

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 завода по ремонту механического оборудования

Студент

А.В. Пушкарев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., Д.А. Кретов

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

Тольятти 2021

## Аннотация

Бакалаврская работа сделана по теме: «Проектирование системы электроснабжения завода по ремонту механического оборудования». Работа состоит из взаимосвязанных этапов, на каждом из которых производятся необходимые расчеты.

Вначале производится расчет электрических нагрузок завода на основании указанных в задании первичных данных об электроустановках. Результаты расчетов сводятся в таблицу. Далее формируются группы из схожих по режимам работы электроприемников и, исходя из категорий надежности электроснабжения, для питания этих групп от трансформаторных подстанций выбираются необходимого типа, мощности и числа трансформаторы. На следующем этапе на основании ранее полученных расчетов мощностей трансформаторных подстанций создается картограмма нагрузок и генеральный план предприятия, где определяется местоположение главной понизительной подстанции. После этого выбирается тип, числа и мощности трансформаторов главной понизительной подстанции. Затем производится расчет токов коротких замыканий, выбор и проверка оборудования на стороне 6 кВ главной понизительной подстанции. В результате этих этапов формируется готовая система электроснабжения завода, отвечающая всем необходимым требованиям.

Пояснительная записка выполнена на 61 листе формата А4, содержит 5 рисунков, 13 таблиц. Список используемых источников включает в себя 25 наименований, в том числе 5 на иностранном языке. Графическая часть представлена на шести листах формата А1.

## Содержание

Введение.....	4
1 Характеристика завода по ремонту механического оборудования .....	6
2 Расчет электрических нагрузок .....	9
2.1 Расчет нагрузки цехов на напряжении 0,4 кВ .....	10
2.2 Расчет высоковольтной нагрузки на напряжении 6 кВ .....	20
3 Расчет цеховых трансформаторных подстанций с учетом компенсации реактивной мощности .....	26
4 Определение местоположения главной понижающей подстанции (ГПП) ..	40
5 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов ГПП .....	47
6 Расчет токов коротких замыканий .....	49
7 Выбор и проверка оборудования на стороне 6 кВ ГПП.....	52
Заключение .....	58
Список используемых источников.....	59

## Введение

Развитие промышленного производства и строительство новых крупных промышленных предприятий всегда являлось важным фактором в развитии экономической независимости страны. При этом огромную роль играют предприятия, обеспечивающие требуемым оборудованием другие отрасли народного хозяйства [12]. К таким предприятиям относятся предприятия по ремонту механического оборудования, которое является объектом выпускной квалификационной работы.

Технологический процесс предприятия по ремонту механического оборудования является сложным и требующим больших электрических мощностей.

Категория надежности электроснабжения определяется согласно Правилам Устройства Электроустановок [13] и на этапе проектирования системы электроснабжения по [10].

Для проектирования надежной и современной системы электроснабжения промышленного предприятия необходимо использовать современные методы инженерного проектирования, а также современные методики выбора электрооборудования [19], [20]. При этом выбор электрооборудования должен производиться среди номенклатуры производимого в Российской Федерации электротехнического и высоковольтного оборудования.

В данной работе рассматривается электроснабжение завода по ремонту механического оборудования. Задачей электроснабжения является обеспечение бесперебойной, безаварийной, надежной работы оборудования во всем заводе, поэтому к электроснабжению предъявляют ряд необходимых и важных требований, решающих эту задачу.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка проекта системы электроснабжения предприятия по ремонту механического

оборудования для обеспечения требуемого уровня надёжности электроснабжения.

Для достижения поставленной цели в ВКР необходимо решить следующие задачи:

1. Представить характеристику технологического процесса и описание предприятия по ремонту механического оборудования в целом;
2. Спроектировать систему распределения электрической энергии между производственными цехами и предприятия по ремонту механического оборудования;
3. Спроектировать электрическую часть главной понизительной подстанции предприятия по ремонту механического оборудования.

Для определения исходных данных по проектированию системы электроснабжения предприятия по ремонту механического оборудования использовались учебные пособия [1], [4], [19] а также другие источники представленные в списке использованных источников, в том числе иностранных [22], [24], [25].

Система электроснабжения должна быть гибкой, то есть способной к переустройству и внедрению более современного и технологичного оборудования, учитывать многообразие электроприемников по различным параметрам: режимам работы, напряжению, току, частоте, должна быть надежной и безопасной, должна быть готова противостоять всевозможным неблагоприятным факторам и условиям, и безотказно работать в них. Нельзя не отметить важность экономической составляющей в решении задачи электроснабжения и автоматизации процесса электроснабжения [8], [9], [11].

Для выполнения всех этих требований должна быть разработана актуальная методика, позволяющая решить все вопросы электроснабжения, а также необходим точный расчет [19]. На сегодняшний день для расчета электрических нагрузок используют [16], а также разработанные на основании них учебные пособия.

## 1 Характеристика завода по ремонту механического оборудования

Завод по ремонту механического оборудования расположен на Средней Волге и состоит из 16 цехов. Наименования цехов, числа и мощности электроприемников представлены в таблице 1. Генеральный план завода по ремонту механического оборудования представлен на рисунке 1.

Предприятие по ремонту механического оборудования предназначено для обеспечения производства капитальных ремонтов машин и агрегатов. Большинство современных ремонтно-механических предприятий выполняются, исходя из необходимости выполнения капитальных ремонтов разнотипного оборудования. Кроме того, в технологическом процессе любого крупного ремонтно-механического предприятия должна быть обеспечена возможность изготовления запасных частей, которые могут потребоваться для обеспечения капитального ремонта различного специализированного оборудования, не относящегося к типовому. Структура цехов предприятия, представленная в таблице 1, позволяет обеспечить требуемые условия проведения капитальных ремонтов. Наличие на предприятии железнодорожных путей позволит принимать в ремонт оборудования с различных регионов.

Таблица 1 – Ведомость нагрузок предприятия

Номер на генеральном плане	Наименование	Установленная мощность, кВт	Приведенное число электроприемников, $n_p$
1	2	3	4
Мощность по 0,4 кВ			
1	Котельная	616	8
2	Вагоноремонтный корпус	455	8
3	Механический корпус №1	1794	23
4	Ремонтно-механический цех	413	21
5	Испытательный комплекс	699	28
6	Строительный цех	213	19
7	Механический корпус №2	1277	22
8	Цех сортировки №1	705	15

Продолжение таблицы 1

9	Цех сортировки №2	349	10
10	Столовая	60	23
11	Погрузочная площадка	1437	27
12	Компрессорная	240	8
13	Административный корпус	160	16
14	Склад продукции	491	12
15	Насосная	234	1
16	Лаборатория	270	17
Мощность по 6 кВ			
3	Синхронные ЭД механического корпуса №1	630	2
4	Синхронные ЭД механического корпуса №2	500	2
12	Синхронные ЭД компрессорной	400	4

Выводы по разделу 1:

1. Определены исходные данные для проведения проектирования системы внутризаводского электроснабжения предприятия по ремонту механического оборудования, а именно, генеральный план предприятия, мощности цехов предприятия, мощности высоковольтных потребителей к которым относятся высоковольтные синхронные двигатели.

2. Представлена краткая характеристика назначения предприятия по ремонту механического оборудования и описание технологического процесса необходимые для проектирования надёжной внутризаводской системы электроснабжения.

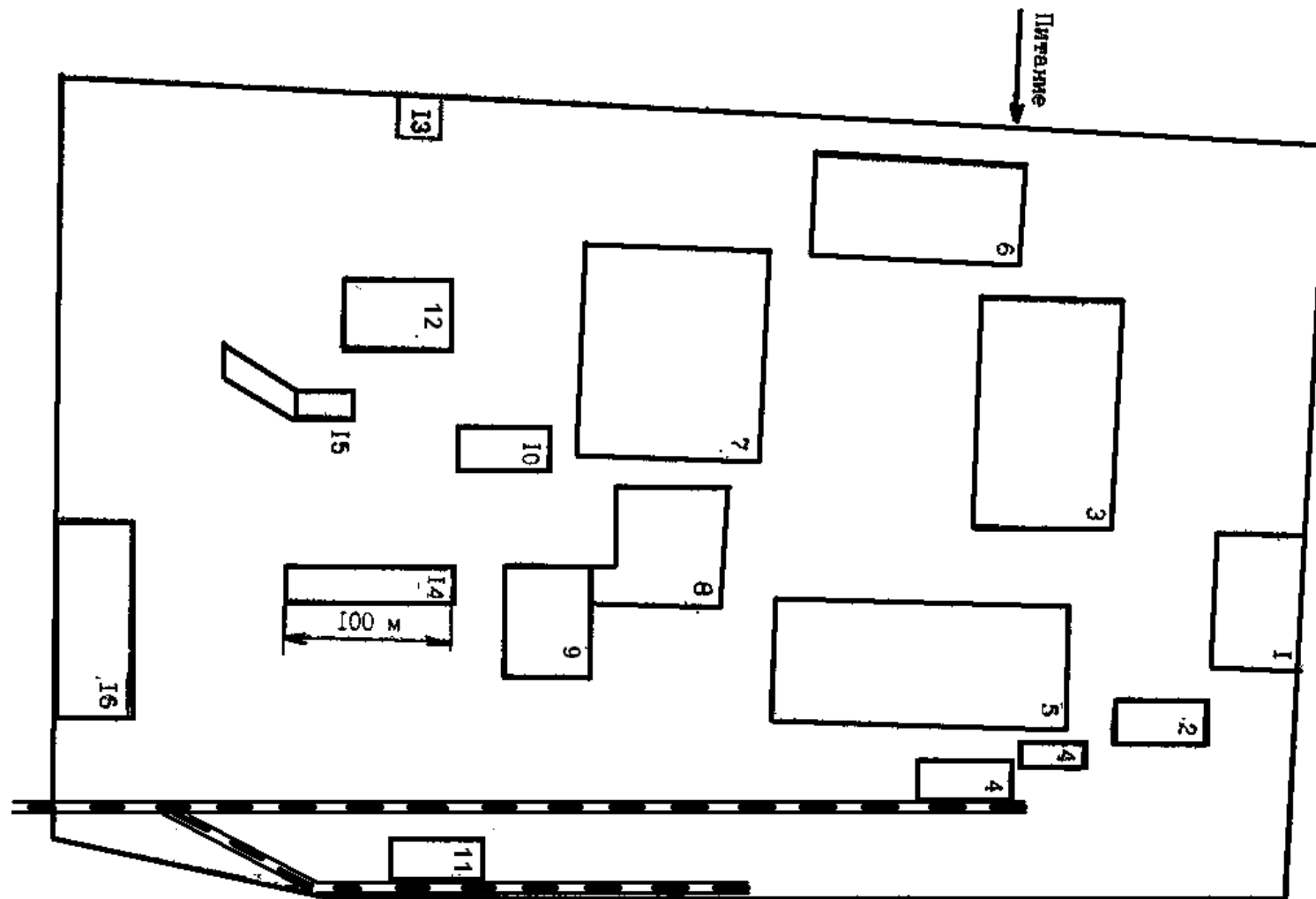


Рисунок 1 – Генеральный план завода по ремонту механического оборудования



## 2 Расчет электрических нагрузок

Исходные данные электроприемников для расчета электрических нагрузок представлены в таблице 2 [18].

