

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники  
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»  
(наименование кафедры)

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение  
(направленность (профиль)/специализация)

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему Реконструкция системы электроснабжения ОАО "Бугурусланский  
завод металлоизделий"

---

---

---

Студент

М.В. Борцов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.Е. Бурмутаев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

А.В. Кириллова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

### Допустить к защите

Заведующий кафедрой

д.т.н., профессор, В.В. Вахнина

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

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

Тольятти 2019

## АНОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа на тему «Реконструкция системы электроснабжения ООО «Бугурусланский завод металлоизделий»» состоит из 11 основных пунктов: введения, краткой характеристики предприятия и расчёта электрических нагрузок. Было рассчитано число и мощности трансформаторов, выполнен расчёт компенсации реактивной мощности и определено место расположения подстанции. Произведено распределение нагрузок и выбора основного внутрицехового оборудования, расчётов токов КЗ, расчёта и выбора элементов релейной защиты, а также расчет заземляющих устройств и молниезащиты. По результатам работы написано заключение.

Объём пояснительной записки составил 62 страницы, из которых аннотация на 1-й странице, аннотация на английском языке выполненная на 1-й странице. В работе присутствуют иллюстрации в объёме 5 рисунков. В пояснительной записке 10 таблиц. Графическая часть работы представлена в виде 6 чертежей формата А1. При выполнении работы было использовано 26 источника, включая 4 источника на английском языке.

## ABSTRACT

This topic of the given graduation work is power supply system reconstruction of Buguruslan hardware plant.

This enterprise consists of 3 workshops, the total energy consumption of which is 1,952 MVA.

This graduation work is devoted to the reconstruction of the power supply system, as well as the calculation of its main parameters.

The key issue of the graduation work is the choice of the most reliable and efficient equipment. To fulfill this task, calculations were performed, confirmed by reference data.

The graduation work may be divided into several logically connected parts:

- calculation of the 2nd workshop electrical loads which includes the calculation of lighting. According to the results of the calculation, 57 lamps should be installed in the workshops;

- calculation of the number of supply substation power transformers. It has shown that it is necessary to install 2 transformers TM-630/10/0,4;

- calculation of reactive power compensation;

- determining the location of the substation. It was decided not to change the location of the substation.

The issues of workshops loads distribution and selection of internal main equipment, and calculation of short circuit currents are highlighted in the project's main part.

The special part of the project gives details about the selection and calculation of relay protection elements, as well as checking power switches.

It can be concluded that calculation of all the main points of the thesis project is completed.

This graduation work consists of 62 pages, including 5 figures, 10 tables, the list of 26 references and the graphic part on 6 A1 sheets.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Краткая характеристика предприятия.....	6
2 Расчёт электрических нагрузок 2-го цеха.....	7
2.1 Расчет электрических нагрузок освещения.....	15
3 Расчёт числа мощности трансформаторов питающей подстанции .....	19
4 Расчёт компенсации реактивной мощности.....	22
5 Определение места расположения подстанции .....	25
6 Распределение нагрузок цеха и выбор внутрицехового основного оборудования .....	28
6.1 Распределение нагрузок цеха .....	28
6.2 Выбор автоматических выключателей .....	30
6.3 Выбор кабелей.....	36
7 Расчёт токов КЗ .....	40
8 Выбор и проверка силовых выключателей высокого напряжения.....	44
9 Расчёт и выбор элементов релейной защиты .....	47
10 Расчёт заземляющего устройства.....	53
11 Расчёт молниезащиты.....	57
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	59
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	61

## ВВЕДЕНИЕ

«Система электроснабжения – совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электроэнергией» [1].

Электроснабжение промышленных предприятий является важной и ответственной задачей.

Электроснабжение в промышленности выполняется с учётом имеющейся мощности всех установок, чтобы в полной мере обеспечить потребителя электроэнергией в часы пиковой нагрузки. Используемые установки выбираются таким образом, чтобы их мощность была наиболее приближена к требуемой. Подобный подход позволяет сэкономить значительную часть средств, поскольку установки больших мощностей значительно дорожают с повышением мощности.

Однако подобный метод выбора оборудования не оставляет запаса для дальнейшего расширения предприятия. Из-за чего при увеличении производства возникает необходимость в проведении реконструкции системы электроснабжения.

Целью выпускной квалификационной работы, является выполнение реконструкции системы электроснабжения Бугурусланского завода металлоизделий в соответствии с национальной энергетической политикой [2]. Для достижения данной цели необходимо произвести расчёт цеховых нагрузок, и их распределение по цеху. Осуществить расчёт освещения, выбор трансформаторов для питающей подстанции и их места установки. Осуществить выбор основного оборудования, принять меры по обеспечению безопасности на производстве.

При проектировании необходимо стремиться к повышению экологичности, безопасности и энергоэффективности.

## 1 Краткая характеристика предприятия

Фирма ООО «Бугурусланский завод металлоизделий» зарегистрирована 20 июня 1995 года. Регистратор – Межрайонная инспекция Федеральной налоговой службы №10 по Оренбургской области [3].

Данное предприятие состоит из 3-х цехов, суммарное энергопотребление которых составляет 1,952 МВА.

Система электроснабжения предприятия представлена виде двух трансформаторных подстанций, подключённых к сети 10 кВ, запитанных от подстанции «Михайловская».

Фирма ООО «Бугурусланский завод металлоизделий» ведет работы по расширению производства путём строительства дополнительного второго цеха, расположение которого, изображено на генеральном плане предприятия, чертёж 1. В связи с чем выполнен анализ системы электроснабжения предприятия, который выявил:

- Нехватку мощности ТП;
- Отсутствие резервного трансформатора;

На основе анализа обстановки на предприятии, а также требований к обязательным пунктам расчёта систем электроснабжения [4, стр. 6], целями выпускной квалификационной работы становятся:

- Обеспечение предприятия ТП большей мощности;
- Расчёт КУ;
- Обеспечение ТП резервным трансформатором;
- Расчёт и выбор аварийного освещения;
- Расчёт защитного заземления и молниезащиты.

## 2 Расчёт электрических нагрузок 2-го цеха

Расчёт внутрицеховой нагрузки будет выполняться в соответствии с методическим руководством [5].

Так как имеются приёмники, работающие в повторно кратковременном режиме, необходимо привести приёмники ПКР к длительному режиму работы.

Рассчитывается номинальная мощность установки контактной сварки по формуле 2.1.

$$P_{ном} = P_{пасп} \times \sqrt{\frac{ПВ}{100}}, \quad (2.1)$$
$$P_{ном} = 60 \times \sqrt{\frac{25}{100}} = 30 \text{ кВт},$$

где ПВ – продолжительность включения,

$P_{пасп}$  – паспортная мощность электроприёмника.

Расчёт оставшихся приёмников выполняется по аналогии, результаты сведены в таблицу 2.1.

В цеху присутствуют 1-но фазные ЭП, которые для расчёта мощности необходимо привести к 3-х фазному режиму.

Рассчитаем неравномерность распределения нагрузки на фазах по формуле 2.2.

$$H = \frac{P_{н.б} - P_{н.м}}{P_{н.б}} \times 100\%, \quad (2.2)$$
$$H = \frac{2,6 - 1,3}{2,6} \times 100\% = 50\%,$$

где  $P_{н.б}$ ,  $P_{н.м}$  - мощности фаз загруженных больше и меньше соответственно.

Однофазная нагрузка включается на фазное напряжение,  $H = 50\% > 15\%$ , расчёт выполнялся по [5, с. 23].

Условная 3-х фазная мощность 1-но фазного потребителя определяется формулой 2.3.

$$P_y = 3 \times P_{ф.нб}, \quad (2.3)$$

$$P_y = 3 \times 2,6 = 7,8 \text{ кВт}.$$

Нагрузка всех 1-но фазных приёмников рассчитывается аналогичным образом. Результаты сведены в таблицу 2.1.

Выполняется расчёт суммарной номинальной мощности группы электроприёмников, токарных станков по формуле 2.4.

$$P_{H\Sigma} = P_{ном} \times n, \quad (2.4)$$

$$P_{H\Sigma} = 18,5 \times 4 = 74 \text{ кВт},$$

где  $n$  – количество приёмников.

Аналогично считаются оставшиеся группы приёмников, результаты расчётов сведены в таблицу 2.1.

Находится коэффициент силовой сборки через формулу 2.5.

$$m = \frac{P_{н.маx}}{P_{н.мин}}, \quad (2.5)$$

$$m = \frac{90}{1,3} = 69,23,$$

$$m > 3,$$

где  $P_{н.маx}$  и  $P_{н.мин}$  – максимальная и минимальная мощность приёмников соответственно.



Определяются активные, реактивные нагрузки для группы токарных станков за смену, а также полная мощность за смену определяются по формулам 2.6, 2.7 и 2.8 соответственно.

$$P_{см} = P_{ном\Sigma} \times K_{II}, \quad (2.6)$$

$$Q_{см} = P_{см} \times tg\varphi, \quad (2.7)$$

$$S_{см} = \sqrt{P_{см}^2 + Q_{см}^2}, \quad (2.8)$$

$$P_{см} = 74 \times 0,14 = 10,36 \text{ кВт},$$

$$Q_{см} = 10,36 \times 1,73 = 17,94 \text{ квар},$$

$$S_{см} = \sqrt{10,36^2 + 17,94^2} = 20,72 \text{ кВА},$$

где  $P_{см}, Q_{см}$  - активные и реактивные нагрузки,

$K_{II}$  - коэффициент использования [5, таб. 1.5.1, стр. 24].

Для прочих приёмников рассчитываются аналогично, результаты сведены в таблицу 2.1.

