quad (37)$$

$$\Delta Q_T = (0,7 + 0,8^2 \times 5,5) \times \frac{2500}{100} = 105,5 \text{ кВАр}.$$

На стороне высокого напряжения трансформатор каждый трансформатор потребляет мощность от головной подстанции:

$$P_{P1} = P_{P\Sigma} + P_{T\Sigma}, \quad (38)$$

$$P_{P1} = 1400 + 20,3 = 1420,3 \text{ кВт},$$

$$Q_{P1} = Q_{P\Sigma} + Q_{T\Sigma}, \quad (39)$$

$$Q_{P1} = 1050 + 105,5 = 1155,5 \text{ кВАр},$$

На трансформаторе желательно скомпенсировать реактивную мощность до $\cos\varphi = 0,95$, $\operatorname{tg}\varphi = 0,33$.

$$Q_{кр} = a \times P_M (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k) \quad (40)$$

где « $Q_{кр}$ » – расчётная мощность компенсирующего устройства, кВАр;

α – коэффициент, учитывающий повышение коэффициента мощности $\cos\varphi$ естественным способом, принимается $\alpha = 0,9$ » [22];
 $\operatorname{tg} \varphi$, $\operatorname{tg} \varphi_k$ – коэффициенты реактивной мощности до и после компенсации.

Фактический коэффициент реактивной мощности составит:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{ф}} = \operatorname{tg} \varphi - Q_{\text{к.ст.}} / a \times P_M \quad (41)$$

где $Q_{\text{к.ст.}}$ – стандартное значение мощности выбранного компенсирующего устройства КУ, кВАр.

$$Q_{\text{кр}} = 0,9 \times 1420 \times 0,75 \times 0,33 = 316 \text{ кВАр,}$$

Выбираем две конденсаторные установки типа КРМ-0,4-175-7 УЗ [24]. Данная КУ предназначена для электроприемников с переменным потреблением реактивной мощности. КУ выполнена на микропроцессорном регуляторе с автоматическим режимом отслеживания изменения потребления реактивной мощности и релейными выходами. Коммутация конденсаторной батареи осуществляется электромеханическими контакторами с предварительно включаемыми токоограничивающими резисторами, включённых для уменьшения пусковых токов.

Технические характеристики выбранной КУ указаны в таблице 15.

Таблица 15 – Технические характеристики КРМ-0,4-175-7 УЗ

Номинальная мощность, кВАр	175
Мощность минимальной ступени, кВАр	25
Конфигурация ступеней	7×25
Габариты, мм	2150 × 800 × 450

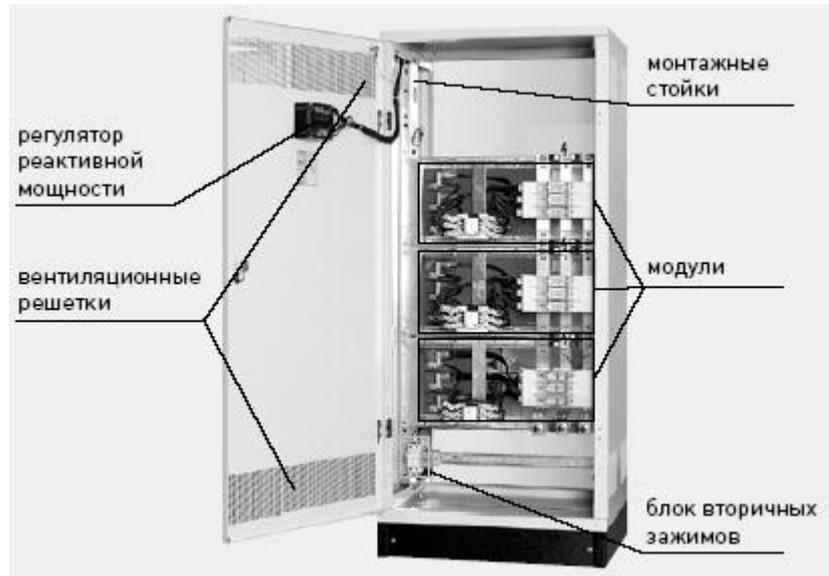


Рисунок 7 – Внешний вид установки КРМ-0,4-175-7 УЗ

Подключение к сети конденсаторной установки показано на рисунке 8.

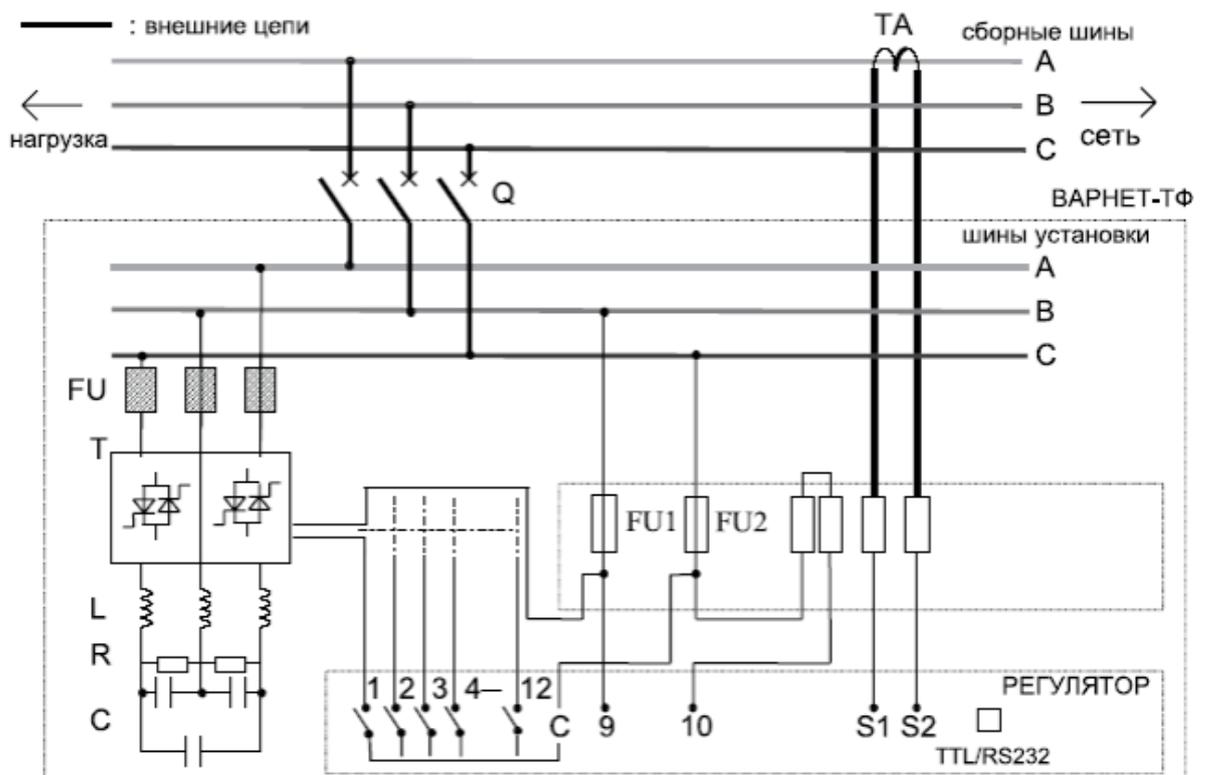


Рисунок 8 – Подключение конденсаторной установки к сети

Выводы по разделу 3.