Таблица 2 – Исходные данные и справочные значения

Номер на ген. плане	Название цеха	$P_H$ , кВт	$n_{\Sigma}$	$\sum P_H$ , кВт	$K_{II}$	$\cos \varphi$	$tg \varphi$	$K_p$	$K_o$
На стороне 0,4 кВ									
1	Котельная	-	8	616	0,6	0,75	0,88	0,92	-
2	Вагоноремонтный корпус	-	8	455	0,4	0,8	0,75	0,94	-
3	Механический корпус №1	-	23	1794	0,4	0,8	0,75	0,85	-
4	Ремонтно-механический цех	-	21	413	0,3	0,6	1,33	0,85	-
5	Испытательный комплекс	-	28	699	0,3	0,6	1,33	0,75	-
6	Строительный цех	-	19	213	0,8	0,8	0,75	0,9	-
7	Механический корпус №2	-	22	1277	0,3	0,6	1,33	0,85	-
8	Цех сортировки №1	-	15	705	0,6	0,7	1,02	0,9	-
9	Цех сортировки №2	-	10	349	0,6	0,7	1,02	0,9	-
10	Столовая	-	23	60	0,5	0,7	1,02	0,85	-
11	Погрузочная площадка	-	27	1437	0,3	0,7	1,02	0,75	-
12	Компрессорная	-	8	240	0,7	0,8	0,75	0,91	-
13	Административный корпус	-	16	160	0,5	0,7	1,02	0,85	-
14	Склад продукции	-	12	491	0,2	0,6	1,33	0,8	-
15	Насосная	-	1	234	0,7	0,8	0,75	1,14	-
16	Лаборатория	-	17	270	0,4	0,8	0,75	0,85	-
На стороне 6 кВ									
3	Механический корпус №1	630	2	1260	0,4	0,8	0,75	-	0,95
7	Механический корпус №2	500	2	1000	0,3	0,6	1,33	-	0,95
12	Компрессорная	400	4	1600	0,7	0,8	0,75	-	1

## 2.1 Расчет нагрузки цехов на напряжении 0,4 кВ

Активные и реактивные электрические нагрузки за наиболее загруженную смену определяются по выражению из [4], [12] на основании исходных данных представленных в таблице 2:

$$P_C = K_H \cdot P_H, \quad (1)$$

$$Q_C = K_H \cdot P_H \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (2)$$

Средние активные и реактивные нагрузки цехов завода по ремонту механического оборудования:

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для котельной [2]:

$$P_C = 0,6 \cdot 616 = 369,6 \text{ кВт},$$

$$Q_C = 0,6 \cdot 616 \cdot 0,88 = 325,96 \text{ квар}.$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для вагоноремонтного корпуса:

$$P_C = 0,4 \cdot 455 = 182 \text{ кВт},$$

$$Q_C = 0,4 \cdot 455 \cdot 0,75 = 136,5 \text{ квар}.$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для механического корпуса №1:

$$P_C = 0,4 \cdot 1794 = 717,6 \text{ кВт},$$

$$Q_C = 0,4 \cdot 1794 \cdot 0,75 = 538,2 \text{ квар}.$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для ремонтно-механического цеха:

$$P_C = 0,3 \cdot 413 = 123,9 \text{ кВт},$$
$$Q_C = 0,3 \cdot 413 \cdot 1,33 = 165,2 \text{ квар.}$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для испытательного комплекса:

$$P_C = 0,3 \cdot 699 = 209,7 \text{ кВт},$$
$$Q_C = 0,3 \cdot 699 \cdot 1,33 = 279,6 \text{ квар.}$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для строительного цеха:

$$P_C = 0,8 \cdot 213 = 170,4 \text{ кВт},$$
$$Q_C = 0,8 \cdot 213 \cdot 0,75 = 127,8 \text{ квар.}$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для механического корпуса №2:

$$P_C = 0,3 \cdot 1277 = 383,1 \text{ кВт},$$
$$Q_C = 0,3 \cdot 1277 \cdot 1,33 = 510,8 \text{ квар.}$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для цеха сортировки №1:

$$P_C = 0,6 \cdot 705 = 423 \text{ кВт},$$
$$Q_C = 0,6 \cdot 705 \cdot 1,02 = 431,55 \text{ квар.}$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для цеха сортировки №2:

$$P_C = 0,6 \cdot 349 = 209,4 \text{ кВт},$$

$$Q_C = 0,6 \cdot 349 \cdot 1,02 = 213,63 \text{ квар.}$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для столовой:

$$P_C = 0,5 \cdot 60 = 30 \text{ кВт},$$

$$Q_C = 0,5 \cdot 60 \cdot 1,02 = 30,6 \text{ квар.}$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для погрузочной площадки:

$$P_C = 0,3 \cdot 1437 = 431,1 \text{ кВт},$$

$$Q_C = 0,3 \cdot 1437 \cdot 1,02 = 439,81 \text{ квар.}$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для компрессорной:

$$P_C = 0,7 \cdot 240 = 168 \text{ кВт},$$

$$Q_C = 0,7 \cdot 240 \cdot 0,75 = 126 \text{ квар.}$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для административного корпуса:

$$P_C = 0,5 \cdot 160 = 80 \text{ кВт},$$

$$Q_C = 0,5 \cdot 160 \cdot 1,02 = 81,6 \text{ квар.}$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для склада продукции:

$$P_C = 0,2 \cdot 491 = 98,2 \text{ кВт},$$

$$Q_C = 0,2 \cdot 491 \cdot 1,33 = 130,93 \text{ квар}.$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для насосной:

$$P_C = 0,7 \cdot 234 = 163,8 \text{ кВт},$$

$$Q_C = 0,7 \cdot 234 \cdot 0,75 = 122,85 \text{ квар}.$$

Используя (1) и (2) определим активную и реактивную электрические нагрузки за наиболее загруженную смену для лаборатории:

$$P_C = 0,4 \cdot 270 = 108 \text{ кВт},$$

$$Q_C = 0,4 \cdot 270 \cdot 0,75 = 81 \text{ квар}.$$

Расчетные активные и реактивные мощности цехов завода по ремонту механического оборудования определяются на основании исходных данных, представленных в таблице 2 по выражениям [4], [5]:

$$P_P = K_P \cdot P_C, \quad (3)$$

$$Q_P = 1,1 \cdot Q_C \text{ при } n_{\text{э}} \leq 10, \quad (4)$$

$$Q_P = Q_C \text{ при } n_{\text{э}} > 10. \quad (5)$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для котельной:

$$P_p = 0,92 \cdot 369,6 = 340,03 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 1,1 \cdot 325,96 = 358,55 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для вагоноремонтного корпуса:

$$P_p = 0,94 \cdot 182 = 171,08 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 1,1 \cdot 136,5 = 150,15 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для механического корпуса №1:

$$P_p = 0,85 \cdot 717,6 = 609,96 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 538,2 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для ремонтно-механического цеха:

$$P_p = 0,85 \cdot 123,9 = 105,32 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 165,2 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для испытательного комплекса:

$$P_p = 0,75 \cdot 209,7 = 157,28 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 279,6 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для строительного цеха:

$$P_p = 0,9 \cdot 170,4 = 153,36 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 127,8 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для механического корпуса №2:

$$P_p = 0,85 \cdot 383,1 = 325,64 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 510,8 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для цеха сортировки №1:

$$P_p = 0,9 \cdot 423 = 380,7 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 431,55 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для цеха сортировки №2:

$$P_p = 0,9 \cdot 209,4 = 188,46 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 1,1 \cdot 213,63 = 235 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для столовой:

$$P_p = 0,85 \cdot 30 = 25,5 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 30,6 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для погрузочной площадки:

$$P_p = 0,75 \cdot 431,1 = 323,33 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 439,81 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для компрессорной:

$$P_p = 0,91 \cdot 168 = 152,88 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 1,1 \cdot 126,6 = 138,6 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для административного корпуса:

$$P_p = 0,85 \cdot 80 = 68 \text{ кВт},$$

$$Q_c = 81,6 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для склада продукции:

$$P_p = 0,8 \cdot 98,2 = 78,56 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 130,93 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для насосной:

$$P_p = 1,14 \cdot 163,8 = 186,73 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 1,1 \cdot 122,85 = 135,14 \text{ квар}.$$

Используя (3), (4) и (5) определим расчетную активную и реактивную электрические нагрузки для лаборатории:



$$P_p = 0,85 \cdot 108 = 91,8 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 81 \text{ квар}.$$

Полную расчетную мощность рассчитываем по формуле (6) :

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (6)$$

Выполним расчет для каждого цеха предприятия.