После необходимо вычислить средний коэффициент использования определяется по формуле 2.9.

$$K_{u.ср} = \frac{\Sigma P_{см}}{\Sigma P_H}, \quad (2.9)$$

$$K_{u.ср} = \frac{327,3}{634,52} = 0,52.$$

Находится средний косинус  $\cos\varphi_{ср}$  для всего цеха и средний тангенс  $tg\varphi_{ср}$  по формулам 2.10 и 2.11 соответственно.

$$\cos\varphi_{ср} = \frac{\Sigma P_{см}}{S_{см}}, \quad (2.10)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{cp} = \frac{\Sigma Q_{cm}}{\Sigma P_{cm}}, \quad (2.11)$$

$$\cos \varphi_{cp} = \frac{327,3}{390,7} = 0,84,$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{cp} = \frac{213,33}{327,3} = 0,65.$$

Определяем эффективное число электроприёмников через формулу 2.12.

$$n_9 = \frac{2 \times \Sigma P_H}{P_{H.\max}}, \quad (2.12)$$

$$n_9 = \frac{2 \times 634,52}{90} \approx 14,$$

$$n_9 > 10.$$

Коэффициент максимума активной нагрузки, определённый по эффективному числу электроприёмников и коэффициенту использования [5, таблица 1.5.3, с. 26],

$$K_M = 1,25.$$

Вычисляется максимальная активная нагрузка всего цеха находится по формуле 2.13.

$$P_{P\Sigma} = P_{cm\Sigma} \times K_M, \quad (2.13)$$

$$P_{P\Sigma} = 327,3 \times 1,25 = 409,1 \text{ кВт},$$

так как по расчётам эффективное число электроприёмников во 2-м цеху  $n_s > 10$ , то расчётная реактивная нагрузка цеха равна реактивной нагрузке за смену

$$Q_{P\Sigma} = Q_{cm},$$
$$Q_{P\Sigma} = 213,33 \text{ квар}.$$

Зная расчётную активную  $P_{P\Sigma}$  и расчётную реактивную  $Q_{P\Sigma}$  нагрузки находим полную мощность всего цеха по формуле 2.14.

$$S_{P\Sigma} = \sqrt{P_{P\Sigma}^2 + Q_{P\Sigma}^2}, \quad (2.14)$$
$$S_{P\Sigma} = \sqrt{409,1^2 + 213,33^2} = 461,4 \text{ кВА}.$$

Определяется максимальный ток для 2-го цеха из формулы 2.15.

$$I_P = \frac{S_{P\Sigma}}{\sqrt{3} \times U_H}, \quad (2.15)$$
$$I_P = \frac{461,4}{\sqrt{3} \times 0,38} = 701 \text{ А}.$$

Таблица 2.1 - Сводная ведомость нагрузки 2-го цеха

№ П/П	Наименование нагрузки	Ко- ли- чес- тво ЭП, <i>n</i>	Мощность ЭП приве- денная к ПВ=100%		<i>m</i>	$K_{II}$	$\cos\varphi$	Средне- сменная нагрузка		$n_{\varepsilon}$	$K_M$	Расчётная нагрузка			Рас- чёт- ный ток, $I_P, A$
			Для 1-го ЭП, кВт	Для группы ЭП, кВт			$tg\varphi$	$P_{см},$ кВт	$Q_{см},$ квар			$P_P,$ кВт	$Q_P,$ квар	$S_P,$ кВА	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Станок токарный	4	18,5	74		0,14	0,5	10,36	17,94						
							1,73								
2	Станок сверлильный	4	2	8		0,14	0,5	1,12	1,94						
							1,73								
3	Станок шлифовальный	4	4,11	16,44		0,14	0,5	2,3	3,99						
							1,73								

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4	Станок фрезерный	4	11	44		0,14	0,5	6,16	10,67						
							1,73								
5	Транспортер	1	3,72	3,72		0,1	0,5	0,37	0,64						
							1,73								
6	Станок точильный	2	2,2	4,4		0,14	0,5	0,62	1,07						
							1,73								
7	Вентиляторы	4	1,3	7,8		0,7	0,8	5,46	4,1						
							0,75								
8	Инверторная сварка	3	19,59	58,76		0,25	0,6	14,69	19,59						
							1,33								
9	Контактная сварка	2	30	60		0,3	0,6	18	24						
							1,33								

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
10	Электроды	4	90	360		0,75	0,9	270	130,77						
							0,48								
11	Всего по цеху без освещения			634,52	> 3	0,52	0,84	327,3	213,33	14	1,25	409,1	213,33	461,4	701
							0,65								
12	Нагрузка освещения											2,62	0,76	2,73	4,15
13	Всего по цеху с учётом освещения											411,69	213,33	463,69	704,5

## 2.1 Расчет электрических нагрузок освещения

Расчёт электрических нагрузок освещения цеха производится по методу коэффициента использования светового потока.

Выполним расчёт освещения для станочного отделения цеха. Начнём с определения площади помещения ( $S$ ) по формуле 2.16.

$$S = a \times b, \quad (2.16)$$
$$S = 24 \times 17 = 408 \text{ м}^2.$$

где  $a$ —длина помещения, м;

$b$ —ширина помещения, м.

Определим индекс помещения через формулу 2.17.

$$i = \frac{S}{(H_1 - H_2) \times (a + b)}, \quad (2.17)$$
$$i = \frac{408}{(4 - 1) \times (17 + 24)} = 3,3,$$

где  $H_1$  - высота цеха, м.

$H_2$  - высота рабочей поверхности, м.

Определяем коэффициент запаса по [6],  $K_3 = 1,4$ .

Принимаем коэффициенты отражения потолка, стен и пола в соответствии с данными предоставленными заказчиком.

Коэффициенты отражения потолка: 50%; стен: 30%; пола: 10%.

Для установки выбираются лампы марки ARCTIC.OPL ECO LED 1200 4000k ( $P=46$  Вт,  $\Phi_{л} = 5100$  лм;  $K=1,4$ ,  $n=1$ ) от российской компании «ЛЕД-Эффект» [7].

Причиной выбора данного промышленного светильника стала его высокая экономичность, что в будущем позволит значительно снизить затраты на освещение, так как «10-15% капитальных затрат приходится на обслуживание светильников» [8, с. 316].

Высокая экологичность, что в значительной степени облегчает утилизацию, а также простота конструкции, которая существенным образом упростит монтажные работы.

Определяется требуемое количество светильников для станочного отделения цеха через формулу 2.18.

$$N = \frac{E \times S \times K_3}{\eta \times n \times \Phi_L}, \quad (2.18)$$
$$N = \frac{300 \times 408 \times 1,4}{0,96 \times 1 \times 5100} = 35 \text{ шт},$$

где  $E$  - требуемая горизонтальная освещённость, лк;

$S$  - площадь станкового отделения;

$\eta$  - коэффициент использования;

$K_3$  - коэффициент запаса;

$n$  - количество ламп в светильнике;

$\Phi_L$  - световой поток одной лампы.

Определяем расчётные активные ( $P_{осв}$ ) и реактивные ( $Q_{осв}$ ) нагрузки освещения по формулам 2.19 и 2.20 соответственно.

$$P_{осв} = N \times n \times P_L, \quad (2.19)$$
$$P_{осв} = 35 \times 1 \times 46 = 1,61 \text{ кВт},$$

$P_L$  - мощность лампы.



При  $\cos \varphi = 0,96$ ,  $tg = 0,29$ ,

$$Q_{осв} = P_{осв} \times tg \varphi, \quad (2.20)$$

$$Q_{осв} = 1,61 \times 0,29 = 0,47 \text{ квар.}$$

Из формулы 2.21 полная мощность освещения составит

$$S_{осв} = \sqrt{P_{осв}^2 + Q_{осв}^2}, \quad (2.21)$$

$$S_{осв} = \sqrt{1,61^2 + 0,47^2} = 1,68 \text{ кВА.}$$

Ток освещения по формуле 2.22 будет равен

$$I_{осв} = \frac{S_{осв}}{\sqrt{3} \times U_H}, \quad (2.22)$$

$$I_{осв} = \frac{1,68}{\sqrt{3} \times 0,38} = 2,55 \text{ А.}$$

Расчёты для других помещений выполнены аналогично, результаты сведены в таблицу 2.2. Расположение и соединение светильников изображено на чертеже 2.

Таблица 2.2 – Расчёт освещения 2-го цеха

Название помещения	$S, м^2.$	$\Phi_{л}, лк.$	$E, лк.$	$K_3$	$n$	$\eta$	$N,$ шт.	$P_{л},$ кВт	$P_{осв},$ кВт.	$Q_{осв},$ квар.	$S_{осв},$ кВА.	$I_{осв},$ А.
Комната персонала	36	5100	300	1,1	1	0,96	3	46				
Ремонтное отделение	36		300	1,2	1	0,96	3					
Инструментарная	24		200	1,1	1	0,96	2					
Термическое отделение 1	48		200	1,3	1	0,96	3					
Термическое отделение 2	48		200	1,3	1	0,96	3					
Склад	48		200	1,1	1	0,96	3					
Станочное отделение	408		300	1,4	1	0,96	35					
Сварочное отделение 1	48		200	1,3	1	0,96	3					
Сварочное отделение 1	24		200	1,3	1	0,96	2					
Всего	720								57		2,62	0,76

### 3 Расчёт числа мощности трансформаторов питающей подстанции

Предварительный выбор трансформаторов осуществляется по суммарной расчётной мощности 2-го цеха, найденной в пункте 2,  $S_{P\Sigma 2} = 463,69 \text{ кВА}$ , мощность 1-го по данным заказчика  $S_{P\Sigma 1} = 415 \text{ кВА}$

Уже существующий цех 1 подключён к 1-но трансформаторной подстанции. Необходимо проверить возможно ли подключение нового 2-го цеха к уже существующей подстанции.

Для этого необходимо определить суммарную мощность обоих цехов, с учётом нагрузки освещения, по формуле 3.1.

$$\begin{aligned}\Sigma S &= S_{P\Sigma 1} + S_{P\Sigma 2}, \\ \Sigma S &= 415 + 463,69 = 878,69 \text{ кВА}.\end{aligned}\tag{3.1}$$

Потребитель относится ко 2 категории надёжности электроснабжения при таких условиях принимаем, коэффициент загрузки имеющегося трансформатора  $K_3 = 0,8$ .

Определяем требуемую минимальную мощность трансформатора по формуле 3.2.

$$\begin{aligned}S_{TT} &= \frac{\Sigma S}{K_3 \times N_T}, \\ S_{TT} &= \frac{878,69}{0,8 \times 1} = 1098,36 \text{ кВА}.\end{aligned}\tag{3.2}$$

где  $N_T$  - число трансформаторов;

$S_{TT}$  - требуемая мощность трансформатора.

Имеющийся трансформатор уже существующей подстанции ТМ–630/10/0,4 не обеспечивает должной мощности, ввиду чего при

подключении 2-х цехов будет работать в режиме перегрузки, принимается решение о использовании дополнительного трансформатора.

В сложившейся ситуации рекомендуется использовать ТМ–630/10/0,4, так как при этом, обеспечивается большая надёжность при эксплуатации оборудования, а так же открывается возможность для использования данного трансформатора в целях резервирования уже имеющегося трансформатора.

Так как имеется два трансформатора ТМ–630/10/0,4 решено использовать их для взаимного резервирования.

Проверяется коэффициент загрузки на случай использования мощностей трансформатора в аварийном режиме 2-мя цехами по формуле 3.3.

$$K_3 = \frac{\Sigma S}{S_T \times N_T}, \quad (3.3)$$

$$K_3 = \frac{878,69}{630 \times 1} = 1,39.$$

где  $S_T$  - мощность проверяемого трансформатора.

Так как в аварийном режиме перегрузка составляет менее 40% использование трансформаторов для резервирования допустимо.

Определяется коэффициент загрузки трансформатора, питающего 2-й цех, в нормальном режиме работы по формуле 3.4.

$$K_3 = \frac{S_{P\Sigma 2}}{S_T \times N_T}, \quad (3.4)$$

$$K_3 = \frac{463,69}{630 \times 1} = 0,74.$$

Так как потребитель относится ко 2-й категории надёжности то,  $K_3 = 0,7$  находится в допустимом диапазоне 0,6 - 0,8.