В данном разделе на основании произведённых расчётов потребляемой мощности литейно-механическим заводом учитывая коэффициент загрузки трансформаторов в аварийном режиме работы и категории электроприёмников по надёжности электроснабжения равный 1,4, определена необходимая номинальная мощность ПС.

Принято для установки двухтрансформаторная подстанция с масляными герметичными трансформаторами номинальной мощностью одного трансформатора 2500 кВА, типа ТМГ 2500 кВА 10/0,4 кВ.

Также выполнено распределение электроприёмников по секциям 0,4 с условием равномерной загрузки трансформаторов.

На стороне низкого напряжения на шинах каждого трансформатора произведён расчёт автоматической конденсаторной установки для централизованной компенсации реактивной мощности с расчётной мощностью 2×75 кВАр, с возможностью регулирования её мощности шагом регулирования 7×25 кВАр. Конденсаторная установка включается при появлении тока через нагрузки.

Подключение конденсаторных установок позволяет уменьшить потери электроэнергии.

4 Электрическая схема электроснабжения

4.1 Выбор и обоснование схемы

В соответствии с расчётами, выбираем двухтрансформаторную подстанцию 2КТПБ-2500/10/0,4-03-У1 показанную на рисунок 9 [25].

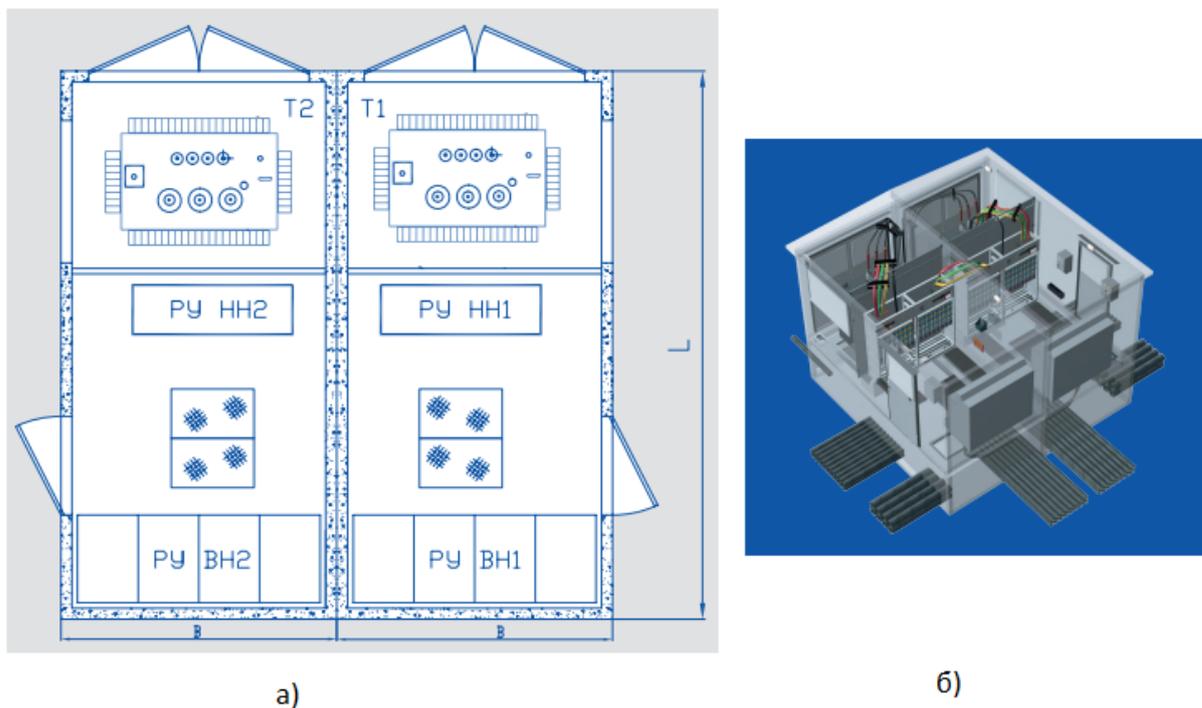


Рисунок 9 – План (а) и внешний вид (б) подстанции 2КТПБ

«Требования к надежности соответствуют ГОСТ 20.39.312. Вероятность безотказной работы за наработку 8760 часов – не ниже 0,98. Срок службы до списания – 30 лет, при условии проведения технического обслуживания и (или) замены аппаратуры и ее комплектующих изделий в соответствии с указаниями инструкции по эксплуатации на КТПБ. Гарантийный срок хранения — не более 6 месяцев при условии соблюдения требований ГОСТ 23216 в части консервации» [22].

Электрическая схема подстанции, с присоединёнными конденсаторными установками, приведена на рисунке 11.

На подстанцию подаётся напряжение по двухцепной линии с номинальным напряжением 10 кВ. Каждый трансформатор запитан от своей линии через свой выключатель. Для обеспечения надёжности электроснабжения потребителей электроэнергии при отключении одной из ЛЭП 10 кВ на стороне 0,4 кВ КТПБ предусмотрен секционный автомат SAC для автоматического включения резерва (АВР). В случае отключения одного из трансформаторов питание будет автоматически подаваться с оставшегося в работе трансформатора.

Электроснабжение цехов, склада и административного здания выполнено от КТПБ для обеспечения надёжности выполнено по радиальной схеме [26].

В нормальном режиме работы от двух трансформатор секционные автоматы по стороне 0,4 в КТПБ и в «Щитовых» цеха или административного здания отключены, при аварийном отключении одного из вводов в Щитовой автоматически сработает АВР на включение секционного автомата и электроснабжение потребителей восстановится. Возврат схемы в нормальный режим работы при появлении напряжения на отключившемся вводе возможен в автоматическом или в ручном режиме работы.

Также при такой схеме электроснабжения обеспечивается ремонтный режим трансформаторов без обесточивания потребителей.