По выражению (6) для котельной:

$$S_{p1} = \sqrt{340,03^2 + 358,55^2} = 494,15 \text{ кВА}$$

По выражению (6) для вагоноремонтного корпуса:

$$S_{p2} = \sqrt{171,08^2 + 150,15^2} = 227,63 \text{ кВА}$$

По выражению (6) для механического корпуса №1:

$$S_{p3} = \sqrt{609,96^2 + 538,2^2} = 813,46 \text{ кВА}$$

По выражению (6) для ремонтно-механического цеха:

$$S_{p4} = \sqrt{105,32^2 + 165,2^2} = 195,91 \text{ кВА}$$

По выражению (6) для испытательного комплекса:

$$S_{p5} = \sqrt{157,28^2 + 279,6^2} = 320,8 \text{ кВА}$$

По выражению (6) для строительного цеха:

$$S_{P6} = \sqrt{153,36^2 + 127,8^2} = 199,63 \text{кВА}$$

По выражению (6) для механического корпуса №2:

$$S_{P7} = \sqrt{325,64^2 + 510,8^2} = 605,77 \text{кВА}$$

По выражению (6) для цеха сортировки №1:

$$S_{P8} = \sqrt{380,7^2 + 431,55^2} = 575,47 \text{кВА}$$

По выражению (6) для цеха сортировки №2:

$$S_{P9} = \sqrt{188,46^2 + 235^2} = 301,23 \text{кВА}$$

По выражению (6) для столовой:

$$S_{P10} = \sqrt{25,5^2 + 30,6^2} = 39,84 \text{кВА}$$

По выражению (6) для погрузочной площадки:

$$S_{P11} = \sqrt{323,33^2 + 439,81^2} = 545,87 \text{кВА}$$

По выражению (6) для компрессорной:

$$S_{P12} = \sqrt{152,88^2 + 138,6^2} = 206,35 \text{кВА}$$

По выражению (6) для административного корпуса:

$$S_{P13} = \sqrt{68^2 + 81,62^2} = 106,23 \text{кВА}$$

По выражению (6) для склада продукции:

$$S_{P14} = \sqrt{78,56^2 + 130,93^2} = 152,69 \text{кВА}$$

По выражению (6) для насосной:

$$S_{P15} = \sqrt{186,73^2 + 135,14^2} = 230,5 \text{кВА}$$

По выражению (6) для лаборатории:

$$S_{P16} = \sqrt{91,8^2 + 81^2} = 122,43 \text{кВА}$$

Общее количество электроприемников на напряжении 0,4 кВ на заводе по ремонту механического оборудования:

$$\sum n_{\text{э}} = 258;$$

Суммы нагрузок всех цехов завода:

$$\sum P_H = 9413 \text{кВт},$$

$$\sum P_C = 3867,8 \text{кВт},$$

$$\sum Q_C = 3742,05 \text{квар},$$

$$\sum P_P = 3358,6 \text{кВт},$$

$$\sum Q_p = 3834,54 \text{ квар.}$$

Коэффициент использования для всей низковольтной нагрузки завода [18]:

$$K_H = \frac{\sum P_C}{\sum P_H}, \quad (7)$$

$$K_H = \frac{3867,8}{9413} = 0,4$$

Коэффициент реактивной мощности низковольтной нагрузки завода [3]:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sum Q_C}{\sum P_C}, \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{3742,05}{3867,8} = 0,97.$$

Полная мощность всех цехов завода по ремонту механического оборудования:

$$\sum S_P = \sqrt{\sum P_P^2 + \sum Q_P^2}, \quad (9)$$

$$\sum S_P = \sqrt{3358,6^2 + 3834,54^2} = 5097,44 \text{ кВА}$$

## 2.2 Расчет высоковольтной нагрузки на напряжении 6 кВ

Завод имеет три цеха высоковольтной нагрузки 6 – 10 кВ: механический корпус №1, механический корпус №2 и компрессорную.

Суммарную номинальную мощность высоковольтной нагрузки цеха находят по формуле [4], [5]:

$$\sum P_H = P_H \cdot n \quad (10)$$

Для механического корпуса №1 по (10)получим:

$$\sum P_H = 630 \cdot 2 = 1260 \text{кВт},$$

Для механического корпуса №2 по (10)получим:

$$\sum P_H = 500 \cdot 2 = 1000 \text{кВт},$$

Для компрессорной по (10)получим:

$$\sum P_H = 400 \cdot 4 = 1600 \text{кВт}.$$

Рассчитывается среднесменная нагрузка по формулам (1) и (2).

Механический корпус №1:

$$P_C = 0,4 \cdot 1260 = 504 \text{кВт},$$

$$Q_C = 0,4 \cdot 1260 \cdot 0,75 = 378 \text{квар}.$$

Механический корпус №2:

$$P_C = 0,3 \cdot 1000 = 300 \text{кВт},$$

$$Q_C = 0,3 \cdot 1000 \cdot 1,33 = 400 \text{квар}.$$

Компрессорная:

$$P_C = 0,7 \cdot 1600 = 1120 \text{ кВт.}$$

$$Q_C = 0,7 \cdot 1600 \cdot 0,75 = 840 \text{ квар.}$$

Суммы нагрузок всего оборудования завода на напряжении 6кВ:

$$\sum P_H = 3860 \text{ кВт,}$$

$$\sum P_C = 1924 \text{ кВт,}$$

$$\sum Q_C = 1618 \text{ квар.}$$

Коэффициент использования для высоковольтной нагрузки завода:

$$K_H = \frac{1924}{3860} = 0,5$$

Коэффициент реактивной мощности высоковольтной нагрузки завода:

$$\text{tg} \varphi = \frac{1618}{1924} = 0,84$$

Высоковольтного оборудования восемь единиц.

$$\sum P_P = 3358,6 \text{ кВт,}$$

$$\sum Q_P = 3834,54 \text{ квар.}$$

Расчетные активные и реактивные мощности цехов завода по ремонту механического оборудования с напряжением 6кВ определяются по выражению на основании исходных данных, представленных в таблице 2:

$$P_p = K_o \cdot P_c, \quad (11)$$

$$Q_p = K_o \cdot Q_c, \quad (12)$$

$$P_p = 0,9 \cdot 1924 = 1731,6 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 0,9 \cdot 1618 = 1456,2 \text{ квар}.$$

Полная мощность оборудования 6 кВ:

$$\sum S_p = \sqrt{1731,6^2 + 1456,2^2} = 2262,5 \text{ кВА}$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 3.

Выводы по разделу 2:

1. Завод имеет 16 различных цехов, в которых расположены 258 электроприемников напряжением 0,4 кВ и 8 электроприемников напряжением 6 кВ. Все они ввиду технологических особенностей и назначения работают в различных режимах и в разное время. Поэтому была использована методика, учитывающая особенности каждого цеха и в то же время позволяющая цехи объединять по общим параметрам.

2. Нашли среднесменную, расчетную и полную нагрузки каждого цеха завода. Проанализировали полученные результаты и увидели, что наибольшие нагрузки сосредоточены в цехах: 3, 7, 8, 11.

3. Расчеты данного этапа являются необходимым базисом для дальнейшей разработки электроснабжения завода по ремонту механического оборудования и будут использованы во всех последующих этапах [21].

Таблица 3 – Результаты расчета нагрузок по заводу

№ на плане	Название цеха	$P_H$ , кВт	$n_{\Sigma}$	$\Sigma P_H$ , кВт	$K_{и}$	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$P_c$ , кВт	$Q_c$ , квар	$K_p$	$K_o$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Нагрузка 0,4 кВ</b>														
1	Котельная		8	616	0,6	0,75	0,88	369,6	325,96	0,92		340,03	358,55	494,15
2	Вагоноремонтный корпус		8	455	0,4	0,8	0,75	182	136,5	0,94		171,08	150,15	227,63
3	Механический корпус №1		23	1794	0,4	0,8	0,75	717,6	538,2	0,85		609,96	538,2	813,46
4	Ремонтно-механический цех		21	413	0,3	0,6	1,33	123,9	165,2	0,85		105,32	165,2	195,91
5	Испытательный комплекс		28	699	0,3	0,6	1,33	209,7	279,6	0,75		157,28	279,6	320,80
6	Строительный цех		19	213	0,8	0,8	0,75	170,4	127,8	0,9		153,36	127,8	199,63
7	Механический корпус №2		22	1277	0,3	0,6	1,33	383,1	510,8	0,85		325,64	510,8	605,77
8	Цех сортировки №1		15	705	0,6	0,7	1,02	423	431,55	0,9		380,70	431,55	575,47
9	Цех сортировки №1		10	349	0,6	0,7	1,02	209,4	213,63	0,9		188,46	234,99	301,23
10	Столовая		23	60	0,5	0,7	1,02	30	30,61	0,85		25,50	30,61	39,84
11	Погрузочная площадка		27	1437	0,3	0,7	1,02	431,1	439,81	0,75		323,33	439,81	545,87
12	Компрессорная		8	240	0,7	0,8	0,75	168	126	0,91		152,88	138,6	206,35
13	Административный корпус		16	160	0,5	0,7	1,02	80	81,62	0,85		68,00	81,62	106,23
14	Склад продукции		12	491	0,2	0,6	1,33	98,2	130,93	0,8		78,56	130,93	152,69
15	Насосная		1	234	0,7	0,8	0,75	163,8	122,85	1,14		186,73	135,14	230,50
16	Лаборатория		17	270	0,4	0,8	0,75	108	81	0,85		91,80	81	122,43
Итого			258	9413	0,41		0,97	3867,8	3742,05			3358,61	3834,54	5097,45



Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Нагрузка 6 – 10 кВ</b>														
3	Механический корпус №1	630	2	1260	0,4	0,8	0,75	504	378		0,95	478,8	359,1	
7	Механический корпус №2	500	2	1000	0,3	0,6	1,33	300	400		0,95	285	380	
12	Компрессорная	400	4	1600	0,7	0,8	0,75	1120	840		1	1120	840	
Итого			8	3860	0,50		0,84	1924	1618		0,9	1731,6	1456,2	2262,51
<b>Вся нагрузка</b>														
Итого			266	13273	0,44		0,93	5791,8	5360,05			5090,21	5290,74	7341,81

### 3 Расчет цеховых трансформаторных подстанций с учетом компенсации реактивной мощности

Число трансформаторов и питающих линий определяется в зависимости от категории надежности электроснабжения потребителей [4], [10]. Для потребителей I и II категорий, будем использовать только двухтрансформаторные подстанции согласно [13].

Мощность трансформаторов для цеховых подстанций должна выбираться с учетом компенсации реактивной мощности. Применение компенсирующих устройств позволит снизить мощность единичных трансформаторов в цеховых ТП и снизить затраты на всю схему внутризаводского электроснабжения.[6], [7], [8].

Распределим все цеха предприятия по ремонту механического оборудования на шесть групп. Каждая группа включает в себя несколько цехов. Группировка цехов выполняется по расположению. В одну группу объединяются только близлежащие цеха. Определим состав групп и занесем их в таблицу 4, согласно генерального плана предприятия по ремонту механического оборудования, представленного в разделе 1 ВКР на рисунке 1.