Трансформатор ТМ–630/10/0,4 от компании ООО «Тольяттинский Трансформатор» обладает следующими характеристиками [9, 10 стр. 106]:

- 1 Потери холостого хода  $P_{XX} = 1,05 \text{ кВт}$ ,
- 2 Потери на короткого замыкания  $P_{K3} = 7,6 \text{ кВт}$ ,
- 3 Напряжение короткого замыкания  $U_{K3} = 5,5\%$ ,
- 4 Ток холостого хода  $I_{XX} = 2,1\%$ .

Определим потери в трансформаторе по методическому руководству [1, с. 183 формула 6.10], для этого определяются активные, реактивные и полные потери мощности трансформатора по формулам 3,5, 3,6, 3,7 соответственно.

$$\Delta P_T = P_{XX} + P_{K3} \times K_3^2, \quad (3.5)$$

$$\Delta Q_T = \left( \frac{I_{XX} + U_{K3} \times K_3}{100} \right) \times S_T, \quad (3.6)$$

$$\Delta S_P = \sqrt{\Delta P_T^2 + \Delta Q_T^2}, \quad (3.7)$$

$$\Delta P_T = 1,05 + 7,6 \times 0,74^2 = 5,21 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_T = \left( \frac{2,1 + 5,5 \times 0,74}{100} \right) \times 630 = 38,88 \text{ квар},$$

$$\Delta S_P = \sqrt{5,21^2 + 38,88^2} = 39,45 \text{ кВА}.$$

Определяется нагрузка трансформатора с учётом потерь по формуле 3.8.

$$S_{P10кВ} = \sqrt{(P_{P\Sigma} + \Delta P_T)^2 + (Q_{P\Sigma} + \Delta Q_T)^2}, \quad (3.8)$$

$$S_{P10кВ} = \sqrt{(411,69 + 5,21)^2 + (213,33 + 38,88)^2} = 494,89 \text{ кВА}.$$

С учётом потерь трансформатор ТМ–630/10/0,4 соответствует требованиям эксплуатации. Ввиду чего будет установлен на питающей ТП.

#### 4 Расчёт компенсации реактивной мощности

Согласно [11] в сетях промышленных предприятий коэффициент мощности должен быть более 0,93. В виду того, что на рассматриваемом заводе  $\cos \varphi = 0,84$ , необходимо рассмотреть вопрос о компенсации реактивной мощности.

Выбор будет выполняться только для нового выбранного трансформатора, так как на уже существующей подстанции компенсирующая установка уже установлена.

Таблица 4.1 – Данные для расчёта КУ

Параметр	$\cos \varphi$	$tg \varphi$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА
Всего без КУ	0,84	0,65	411,69	213,33	463,69
Всего без КУ с учетом потерь мощности	0,85	0,62	420,34	261,21	494,89

Рассчитаем величину компенсируемой реактивной мощности по формуле 4.1.

$$Q_{к.р.} = \alpha \times P_p \times (tg \varphi - tg \varphi_k), \quad (4.1)$$

$$Q_{к.р.} = 0,9 \times 420,34 \times (0,62 - 0,4) = 83,23 \text{ квар},$$

где  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий повышение  $\cos \varphi$  естественным способом, принимается 0,9 [5, с. 33];

$tg \varphi, tg \varphi_k$  - коэффициенты реактивной мощности до и после компенсации, так как  $\cos \varphi_k = 0,93$ , то берётся  $tg \varphi_k = 0,4$ .

Ввиду того, что определена мощность устройства для компенсации, выбираем КУ по [10, таблица 6.1.1, с. 123].

В соответствии с требуемой компенсируемой мощностью выбрано УК4 – 0,38 – 100. Со ступенчатым регулированием по 50 квар.

Определяются фактические значения  $tg\varphi_\phi$  и  $\cos\varphi_\phi$  после компенсации реактивной мощности по формуле 4.2.

$$tg\varphi_\phi = tg\varphi - \frac{Q_{К.Р.}}{\alpha \times P_P}, \quad (4.2)$$

$$tg\varphi_\phi = 0,62 - \frac{100}{0,9 \times 420,34} = 0,37,$$

$$\cos\varphi_\phi = 0,932.$$

Так как фактический косинус  $\cos\varphi_\phi = 0,932 > 0,93$ , то можно судить о том, что компенсация реактивной мощности выполнена успешно.

Ввиду изменения значения реактивной мощности выполняется перерасчёт полной мощности сети предприятия по формуле 4.3.

$$S_H = \sqrt{P_P^2 + (Q_P - Q_{К.Р.})^2}, \quad (4.3)$$

$$S_H = \sqrt{420,34^2 + (261,21 - 100)^2} = 450,19 \text{ кВА}.$$

Результаты компенсации реактивной мощности сведём в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Сравнение параметров сети предприятия до и после компенсации реактивной мощности

Параметр	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	$P_P$ , кВт	$Q_P$ , квар	$S_P$ , кВА
1	2	3	4	5	6
Всего без КУ	0,84	0,65	411,69	213,33	463,69

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6
Всего без КУ с учетом потерь мощности	0,85	0,62	420,34	261,21	494,89
КУ				100	
Всего с КУ	0,932	0,37	420,34	161,21	450,19

Как видно из таблицы 4.2 использование КУ позволяет повысить  $\cos \varphi$ , а также уменьшить полную мощность. Что свидетельствует о повышении эффективности использования электроэнергии.

В виду изменения значения мощности цеха выполняется перерасчёт коэффициента загрузки подключаемого трансформатора по формуле 3.4.

$$K_3 = \frac{450,19}{630 \times 1} = 0,71.$$

Значение коэффициента загрузки всё ещё в пределах нормы [12 стр. 38]. Перевыбор трансформатора не требуется.



## 5 Определение места расположения подстанции

Как правило подстанции устанавливаются в центрах электрических нагрузок. Для определения центра электрических нагрузок необходимо произвести соответствующие расчёты, приведённые ниже. Так как уже имеется подстанция, то следует определить, соответствует ли её место установки изменённому центру электрических нагрузок, в виду включения в систему электроснабжения нового цеха.

С целью определения местоположения подстанции составляется картограмма нагрузок, изображённая на рисунке 5,1.

Принимается для меньшей нагрузки Ц1 (1-й цех) радиус  $R_{a1} = 0,03 \text{ км}$ , исходя из чего рассчитываются масштабы нагрузок по формулам 5,1 и 5,2.

$$m_a = \frac{P_{Ц1}}{\pi R_{a1}^2}, \quad (5.1)$$

$$m_p = \frac{Q_{Ц1}}{\pi R_{a1}^2}, \quad (5.2)$$

$$m_a = \frac{390}{\pi 0,03^2} = 137934 \text{ кВт} / \text{км}^2,$$

$$m_p = \frac{155}{\pi 0,03^2} = 54820 \text{ квар} / \text{км}^2$$

Масштаб активной нагрузки принят равным  $m_a = 137934 \text{ кВт} / \text{км}^2$ , масштаб реактивной принят  $m_p = 54820 \text{ квар} / \text{км}^2$ .

Определяются радиусы активной и реактивной нагрузок 2-го цеха, по формулам 5.3 и 5.4.

$$R_a = \sqrt{\frac{P_{Ц}}{\pi \times m_a}}, \quad (5.3)$$

$$R_p = \sqrt{\frac{Q_{II}}{\pi \times m_p}}, \quad (5.4)$$

$$R_a = \sqrt{\frac{420,34}{\pi \times 137934}} = 0,031 \text{ км},$$

$$R_p = \sqrt{\frac{161}{\pi \times 54820}} = 0,03 \text{ км}.$$

Радиус реактивной нагрузки первого цеха определяется аналогично. Определяются условные центры нагрузок по формулам 5.5, 5.6 для активной и 5.7, 5.8 для реактивной мощности.

$$X_a = \frac{\sum_{i=n}^i P_i X_i}{\sum_{i=n}^i P_i}, \quad (5.5)$$

$$X_a = \frac{390 \times 0,03 + 411,69 \times 0,07}{390 + 411,69} = 0,05 \text{ км},$$

$$Y_a = \frac{\sum_{i=n}^i P_i Y_i}{\sum_{i=n}^i P_i}, \quad (5.6)$$

$$Y_a = \frac{390 \times 0,04 + 411,69 \times 0,03}{390 + 411,69} = 0,035 \text{ км},$$

$$X_p = \frac{\sum_{i=n}^i Q_i X_i}{\sum_{i=n}^i P_i}, \quad (5.7)$$

$$X_p = \frac{127,28 \times 0,03 + 161,21 \times 0,07}{127,28 + 161,21} = 0,052 \text{ км},$$

$$Y_p = \frac{\sum_{i=n}^i P_i Y_i}{\sum_{i=n}^i P_i}, \quad (5.8)$$

$$Y_p = \frac{127,28 \times 0,04 + 161,21 \times 0,03}{127,28 + 161,21} = 0,034 \text{ км.}$$

Отметим координаты и определим местоположение подстанции по рисунку 5.1.

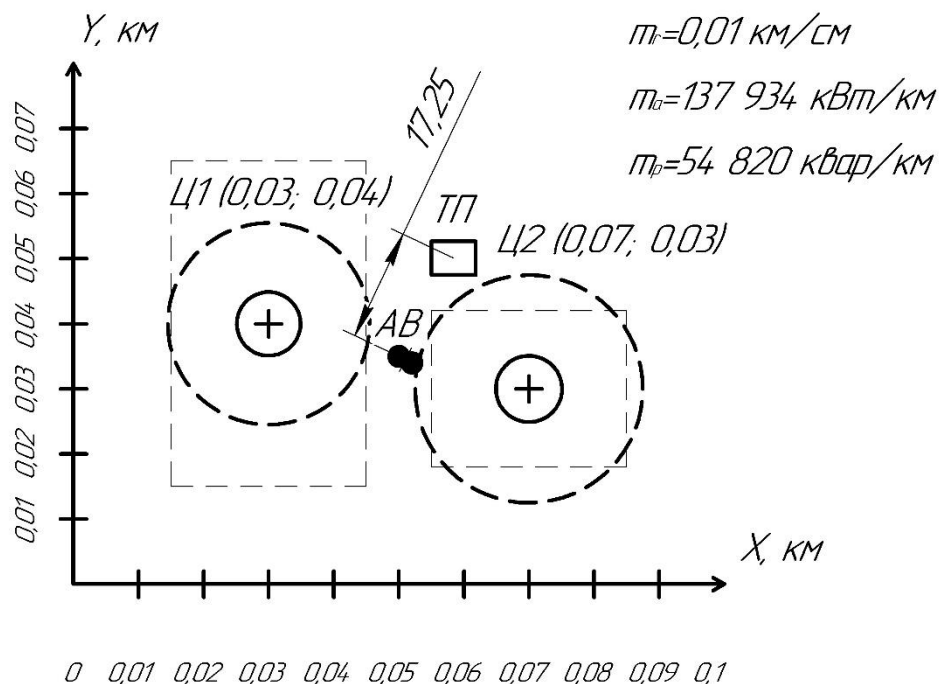


Рисунок 5.1 – Картограмма нагрузок

Как видно из рисунка 5.1 расчётный центр электрических нагрузок отличается от местоположения существующей подстанции на 17,25 метра. По генплану в расчетной точке установки подстанции находится проезд, так же расчётное место установки находится дальше от питающей ВЛ и перенос подстанции приведёт к излишним затратам, а также нарушит логистику предприятия, в виду этого местоположение подстанции останется неизменным.

