

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 заготовительного производства
предприятия тяжелого машиностроения

Обучающийся

М.С. Кулагин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, С.В. Шаповалов

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

Тольятти 2025

Аннотация

В выпускной квалификационной работе выполнен расчет системы электроснабжения предприятия тяжелого машиностроения с заготовительным производством. Предприятие тяжелого машиностроения расположено в Свердловской области. На основании исходных данных выполнен анализ предприятия и определены расчетные нагрузки.

Выбраны тип, количество и мощность установок компенсации реактивной мощности. К установке в системе электроснабжения предприятия тяжелого машиностроения приняты автоматические установки компенсации реактивной мощности с фильтрами гармоник типа АУКРМ-VE-Ф. Выбраны трансформаторы цеховых подстанций типа ТМГ различных мощностей с классом напряжения 6/0,4 кВ. Мощность трансформаторов цеховых подстанций выбрана с учетом компенсации реактивной мощности.

Для питания системы электроснабжения выбраны силовые трансформаторы марки ТДН-16000/110/6 кВ. Все трансформаторы удовлетворяют условиям работы в аварийном режиме N-1.

Для всех кабельных линий спроектированной системы электроснабжения приняты кабели типа ПвКП с медными токоведущими жилами, с изоляцией из сшитого полиэтилена, с проволоочной стальной броней с наружной оболочкой из полиэтилена и выполнена проверка по величине падения напряжения.

Выпускная квалификационная работа содержит 68 печатных листов, 21 таблицу и 12 рисунков. Список используемых источников и используемой литературы содержит 20 наименований.

Содержание

Введение.....	4
1 Структура предприятия тяжелого машиностроения	8
2 Электрические нагрузки предприятия тяжелого машиностроения с картограммой нагрузок.....	16
2.1 Электрические нагрузки.....	16
2.2 Картограмма электрических нагрузок предприятия тяжелого машиностроения.....	22
3 Выбор мощности цеховых трансформаторов и компенсация реактивной мощности.....	30
3.1 Выбор мест размещения цеховых трансформаторных подстанций	30
3.2 Компенсация реактивной мощности в системе электроснабжения предприятия тяжелого машиностроения.....	32
3.3 Выбор типа мощности цеховых трансформаторов	37
4 Выбор оборудования подстанции глубокого ввода	44
4.1 Построение годового графика нагрузок предприятия	44
4.2 Выбор и проверка трансформаторов подстанции глубокого ввода	51
5 Выбор типа и сечения кабелей распределительной сети 6 кВ	55
Заключение	63
Список используемой литературы и используемых источников.....	67

Введение

В настоящее время наблюдается период роста внутреннего производства Российской Федерации. Крупные компании и государство нацелены на развитие отраслей народного хозяйства за счет внедрения новых технологий производства и снижения затрат на выпуск продукции; расширение номенклатуры производимой продукции, в том числе, за счет строительства новых и реконструкции существующих промышленных предприятий.

Отрасль тяжелого машиностроения является одной из ведущих отраслей промышленности Российской Федерации. Предприятия, отнесенные к отрасли тяжелого машиностроения и производимая ими продукция обеспечивает внедрение новых научно-технических достижений и оказывает существенное влияние на развитие других отраслей народного хозяйства и промышленности. Среди предприятий машиностроительной отрасли выделяют три подгруппы:

- предприятия тяжелого машиностроения;
- предприятия среднего машиностроения;
- предприятия общего машиностроения;
- предприятия точного машиностроения.

На долю предприятий тяжелого машиностроения приходится более 60% продукции всех предприятий машиностроительной отрасли. Среди номенклатуры производимой продукции предприятий тяжелого машиностроения можно выделить:

- подъемно-транспортное оборудование;
- оборудование для горнодобывающей промышленности;
- оборудование для предприятий металлургического комплекса;
- оборудование для объектов выработки электрической энергии.

Основными центрами присутствия предприятий тяжелого машиностроения являются:

- г. Сызрань Самарской области;
- г. Екатеринбург Свердловской области;

- г. Ижевск Удмуртской Республики;
- г. Пермь Пермского края;
- г. Уфа Республики Башкортостан.

Для развития отрасли тяжелого машиностроения необходимо строительство новых предприятий в связи с чем тема выпускной квалификационной работы является актуальной.

Цель выпускной квалификационной работы – разработка проектных решений, направленных на обеспечение электроснабжения заготовительного производства предприятия тяжелого машиностроения.