Таблица 4 – Состав групп цехов

Номер группы	Состав группы	Мощность цеха входящего в группу, кВА	Номер согласно генерального плана предприятия
1	2	3	4
1	Котельная	494,15	1
	Вагоноремонтный корпус	227,63	2
	Ремонтно-механический цех	195,91	4
	Испытательный комплекс	320,8	5

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
Суммарная мощность группы 1		1238,49	
2	Механический корпус №1	813,46	3
	Строительный цех	199,63	6
Суммарная мощность группы 2		1013,09	
3	Механический корпус №2	605,77	7
	Цех сортировки №1	575,47	8
	Цех сортировки №2	301,23	9
	Столовая	39,84	10
Суммарная мощность группы 3		1522,31	
4	Погрузочная площадка	545,87	11
Суммарная мощность группы 4		545,87	
5	Компрессорная	206,35	12
	Административный корпус	106,23	13
	Насосная	230,5	15
Суммарная мощность группы 5		543,08	
6	Склад продукции	152,69	14
	Лаборатория	122,43	16
Суммарная мощность группы 6		275,12	

Мощность компенсирующего устройства определяется из выражения:

$$Q_{K.P} = \alpha \cdot P_P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_{K.P}), \quad (13)$$

$$\alpha = 0,9,$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{K.P} = 0,33 \dots 0,48.$$

Расчетная полная мощность цеха с учетом компенсации рассчитывается по выражению:

$$S_P = \sqrt{P_P^2 + (Q_P - Q_{K.P})^2} \quad (14)$$

Расчет первой группы цехов.

Находим суммы расчетных мощностей: активной и реактивной.

$$\sum P_p = 340,03 + 171,08 + 105,32 + 157,28 = 773,7 \text{ кВт},$$

$$\sum Q_p = 358,55 + 150,15 + 165,2 + 279,6 = 953,5 \text{ квар.}$$

Находим коэффициент реактивной мощности для группы цехов по формуле (8):

$$\sum Q_c = 325,96 + 136,5 + 165,2 + 279,6 = 907,26 \text{ квар},$$

$$\sum P_c = 369,6 + 182 + 123,9 + 209,7 = 885,2 \text{ кВт},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{907,26}{885,2} = 1,02.$$

Значения всех величин найдены, теперь по формуле (13) рассчитываем мощность КУ:

$$Q_{к.р} = 0,9 \cdot 773,7 \cdot (1,02 - 0,33) = 480,47 \text{ квар}$$

Цеха первой группы имеют первую и вторую категории электроснабжения, поэтому выбираем два компенсирующих устройства АУКРМ-240-0,4.

Вычисляем расчетную полную мощность первой группы цехов с учетом компенсации по выражению (14) [23]:

$$S_p = \sqrt{773,7^2 + (953,5 - 480)^2} = 907,1 \text{ кВА}$$

Согласно [12] выбираем количество трансформаторов и коэффициент нагрузки, а затем по формуле (15) находим мощность цеховых трансформаторов для цехов первой группы:

$$S_T \geq \frac{S_P}{K_3 \cdot N_T}, \quad (15)$$

$$S_T \geq \frac{907,1}{0,7 \cdot 2} = 647,93 \text{ кВА}$$

Согласно [6] выбираем трансформаторы со значениями 1000 кВА.

Расчет второй группы цехов.

Находим суммы расчетных мощностей: активной и реактивной.

$$\sum P_p = 609,96 + 153,36 = 763,32 \text{ кВт},$$

$$\sum Q_p = 538,2 + 127,8 = 666 \text{ квар}.$$

Находим коэффициент реактивной мощности для группы цехов:

$$\sum Q_c = 538,2 + 127,8 = 666 \text{ квар},$$

$$\sum P_c = 717,6 + 170,4 = 888 \text{ кВт},$$

$$\text{tg} \varphi = \frac{666}{888} = 0,75.$$

Значения всех величин найдены, теперь по формуле (13) рассчитываем мощность КУ:

$$Q_{к.р} = 0,9 \cdot 763,32 \cdot (0,75 - 0,33) = 288,53 \text{ квар}$$

Цехи второй группы имеют вторую категорию электроснабжения, поэтому выбираем два компенсирующих устройства АУКРМ-140-0,4.

Вычисляем расчетную полную мощность второй группы цехов с учетом компенсации:

$$S_p = \sqrt{763,32^2 + (666 - 280)^2} = 855,37 \text{кВА}$$

Согласно [12] выбираем количество трансформаторов и коэффициент нагрузки, а затем по формуле (15) находим мощность цеховых трансформаторов для цехов второй группы:

$$S_T \geq \frac{855,37}{0,8 \cdot 2} = 534,6 \text{кВА}$$

Согласно [6] выбираем трансформаторы со значениями 630 кВА.

Расчет третьей группы цехов.

Находим суммы расчетных мощностей: активной и реактивной.

$$\sum P_p = 325,64 + 380,7 + 188,46 + 25,5 = 920,3 \text{кВт},$$

$$\sum Q_p = 510,8 + 431,55 + 235 + 30,6 = 1207,95 \text{квар}.$$

Находим коэффициент реактивной мощности для группы цехов:

$$\sum Q_c = 510,8 + 431,55 + 213,63 + 30,6 = 1186,58 \text{квар},$$

$$\sum P_c = 383,1 + 423 + 209,4 + 30 = 1045,5 \text{кВт},$$

$$\text{tg} \varphi = \frac{1186,58}{1045,5} = 1,13.$$

Значения всех величин найдены, теперь по формуле (13) рассчитываем мощность КУ:

$$Q_{к.р} = 0,9 \cdot 920,3 \cdot (1,13 - 0,33) = 662,62 \text{квар}$$

Цехи третьей группы имеют вторую и третью категории электроснабжения, поэтому выбираем два компенсирующих устройства АУКРМ-325-0,4.

Вычисляем расчетную полную мощность третьей группы цехов с учетом компенсации:

$$S_p = \sqrt{920,3^2 + (1207,95 - 325)^2} = 1275,36 \text{кВА}$$

Согласно [12] выбираем количество трансформаторов и коэффициент нагрузки, а затем по формуле (15) находим мощность цеховых трансформаторов для цехов третьей группы:

$$S_T \geq \frac{1275,36}{0,8 \cdot 2} = 797,1 \text{кВА}$$

Согласно [6] выбираем трансформаторы со значениями 1000 кВА.

Расчет четвертой группы цехов.

В этой группе только один, отдельно стоящий цех. Все необходимые значения известны, поэтому сразу рассчитаем мощность КУ:

$$Q_{к.р} = 0,9 \cdot 323,33 \cdot (1,02 - 0,33) = 200,79 \text{квар}$$

Цех четвертой группы имеет третью категорию электроснабжения, поэтому выбираем одно компенсирующее устройство АУКРМ-200-0,4.

Вычисляем расчетную полную мощность четвертой группы цехов с учетом компенсации:

$$S_p = \sqrt{323,33^2 + (439,81 - 200)^2} = 402,56 \text{кВА}$$

Согласно [12] выбираем количество трансформаторов и коэффициент нагрузки, а затем по формуле (15) находим мощность цеховых трансформаторов для цехов четвертой группы:

$$S_T \geq \frac{402,56}{0,92} = 437,57 \text{кВА}$$

Согласно [6] выбираем трансформатор со значением 630 кВА.

Расчет пятой группы цехов.

Находим суммы расчетных мощностей: активной и реактивной.

$$\sum P_p = 152,88 + 68 + 186,73 = 407,61 \text{кВт},$$

$$\sum Q_p = 138,6 + 81,62 + 135,14 = 355,36 \text{квар}.$$

Находим коэффициент реактивной мощности для группы цехов:

$$\sum Q_c = 126 + 81,62 + 122,85 = 330,47 \text{квар},$$

$$\sum P_c = 168 + 80 + 163,8 = 411,8 \text{кВт},$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{330,47}{411,8} = 0,8.$$

Значения всех величин найдены, теперь по формуле (13) рассчитываем мощность КУ:



$$Q_{к.р} = 0,9 \cdot 407,61 \cdot (0,8 - 0,33) = 172,42 \text{квар}$$

Цехи пятой группы имеют первую и третью категории электроснабжения, поэтому выбираем два компенсирующих устройства АУКРМ-85-0,4.

Вычисляем расчетную полную мощность пятой группы цехов с учетом компенсации:

$$S_p = \sqrt{407,61^2 + (355,36 - 85)^2} = 489,12 \text{кВА}$$

Согласно [12] выбираем количество трансформаторов и коэффициент нагрузки, а затем по формуле (15) находим мощность цеховых трансформаторов для цехов пятой группы:

$$S_T \geq \frac{489,12}{0,7 \cdot 2} = 349,37 \text{кВА}$$

Согласно [6] выбираем трансформаторы со значениями 400 кВА.

Расчет шестой группы цехов.

Находим суммы расчетных мощностей: активной и реактивной.

$$\sum P_p = 78,56 + 91,8 = 170,36 \text{кВт},$$

$$\sum Q_p = 130,93 + 81 = 211,93 \text{квар}.$$

Находим коэффициент реактивной мощности для группы цехов:

$$\sum Q_c = 130,93 + 81 = 211,93 \text{квар},$$

$$\sum P_c = 98,2 + 108 = 206,2 \text{кВт},$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{211,93}{206,2} = 1,03.$$

Значения всех величин найдены, теперь по формуле (13) рассчитываем мощность КУ:

$$Q_{K.P} = 0,9 \cdot 170,36 \cdot (1,03 - 0,33) = 107,33 \text{квар}$$

Цехи шестой группы имеют вторую и третью категории электроснабжения, поэтому выбираем два компенсирующих устройства АУКРМ-54-0,4.

Вычисляем расчетную полную мощность шестой группы цехов с учетом компенсации:

$$S_p = \sqrt{170,36^2 + (211,93 - 54)^2} = 232,3 \text{кВА}$$

Согласно [12] выбираем количество трансформаторов и коэффициент нагрузки, а затем по формуле (15) находим мощность цеховых трансформаторов для цехов шестой группы:

$$S_T \geq \frac{232,3}{0,8 \cdot 2} = 145,19 \text{кВА}$$

Согласно [6] выбираем трансформаторы со значениями 160 кВА.