План ТП изображен на чертеже 3.

## **6 Распределение нагрузок цеха и выбор внутрицехового основного оборудования**

### **6.1 Распределение нагрузок цеха**

Для обеспечения надёжности системы электроснабжения «Бугурусланского завода металлоизделий». В виду неравномерности распределения нагрузки цеха, наличия сварочных аппаратов и электропечей решено использовать радиальную схему распределения нагрузки, ввиду обеспечения ей большей надёжности и удобства эксплуатации [13 стр. 708].

Электроприёмники цеха подключаются исходя из расположения в цеху, характеру нагрузки и расчётной номинальной мощности.

Для обеспечения удобства и надёжности нагрузка была распределена между РП, и дополнительным электрощитом для освещения. Схема подключения показана на рисунке 6.1.

Ввиду наличия потребителей разной мощности, а также их расположения в цеху, принято решение использовать радиальную схему питания.

Данная схема обеспечит большую надёжность и безопасность работы системы электроснабжения рассматриваемого цеха [14 стр. 110]. Подробнее подключения приёмников отображено на плане цеха, чертеж 4.

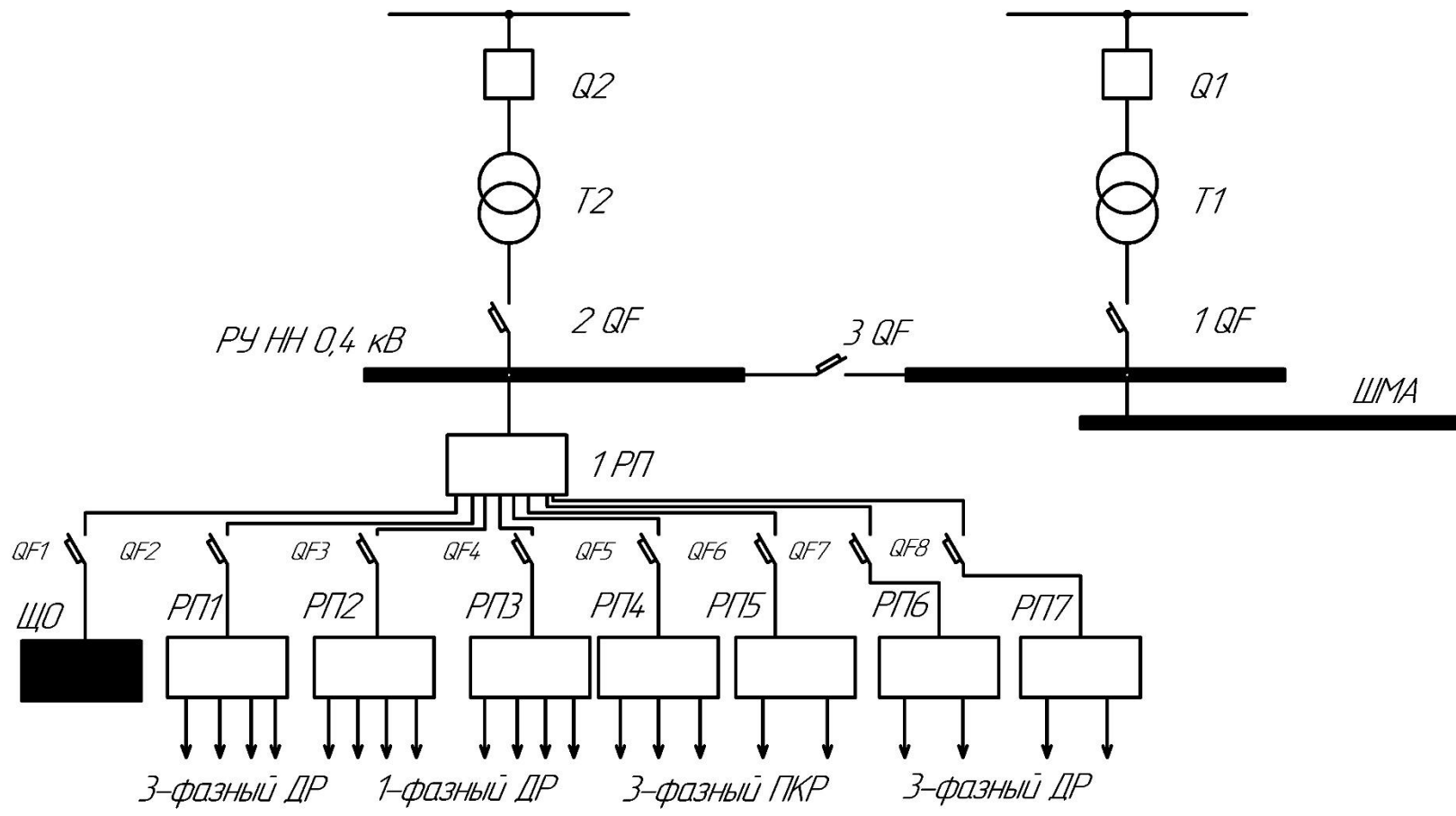


Рисунок 6.1 – Схема подключения приёмников и РП

## 6.2 Выбор автоматических выключателей

Автоматические выключатели применяют для быстрой и надёжной защиты кабелей и проводов электрических сетей от токов перегрузки и токов КЗ.

Выбираем межсекционный выключатель по формуле 6.1.

$$I_T = \frac{S_T}{\sqrt{3} \times U_H}, \quad (6.1)$$
$$I_T = \frac{630}{\sqrt{3} \times 0,38} = 958,32 \text{ A},$$

где  $I_T$  - ток сразу после трансформатора;

$S_T$  - мощность трансформатора;

$U_H$  - напряжения трансформатора на низкой стороне.

Условие выбора выключателя 6.2,

$$I_{H.A.} \geq I_{H.P.} \geq I_T = 958,32 \text{ A}, \quad (6.2)$$

где  $I_{H.A.}$  - номинальный ток автомата, А;

$I_{H.P.}$  - номинальный ток расцепителя, А.

По [10, стр. 39 таб. 2.1.1] ВА-53-41 обладает следующими характеристиками:

$$U_H = 380 \text{ В};$$

$$I_{H.A.} = 1000 \text{ А};$$

$$I_{H.P.} = 1000 \text{ А (со ступенчатым регулированием 0,63; 0,8; 1);}$$

$$I_{V(II)} = 1,25 I_{H.P.};$$

$$I_{V(KЗ)} = 3 I_{H.P.};$$

$$I_{откл} = 25 \text{ кА}.$$

Выбираем выключатель для РП по расчётному току из пункта 2  
 $I_p = 704,5 \text{ А}$ , с соблюдением условия 6.3,

$$I_{H.A.} \geq 1,1 I_p, \quad (6.3)$$

$$I_{H.A.} \geq 1,1 \times 704,5 = 774,95 \text{ А}.$$

По [10, стр. 39 таб. 2.1.1] ВА-53-41 обладает следующими характеристиками:

$$U_H = 380 \text{ В};$$

$$I_{H.A.} = 1000 \text{ А};$$

$$I_{H.P.} = 800 \text{ А};$$

$$I_{Y(II)} = 1,25 I_{H.P.};$$

$$I_{Y(K3)} = 3 I_{H.P.};$$

$$I_{откл} = 25 \text{ кА}.$$

Проверяем кратность отсечки ( $K_O$ ) через формулу 6.8. Для этого рассчитаем пиковый ток ( $I_{ПИК}$ ) для наибольшей по мощности нагрузки по формуле 6.6.

$$I_{H.HБ} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \times U_H \times \cos \varphi \times n}, \quad (6.4)$$

$$I_{П.HБ} = 6,5 \times I_{H.HБ}, \quad (6.5)$$

$$I_{ПИК} = I_{П.HБ} + I_p - I_{H.HБ} \times K_H, \quad (6.6)$$

$$I_0 \geq 1,25 \times I_{ПИК}, \quad (6.7)$$

$$I_{H.HБ} = \frac{90}{\sqrt{3} \times 0,38 \times 0,9 \times 0,9} = 169 \text{ А},$$

$$I_{П.HБ} = 6,5 \times 169 = 1098,6 \text{ А},$$

$$I_{\text{пик}} = 1098,6 + 704,5 - 169 \times 0,75 = 1676,34 \text{ A},$$

$$I_0 \geq 1,25 \times 1676,34 = 2095,43 \text{ A},$$

где  $I_{\text{п.нб}}$  - наибольший пусковой ток, 6.5;

$I_0$  - ток отсечки, 6.7;

$I_{\text{н.нб}}$  - номинальный ток наибольшей нагрузки, 6.4;

$K_{\text{и}}$  - коэффициент использования;

$I_{\text{пик}}$  - пиковый ток;

$P_{\text{н}}$  - номинальная мощность наибольшей по мощности нагрузки;

$n$  - коэффициент равный 0,9.

$$K_0 \geq \frac{I_0}{I_{\text{н.п.}}}, \quad (6.8)$$

$$K_0 \geq \frac{2095,43}{800} = 2,62,$$

кратность отсечки принимается  $K_0 = 3$ .

Выберем выключатель для токарного станка, подключённого к по формуле 6.9, с соблюдением условия 6.10.

$$I_{\text{д}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} \times U_{\text{н}} \times \cos \varphi \times n}, \quad (6.9)$$

$$I_{\text{д}} = \frac{18,5}{\sqrt{3} \times 0,38 \times 0,5 \times 0,9} = 62,54 \text{ A},$$

$$I_{\text{н.п.}} \geq 1,25 I_{\text{д}}, \quad (6.10)$$

$$I_{\text{н.п.}} \geq 1,25 I_{\text{д}} = 78,17 \text{ A},$$

где  $I_{\text{д}}$  - Длительный ток.