Среди особенностей предприятий тяжелого машиностроения выделяется возможность производства мелкосерийной и штучной продукции. Исходя из этой особенности структура предприятий тяжелого машиностроения может различаться. Однако рассматривая обобщенную структуру производств предприятий тяжелого машиностроения, можно выделить следующие группы цехов и производств:

- заготовительные цеха и производства;
- обрабатывающие цеха и производства;
- цеха основного производства и сборочные цеха;
- цеха вспомогательного производства;
- цеха энергетического производства;
- цеха контроля качества производимой продукции.

К заготовительным цехам и производствам относятся цеха реализующие технологические процессы производства заготовок из металла – сварочные цеха, литейные цеха, прокатные цеха, прессовые и кузнечнопрессовые производства, штамповочные производства и цеха, раскройно-заготовительные цеха, лесопильные цеха и т.д.

К группе обрабатывающих цехов и производств относятся цеха и производства механической и термической обработки заготовок, гальванические цеха, цеха металлопокрытий и цеха окраски.

В цехах основного производства и сборочных цехах выполняется сборка готовой продукции, выпускаемой предприятием тяжелого машиностроения. В зависимости от типа производимой продукции к цехам основного производства относятся механосборочные производства, сборочные производства и сварочно-сборочные производства. Сборка готовой продукции выполняется из заготовок, производимых на заготовительном производстве и обрабатывающем производствах.

К группе цехов вспомогательного производства относятся цеха, обеспечивающие работу основного, обрабатывающего и заготовительного производств, а также всего предприятия в целом. Среди цехов вспомогательного производства можно выделить: инструментальные цеха, инструментально-штамповочные цеха, модельные, цеха абразивные цеха, ремонтно-механические цеха, экспериментальные цеха и т.д.

К цехам энергетического производства относятся электроремонтные цеха, электромонтажные цеха, компрессорные и насосные станции, электрические подстанции и т.д.

К цехам контроля качества производимой продукции относятся центральные заводские лаборатории, испытательные полигоны, испытательные центры, лаборатории химического анализа, отделы контроля качества и т.д.

Исходя из поставленной цели выпускной квалификационной работы и проведенной характеристики производств предприятий тяжелого машиностроения задачами выпускной квалификационной работы являются:

- анализ структуры предприятия тяжелого машиностроения с определением объектов, отнесенных к заготовительному производству;
- расчет ожидаемых электрических нагрузок в целом по предприятию тяжелого машиностроения;

- выбор типа числа и мощности цеховых трансформаторных подстанций с учетом компенсации реактивной мощности во внутризаводской системе электроснабжения;
- выбор места расположения главной понизительной подстанции предприятия и с силовыми трансформаторами требуемой мощности;
- выбор типа и сечения линий электропередачи во внутризаводской системе электроснабжения предприятия тяжелого машиностроения с проверкой по величине падения напряжения.

Учитывая специфику технологического процесса и производимой продукции предприятий тяжелого машиностроения необходимо рассматривать только оборудование отечественного производства при разработке проектных решений, а также опираться на действующие нормы, правила и стандарты проектирования систем электроснабжения крупных промышленных предприятий.

1 Структура предприятия тяжелого машиностроения

Объект выпускной квалификационной работы – предприятие тяжелого машиностроения располагается в Свердловской области.

В состав предприятия тяжелого машиностроения входит 20 цехов и корпусов. Перечень цехов и корпусов предприятия тяжелого машиностроения представлен в таблице 1 [20].

Таблица 1 - Перечень цехов и производств предприятия тяжелого машиностроения

Номер производственного цеха или корпуса	Наименование производственного цеха или корпуса
1	Главный корпус
2	Блок вспомогательных цехов
3	Сварочный цех
4	Литейный цех
5	Кузнечный цех
6	Экспериментальный цех
7	Цех деревообработки
8	Компрессорная
9	Склад
10	Хранение сжатых газов
11	Насосная
12	Склад и регенерация масел
13	Склад химикатов
14	Железнодорожное депо
15	Столовая
16	Заводоуправление
17	Проходная
18	Центральная заводская лаборатория
19	Гараж
20	Ремонтно-механический цех

Размещение цехов и корпусов предприятия тяжелого машиностроения, представленных в таблице 1 показано на генеральном плане предприятия тяжелого машиностроения на рисунке 1 [20].