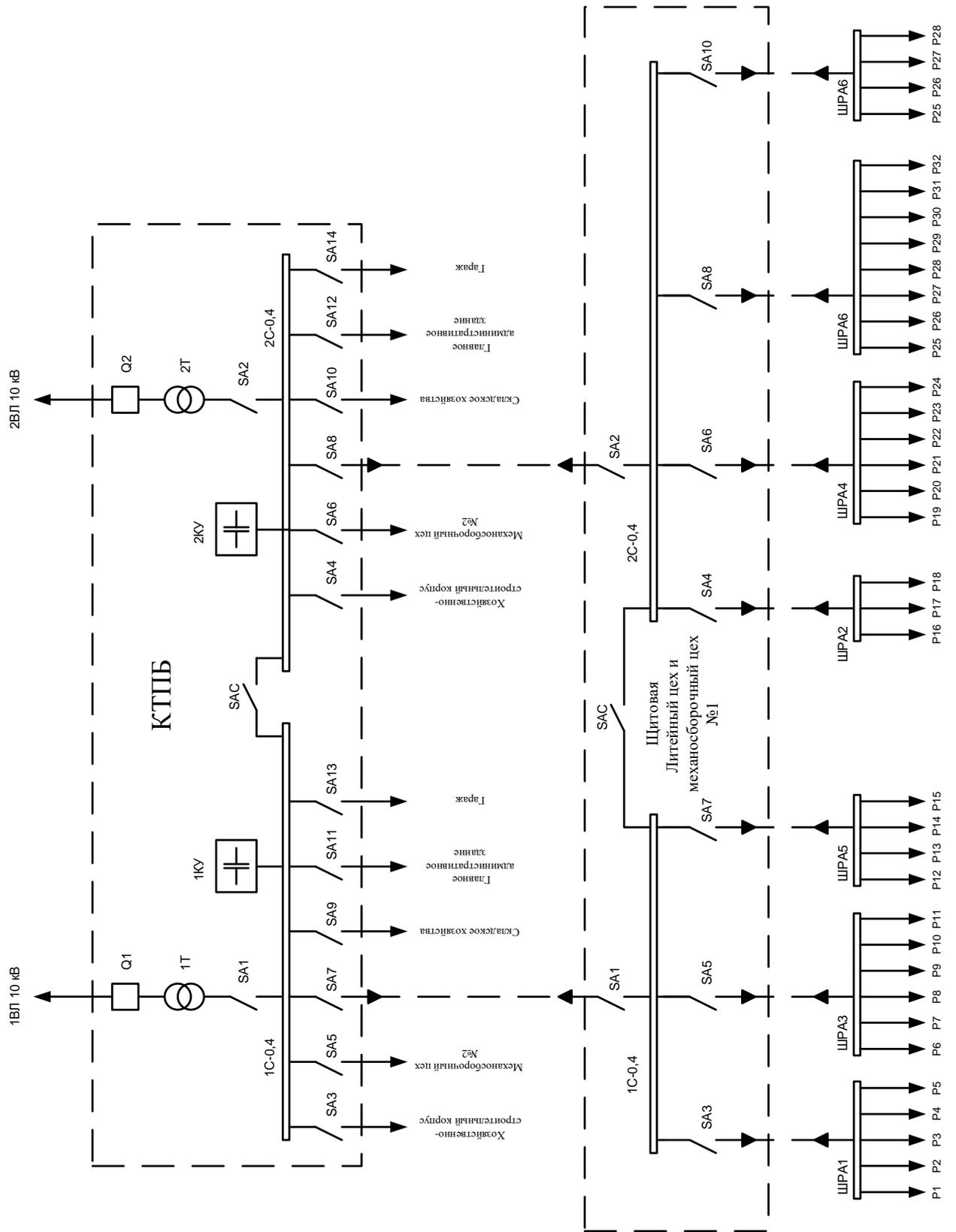


Рисунок 11 – Электрическая схема электроснабжения предприятия

Трансформаторный отсек отделен от других помещений КТПБ защитной перегородкой, для защиты персонала от поражения током и от возможных последствий короткого замыкания 28. Предусмотрена возможность осмотра трансформаторных камер при наличии напряжения, для этого на токоведущих частях силовых трансформаторов имеются съемные изолированные барьеры, устанавливаемые на высоте 1,2 м.

На стороне высокого напряжения установлены трансформаторы тока. Они нужны для учёта потребляемой электроэнергии, а также для подачи информации схемам защиты от короткого замыкания.

В схеме предусмотрены блокировки:

- блокировка, не допускающая включения или отключения разъединителей при включенном выключателе первичной цепи;
- блокировка между выключателем нагрузки или разъединителем и заземляющим разъединителем, не позволяющая включать выключатель нагрузки или разъединитель при включенном заземляющем разъединителе и включать заземляющий разъединитель при включенном выключателе нагрузки или разъединителе;
- блокировка, не позволяющая замены предохранителей ВН без включения заземляющих ножей;
- блокировка между выключателями нагрузки и разъединителями, присоединенными к одной системе шин, и заземляющим разъединителем этих шин, не позволяющая включать выключатели нагрузки и разъединители при включенном заземляющем разъединителе шин и включать заземляющий разъединитель шин при включенном хотя бы одном выключателе нагрузки или разъединителе [27].

4.2 Выбор распределительных шин и проводников

Для подачи напряжения 0,4 кВ к распределительным пунктам и к шинопроводам, а также к станкам выбираем кабель марки АВВГнг.

Расчётный ток на шинах между трансформатором и секцией 0,4 в КТПБ:

$$I_T = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_{н.Т}},$$

где S_T – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$U_{н.Т}$ – номинальное напряжение трансформатора принимаем как 0,4 кВ.

Линия к РУ-0,4, ШРА:

$$I_{РУ} = \frac{S_{м.РУ}}{\sqrt{3} \times U_{н.РУ}}.$$

Линия к для каждого электроприемника:

$$I_p = \frac{\sqrt{P_H^2 + (P_H \times \operatorname{tg}\varphi)^2}}{\sqrt{3}U_H}. \quad (50)$$

Условие выбора сечения проводника:

$$I_p \leq I_{\text{доп}} \quad (51)$$

где $I_{\text{доп}}$ - длительно допустимый ток для трехжильного кабеля, А.

Расчётные значения для шин КТПБ указаны в таблице 16

Результаты расчёта и выбор кабелей приводятся в таблице 17.

Таблица 16 – Параметры токопроводов для питания нагрузок

Элемент цепи	I_p , А	$I_{доп}$, А	Размер шины на фазу, мм	Тип шинопровода	R, Ом/км	X, Ом/км
Шины от Т к С-0,4 ТПБ	3600	4000	$2 \times (160 \times 10) + 2 \times 640$	ШМА-68-Н	0,013	0,02
КЛ от С-0,4 ТПБ к РЩ-0,4	1755	2000	2×500	-	-	-
ШРА-1	315	400	60×5	ШРА-73	0,13	0,1
ШРА-3	183	250	35×5	ШРА-73	0,2	0,1
ШРА-5	396	400	60×5	ШРА-73	0,13	0,1
ШРА-2	331	400	60×5	ШРА-73	0,13	0,1
ШРА-4	327	400	60×5	ШРА-73	0,13	0,1
ШРА-6	117	250	35×5	ШРА-73	0,2	0,1
ШРА-8	95	150	25×5	ШРА-73	0,3	0,1

Кабели к электроприёмникам приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Кабели для электроприемников