По [10, стр. 39 таб. 2.1.1] выбран ВА-51-31 со следующими характеристиками:

$$U_H = 380 B;$$

$$I_{H.A.} = 100 A;$$

$$I_{H.P.} = 80 A;$$

$$I_{V(II)} = 1,35 I_{H.P.};$$

$$I_{V(K3)} = 10 I_{H.P.};$$

$$I_{откл} = 6 kA.$$

Проверяем кратность отсечки ( $K_o$ ) по формуле 6.8.

$$K_o \geq \frac{657}{80} = 8,21$$

Таким же образом выберем выключатели для оставшихся приёмников, результаты расчёта сведены в таблицу 6.1, и так же рассчитываются выключатели для электрощитов таблица 6.2.

Таблица 6.1 – Выбор автоматических выключателей для ЭП

№п. п	Наименование приёмника	Количество $n$	$I_D, A$	$I_{H.P.}, A$	$I_0, A$	$K_o$	Номинальный ток выключателя, А	Наименование выключателя, А
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Станок токарный	4	62,5 4	80	656, 63	9	100	ВА 51 -31
2	Станок сверлильный	4	6,76	10	70,9 9	8	25	ВА 51 -25

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	Станок шлифоваль ный	4	13,8 9	20	145,8 8	8	25	ВА 51 -25
4	Станок фрезерный	4	37,1 8	50	390,4 3	8	100	ВА 51 -31
5	Транспортё р	1	12,5 7	16	131,9 7	9	25	ВА 51 -25
6	Станок точильный	2	7,44	10	78,09	8	25	ВА 51 -25
7	Вентилятор	4	2,75	4	28,84	8	25	ВА 51 -25
8	Инверторна я сварка	3	55,1 7	63	55,17	2	100	ВА 51 -31
9	Контактная сварка	2	84,5 1	100	84,51	2	100	ВА 51 -31
10	Электропеч ь	4	169, 02	200	169,0 2	2	250	ВА 51 -37

Таблица 6.2 – Выбор автоматических выключателей РП

Название электроц ита		Название приёмник а	Ко ли че ст во <i>n</i>	$I_D, A$	$I_{H.P.}, A$	$I_0, A$	$K_o$	Номин альны й ток выклю чателя , А	Наименов ание выключат еля, А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
РП 2	РП 1	Станок токарный	2	240,75	264,82	870,48	3	400	ВА 51 - 37

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	1
		Станок сверлильный	2						
		Станок шлифовальный	2						
		Станок фрезерный	2						
	+	Транспортёр	1	253	278,65	875,56	3	400	
	РПЗ	Станок точильный	2	25,86	31,5	147,91	5	100	ВА 51 - 31
		Вентилятор	4						
	РП4	Инверторная сварка	3	169,01	200	169,01	3	250	ВА 51 - 35
	РП5	Контактная сварка	2	165,52	200	165,52	3	250	ВА 51 - 35
РП 6	РП 7	Электродпечь	2	338,03	400	338,3	2	400	ВА 51 - 37
	ЩО	Освещение	-	4,15	16	4,15	2	16	ВА 47 - 29

При выборе выключателей так же проверялись характеристики от заводов изготовителей [15, 16].

### 6.3 Выбор кабелей

Для передачи электроэнергии в цеху применяются кабели.

Выбор кабелей осуществляется по номинальному току. При этом должно выполняться данное условие 6.11,

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{д}}, \quad (6.11)$$

где  $I_{\text{доп}}$  – допустимый ток кабеля А,

$I_{\text{д}}$  – длительный ток А.

Расчётный ток для кабелей из пункта 6 таблицы 6.1, 6.2. Выбираем по справочнику [10, стр. 78] сверяясь с [17,18].

Составим таблицу выбранных кабелей.

Таблица 6.3 – Выбор кабелей

Наименование нагрузки	Номер на плане	Длительный ток, А	Номинальный ток оборудования, А	Марка оборудования
1	2	3	4	5
Станок токарный	1	62,54	80	ПВХ - 4×16
Станок токарный	2	62,54	80	ПВХ - 4×16
Станок токарный	3	62,54	80	ПВХ - 4×16
Станок токарный	4	62,54	80	ПВХ - 4×16

Продолжение таблицы 6.3

1	2	3	4	5
Станок сверлильный	5	6,76	15	П - 4×1
Станок сверлильный	6	6,76	15	П - 4×1
Станок сверлильный	7	6,76	15	П - 4×1
Станок сверлильный	8	6,76	15	П - 4×1
Станок шлифовальный	9	13,89	15	П - 4×1
Станок шлифовальный	10	13,89	15	П - 4×1
Станок шлифовальный	11	13,89	15	П - 4×1
Станок шлифовальный	12	13,89	15	П - 4×1
Станок фрезерный	13	37,18	34	П - 4×5
Станок фрезерный	14	37,18	34	П - 4×5
Станок фрезерный	15	37,18	34	П - 4×5
Станок фрезерный	16	37,18	34	П - 4×5
Транспортер	17	12,57	15	П - 4×1
Станок точильный	18	7,44	15	П - 4×1

Продолжение таблицы 6.3

1	2	3	4	5
Станок точильный	19	7,44	15	П - 4×1
Вентиляторы	20	2,75	15	П - 2×1
Инверторная сварка	21	55,17	60	ПВХ - 4×10
Инверторная сварка	22	55,17	60	ПВХ - 4×10
Инверторная сварка	23	55,17	60	ПВХ - 4×10
Контактная сварка	24	84,51	100	ПВХ - 4×25
Контактная сварка	25	84,51	100	ПВХ - 4×25
Электропечь	26	169,02	185	ПВХ - 4×70
Электропечь	27	169,02	185	ПВХ - 4×70
Электропечь	28	169,02	185	ПВХ - 4×70
Электропечь	29	169,02	185	ПВХ - 4×70
Вентиляторы	30	2,75	15	П - 2×1
Вентиляторы	31	2,75	15	П - 2×1
Вентиляторы	32	2,75	15	П - 2×1
РП 1	РП1	240,75	260	ПВХН - 4×120
РП 2	РП 2	253	260	ПВХН - 4×120
РП 3	РП 3	25,86	34	ПВХН - 4×5
РП 4	РП 4	169,1	170	ПВХН - 4×50
РП 5	РП 5	165,52	170	ПВХН - 4×50

Продолжение таблицы 6.3

1	2	3	4	5
РП 6	РП 6	338,03	350	ПВГнг - 4×185
РП 7	РП 7	338,03	350	ПВГнг - 4×185
Щит освещения	ЩО	4,15	15	ПВ – 4×1
Цех 2	1 РП	704,5	1000	ПВХПН - 3×300

Материалом изоляции кабелей выбран материал ПВХ – поливинилхлорид, ввиду его высокой надежности и дешевизны. Данный тип изоляции хорошо себя зарекомендовал и широко используется при монтаже электроустановок.

## 7 Расчёт токов КЗ

В соответствии с [1, 5] необходимо выполнить расчёт токов короткого замыкания, для трёх точек, изображённых на рисунке 7.1 данного пункта, точка К1 сразу после трансформатора и выключателя, К2 точка подключения потребителя к РП, К3 самый мощный электроприёмник.

Составим схему замещения для электропечи рисунок 7.1.

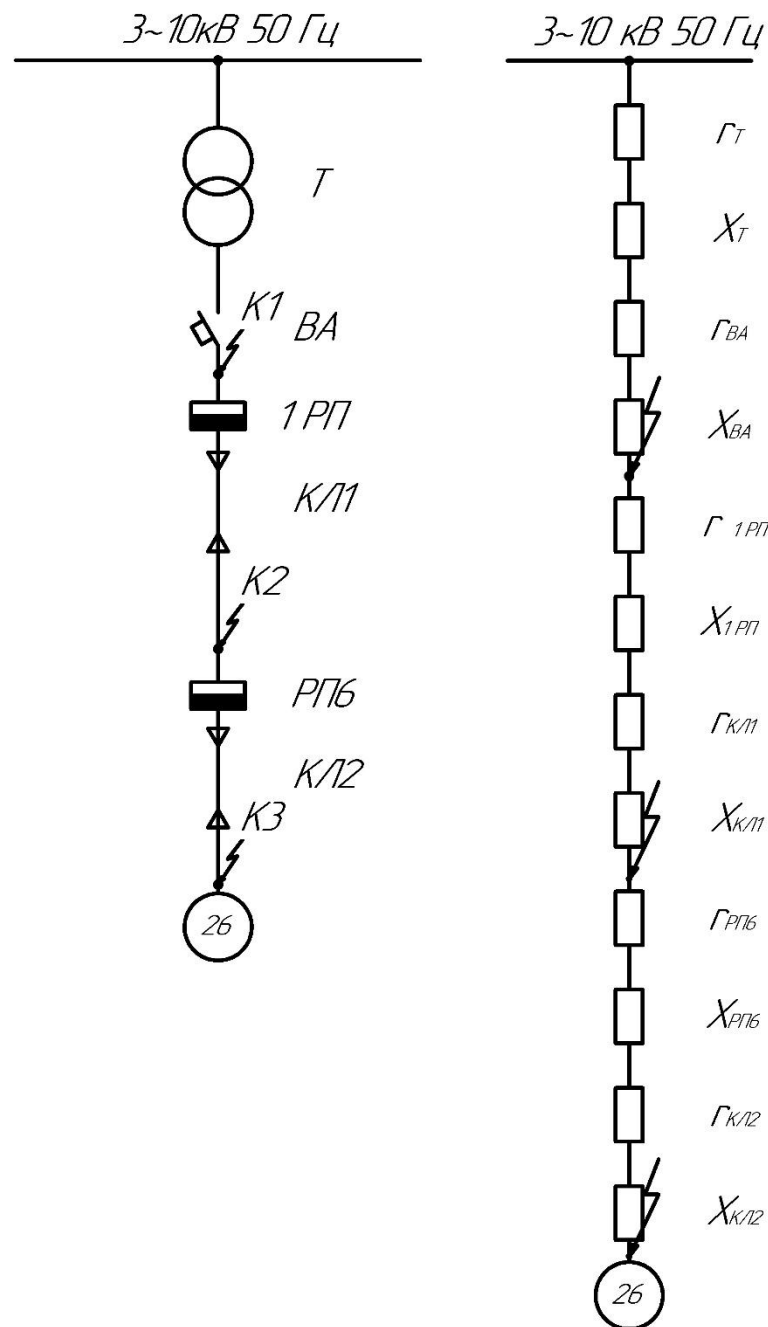


Рисунок 7.1 – Схема соединения электроприёмника и схема замещения



Рассчитаем токи КЗ для точки К1. Для этого определим арифметическую сумму активных ( $R_{1\Sigma}$ ) и реактивных ( $X_{1\Sigma}$ ) сопротивлений до точки КЗ по выражениям 7.1 и 7.2 соответственно. Характеристики элементов схемы берутся из [14, 15, 18, 19].

$$R_{1\Sigma} = r_T + r_{BA}, \quad (7.1)$$

$$R_{1\Sigma} = 5,5 + 1,1 = 6,6 \text{ мОм},$$

$$X_{1\Sigma} = X_T + X_{BA}, \quad (7.2)$$

$$X_{1\Sigma} = 17,1 + 0,5 = 17,6 \text{ мОм},$$

$r_T, X_T$  - активное и реактивное сопротивление трансформатора [10 с. 106, таблица 5.1.1];

$r_{BA}, X_{BA}$  - активное и реактивное сопротивление автоматического выключателя;

Полное сопротивление до точки КЗ определяется по формуле 7.3.

$$Z_{1\Sigma} = \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}, \quad (7.3)$$

$$Z_{1\Sigma} = \sqrt{17,6^2 + 6,6^2} = 19,36 \text{ мОм}.$$

Ток металлического КЗ будет определён по выражению 7.4.