Теперь определим плотность электрической нагрузки каждой группы цехов по формуле (16):

$$\sigma = \frac{S_p}{F_{ц}} \tag{16}$$

Полные мощности групп цехов рассчитаны ранее, остается посчитать площади цехов и объединить их в соответствующие мощностям группы.

Площадь цехов первой группы:

$$F_{ц} = 4250 + 1375 + 2200 + 13500 = 21325 \text{ м}^2$$

Плотность электрической нагрузки цехов первой группы:

$$\sigma = \frac{907,1}{21325} = 0,043 \frac{\text{кВА}}{\text{м}^2}$$

Площадь цехов второй группы:

$$F_{ц} = 11900 + 8125 = 20025 \text{ м}^2$$

Плотность электрической нагрузки цехов второй группы:

$$\sigma = \frac{855,37}{20025} = 0,043 \frac{\text{кВА}}{\text{м}^2}$$

Площадь цехов третьей группы:

$$F_{ц} = 14950 + 5250 + 3250 + 1375 = 24825 \text{ м}^2$$

Плотность электрической нагрузки цехов третьей группы:

$$\sigma = \frac{1275,36}{24825} = 0,051 \frac{\text{кВА}}{\text{м}^2}$$

Площадь цехов четвертой группы:

$$F_{ц} = 1375 м^2$$

Плотность электрической нагрузки цехов четвертой группы:

$$\sigma = \frac{402,56}{1375} = 0,293 \frac{кВА}{м^2}$$

Площадь цехов пятой группы:

$$F_{ц} = 2925 + 625 + 1487,5 = 5037,5 м^2$$

Плотность электрической нагрузки цехов пятой группы:

$$\sigma = \frac{489,12}{5037,5} = 0,097 \frac{кВА}{м^2}$$

Площадь цехов шестой группы:

$$F_{ц} = 2000 + 6000 = 8000 м^2$$

Плотность электрической нагрузки цехов шестой группы:

$$\sigma = \frac{232,3}{8000} = 0,029 \frac{кВА}{м^2}$$

Наибольшую среди всех групп цехов плотность электрической нагрузки имеет четвертая группа с плотностью, равной 0,293 кВА/м<sup>2</sup>. Поэтому максимальная мощность трансформаторов не превышает 1600 кВА.

Сведем расчеты групп цехов в таблицу 5.

Выводы по разделу 3:

1. На данном этапе 16 цехов разбили на 6 групп, состоящих из соседних цехов с учетом их нагрузок. Данное действие позволяет рациональнее использовать имеющееся пространство завода, уменьшить затраты на электротехнический материал и строительство завода в целом.

2. Рассчитали суммарные нагрузки для каждой группы цехов.

3. С целью уменьшения мощности и стоимости выбираемых трансформаторов рассчитали и подобрали устройства компенсации реактивной мощности.

4. С учетом компенсации реактивной мощности подобрали соответствующие трансформаторы для каждой группы.

5. Определили площади всех групп цехов завода и рассчитали для них плотности электрических нагрузок, что позволяет на этапе проектирования и в дальнейшем равномерно распределять нагрузки по всему заводу.

Таблица 5 – Сводные расчеты выбора цеховых трансформаторов и КУ

Группа	Номер на плане	Наименование цехов завода	Категория надежности	$F_{Ц}, м^2$	$\sigma, кВА/м^2$	$P_p, кВт$	$Q_{к.р}, квар$	$Q_p, квар$	$S_p, кВА$	Определено для установки		
										КУ	$S_{н.т}, кВА$	$\frac{n_T}{n_{к.у}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Первая	1	Котельная	1	21325	0,043	773,7	480	953,5	907,1	АУКРМ – 240 0,4	1000	2
	2	Вагоноремонтный корпус	2									
	4	Ремонтно-механический цех	2									
	5	Испытательный комплекс	2									
Вторая	3	Механический корпус №1	2	20025	0,043	763,32	280	666	855,37	АУКРМ – 140 0,4	630	2
	6	Строительный цех	2									
Третья	7	Механический корпус №2	2	24825	0,051	920,3	650	1207,95	1275,36	АУКРМ – 325 0,4	1000	2
	8	Цех сортировки №1	3									
	9	Цех сортировки №2	3									
	10	Столовая	3									

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Четвертая	11	Погрузочная площадка	3	1375	0,29	323,33	200	439,81	402,56	АУКРМ – 200 0,4	630	1
Пятая	12	Компрессорная	1	5038	0,097	407,61	170	355,35	489,12	АУКРМ – 85 0,4	400	2
	13	Административный корпус	3									
	15	Насосная	1									
Шестая	14	Склад продукции	3	8000	0,029	170,36	108	211,93	232,2	АУКРМ – 54 0,4	160	2
	16	Лаборатория	2									
Полная мощность всех цехов завода, $\sum S_p, \text{кВА}$									4161,71			

#### 4 Определение местоположения главной понижающей подстанции (ГПП)

Для определенных групп цехов сформируем таблицу 6 с указанием в ней соответствующих каждой группе активных и реактивных нагрузок и цеховых ТП.

Таблица 6 – Значения мощностей цеховых ТП

Название цехового ТП	Ц1	Ц2	Ц3	Ц4	Ц5	Ц6
Номера цехов, подключенных к данным цеховым ТП	1,2,3,4	3,6	7,8,9,10	11	12,13,15	14,16
$P_p$ , кВт	773,7	763,32	920,3	323,32	407,61	170,36
$Q_p$ , квар	953,5	666	1207,95	439,81	355,36	211,93

Нанесем генеральный план завода на картограмму с осями X и Y и масштабом  $m_T = 50$  м/см.

Теперь расположим цеховые ТП так, чтобы они находились как можно ближе к месту прихода питания. При этом они должны располагаться только в пределах своих цехов. Если к цеховому ТП подключается несколько цехов, то данное ТП должно быть расположено так, чтобы до каждого цеха было примерно одинаковое расстояние.[4]

Размер ЦТП равен  $10 \times 10$  метров.

Определение координат цеховых ТП - Ц1, Ц2, Ц3, Ц4, Ц5 Ц6.

Наименьшую мощность имеет ТП Ц6, возьмем за соответствующий ей наименьший радиус  $R_{A6} = 25$  м. Находим радиусы активных и реактивных нагрузок по выражению:

$$m_a = \frac{P_6}{\pi \cdot R_{A6}^2} = \frac{170,36}{\pi \cdot 25^2} = 0,087 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$$



Округляем до  $m_a = 0,1 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ .

Наибольшую нагрузку имеет цеховая ТП ЦЗ, ее радиус и радиусы всех остальных активных нагрузок определяются по следующему выражению:

$$R_{A3} = \sqrt{\frac{P_3}{\pi \cdot m_a}} = \sqrt{\frac{920,3}{\pi \cdot 0,1}} = 54,12 \text{ м}$$

Радиусы остальных ЦТП:

$$R_{A1} = \sqrt{\frac{P_1}{\pi \cdot m_a}} = \sqrt{\frac{773,7}{\pi \cdot 0,1}} = 49,63 \text{ м},$$

$$R_{A2} = \sqrt{\frac{P_2}{\pi \cdot m_a}} = \sqrt{\frac{763,32}{\pi \cdot 0,1}} = 49,29 \text{ м},$$

$$R_{A4} = \sqrt{\frac{P_4}{\pi \cdot m_a}} = \sqrt{\frac{323,33}{\pi \cdot 0,1}} = 32,08 \text{ м},$$

$$R_{A5} = \sqrt{\frac{P_5}{\pi \cdot m_a}} = \sqrt{\frac{407,61}{\pi \cdot 0,1}} = 36,02 \text{ м}.$$

Для расчета радиусов реактивных мощностей возьмем соизмеримую удельную реактивную нагрузку на квадратный метр с удельной активной нагрузкой на квадратный метр,  $m_p = 0,1 \text{ квар} / \text{м}^2$  и найдем по формуле (17):

$$R_{Pi} = \sqrt{\frac{Q_i}{\pi \cdot m_p}}, \quad (17)$$

$$R_{P1} = \sqrt{\frac{Q_1}{\pi \cdot m_p}} = \sqrt{\frac{953,5}{\pi \cdot 0,1}} = 55,09 \text{ м}$$

$$R_{P2} = \sqrt{\frac{Q_2}{\pi \cdot m_p}} = \sqrt{\frac{666}{\pi \cdot 0,1}} = 46,04 \text{ м}$$

$$R_{P3} = \sqrt{\frac{Q_3}{\pi \cdot m_p}} = \sqrt{\frac{1207,95}{\pi \cdot 0,1}} = 62 \text{ м}$$

$$R_{P4} = \sqrt{\frac{Q_4}{\pi \cdot m_p}} = \sqrt{\frac{439,81}{\pi \cdot 0,1}} = 37,42 \text{ м}$$

$$R_{P5} = \sqrt{\frac{Q_5}{\pi \cdot m_p}} = \sqrt{\frac{355,36}{\pi \cdot 0,1}} = 33,63 \text{ м}$$

$$R_{P6} = \sqrt{\frac{Q_6}{\pi \cdot m_p}} = \sqrt{\frac{211,93}{\pi \cdot 0,1}} = 25,97 \text{ м}$$

Все найденные радиусы, нагрузки и координаты сведем в таблицу 7.

Таблица 7 – Радиусы мощностей цеховых ТП и координаты этих ЦТП.

Название цехового ТП	Ц1	Ц2	Ц3	Ц4	Ц5	Ц6
X, м	326,1	141,6	222,58	464,36	130,64	300,9
Y, м	595,5	556,66	318,33	245,21	180,59	144,89
P <sub>p</sub> , кВт	773,7	763,32	920,3	323,33	407,61	170,36
R <sub>A</sub> , м	49,63	49,29	54,12	32,08	36,02	25
Q <sub>p</sub> , квар	953,5	666	1207,95	439,81	355,36	211,93
R <sub>p</sub> , м	55,09	46,04	62	37,42	33,63	25,97

Нанесем координаты цеховых ТП и радиусы активных и реактивных нагрузок на рисунок 2, и получим картограмму нагрузок, визуально показывающую соотношение активной и реактивной нагрузок каждой ЦТП.