Наименование оборудования	$S_{потр}$ кВА	I_p , А	$I_{доп}$, А	Жилы кабеля АВВГнг
Электрическая печь сопротивления	31,6	45,6	50	$3 \times 6 + 1 \times 4$
Электрические печи индукционные	40,0	57,7	70	$3 \times 10 + 1 \times 6$
Электродуговые печи	60,0	86,6	90	$3 \times 16 + 1 \times 10$
Краны мостовые	57,1	82,5	90	$3 \times 16 + 1 \times 10$
Плоско-шлифовальные станки	7,1	10,3	24	$3 \times 2,5 + 1 \times 2,5$
Радиально-сверлильный станок	23,1	33,4	38	$3 \times 4 + 1 \times 2,5$
Вертикально-сверлильные станки	11,4	16,5	24	$3 \times 2,5 + 1 \times 2,5$
Токарно-револьверные станки	35,7	51,5	70	$3 \times 10 + 1 \times 6$
Станок с ЧПУ	24,3	35,1	38	$3 \times 4 + 1 \times 2,5$
Координатно-расточный станок	16,0	23,1	38	$3 \times 4 + 1 \times 2,5$
Станок лазерной гравировки	5,0	7,2	24	$3 \times 2,5 + 1 \times 2,5$
Вентиляционная установка	12,5	18,0	24	$3 \times 2,5 + 1 \times 2,5$

На основании полученных расчётных данных проведём выбор автоматических выключателей [28].

4.3 Выбор автоматических выключателей

Автоматические выключатели и расцепители выбираем на одну ступень больше максимального тока [8]. Выбранные АВ приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Автоматические выключатели для коммутации тока в нагрузках

Наименование оборудования	I_p , А	Автоматический выключатель
ШРА-1	315	ВА-51-35М2-500А
ШРА-3	183	ВА-51-35М2-250А
ШРА-5	396	ВА-51-35М2-500А
ШРА-2	331	ВА-51-35М2-500А
ШРА-4	327	ВА-51-35М2-500А
ШРА-6	117	ВА-51-35М2-1600А
ШРА-8	95	ВА-51-35М2-125А
Электрическая печь сопротивления	45,6	ВА-51-35М2-63А
Электрические печи индукционные	57,7	ВА-51-35М2-80А
Электродуговые печи	86,6	ВА-51-35М2-125А
Краны мостовые	82,5	ВА-51-35М2-125А
Плоско-шлифовальные станки	10,3	ВА-51-35М2-20А
Радиально-сверлильный станок	33,4	ВА-51-35М2-50А
Вертикально-сверлильные станки	16,5	ВА-51-35М2-25А
Токарно-револьверные станки	51,5	ВА-51-35М2-80А
Станок с ЧПУ	35,1	ВА-51-35М2-50А
Координатно-расточный станок	23,1	ВА-51-35М2-32А
Станок лазерной гравировки	7,2	ВА-51-35М2-16А
Вентиляционная установка	18,0	ВА-51-35М2-25А

Выводы к разделу 4.

Для электроснабжения предприятия высокое напряжение 10 кВ преобразуется в 0,4 кВ на подстанции 2КТПБ-400/10/0,4-03-У1. Напряжение 0,4 кВ подаётся на шинопроводы секций и распределительных шкафов. На каждой ступени передачи тока установлен АВ для ручной коммутации тока и для автоматического отключения питания при возникновении повышенного тока. Определены номинальные токи от трансформаторов к шинопроводам, распределительным щитам и электроприёмникам. На основании расчётной величины токов выбраны кабели питания и АВ для защиты от КЗ. Выбранные проводники проверены на не превышение длительно допустимых токов.

5 Расчёт значений токов коротких замыканий

Для проверки автоматических выключателей выполняется расчёт токов короткого замыкания в разных точках схемы. Выберем путь от энергосистемы до электроприёмника – станка с ЧПУ (рисунок 12) [30].

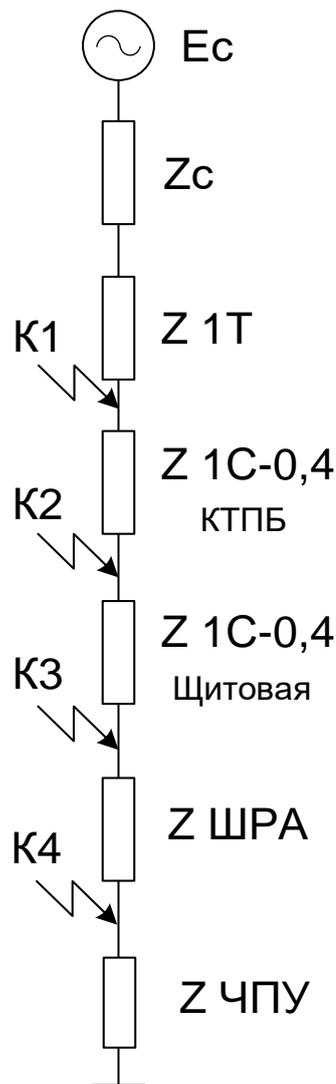


Рисунок 12 – Схема замещения, реальные элементы представлены в виде собственных реактивных сопротивлений

Определим параметры схемы замещения. Сделаем допущения: базовое напряжение примем равным 0,4 кВ, мощность энергосистемы 10000 кВА.

Сопротивление энергосистемы:

$$Z_c = \frac{U_6^2}{S_c} = \frac{0,16}{10^7} = 1,6 \text{ мОм} \quad (52)$$

Сопротивление трансформатора берём из справочника:

$$R_{1T} = 5,4 \text{ мОм};$$

$$X_{T1} = 15,2 \text{ мОм};$$

$$Z_{T1} = 16,1 \text{ мОм}$$

Шинопровод от трансформатора к 1С-0,4 в КТПБ – примем длину 5 м:

$$R_{\text{ШП}} = R_0 \times l = 0,013 \times 5 = 6,5 \text{ мОм}, \quad (53)$$

$$X_{\text{ШП}} = X_0 \times l = 0,02 \times 5 = 0,1 \text{ мОм}, \quad (54)$$

$$Z_{\text{ШП}} = \sqrt{R_{\text{ШП}}^2 + X_{\text{ШП}}^2} = 6,5 \text{ мОм}, \quad (55)$$

Кабельная линия от 1С-0,4 КТПБ к 1С-0,4 Щитовой составляет 35 м:

$$R_{\text{КЛ1}} = R_0 \times l = 0,013 \times 35 = 4,5 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{КЛ1}} = X_0 \times l = 0,02 \times 35 = 0,7 \text{ мОм},$$

$$Z_{\text{КЛ1}} = \sqrt{R_{\text{КЛ1}}^2 + X_{\text{КЛ1}}^2} = 4,5 \text{ мОм},$$

Кабельная линия от 1С-0,4 Щитовой к ШРА1 составляет 50 м:

$$R_{\text{КЛ2}} = R_0 \times l = 0,12 \times 50 = 6 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{КЛ2}} = X_0 \times l = 0,058 \times 50 = 2,9 \text{ мОм},$$

$$Z_{\text{КЛ2}} = \sqrt{R_{\text{КЛ2}}^2 + X_{\text{КЛ2}}^2} = 6,6 \text{ мОм},$$

Кабельная линия от ШРА1 к ЧПУ составляет 8 м:

$$R_{\text{КЛЗ}} = R_0 \times l = 0,36 \times 8 = 2,88 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{КЛЗ}} = X_0 \times l = 0,15 \times 8 = 1,2 \text{ мОм},$$

$$Z_{\text{КЛЗ}} = \sqrt{R_{\text{КЛЗ}}^2 + X_{\text{КЛЗ}}^2} = 3,12 \text{ мОм},$$

5.1 Токи короткого замыкания в точке К1

Определим ток короткого замыкания в точке К1.