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{U_{\text{НН}}}{\sqrt{3} \times Z_{\Sigma}}, \quad (7.4)$$

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \times 19,36 \times 10^{-3}} = 11,68 \text{ кА}.$$

Определим ударный коэффициент через выражение 7.5.

$$K_y = 1 + e^{\frac{0,01}{Ta}}, \quad (7.5)$$

$$K_y = 1 + e^{\frac{0,01}{0,0085}} = 1,31$$

$$Ta = \frac{X_{1\Sigma}}{2 \times \pi \times f \times R_{1\Sigma}}, \quad (7.6)$$

$$Ta = \frac{17,6}{2 \times \pi \times 50 \times 6,6} = 0,0085,$$

где  $Ta$  – постоянная времени цепи КЗ, определяется по формуле 7.6;  
 $f$  - частота тока.

Найдём ударный ток по формуле 7.7.

$$i_y = K_y \times \sqrt{2} \times I_{K1}, \quad (7.7)$$

$$i_y = 1,31 \times \sqrt{2} \times 11,68 = 21,81 \text{ кА}.$$

Рассчитаем токи КЗ для точек К2 и К3 аналогично К1, результаты сведём в таблицу 7.1.

Как правило при расчёте токов короткого замыкания требуется определения помимо 3-х фазного тока КЗ, так же 1-но фазный ток КЗ. Расчёт однофазного КЗ ведётся по выражению 7.8.

$$I_{K3}^{(3)} = \frac{U_{HH}}{Z_{\Pi} + \frac{Z_T^{(1)}}{3}}, \quad (7.8)$$

$$I_{K3}^{(3)} = \frac{0,4}{0,058 + \frac{0,043}{3}} = 5,52 \text{ кА}$$

где  $Z_T^{(1)}$  - полное сопротивление трансформатора однофазному КЗ,

$Z_{II}$  - полное сопротивление петли фаза - ноль до точки КЗ.

Расчёт однофазного КЗ для точек К2 и К3 проводится аналогично. Результаты расчётов сведены в таблицу 7.2.

Таблица 7.1 – Расчёт токов трехфазного короткого замыкания

Точка КЗ	Активное сопротивление до точки КЗ $R_{\Sigma}$ , мОм	Индуктивное сопротивление до точки КЗ $X_{\Sigma}$ , мОм	Полное сопротивление до точки КЗ $Z_{\Sigma}$ , мОм	Ток трёхфазного КЗ, $I_{кз}^{(3)}$ , кА	Ударный ток КЗ $i_y$ , кА
К1	6,6	17,6	19,36	11,68	21,81
К2	70,6	46,6	84,59	2,73	7,15
К3	73,18	48,91	88,03	2,63	6,87

Таблица 7.2 – Расчёт токов однофазного короткого замыкания

Точка КЗ	Активное сопротивление петли фаза - ноль до точки КЗ $R_{\Sigma}$ , мОм	Индуктивное сопротивление до петли фаза - ноль точки КЗ $X_{\Sigma}$ , мОм	Полное сопротивление петли фаза - ноль до точки КЗ $Z_{\Sigma}$ , мОм	Ток однофазного КЗ, $I_{кз}^{(1)}$ , кА
К1	19,47	53,4	58,08	5,52
К2	209	140	251,56	1,5
К3	219,54	143,83	262,46	1,45

## **8 Выбор и проверка силовых выключателей высокого напряжения**

Для обеспечения безопасности проведения ремонтных работ, защиты оборудования при авариях и прочих событиях, требующих отключения трансформатора на стороне ВН применяют силовые выключатели.

Выбор силовых выключателей выполняется по номинальному напряжению, номинальному току, категории размещения коммутационной способности и конструктивному исполнению. Выбор осуществляется по условиям, приведённым в [20 стр. 18], а так же сверяясь с [21]. На напряжение 10 кВ рекомендовано использовать выключатель с вакуумным гашением дуги.

Выключатели масляные при выборе силового выключателя не рассматриваются, в виду того, что данный тип выключателей считается морально устаревшим.

Проверка выключателя ВВ – 10 – 20/1000 У3 сведена в таблицу 8.1. Технические характеристики выключателя взяты из каталога [22].

Как видно из таблицы 8.1 все условия соблюдены. Значит проверяемый выключатель ВВ – 10 – 20/1000 У3 допускается до эксплуатации.

Продолжение таблицы 8.1

Параметра выбора	Расшифровка обозначений	Условие проверки	Подстановка численных значений	Результаты проверки
1	2	3	4	5
Номинальное напряжение	$U_{H.B}$ - номинальное напряжение выключателя; $U_{H.Y}$ - номинальное напряжение установки.	$U_{H.B} \geq U_{H.Y}$ .	$10кВ \geq 10кВ$	Условие соблюдается, проверка пройдена.
Номинальный ток	$I_{H.B}$ - номинальный ток выключателя; $I_{H.Y}$ - номинальный ток установки.	$I_{H.B} \geq I_{H.Y}$ .	$1000 А \geq 36,37 А$	Условие соблюдается, проверка пройдена.
Ток отключения	$I_{H.OTKL}$ - номинальный ток отключения, $I_{P.OTKL}$ - расчётный ток отключения, $I_{\infty}^{(3)}$ - трех фазный ток КЗ в момент отключения, $Z_K$ - принимается 10,1 Ом [2, с. 78].	$I_{H.OTKL} \geq I_{P.OTKL}$ , $I_{P.OTKL} = I_{\infty}^{(3)}$ , $I_{\infty}^{(3)} = \frac{U_{H.Y}}{\sqrt{3} \times Z_K}$ , $I_{P.OTKL} = I_{K3}^{(3)}$ , $I_{K3}^{(3)} = \frac{U_{H.Y}}{\sqrt{3} \times Z_K}$ .	$20кА \geq 0,578кА$	Условие соблюдается, проверка пройдена.

Продолжение таблицы 8.1

Мощность отключения	$S_{H.OTKL}$ , $S_{P.OTKL}$ - номинальная и расчётная полная мощность отключения.	$S_{H.OTKL} \geq S_{P.OTKL}$ , $S_{P.OTKL} = \sqrt{3} \times I_{P.OTKL} \times U_{H.U}$	$346 MVA \geq 10,05 MVA$	Условие соблюдается, проверка пройдена.
Электродинамическая стойкость.	$i_{\text{эо}}$ - ток электродинамической стойкости; $i_y$ - ударный ток КЗ	$i_{\text{эо}} \geq i_y$ .	$52 \text{ кА} \geq 21,81 \text{ кА}$	Условие соблюдается, проверка пройдена.
Термическая стойкость	$I_{TC}$ - ток термической стойкости (3 с); $I_{P.TC}$ - расчётный ток термической стойкости.	$I_{TC} \geq I_{P.TC}$ .	$25 \text{ кА} \geq 0,697 \text{ кА}$	Условие соблюдается, проверка пройдена.

## 9 Расчёт и выбор элементов релейной защиты

Целью расчёта релейной защиты становится выбор схемы и вида релейной защиты. Так же выбор трансформаторов тока и определение чувствительности релейной защиты [23].

Выбранная схема РЗ с занесёнными данными изображена на рисунке 9.1. Назначение релейной защиты обеспечение безопасности эксплуатации силового трансформатора. Так как мощность трансформатора менее 1 МВА, то устанавливается МТЗ и ТО.

Как видно на схеме рисунок 9.1 ТТ включены на разность 2-х фаз, используется только 2 ТТ с целью экономии.

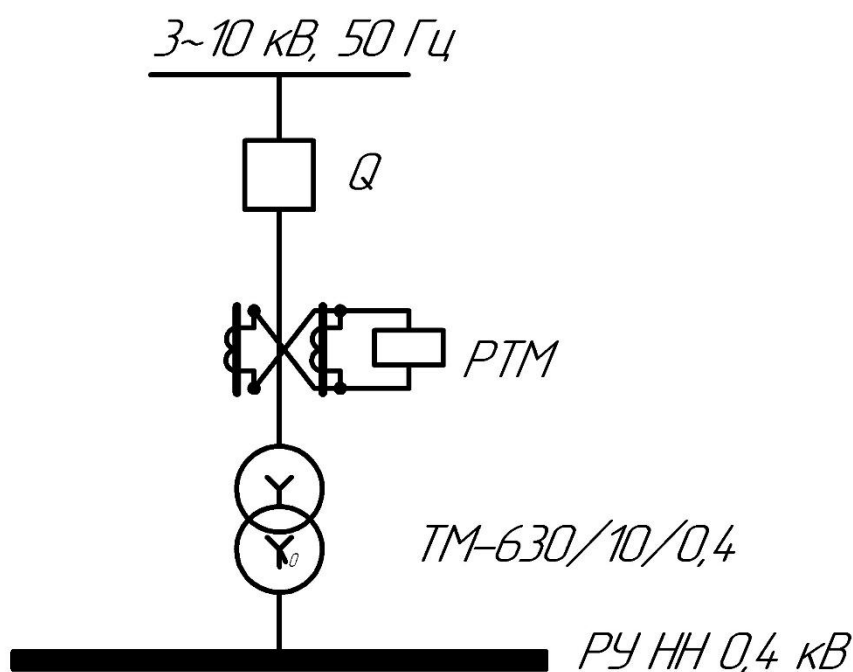


Рисунок 9.1 – Схема релейной защиты

Защита стороны НН обеспечивается наличием автоматических выключателей SF.

Ввиду того, что трансформатор, установленный на ТП масляный, типа ТМ, необходимо установить газовую защиту.

Выбираются трансформаторы тока на стороне ВН, для чего определяются токи по формуле 9.1. Должно выполняться условие  $I_{Н.ТТ} \geq I_{Н.Т}$

$$I_{Н.Т} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \times U_{ВН}}, \quad (9.1)$$

$$I_{Н.Т} = \frac{630}{\sqrt{3} \times 10} = 36,37 \text{ А},$$

где  $S_T$  - мощность трансформатора,

$U_{ВН}$  - напряжение ВН.

По [5 стр. 83] выбирается ТВЛ – 10 с  $I_{Н.ТТ} = 40 \text{ А}$ . Трансформатор тока выбирается встроенным в виду того, что ПС находится на территории предприятия и необходимо минимизировать занимаемое ей пространство. Так же это позволит обезопасить ТТ от внешних воздействий.