Центры электрических нагрузок (ЦЭН) ,активной и реактивной, определяются по следующим выражениям:

$$X_{a0} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n P_i} =$$

$$= \frac{773,7 \cdot 326,1 + 763,32 \cdot 141,6 + 920,3 \cdot 222,58 + 323,33 \cdot 464,36 + 407,61 \cdot 130,64}{773,7 + 763,32 + 920,3 + 323,33 + 407,61 + 170,36} +$$

$$+ \frac{170,36 \cdot 300,9}{773,7 + 763,32 + 920,3 + 323,33 + 407,61 + 170,36} =$$

$$= \frac{819883,07}{3358,62} = 244,11 \text{ м},$$

$$Y_{a0} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n P_i} =$$

$$= \frac{773,7 \cdot 595,5 + 763,32 \cdot 556,66 + 920,3 \cdot 318,33 + 323,33 \cdot 245,21 + 407,61 \cdot 180,59}{773,7 + 763,32 + 920,3 + 323,33 + 407,61 + 170,36} +$$

$$+ \frac{170,36 \cdot 144,89}{773,7 + 763,32 + 920,3 + 323,33 + 407,61 + 170,36} =$$

$$= \frac{1356184,66}{3358,62} = 403,79 \text{ м},$$

$$X_{p0} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} =$$

$$= \frac{953,5 \cdot 326,1 + 666 \cdot 141,6 + 1207,95 \cdot 222,58 + 439,81 \cdot 464,36 + 355,36 \cdot 130,64}{953,5 + 666 + 1207,95 + 439,81 + 355,36 + 211,93} +$$

$$+ \frac{211,93 \cdot 300,9}{953,5 + 666 + 1207,95 + 439,81 + 355,36 + 211,93} =$$

$$= \frac{988531,6}{3834,55} = 257,8 \text{ м},$$

$$Y_{p0} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} =$$

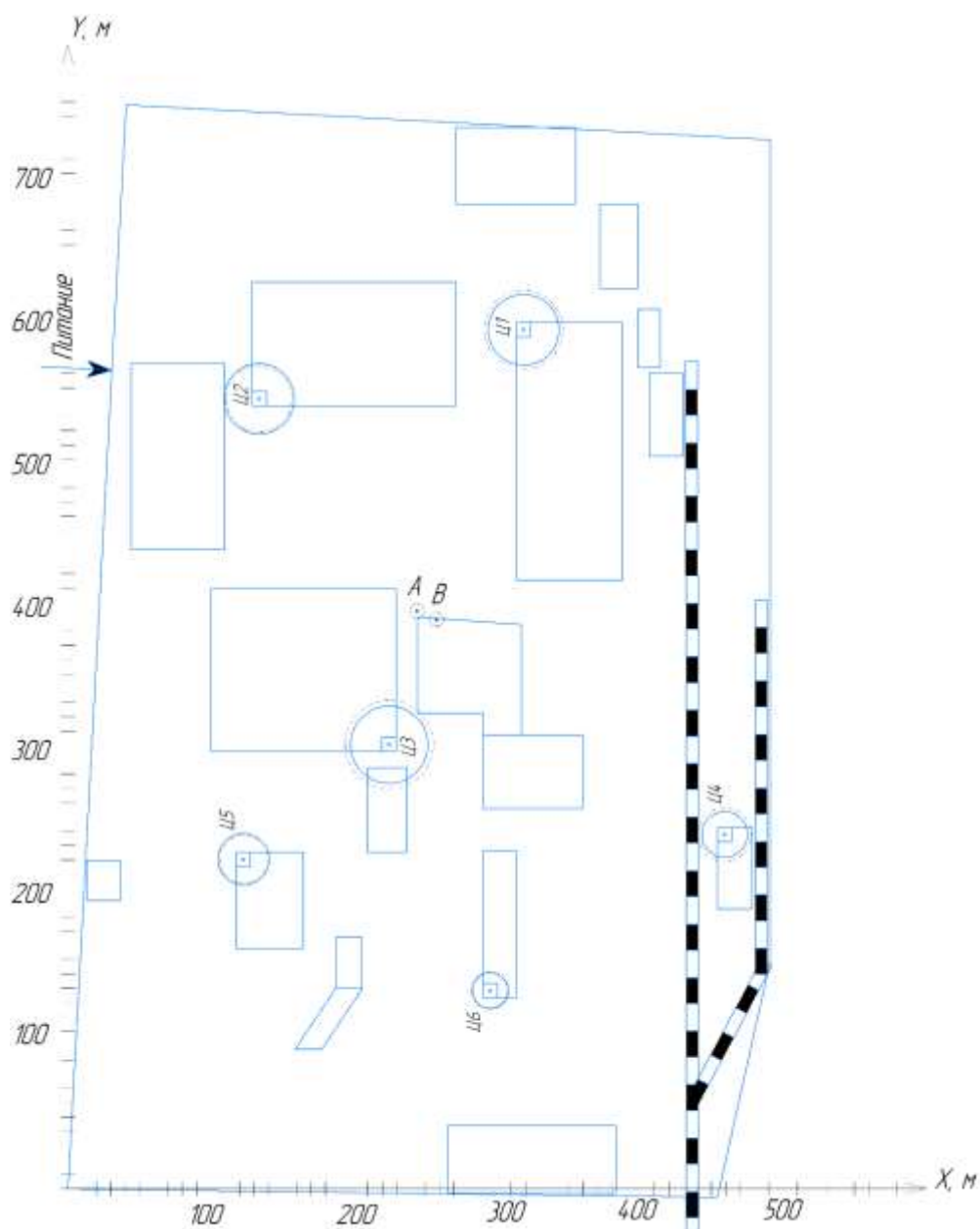
$$= \frac{953,5 \cdot 595,5 + 666 \cdot 556,66 + 1207,95 \cdot 318,33 + 439,81 \cdot 245,21 + 355,36 \cdot 180,59}{953,5 + 666 + 1207,95 + 439,81 + 355,36 + 211,93} +$$

$$+ \frac{211,93 \cdot 144,89}{953,5 + 666 + 1207,95 + 439,81 + 355,36 + 211,93} =$$

$$= \frac{1525798,34}{3834,55} = 397,91 \text{ м}.$$

Точка *A* является ориентиром для положения ГПП, а точка *B* - ККУ или СК.

Расположив точки *A* и *B* на картограмме, видно, что точка *A* располагается слишком близко к первому цеху сортировки, а точка *B* находится на его территории. Ввиду невозможности постройки главной понизительной подстанции в рассчитанных точках, установим нашу ГПП на краю завода напротив седьмого цеха. Данное расположение незначительно отстоит от ЦЭН, но зато дает удобство для построения питающих линий на территории завода.



## Рисунок 2 – Картограмма нагрузок

На рисунке 3 изображен генеральный план предприятия с нанесенными ТП и кабельными линиями.

Выводы по разделу 4:

1. Как и предыдущие этапы данный этап ведет к минимизации затрат и к наиболее удовлетворяющему нескольким требованиям выбору места нахождения ГПП.

2. Нашли координаты всех шести цеховых ТП и рассчитали для них радиусы активной и реактивной нагрузок. Полученные значения изобразили в виде картограммы нагрузок, что позволило наглядно увидеть соотношение активной и реактивной нагрузки в каждой цеховой ТП

3. На основании полученных координат цеховых ТП рассчитали координаты центров тяжести активной и реактивной нагрузок завода, называемые центрами электрических нагрузок (ЦЭН). В идеале ГПП должна устанавливаться по этим координатам, однако из-за имеющихся препятствий, принимая во внимание ЦЭН, место расположения ГПП сместили на край завода напротив седьмого цеха. Такое расположение является оптимальным с позиции дальнейшего питания цеховых ТП.

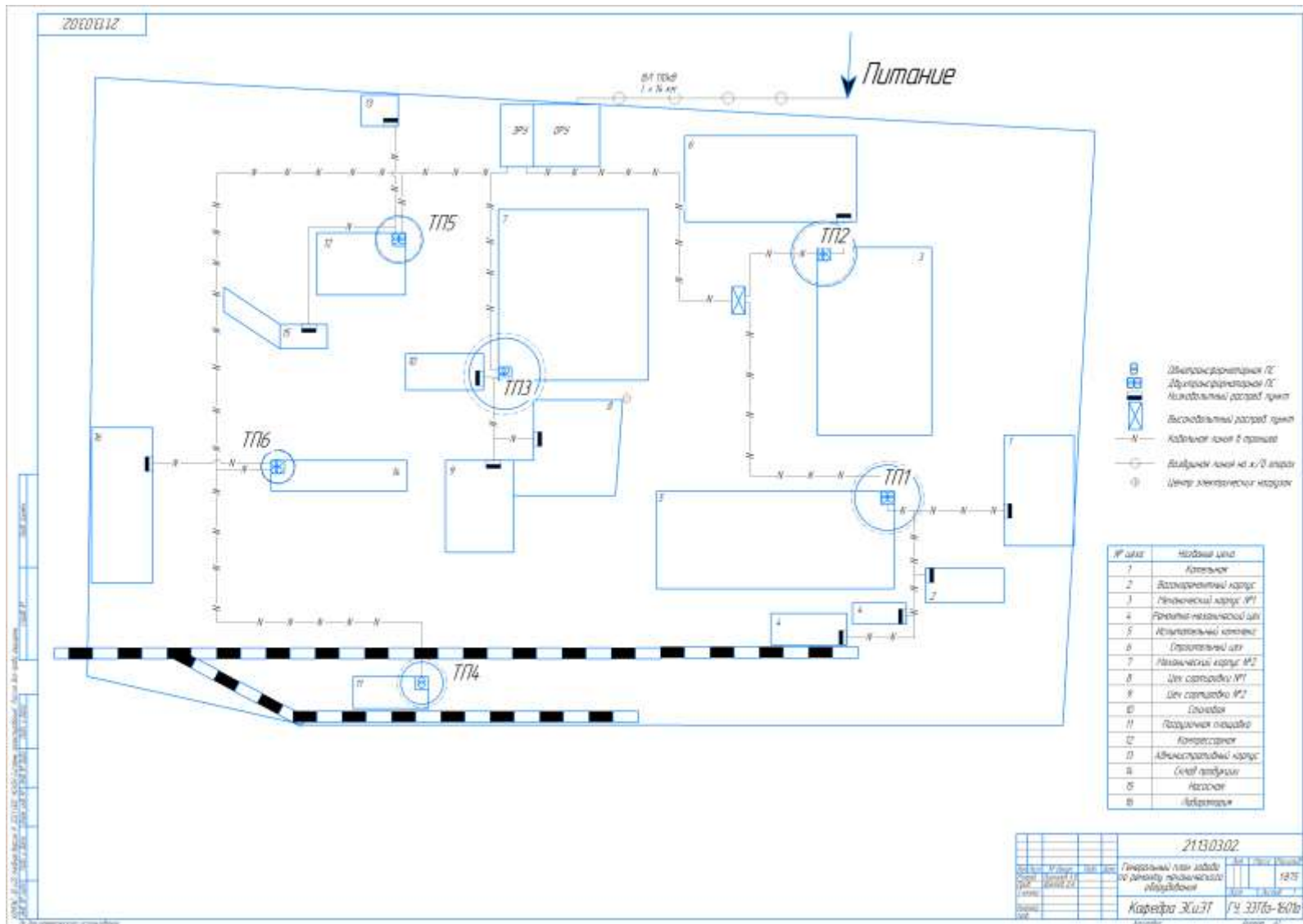


Рисунок 3 - Генеральный план предприятия с нанесенными ТП и кабельными линиями

## 5 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов ГПП

Выбор напряжения питания ГПП промышленного предприятия зависит от напряжения возможного источника питания, расстояния от подстанции предприятия до этого источника питания, возможности размещения высоковольтных воздушных и кабельных линий электропередачи [17], условий окружающей среды и ряда других факторов [4], [15], [25].