Ток трехфазного металлического короткого замыкания в точке К1:

$$I_{\text{К1}} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_c + Z_T + Z_{\text{ШП}})} \quad (56)$$

$$I_{\text{К1}} = \frac{400}{\sqrt{3}(1,6 + 16,1 + 6,5)} = 9,5 \text{ кА}$$

Найдём ток трёхфазного дугового КЗ

$$I_{\text{КЗ1(Д)}} = I_{\text{К1}} \times K_{\text{С1}} = 9,5 \times 0,65 = 6,1 \text{ кА} \quad (t < 0,05 \text{ с}) \quad (57)$$

$$I_{\text{КЗ1(Д)}} = I_{\text{К1}} \times K_{\text{С2}} = 9,5 \times 0,74 = 7,03 \text{ кА} \quad (t > 0,05 \text{ с}) \quad (58)$$

Определим значение трёхфазного ударного тока. Для этого найдём соотношение $R/X=5,4/15,2=0,35$. Ударный коэффициент равен 1,32 согласно графику, на рисунке 13.

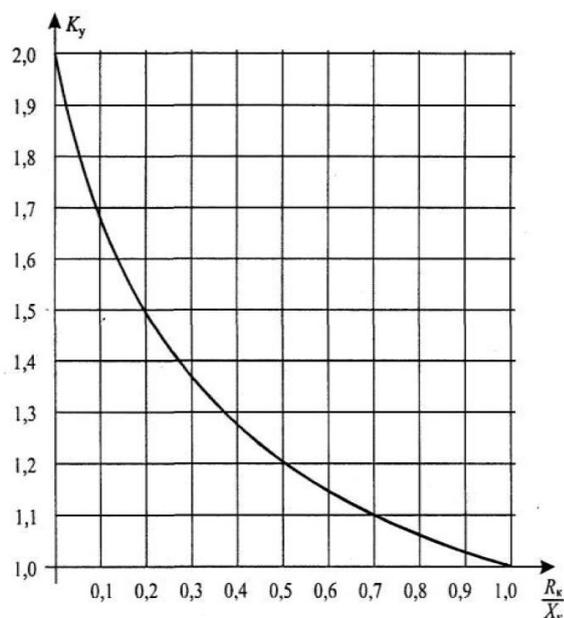


Рисунок 13 – Зависимость $K_y = R_k/X_k$

$$I_y = \sqrt{2} \times K_{уд} \times K_1 = \sqrt{2} \times 1,32 \times 9,5 = 17,7 \text{ кА} \quad (59)$$

5.2 Токи короткого замыкания в точке К2

Определим ток короткого замыкания в точке К2.

Ток трёхфазного металлического короткого замыкания в точке К2:

$$I_{K2} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_c + Z_T + Z_{шп} + KЛ1)} \quad (60)$$

$$I_{K2} = \frac{400}{\sqrt{3}(1,6 + 16,1 + 6,5 + 4,5)} = 7,3 \text{ кА}$$

Найдём ток трёхфазного дугового КЗ

$$I_{K2(D)} = I_{K2} \times K_{C1} = 7,3 \times 0,65 = 4,7 \text{ кА} \quad (t < 0,05 \text{ с}) \quad (61)$$

$$I_{K2(D)} = I_{K2} \times K_{C2} = 7,3 \times 0,74 = 5,4 \text{ кА} \quad (t > 0,05 \text{ с}) \quad (62)$$

Определим значение трёхфазного ударного тока. Для этого найдём соотношение $R/X=12,8/15,3=1,05$. Ударный коэффициент равен 1,05.

$$I_y = \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 7,3 = 10,8 \text{ кА.} \quad (63)$$

5.3 Токи короткого замыкания в точке К3

Определим ток короткого замыкания в точке К3.

Ток трехфазного металлического короткого замыкания в точке К3:

$$I_{K3} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_c + Z_T + Z_{шп} + KЛ1 + KЛ2)} \quad (64)$$

$$I_{K3} = \frac{400}{\sqrt{3}(1,6 + 16,1 + 6,5 + 4,5 + 6,6)} = 6 \text{ кА}$$

Найдём ток трёхфазного дугового КЗ

$$I_{K33(Д)} = I_{K3} \times K_{C1} = 6 \times 0,65 = 3,9 \text{ кА } (t < 0,05 \text{ с}) \quad (65)$$

$$I_{K33(Д)} = I_{K3} \times K_{C2} = 6 \times 0,74 = 4,4 \text{ кА } (t > 0,05 \text{ с}) \quad (66)$$

Определим значение трёхфазного ударного тока. Для этого найдём соотношение $R_k/X_k = 19,3/15,4=1,2$. Ударный коэффициент равен 1,08.

$$I_y = \sqrt{2} \cdot 1,08 \cdot 6 = 9,1 \text{ кА} \quad (67)$$

$$I_{K4} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_c + Z_T + Z_{шп} + KЛ1 + KЛ2 + KЛ3)} \quad (68)$$

$$I_{K4} = \frac{400}{\sqrt{3}(1,6 + 16,1 + 6,5 + 4,5 + 6,6 + 3,12)} = 5,58 \text{ кА}$$

Найдем ток трехфазного дугового КЗ

$$I_{K34(D)} = I_{K1} \times K_{C1} = 5,58 \times 0,65 = 3,6 \text{ кА} \quad (t < 0,05 \text{ с}) \quad (69)$$

$$I_{K34(D)} = I_{K1} \times K_{C2} = 5,58 \times 0,74 = 4,1 \text{ кА} \quad (t > 0,05 \text{ с}) \quad (70)$$

Определим значение трёхфазного ударного тока. Для этого найдём соотношение $R/X = 25,3/18,3 = 1,38$. Ударный коэффициент равен 1,08.

$$I_y = \sqrt{2} \cdot 1,08 \cdot 5,58 = 8,5 \text{ кА}$$

5.4 Проверка коммутационного оборудования по результатам расчётов токов короткого замыкания

Проверим отключающую способность выключателей при возникновении коротких замыканий [15].