Трансформатор тока необходимо проверить по нескольким критериям.

По номинальному напряжению:

$$\begin{aligned} U_{Н.Т} &\geq U_{Н.У}, & (9.2) \\ 10 \text{ кВ} &\geq 10 \text{ кВ}, \end{aligned}$$

где  $U_{Н.Т}$  - номинальное напряжение ТТ,

$U_{Н.У}$  - номинальное напряжение установки.

По номинальной нагрузке вторичной цепи:

$$\begin{aligned} S_{2Н} &\geq S_{2Р}, & (9.3) \\ 15 \text{ ВА} &\geq 11,5 \text{ ВА}, \end{aligned}$$

где  $S_{2Н}$  - номинальная нагрузка вторичной цепи,

$S_{2Р}$  - расчётная нагрузка вторичной цепи.



По току электродинамической стойкости:

$$i_{\text{макс.дин}} \geq i_{\text{р.дин}}, \quad (9.4)$$

$$i_{\text{р.дин}} = I_{\text{КЗ.Т}}^{(3)} \times K_{\text{У}} \times \sqrt{2} = \frac{U_{\text{ср}}}{1,73 \times z_{\text{T}}} \times K_{\text{У}} \times \sqrt{2}, \quad (9.5)$$

$$i_{\text{р.дин}} = \frac{10500}{1,73 \times 8,7} \times 1,49 \times \sqrt{2} = 1470 \text{ А},$$

$$7 \text{ кА} \geq 1,47 \text{ кА},$$

где  $i_{\text{макс.дин}}$  - ток максимальной электродинамической стойкости по справочнику [5 таб. 1.12.1 стр. 83],

$i_{\text{р.дин}}$  - расчётный ток динамического воздействия,

$z_{\text{T}}$  - полное сопротивление силового трансформатора,

$K_{\text{У}}$  - ударный коэффициент рассчитывается по формуле 7.5,

$U_{\text{ср}}$  - среднее значение междуфазного напряжения.

По току термической стойкости:

$$I_{\text{терм.ст.Т}} \geq I_{\text{терм.ст.расч}}, \quad (9.6)$$

$$I_{\text{терм.ст.расч}} = I_{\text{КЗ.Т}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср}}}{1,73 \times z_{\text{T}}}, \quad (9.7)$$

$$0,94 \text{ кА} \geq 0,697 \text{ кА}$$

где  $I_{\text{терм.ст.Т}}$  - значение четырёхсекундного ток термической стойкости ТТ, по справочнику [13 стр. 302],

$I_{\text{терм.ст.расч}}$  - ток термического воздействия расчётный.

По допустимой погрешности (на 10%):

а) Определяется расчётный первичный ток:

$$I_{\text{расч}} = K_{\text{а}} \times I_{\text{КЗ.Т}}^{(3)}, \quad (9.8)$$

$$I_{расч} = 1,49 \times 697,63 = 1039,47$$

где  $I_{к\max}^{(3)}$  – максимальный ток внешнего 3-х фазного КЗ;

$\kappa_a$  - учёт апериодической составляющей  $\kappa_a = 1,49$ .

б) Расчётная кратность первичного тока:

$$m_{расч} = \frac{I_{расч}}{\alpha \times I_{Н.Т}}, \quad (9.9)$$

$$m_{расч} = \frac{1039,47}{0,8 \times 36,37} = 29$$

$\alpha$  – поправка к действительной кратности.

Так как все критерии проверки выполнены проверяемый ТТ допускается к эксплуатации.

Находится коэффициент трансформации ТТ по формуле 9.10.

$$K_{ТТ} = \frac{I_{1Н}}{I_{2Н}}, \quad (9.10)$$

$$K_{ТТ} = \frac{40}{5} = 8.$$

Так как наиболее опасный режим трехфазное КЗ, то коэффициент схемы принимается равным  $K_{сх} = 1,73$  по [5, стр. 85].

По выражению 9.11 находится ток срабатывания реле.

$$I_{с3(МТЗ)} = \frac{K_{зап} K_H K_{сх}}{K_B K_{ТТ} K_T} I_{н.б.}, \quad (9.11)$$

$$I_{с3(МТЗ)} = \frac{2,5 \times 1,1 \times 1,73}{0,85 \times 8 \times 25} \times 704,5 = 19,72 \text{ А},$$

где  $K_{зап}$  - коэффициент самозапуска,

$K_H$  - коэффициент надежности отстройки реле,

$K_B$  - коэффициент возврата реле,

$I_{н.б}$  - ток наибольшей нагрузки.

Значения коэффициентов по [5, стр. 82].

Исходя из тока срабатывания выбирается реле типа *РТМ – II*.

Выполняется проверка чувствительности реле по формуле 9.12.

$$K_{Ч(МТЗ)} = \frac{0,87 \times I_{КЗ,мин}^{(3)}}{I_{СЗ(МТЗ)} \times K_{ТТ} \times K_T}, \quad (9.12)$$
$$K_{Ч(МТЗ)} = \frac{0,87 \times 2630}{19,72 \times 8 \times 25} = 0,58,$$

Так как условие надежности  $K_{Ч(МТЗ)} \geq 1,2$  не выполнено, то необходимо изменить ток срабатывания. Для функционирования реле должно выполняться условие  $I_{СЗ(МТЗ)} > I_{н.б(втор.цель)}$ . Определим ток срабатывания по выражению 9.13.

$$I_{СЗ(МТЗ)} > \frac{I_{н.б}}{K_{ТТ} \times K_T}, \quad (9.13)$$
$$I_{СЗ(МТЗ)} > \frac{704,5}{8 \times 25} = 3,5 \text{ A},$$

По [5 таб. 1.12.2 стр. 83] выберем реле *РТ – 40/10*, с током срабатывания  $I_{СЗ(МТЗ)} = 4 \text{ A}$ . Выполним проверку коэффициента чувствительности,  $K_{Ч(МТЗ)} = 2,86$ , условие выполнено.

Помимо МТЗ для трансформаторов до 1 МВА применяют так же ТО. Ток срабатывания ТО определяется по выражению 9.14.

$$I_{C3(TO)} = \frac{K_H K_{CX}}{K_{TT} K_T} I_{кз.мин}^{(3)}, \quad (9.14)$$

$$I_{C3(TO)} = \frac{1,8 \times 1,73}{8 \times 25} \times 2630 = 40,9 \text{ A}.$$

Определяется коэффициент чувствительности ТО по выражению 9.12.

$$K_{ч(МТЗ)} = \frac{0,87 \times 2630}{40,9 \times 8 \times 25} = 0,28.$$

Так как условие надежности  $K_{ч(ТО)} \geq 2$  не выполнено необходимо перевыбрать ток срабатывания. Для ТО должно соблюдаться условие  $I_{C3(ТО)} > I_{C3(МТЗ)}$ .

По [5 таб. 1.12.2 стр. 83] выберем реле *РТМ* – I, с током срабатывания  $I_{C3(ТО)} = 5 \text{ A}$ . Выполним проверку коэффициента чувствительности,  $K_{ч(МТЗ)} = 2,28$ , условие выполнено.

## 10 Расчёт заземляющего устройства

Для расчёта защитного заземления необходимо определить расчётный ток замыкания на землю и расчётное сопротивление заземляющего устройства по формулам 10.1 и 10.2 соответственно.

$$I_3 = \frac{U_H (35L_{КЛ} + L_{БЛ})}{350}, \quad (10.1)$$

$$R_{3V1} \leq \frac{250}{I_{C3}}, \quad (10.2)$$

$$I_3 = \frac{10 \times (35 \times 10)}{350} = 10 \text{ A},$$

$$R_{3V1} \leq \frac{250}{10} = 25 \text{ Ом}.$$

Определяется сопротивление одного вертикального электрода по выражению 10.3.

$$r_{вз} = 0,3 \times \rho \times K_{сез.в}, \quad (10.3)$$

$$r_{вз} = 0,3 \times 50 \times 1,5 = 22,5 \text{ Ом},$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление грунта (чернозем  $\rho=50$  Ом  $\times$  м),

$K_{сез.в}$  - коэффициент сезонности.

Требуемое по НН  $R_{3V2} \leq 4 \text{ Ом}$  на НН, из [5, стр. 91].

Для расчёта принимается наименьшее предельное сопротивление совмещённого заземляющего устройства.

В виду того, что сопротивление грунта, чернозем  $\rho=50$  Ом  $\times$  м, то в расчёте будет использоваться  $R_{3V}$  полученное через выражение 10.4.

$$R_{3У} \leq 4 \times \frac{\rho}{100}, \quad (10.4)$$

$$R_{3У} \leq 4 \times \frac{50}{100} = 2 \text{ Ом}.$$

Определяется количество вертикальных электродов по выражению 10.5 без учёта экранирования.

$$N'_{\text{в.п}} = \frac{r_{\text{вз}}}{R_{3У}}, \quad (10.5)$$

$$N'_{\text{в.п}} = \frac{22,5}{2} = 11,25,$$

принимается количество вертикальных заземлителей  $N'_{\text{в.п}} = 12$ .

С учётом экранирования количество вертикальных электродов рассчитывается по выражению 10.6.

$$N_{\text{в.з}} = \frac{N'_{\text{в.п}}}{\eta_{\text{э}}}, \quad (10.6)$$

$$N_{\text{в.з}} = \frac{12}{0,64} = 18,75,$$

где  $\eta_{\text{э}}$  - значение коэффициента использования электродов для контурного ЗУ [5, стр. 91].

Принимается  $N_{\text{в.з}} = 19$ .

Размещение ЗУ отображено на плане. Длина по периметру закладки определяется по выражению 10.7.

$$L_{\text{п}} = (A + 2) \times 2 + (B + 2) \times 2, \quad (10.7)$$

$$L_{\text{п}} = (30 + 2) \times 2 + (24 + 2) \times 2 = 116 \text{ м},$$

где  $A$  - длина цеха 2,

$B$  - ширина цеха 2.

Расстояние между электродами, расположенными по периметру определено по формуле 10.8.

$$a = \frac{L_{II}}{N_{6.3}}, \quad (10.8)$$

$$a = \frac{116}{19} = 6,11 \text{ м.}$$

Определяются уточнённые значения сопротивления вертикальных и горизонтальных электродов по выражениям 10.9 и 10.10.

$$R_B = \frac{r_{63}}{N_6 \times \eta_6}, \quad (10.9)$$

$$R_\Gamma = \frac{0,4}{L_{II} \times \eta_\Gamma} \times \rho \times K_{\text{сез.2}} \times \lg \frac{2L_{II}^2}{b \times t}, \quad (10.10)$$

$$R_B = \frac{22,5}{19 \times 0,64} = 1,85 \text{ Ом},$$

$$R_\Gamma = \frac{0,4}{116 \times 0,32} \times 50 \times 1,5 \times \lg \frac{2 \times 116^2}{17,6 \times 10^{-3} \times 0,5} = 7,29 \text{ Ом},$$

где  $b$  - ширина полосы для круглого горизонтального заземлителя,

$t$  - глубина закладки,

$K_{\text{сез.2}}$  - коэффициент сезонности.