Сначала найдем активные потери на цеховых трансформаторах по формуле (18) :

$$\Delta P_T = \sum S_P \cdot 0,02, \quad (18)$$
$$\Delta P_T = 4161,71 \cdot 0,02 = 83,23 \text{ кВт.}$$

Теперь найдем суммарную активную мощность по всему предприятию по формуле (19):

$$P_{PI} = P_{PH} + P_{PB} + \Delta P_T, \quad (19)$$
$$P_{PI} = 3358,6 + 1731,6 + 83,23 = 5173,43 \text{ кВт.}$$

После этого определим величину рационального напряжения, которую можно определить по формуле Стилла (20):

$$U_{РАЦ} = 4,34 \cdot \sqrt{L \cdot 0,016 \cdot P_{PI}}, \quad (20)$$
$$U_{РАЦ} = 4,34 \cdot \sqrt{14 \cdot 0,016 \cdot 5173,43} = 147,74 \text{ кВ.}$$

Согласно расчетам питающее напряжение будет равно 110 кВ.

Теперь определим экономически целесообразную реактивную мощность, потребляемую предприятием из энергосистемы, на стороне ВН ГПП [4] по формуле (21):

$$Q_{\text{ЭС}} = P_{\text{РП}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{ЭС}}, \quad (21)$$

$$Q_{\text{ЭС}} = 5173,43 \cdot 0,54 = 2793,65 \text{ квар.}$$

Коэффициент экономически целесообразной реактивной мощности  $\text{tg}\varphi_{\text{ЭС}}$  находится согласно [4].

Полная расчетная мощность завода по ремонту механического оборудования определяется по формуле (22):

$$S_{\text{РП}} = \sqrt{P_{\text{РП}}^2 + Q_{\text{ЭС}}^2}, \quad (22)$$

$$S_{\text{РП}} = \sqrt{5173,43^2 + 2793,65^2} = 5879,53 \text{ кВА.}$$

Номинальная мощность трансформаторов на ГПП завода определяется по формуле (23) [15]:

$$S_T \geq \frac{S_P \cdot K_{1-2}}{K_{\text{ПЕР}}}, \quad (23)$$

$$S_T \geq \frac{5879,53 \cdot 1}{1,3} = 4522,71 \text{ кВА.}$$

Коэффициенты для нахождения мощности берутся из [12].

Выводы по разделу 5:

1. На основании проведенных расчетов для главной понизительной подстанции завода по ремонту механического оборудования выбраны 2 трансформатора ТМН-6300/110/6 [15].



## 6 Расчет токов коротких замыканий

В данном разделе нужно найти ток 3-фазного КЗ на низкой стороне трансформатора ГПП используя методику [14].

Изобразим сначала расчетную схему (рисунок 4) и схему замещения (рисунок 5).

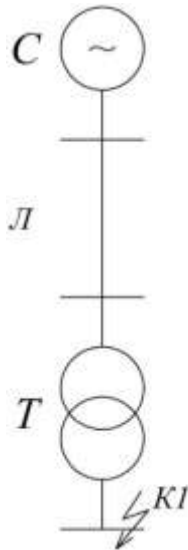


Рисунок 4 – Расчетная схема

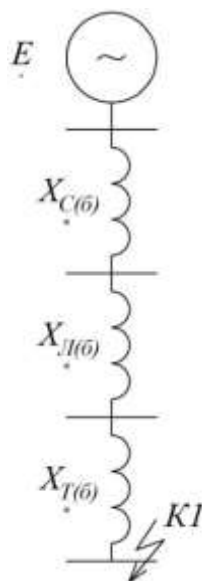


Рисунок 5 – Схема замещения

Паспортные данные [7] занесены в таблицу 8.

Таблица 8 – Паспортные данные трансформатора

Тип	$S_H, \text{MBA}$	Каталожные данные				
		$U_{\text{НОМ}}, \text{кВ}$		$U_K, \%$	$P_K, \text{кВт}$	$P_X, \text{кВт}$
		ВН	НН			
ТМН – 6300/110	6,3	115	6,6	10,5	35	6,5

Также запишем дополнительные данные:

$$S_{\sigma} = 1000 \text{ MBA}; U_{\sigma} = 6,6 \text{ кВ}; S_K = 2700 \text{ MBA}$$

$$k_{y\sigma} = 1,85; l = 14 \text{ км}; x_0 = 0,4 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

Рассчитаем сопротивления системы:

$$x_{*C(\sigma)} = \frac{S_{\sigma}}{S_K} = \frac{1000}{2700} = 0,37 \text{ о.е.}$$

Рассчитаем сопротивления линии:

$$x_{*L(\sigma)} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma}^2} = 0,4 \cdot 14 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,42 \text{ о.е.}$$

Рассчитаем сопротивление трансформатора:

$$x_{*T(\sigma)} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{6,3} = 16,67 \text{ о.е.}$$

Осталось рассчитать ток короткого замыкания:

$$x_{K1} = x_{*C(\delta)} + x_{*L(\delta)} + x_{*T(\delta)} = 0,37 + 0,42 + 16,67 = 17,46 \text{ о.е.}$$

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,6} = 87,48 \text{ кА}$$

$$I_{II,0} = \frac{E_{*C}''}{x_{рез,K1}} \cdot I_{\delta} = \frac{1}{17,46} \cdot 87,48 = 5,01 \text{ кА}$$

$$i_{y\delta} = \sqrt{2} \cdot I_{II,0} \cdot k_{y\delta} = \sqrt{2} \cdot 5,01 \cdot 1,85 = 13,11 \text{ кА}$$

Занесем полученные данные в таблицу 9.

Таблица 9 – Расчетные значения тока КЗ

Точка	Ударный ток	Периодическая составляющая тока КЗ
К1	13,11 кА	5,01 кА

Выводы по разделу 6:

1. Рассчитали ток трехфазного КЗ на низкой стороне трансформатора ГПП, который равен 5010 А, а ударный ток 13110 А.

## 7 Выбор и проверка оборудования на стороне 6 кВ ГПП

Для напряжений 6 кВ можно использовать КРУ. Выберем КРУ-СЭЩ-70.  
Данные по КРУ записываются в таблицу 10.

Таблица 10 – Используемое оборудование КРУ

Тип ячейки	
Параметр	Значение
Номинальное напряжение, кВ	10
Тип выключателя	ВВУ-СЭЩ-ПЗ-10-20/1000
Тип трансформатора напряжения	НАЛИ-СЭЩ-6-1-0,5-225
Тип трансформатора тока	ТОЛ-СЭЩ-10-0,2S-750/5

Проверяем вакуумный выключатель ВВУ-СЭЩ-ПЗ-10-20/1000.

1. Номинальное напряжение:

$$U_{ном} = 10 \text{ кВ} \geq U_{сет.ном} = 6 \text{ кВ}$$

2. Номинальный рабочий ток:

$$I_{раб} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 6} = 606,22 \text{ А},$$

$$I_{раб} = 606,22 \text{ А} \leq I_{ном} = 1000 \text{ А}.$$

3. Отключающая способность:

3.1. Симметричный ток:

$$I_{n,\tau} = I_{II,0} = 5,01 \text{ кА},$$

$$I_{n,\tau} = 5,01 \text{ кА} \leq I_{откл.ном} = 20 \text{ кА}.$$

### 3.2. Аperiodическая составляющая тока:

$$\tau = t_{pz} + t_{c.в.} = 0,01 + 0,03 = 0,04 \text{ с,}$$

$$I_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{n,\tau} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 5,01 \cdot e^{-\frac{0,04}{0,03}} = 1,87 \text{ кА,}$$

$$I_{a,ном} = \left( \frac{\sqrt{2} \cdot \beta_{нор}}{100} \right) \cdot I_{откл.ном} = \left( \frac{\sqrt{2} \cdot 40}{100} \right) \cdot 20 = 11,31 \text{ кА,}$$

$$I_{a,\tau} = 1,87 \text{ кА} \leq I_{a,ном} = 11,31 \text{ кА.}$$

### 4. Включающая способность:

$$I_{n,0} = 5,01 \text{ кА} \leq I_{вкл.ном} = 20 \text{ кА,}$$

$$i_{y\partial} = 13,11 \text{ кА} \leq i_{вкл.ном} = 50 \text{ кА.}$$

### 5. Электродинамическая стойкость:

$$I_{n,0} = 5,01 \text{ кА} \leq I_{нр.с} = 20 \text{ кА,}$$

$$i_{y\partial} = 13,11 \text{ кА} \leq i_{нр.с} = 50 \text{ кА.}$$

### 6. Термическая стойкость:

$$t_{откл} = t_{pz} + t_{нв.откл} = 0,01 + 0,05 = 0,06 \text{ с,}$$

$$B_K = I_{n,0}^2 \cdot (t_{откл} + T_a) = (5,01 \cdot 10^3)^2 \cdot (0,06 + 0,03) = 2,26 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с,}$$

$$\text{Если } t_{откл} \geq t_T, \text{ то } B_K \leq I_T^2 \cdot t_T,$$

$$\text{Если } t_{откл} \leq t_T, \text{ то } B_K \leq I_T^2 \cdot t_{откл},$$

$$t_{откл} = 0,06 \text{ с} \leq t_T = 3 \text{ с,}$$

$$I_T^2 \cdot t_{откл} = (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,06 = 150 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с,}$$

$$B_K = 2,26 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \leq I_T^2 \cdot t_{откл} = 150 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с.}$$

Все условия выполняются, а значит, данный выключатель прошел проверку.