Автоматический выключатель ШРА1 ВА-51-35М2-500А, уставка электромагнитного расцепителя 2,5 кА. При коротком замыкании (точка К1) ударный ток 17,7 кА. ВА-51-35М2-400А обеспечит защиту от КЗ.

Автоматический выключатель ВА-51-35М2-400А коммутирует питание шинопровода ШРА1. Уставка электромагнитного расцепителя 2,5 кА. При коротком замыкании (точка К2) ударный ток 10,8 кА. ВА-51-35М2-400А обеспечит защиту от КЗ.

Автоматический выключатель ВА-51-35М2-125 коммутирует питание термопласт автомата. Уставка расцепителей токов короткого замыкания: 1500А. При коротком замыкании (точка К3) ударный ток 9,1 кА. Выключатель обеспечивает отключение при КЗ.

Выводы по разделу 5.

Выполнен расчёт токов КЗ на стороне 0,4 кВ на разных расстояниях от питающего трансформатора. На основании расчётов проверены автоматические выключатели на отключающую способность. Автоматические выключатели срабатывают при значительно меньших токах, чем те, которые могут возникнуть при коротких замыканиях, они соответствуют требованиям.

6 Релейная защита трансформаторов ТМГ-2500/10/0,4

Для защиты ТМГ-2500/10/0,4 в КТПБ 10 кВ выбираем блок релейной защиты Sepam.

Рассчитываем уставку токовой отсечки на стороне 10 кВ по выражению (71) [27].

$$I_{сз1} = k_{отс} \times I_{К1-0,4} \quad (71)$$

где $k_{отс}$ – коэффициент отстройки, для SEPAM соглас рекомендациям выбирается от 1,1 до 1,15:

$$I_{сз1} = 1,12 \times 380 = 425 \text{ А.}$$

Рассчитываем бросок тока намагничивания трансформатора по стороне 10 кВ по выражению (72).

$$I_{сз2} = k_{отс} \times I_{ном} \times k_{бр}. \quad (72)$$

где $k_{бр} = 5$, значение броска тока намагничивания по стороне 10 кВ.

$$I_{сз2} = 1,12 \times 144 \times 5 = 806 \text{ А.}$$

За расчётный ток принимаем наибольший ток СЗ. Выбираем уставки защиты.

$$I_{ср} = 806 \text{ А.}$$

Чувствительность защиты вычислим по формуле:

$$K_{ч} = \frac{9500}{806} = 11.$$

« $K_{\text{ч}}$ обеспечивается и соответствует требованиям ПУЭ должен быть больше 2.

Максимальная токовая защита рассчитывается по формуле

$$I_{\text{сз}} = \frac{k_{\text{н}} \times k_{\text{сзп}} \times I_{\text{макс}}}{k_{\text{в}}} \quad (70)$$

где $k_{\text{н}}$ – коэффициент надёжности, для SEPAM равен 1,1

$k_{\text{в}}$ – коэффициент возврата, для SEPAM равен 0,935

$k_{\text{сзп}}$ – коэффициент запуска, принимается 1,2...1,3» [27].

$$I_{\text{сз}} = \frac{1,1 \times 1,2 \times 144}{0,935} = 203 \text{ А.}$$

Выдержка времени 500 мс

Выводы по разделу 6.

Для защиты трансформаторов Т1, Т2 выбран блок релейной защиты типа Seram 1000+ Т40. Произведена защита трансформатора от токов короткого замыкания. Также выполнена проверка работы защиты от бросков тока намагничивания при постановке трансформатора под напряжения. Его параметры соответствуют требованиям по чувствительности и быстродействию защиты. Выбранная защита позволяет защитить трансформатор от всех видов КЗ.

7 Расчёт заземления зданий и сооружений объекта

Для заземления технологических и административных зданий применяем стальные трубы и металлические штыри из отрезков арматуры [31].

Контур заземления монтируется на определённом расстоянии от здания согласно ПУЭ. Размещённые в земле металлические конструкции соединяются проводом с контуром заземления электрического оборудования.

Сопротивление одного элемента-заземлителя рассчитываем согласно выражению (71).

$$R_0 = \frac{\rho_{\text{ЭКВ}}}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{2L}{d} \right) + 0,5 \ln \left(\frac{4T + L}{4T - L} \right) \right) \quad (71)$$

где $\rho_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное удельное сопротивление почвы, Ом×м;

L – длина стержня, м;

d – диаметр стержня, м;

T – расстояние от поверхности грунта до середины заземлителя (геометрическая середина стержня), м.

Выбираем длину стержня $L = 5$ м с диаметром $d = 0,012$ м;

Для расчёта системы заземления производственного здания являются: длина стержней равным 5 м; м диаметр – $d = 0,012$ м; $T = 3$ м. При расчёте удельное сопротивление для суглинка составляет 100 Ом/м.

Вычислим сопротивление одного заземлителя.

$$R_0 = \frac{100}{6,28 \times 5} \left(\ln \left(\frac{10}{0,012} \right) + 0,5 \ln \left(\frac{6 + 5}{12 - 5} \right) \right) \approx 22 \text{ Ом.}$$

На заводе применяется сеть электроснабжения с номинальным напряжением 400 В, на КТПБ присутствует высокое напряжение со стороны

питающей ЛЭП 10 кВ. Сопротивление заземляющего устройства должно быть не более 4 Ом, в соответствии с ГОСТ 464-79.

При расчёте примем величиной сопротивления заземления равным 1 Ом. Число вертикальных заземлителей рассчитываем по выражению 72:

$$N_c = \frac{R_0}{n_c \times R_3}, \quad (72)$$

где $n_c = 0,78$ – коэффициент использования заземлителя.

$$N_c = \frac{22}{0,78 \times 1} = 28$$

Выводы к разделу 7.

Для выполнения контура заземления производственных и административного здания выполнен расчёт параметров заземляющего устройства. При сопротивлении заземления в 1 Ом необходимо установить в землю по периметру здания стальные штыри длиной 5 метров и диаметром 1,2 см, расчётное количество штырей составило 28 штук, которые необходимо соединить с заземляющим контуром оборудования.

8 Молниезащита производственного здания

Для защиты производственных зданий от ударов молний необходимо установить молниеотводы. Рассчитываем высоту молниеотводов – h двойного стержневого молниеотвода и построим зону защиты на высоте h_x объекта которого необходимо защитить от попаданий молнии [32].

Молниеотводы одинаковой высоты устанавливаем на крыше защищаемого производственного здания.

Технические характеристики защищаемого объекта указаны в таблице 19.

Таблица 19 – Параметры здания

Ширина объекта a , м	Длина объекта b , м	Высота объекта h_x , м	Надежность защиты P_z
54	60	12	0,95

Защищаемый объект имеет длину 49 м, ширину 31 м и высоту 11 м. Молниеотводы расположены на крыше, то есть самая узкая часть защищенной области на высоте крыши (16 м) должна быть более 31 м.

Зона защиты двухстержневого молниеотвода изображена на рисунке 14.