По выражению 10.11 рассчитывается фактическое сопротивление ЗУ.

$$R_{3У.Ф} = \frac{R_B R_\Gamma}{R_B + R_\Gamma}, \quad (10.11)$$

$$R_{3У.Ф} = \frac{1,85 \times 7,29}{1,85 + 7,29} = 1,48 \text{ Ом},$$

$$R_{3У.Ф}(1,48 \text{ Ом}) < R_{3У}(2 \text{ Ом}). \quad (10.12)$$

Так как фактическое ЗУ меньше предельного ЗУ выбрано верно. План заземления отображен на рисунке 10.1.

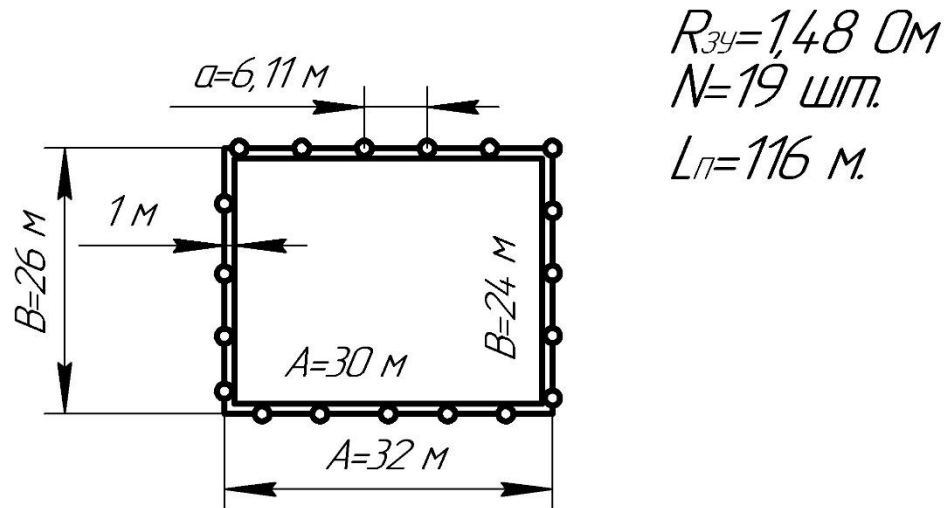


Рисунок 10.1 - План ЗУ



## 11 Расчёт молниезащиты

В расчёт молниезащиты входит определение типа защиты, параметров и зоны действия.

Ввиду наличия различных средств молниезащиты необходимо выбрать наиболее подходящую для данного объекта. Первостепенной задачей является выбор между активной и пассивной молниезащитой.

Так как активная молниезащита практически не используется в России информация о ней взята из иностранных источников.

Основное различие между активной молниезащитой и традиционными молниезащитными устройствами в наличии активного молниеприемника, который реагирует на рост напряженности электромагнитного поля, образующегося при приближении грозового фронта. Конденсаторы, входящие в состав АМЗ, заряжаются от напряжения, наведенного этим полем на антеннах устройства. При достижении на конденсаторах 12-14 кВ, происходит пробой разрядников и формирование короткого высоковольтного импульса (более 200 кВ), полярность которого обратна полярности фронта. За счёт этого импульса создаются наиболее благоприятные условия для удара молнии, чем окружающими объектами [24, 25, 26].

Пассивная молниезащита может быть выполнена несколькими методами: одиночным стержневым молниеотводом, двойными стержневыми молниеотводами, одиночные и двойные тросовые молниеотводы.

Данные молниезащиты являются очень надёжными, однако для 3-й категории молниезащиты подобная надёжность не требуется. Так же стоимость данных конструкций все же уступает в экономичности молниезащитной сетке.

Так как при установке молниезащиты необходимо руководствоваться как надёжностью защиты, так и экономичностью, наиболее соответствующей этим критериям является молниезащитная сетка.

Молниезащитная сетка является наиболее подходящим типом молниезащиты в виду достаточной надёжности, простоты конструкции, а также экономичности.

Для зданий третьей категории молниезащиты размер ячеек молниезащитной сетки должен составлять не более 15 метров. Ввиду того что размеры здания 30 на 24 метра, то принято решение о использовании молниезащитной сетки с ячейкой размером 14,5 на 11,4. Расположение молниезащитной сетки изображено на чертеже 5.

В качестве молниеприёмников используются стальные стержни диаметром 10 мм. Места стыков надёжно провариваются. Крепятся на поверхности крыши при помощи фарфоровых держателей, данные держатели обеспечивают необходимый зазор между поверхностью крыши и молниеприёмником не менее 10 см. Держатели установлены с интервалом в 2 м.

Молниеотвод выполнен из того же материала, что и молниеприёмник, крепится к стене здания на специальные крепления.

Узлы спуска и крепления изображены на чертеже 5.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения ВКР были решены все поставленные задачи:

- 1 Составлена сводная ведомость нагрузок, сведённая в таблицу 1;
- 2 Рассчитано освещение для помещений, и определено требуемое количество светильников, 57 шт.;
- 3 Выбран трансформатор для питающей подстанции с учётом потерь ТМ – 630/10/0,4.;
- 4 Выбрано компенсирующее устройство, УК4 – 0,38 – 100.;
- 5 Определено местоположение подстанции, отображенное на рисунке 1;
- 6 Выбрано основное оборудование цеха в виде выключателей и кабелей, результаты выборов которых сведены в таблицы 5 и 6;
- 7 Распределена нагрузка цеха между электрощитами. Схема распределения изображена на рисунке 2;
- 8 Найдены токи короткого замыкания, результаты сведены в таблицу 7.1 – 7.2.
- 9 По полученным результатам был составлен план расположения оборудования с указанием подключений, а также генплан с указанием места установки подстанции;
- 10 Выбрана релейная защита, а также рассчитаны уставки срабатывания.
- 11 Рассчитано защитное заземление, а также подсчитано количество заземляющих электродов, 19 шт.
- 12 Определен тип молниезащиты, а также выбран материал молниеприёмника, стальные стержни.
- 13 На основании всех расчетов составлена электрическая схема подстанции, от которой запитано предприятие, изображённая на чертеже 6, а также составлена аннотация на английском языке.

Ввиду выполнения основных задач ВКР, работу можно считать завершённой.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Ополева Г. Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. М.: ФОРУМ, 2017. 416 с.

2 Министерство энергетики, энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Электронный ресурс]: URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 15.09.2018).

3 Официальный сайт ООО «Бугурусланский завод металлоизделий» [Электронный ресурс]: URL: <https://www.iprom.ru/company/64370/> (дата обращения 15.09.2018).

4 Кабышев А. В., Обухов С. Г. Расчёт и проектирование систем электроснабжения объектов и установок: учебное пособие и справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. Томск: ТПУ, 2016. 248 с.

5 Шеховцов В. П. Расчёт и проектирование схем электроснабжения: методическое пособие для курсового и дипломного проектирования. М.: ИНФРА-М, 2019. 214 с.

6 СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [Электронный ресурс]: URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения 02.10.2018).

7 Характеристики лампы ARCTIC.OPL ECO LED 1200 4000k [Электронный ресурс]: URL: <https://www.etm.ru/cat/nn/8933447/> (дата обращения 02.10.2018).

8 Анчарова Т. В., Рашевская М.А., Стебунова Е.Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2017. 415 с.

9 Технические характеристики силовых трансформаторов [Электронный ресурс]: URL:

[http://www.transformator.com.ru/ttproduction/transform/tmg\\_6\\_10kv.php?GALLERY\\_ID=9](http://www.transformator.com.ru/ttproduction/transform/tmg_6_10kv.php?GALLERY_ID=9) (дата обращения 15.10.2018).

10 Шеховцов В. П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению: учебное пособие. 3-е изд. М.: ИНФРА-М, 2019. 136 с.

11 Стандарты организации ОАО «ФСК ЕЭС» [Электронный ресурс]: URL: [http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO\\_56947007-29.180.02.140-2012.pdf](http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.180.02.140-2012.pdf) (дата обращения 02.11.2018).

12 Инструкция по эксплуатации. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» [Электронный ресурс]: URL: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto\\_56947007-29.180.01.116-2012.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29.180.01.116-2012.pdf) (дата обращения 05.10.2018).

13 Герасимов В. Г., Дьяков А. Ф., Ильинский Н. Ф. Электротехнический справочник: справочник. 10-е изд. М.: МЭИ, 2017. 964 с.

14 Файбисович Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей: справочник. М.: НЦ ЭНАС, 2015. 301 с.

15 Автоматические выключатели – Могилёвский завод [Электронный ресурс]: URL: <http://www.tdmogilev.ru/katalog/avtomaticheskie-vyklyuchateli/> (дата обращения 15.11.2018).

16 Завод Электроконтактор. Выключатели автоматические [Электронный ресурс]: URL: <https://www.elektrokontaktor.ru/produkcija/vyklyuchateli-avtomaticheskie-0> (дата обращения 20.11.2018).

17 ПУЭ-7 п. 1.3.10-1.3.11 [Электронный ресурс]: URL: <http://pue7.ru/pue7/punkt.php?n=1.3.10&k=1.3.11> (дата обращения 10.12.2018)

18 Технические характеристики кабелей [Электронный ресурс]: URL: <http://beenergy.ru/equipment/harakteristiki-marka-i-primenenie-provodov-i-kabeley.html> (дата обращения 22.12.2019)

19 Иванов И. И., Соловьёв Г. И., Фролов В. Я. Справочник электротехника: справочник. С.: Лань, 2019. 736 с.

20 Гайсаров П. В., Лисовская И. Т. Выбор электрической аппаратуры, токоведущих частей и изоляторов: учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию. Челябинск.: ЮУрГУ, 2015. 59 с.

21 Electric power equipment maintenance and testing second edition Paul Gill, Press, CRC, 2010. 1000 с.

22 Каталог выключателей 10 кВ [Электронный ресурс]: URL: <http://www.vsoyuz.com/ru/produkcija/cb/vakuumnye-vyklyuchateli-10-kv/vrs-10.htm> (дата обращения 10.01.2019)

23 Lewis J. C. Protective relaying: principles and applications. Майами: CRC Press Taylor & Francis Group, LCC, 2014. 695с

24 Adams D.J. Differences between active and passive lightning rods. Нью-Йорк: MassPressState Group, 2019.

25 Hein R. H. Research and application of active lightning protection. Лондон: LLC Paper and Press, 2018. 523с.

26 Clarke A. C. Lightning Protection. Майами: CRC Press Taylor and Francis Group, 2016. 593с.