Теперь проверим трансформатор тока ТОЛ-СЭЩ-10-0,2S-750/5.

1. Номинальное напряжение:

$$U_{ном} = 10 \text{ кВ} \geq U_{сет.ном} = 6 \text{ кВ}$$

2. Номинальный рабочий ток:

$$I_{раб} = 606,22 \text{ А} \leq I_{1ном} = 750 \text{ А}$$

3. Термическая стойкость:

$$t_{откл} = 0,06 \text{ с}; B_K = 2,26 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

$$\text{Если } t_{откл} \geq t_T, \text{ то } B_K \leq I_T^2 \cdot t_T,$$

$$\text{Если } t_{откл} \leq t_T, \text{ то } B_K \leq I_T^2 \cdot t_{откл},$$

$$t_{откл} = 0,06 \text{ с} \leq t_T = 3 \text{ с},$$

$$I_T^2 \cdot t_{откл} = (40 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,06 = 96 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с},$$

$$B_K = 2,26 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \leq I_T^2 \cdot t_{откл} = 96 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$

4. Вторичная нагрузка:

$$Z_{2НОМ} = \frac{S_2}{I_2^2} = \frac{50}{5^2} = 2 \text{ Ом}$$

Заполним таблицу (таблица 11) с измерительными приборами, подключаемыми к вторичной обмотке трансформатора тока.

Нагрузку вторичных обмоток ТТ выбираем исходя из одной ячейки.

Таблица 11 – Измерительные приборы, подключенные к ТТ

Тип прибора	Название прибора	п, кол.	$S_{\text{приб}}, \text{ВА}$	$S_{\Sigma}, \text{ВА}$
Амперметр	ЩМ120	1	15	15
Ваттметр				
Счетчики активной и реактивной энергии	ЩМК120СП	1	10	10
Суммарное значение полной мощности всех приборов				25

$$R_{\text{приб}} = \frac{S_{\Sigma}}{I_2^2} = \frac{25}{5^2} = 1 \text{ Ом}$$

Так как во вторичной цепи будет больше одного устройства, то сопротивление контактов примем равным  $R_k = 0,1 \text{ Ом}$

$$R_{\text{пр}} \leq Z_{2\text{НОМ}} - R_{\text{приб}} - R_k = 2 - 1 - 0,1 = 0,9 \text{ Ом}$$

Расчетная длина проводов вторичной обмотки зависит от схемы соединения. Как правило, используется полная звезда, а значит,  $l_p = l$ .

Для 10 кВ длина вторичных цепей находится в диапазоне 4...6 м.

Удельное сопротивление равно  $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ , так как жила будет из меди.[4]

$$s = \frac{\rho \cdot l_p}{R_{\text{пр}}} = \frac{0,0175 \cdot 6}{0,9} = 0,12 \text{ мм}^2$$

Минимальное сечение для медных проводов равно  $2,5 \text{ мм}^2$ . Поэтому выбираем именно такое.

Проверяем трансформатор напряжения.

Теперь проверим трехфазный трансформатор напряжения НАЛИ-СЭЩ-10-1-0,5-225 [4].

1. Номинальное напряжение:

$$U_{ном} = 10 \text{ кВ} \geq U_{сет.ном} = 6 \text{ кВ}$$

2. Вторичная нагрузка:

Заполним таблицу 12 с измерительными приборами, подключаемыми к вторичной обмотке трансформатора напряжения.

Нагрузка вторичных обмоток ТН выбираем исходя из всей шины.[3],[5].

Таблица 12 – Измерительные приборы, подключенные к ТН

Тип прибора	Название прибора	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$n_{\text{приб}},$ КОЛ.	$n_{\text{кат}},$ КОЛ.	$S_{\text{кат}},$ ВА	$S_{\Sigma},$ ВА
Вольтметр	ЦМ120	1	0	2	-	-	30
Ваттметр							
Счетчики активной и реактивной энергии	ЦМК120СП	0,38	0,925	7	-	-	70

$$S_{ном} = 225 \text{ ВА},$$

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{(\sum S_{\text{приб}} \cdot \cos \varphi)^2 + (\sum S_{\text{приб}} \cdot \sin \varphi)^2} =$$

$$= \sqrt{(30 + 70 \cdot 0,38)^2 + (\sum 70 \cdot 0,925)^2} = 86 \text{ ВА},$$

$$S_{ном} = 225 \text{ ВА} \geq S_{2\Sigma} = 86 \text{ ВА}.$$

Параметры выбранного трансформатора напряжения сводятся в таблицу

13.



Таблица 13 - Параметры выбранного трансформатора напряжения

Параметр	Значение
Номинальное напряжение обмотки, В: ВН НН	$6000 / \sqrt{3}$ $100 / \sqrt{3}$
Вторичная нагрузка, ВА: расчетная $S_{2\Sigma}$ $S_{\text{ном}}$	86 225
Класс точности	0,5

Выводы по разделу 7:

1. Для стороны 6 кВ выбрали ячейку КРУ и ее оборудование. Проверили его на включающую и отключающую способности, на электродинамическую и термическую стойкость
2. Определили тип и сечение проводов для вторичных цепей.[3]

## Заключение

В результате проделанной выпускной работы был разработан проект системы электроснабжения предприятия по ремонту механического оборудования с требуемым уровнем надёжности электроснабжения.

Работа состоит из семи основных разделов, поэтапно формирующих всю систему электроснабжения завода по ремонту механического оборудования

На первом и втором этапе определили среднесменную, расчетную и полную нагрузки каждого цеха завода. Далее цехи распределили в шесть групп, для каждой из которых производился расчет для подбора трансформаторов. С учетом компенсации реактивной мощности подобрали соответствующие трансформаторы для каждой группы. Определили площади всех групп цехов завода и рассчитали для них плотности электрических нагрузок.

На следующем этапе составили картограмму нагрузок цеховых ТП и определили место для строительства ГПП, после чего рассчитали и подобрали трансформаторы для ГПП. Рассчитали токи КЗ для стороны 6 кВ трансформатора ГПП. На последнем этапе для стороны 6 кВ определили КРУ и оборудование для него, произвели проверку оборудования КРУ.

В итоге были решены следующие задачи, стоящие перед нами на начальном этапе проектирования:

- Представили характеристику технологического процесса и описание предприятия по ремонту механического оборудования в целом;

- Спроектировали систему распределения электрической энергии между производственными цехами и предприятия по ремонту механического оборудования;

- Спроектировали электрическую часть главной понизительной подстанции предприятия по ремонту механического оборудования.

Выбрали все соответствующие высокому и низкому напряжению аппараты защиты.

## Список используемых источников

1. Абрамова Е. Я. Курсовое проектирование по электроснабжению промышленных предприятий: учебное пособие. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2017. 122 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/78780.html>
2. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений [Электронный ресурс] : учебник. М.: ИНФРА-М, 2018. 414 с. URL: <https://new.znanium.com/catalog/document?id=345168>
3. Беляев А.В. Выбор аппаратуры, защиты и кабелей в сетях 0,4 кВ. Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. 176 с.
4. Вахнина В.В. Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий. Методические указания к курсовому проектированию. Тольятти: ТГУ, 2006. 78 с.
5. Вахнина В.В. Системы электроснабжения: электронное учебное пособие. Тольятти: ТГУ, 2015. 46 с. URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/2943>
6. ГОСТ 9680 – 77 Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВА и более.
7. ГОСТ Р 52719 – 2007 Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
8. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. М.: НЦ ЭНАС, 2009. 456 с.
9. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник. М.: Интермент Инжиниринг, 2006. 672 с.
10. Методические рекомендации для определения категорийности потребителей по надежности электроснабжения // Электроэнергетический Совет Содружества Независимых Государств. Исполнительный Комитет. 2019. URL: <http://energo-cis.ru/wyswyg/file/RGN-new/Метод по категор.потр.pdf> (дата обращения: 30.03.2021).

11. НТП ЭПП-94. Нормы технологического проектирования. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий. М788-1090 // Информационно-справочная система «GOSTRF.COM» : [сайт]. – URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4294847/4294847066.pdf> (дата обращения: 10.01.2021).
12. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов [Электронный ресурс] : учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2020. 416 с. URL: <https://new.znaniium.com/catalog/document?id=345761>
13. Правила устройства электроустановок. 7-е-е изд. Москва: Издательство Проспект, 2020. 832 с.
14. РД 153-34.0-20.527–98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбор электрооборудования. – Москва : НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
15. Рожкова Л. Д., Корнеева Л. К., Чиркова Т. В. Электрооборудование электрических станций и подстанций. М. Издательский центр «Академия», 2005. 448 с.
16. РТМ 36.18.32.4-92. Указания по определению электрических нагрузок –М.:ВНИИПИТяжпромэлектропроект, 1992. –14 с.
17. СО 153-34.20.186-2003 Рекомендации по техническому проектированию воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше : утверждены приказом Министерства энергетики Российской Федерации № 284 от 30 июня 2003 года. – Москва : НЦ ЭНАС, 2004. – 40 с.
18. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
19. Сумарокова Л.П. Основы расчета систем внутривозводского электроснабжения: учебное пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2014. 119 с.
20. Федоров А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий: учебник для вузов. М.: Энергия, 1979. 408 с.

21. Chapman S.J. Instructor's Manual to accompany Electric Machinery and Power System Fundamentals, Second Edition. USA: McGraw-Hill, 2011. 307 p.
22. Giridharan M.K. Electrical Systems Design: 2nd edition. I K International Publishing House, 2015. 405 p.
23. Keith H. Billings. Switchmode Power Supply Handbook, Keith H. Billings second edition: Holon McGraw-Hill book company, 2012. 656 p.
24. Maity K. K. Electrical system design calculation: Electrical engineering. Independently published, 2018. 122 p.
25. Whitaker J.C. AC power systems. 4rd ed. California: CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, 2014. 428 p.