Размеры горизонтальных сечений зоны вычисляются по следующим формулам, общим для всех уровней надежности защиты:

- максимальная полуширина зоны r_x в горизонтальном сечении на высоте h_x :

$$r_x = \frac{r_0(h_0 - h_x)}{h_0} \quad (73)$$

- ширина горизонтального сечения в центре между молниеотводами $2r_{cx}$ на высоте $h_x \leq h_c$:

$$r_{cx} = \frac{r_0(h_c - h_x)}{h_c} \quad (74)$$

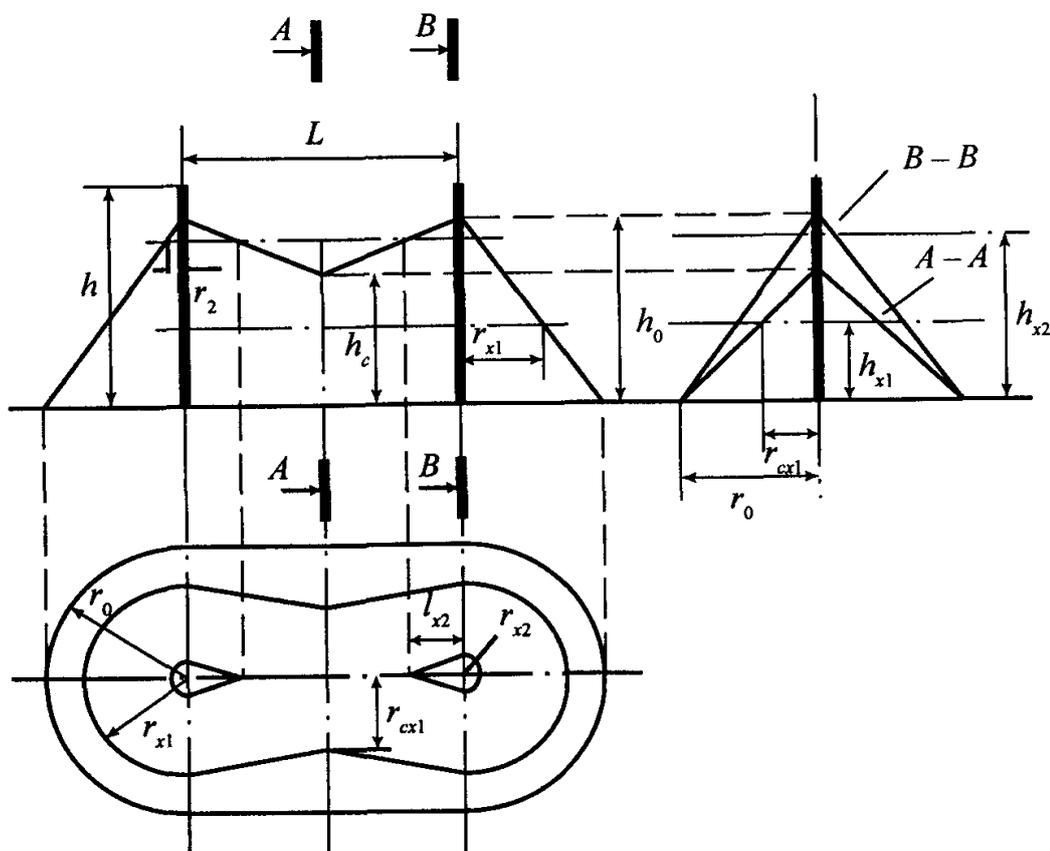


Рисунок 14 – Зона защиты двухстержневого молниеотвода

При расположении молниеотводов на крыше будем рассматривать зону защиты, достаточную для размеров крыши, и примем $h_x = 0$. Тогда $r_x = r_0$, $r_{cx} = r_0$.

Поскольку ширина строения 54 м, примем $r_{cx} = 54$ м; $r_0 = 54$ м

В соответствии с СО 153-34.21.122 – 2003 стандартной зоной защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой h является круговой конус высотой $h_0 < h$, вершина которого совпадает с вертикальной осью молниеотвода.

Габариты зоны определяются двумя параметрами: высотой конуса h_0 и радиусом конуса r_0 .

Расчётные данные для расчёта зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода указаны в таблице 20.

Расчётные данные для расчёта зоны защиты двойного стержневого молниеотвода указаны в таблице 21.

Таблица 20 – Расчёт зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода

Надежность защиты P_z	Высота молниеотвода h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса r_0 , м
0,95	От 0 до 100	$0,85h$	$1,2h$
	От 100 до 150	$0,85h$	$[1,2 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$

$$h = \frac{r_0}{1,2} = \frac{54}{1,2} = 45 \text{ м.}$$

Построение внешних областей зон двойного молниеотвода (полуконусов с габаритами h_0 , r_0) производится по формулам для одиночных стержневых молниеотводов [33]. Размеры внутренних областей определяются параметрами h_0 и h_c , первый из которых задает максимальную высоту зоны непосредственно у молниеотводов, а второй - минимальную высоту зоны посередине между молниеотводами. При расстоянии между молниеотводами $L \leq L_c$ граница зоны не имеет провеса ($h_c = h_0$). Для расстояний $L_c \leq L \leq L_{max}$ высота h_c определяется по выражению (75).

$$h_c = \frac{L_{max} - L}{L_{max} - L_c}. \quad (75)$$

Входящие в него предельные расстояния L_{max} и L_c вычисляются по эмпирическим формулам.

Таблица 21 – Расчёт параметров зоны защиты двойного стержневого молниеотвода

Надёжность защиты P_3	Высота молниеотвода h , м	L_{\max} , м	L_c , м
0,95	От 0 до 30	$5,75h$	$2,5h$
	От 30 до 100	$[5,75-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$2,5h$
	От 100 до 150	$5,5h$	$2,5h$

Максимальное расстояние между двумя молниеотводами, при котором не будет провеса защиты между стержнями составит $2,5 \cdot 45 = 112$ м. Длина крыши всего 60 метров, поэтому расстояние уменьшим.

Выбираем параметры двойного молниеотвода $L = 50$ м, $h=45$ м.

Выводы к разделу 8.

В этом разделе рассчитаны параметры молниеотвода, устанавливаемого на крыше производственного здания. Выбран двойной молниеотвод, длина каждой мачты, установленной на крыше, составляет 26м, расстояние между мачтами 40 м. Молниеотводы соединены с защитным заземлением здания.

Заключение

В выпускной квалификационной работе при выполнении ставилась задача разработки решений по созданию надёжной и энергоэффективной схемы системы электроснабжения предприятия.

В качестве объекта электроснабжения выбран литейно-механический завод по производству трубопроводной запорной и регулирующей арматуры. Исходными данными для расчётов является план технологических помещений предприятия, расположение оборудования, номенклатура оборудования, мощность, потребляемая производственным оборудованием.

Электроэнергия завода расходуется на электропитание цехового оборудования включающее в себя плавильные печи, токарные станки, мостовые краны, а также освещение технологических и административных помещений.

Нормы освещённости определены на основании санитарно-гигиенических норм. В соответствии с этими нормативами выбраны типы светильников и их количество для каждого помещения, выполнен расчёт потребления электроэнергии для освещения.

В процессе выполнения ВКР произведены расчёты электрических нагрузок, распределение нагрузок по территории предприятия включающий в себя определение центра нагрузок, в соответствии с полученными данными выбрано место для установки понижающей подстанции 10 кВ в 0,4 кВ.

На основании расчёта суммарной потребляемой мощности определён тип трансформаторов и их количество с требуемой номинальной мощностью. Поскольку литейно-механического завода относится ко II группе потребителей электроэнергии, для электроснабжения выбрана двухтрансформаторная подстанция с трансформаторами типа ТМГ 2500 кВА 10/0,4 кВ.

Расположение подстанции выбрано с учётом распределения нагрузок, вблизи расчётного центра электрических нагрузок. Нагрузка завода при расчёте равномерно распределена между секциями шин 0,4.

Для снижения потерь на реактивное сопротивление выбраны компенсирующие конденсаторные установки ВАРНЕТ-АС.

Разработана электрическая принципиальная схема электроснабжения, схема расположения распределительных устройств по территории предприятия, выбраны кабели питания и автоматы для защиты оборудования от коротких замыканий. Выполнена проверка соответствия автоматов своему назначению, для этого проведены расчёты токов коротких замыканий на разных участках цепи электроснабжения. Автоматические выключатели срабатывают при токах, значительно меньших, чем токи короткого замыкания, что говорит об эффективности и надёжности их применения.

Выполнен расчёт молниезащиты предприятия, выбраны размеры и расположение молниеотводов по территории завода.

Для защиты трансформаторов используется реле Seram. Расчёт релейной защиты показывает, что применение данного типа реле эффективно для защиты выбранных трансформаторов от всех видов КЗ с блокировкой от токов намагничивания.

Техническое задание, поставленное для выполнения выпускной квалификационной работы, выполнено.

Список используемой литературы

1. Абрамова Е.Я., Алешина С.К., Чиндякин В.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие по курсу ЭПП. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2015. 103 с.
2. Алиев И.И. Электротехника и электрооборудование: учебное пособие для вузов. Саратов: Вузовское образование, 2014. 1199 с.
3. Вакуумные Выключатели 6-20 кВ [Электронный ресурс] : Режим доступа : URL <https://www.tavrida.com/ter/support/documents/1/> (дата обращения: 12.03.2024)
4. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения [Электронный ресурс]: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2016. 78 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf (дата обращения: 27.11.2023).
5. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Системы электроснабжения [Электронный ресурс]: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015. 46 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2943/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf (дата обращения: 02.02.2024).
6. ГОСТ Р 59232-2020 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматической частотной разгрузки. Нормы и требования», утвержденный приказом Росстандарта от 30.11.2020 № 1219-ст
7. Дьяков А.Ф. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике: учебник для вузов. Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. 543 с.
8. Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник. М.: Феникс, 2018. 382 с.

9. Мельников М.А. Электроснабжение промышленных предприятий: Учеб. пособие. Томск: Изд. ТПУ, 2001. 140 с.
10. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть станций и подстанций. Справочные материалы. М., Энергия, 2012. 450 с.
11. Михайлов В.Е. Современная электросеть. СПб. : Наука и Техника, 2013. 256 с.
12. Савоськин В. С. Электроснабжение. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2018. 256 с.
13. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий [Электронный ресурс]: учебник. 5-е изд., перераб. и доп. М.: ИНФРА М, 2019. 405 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/1003810>.
14. Шеховцов, В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению: Учебное пособие / В.П. Шеховцов. – М.: ФОРУМ, 2011. – 136 с.
15. СНИП 23-05-95. Строительные нормы и правила российской федерации. Естественное и искусственное освещение. Дата введения 1996-01-01.
16. Герасимов, А.И. Проектирование электроснабжения цехов промышленных предприятий / А.И. Герасимов, С.В. Кузьмин. – Красноярск: СФУ, 2014. – 304 с.
17. Правила устройства электроустановок ПУЭ-6 и ПУЭ-7. М.: Норматика, 2018. 462 с. Сибикин, Ю.Д. Основы электроснабжения объектов: Учебное пособие / Ю.Д. Сибикин. – М.–Берлин: Энергия, Директ-Медиа, 2014. – 328 с.
18. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях: учебное пособие. М.: Форум, 2019. 496 с.
19. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения: учеб. пособие. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2017. 127 с

20. Производство трансформаторов, подстанций, электрооборудования 0,4-35 кВ. <http://trf-ural.ru/files/catalog/upload.pdf>.
21. Вахнина, В.В. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий: Учебное пособие / В.В. Вахнина. – Тольятти: ТГУ, 2011. – 69 с
22. Установки компенсация реактивной мощности серии "ВАРНЕТ". https://websor.ru/oborudovanie-i-materialy/objie_ukrm/.
23. Шлейников, В.Б. Электроснабжение силовых электроприемников цеха промышленного предприятия: Учебное пособие / В.Б. Шлейников, Т.В. Сазонова. – Оренбург: ОГУ, 2012. – 110 с.
24. Сибикин, Ю.Д. Основы электроснабжения объектов: Учебное пособие / Ю.Д. Сибикин. – М.–Берлин: Энергия, Директ-Медиа, 2014. – 328 с.
25. Секретарев, Ю. А. Надежность электроснабжения: Учебное пособие / Ю. А. Секретарев. – Новосибирск: НГТУ, 2013. – 104 с.
26. Щербаков Е. Ф., Александров Д. С. Электрические аппараты: учебник. - М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 304 с
27. ГОСТ Р 56303-2014 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Нормальные схемы электрических соединений объектов электроэнергетики. Общие требования к графическому исполнению», утвержденный и введенный в действие приказом Росстандарта от 12.12.2014 № 1984-ст
28. Шеховцов, В.П. Расчёт и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования: Учебное пособие / В.П. Шеховцов. – М.: ФОРУМ, 2011. – 105 с.
29. Bobby Rauf S. Electrical Engineering for Non-electrical Engineers. Lulu Press. Inc, 2015. 235 p
30. IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems. IEEE Std 551. NY: IEEE, 2013. 300 p.

31. Khan S., Khan S., Ahmed G. Industrial power systems. Boca Raton: CRC Press, 2016. 488 p.
32. Usman M., Coppo M., Bignucolo F., Turri R., Cerretti, A. A novel methodology for the management of distribution network based on neutral losses allocation factors // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2019. №1. pp. 613-622.
33. Zhang Q., Tang W., Zaccour G., Zhang J. Should a manufacturer give up pricing power in a vertical information-sharing channel // European Journal of Operational Research. 2019. №276, pp. 910-928.