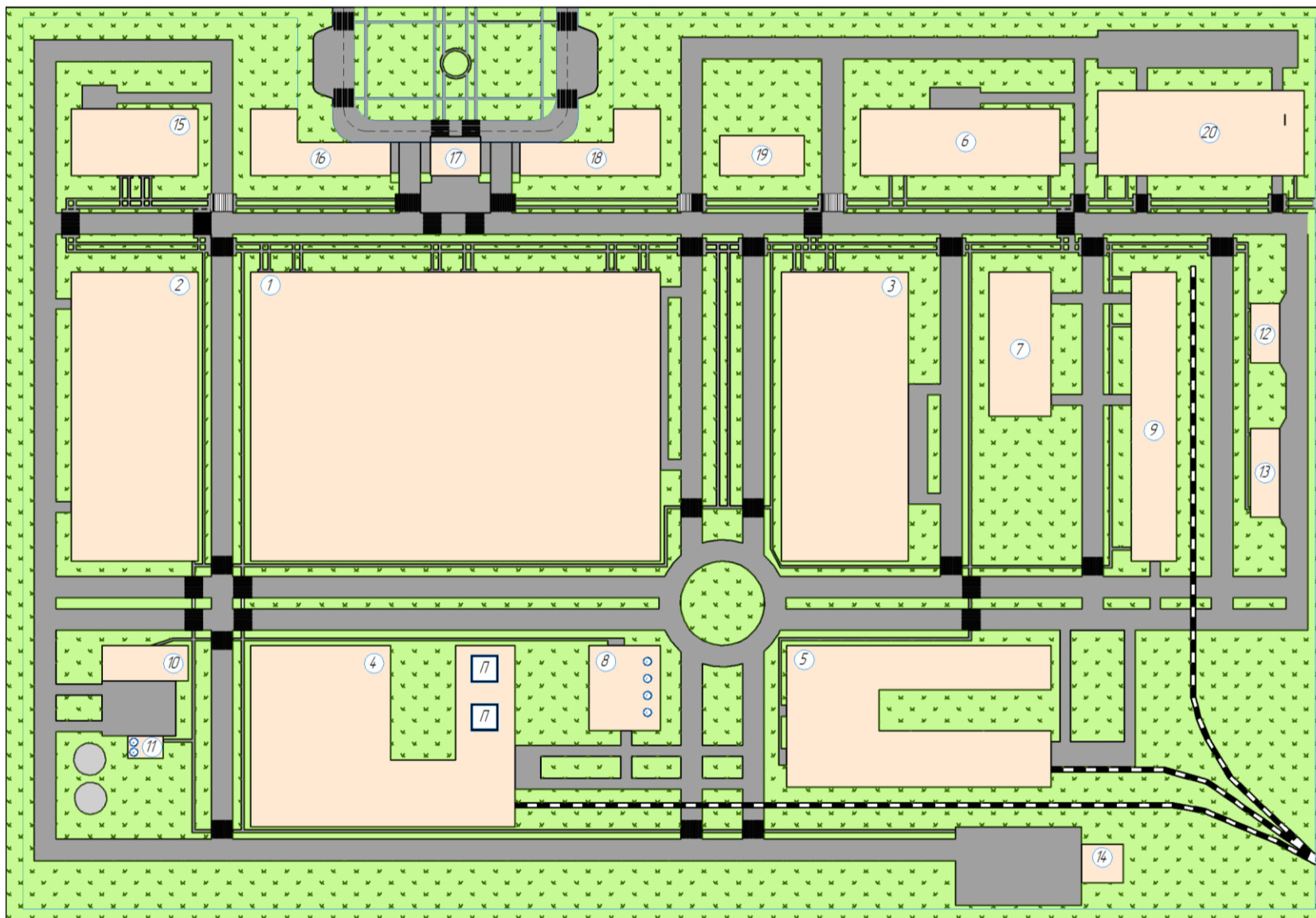


Рисунок 1 - Генеральный план предприятия тяжелого машиностроения

На предприятии тяжелого машиностроения в литейном цехе (Цех №4), насосной (Цех №11), а также в компрессорной (Цех №8) установлены высоковольтные электроприемники напряжением 6 кВ: электротермические установки – печи (литейный цех), асинхронные электродвигатели приводов компрессоров (компрессорная) и насосов (насосная).

Согласно генеральному плану (рисунок 1) площадь территории предприятия тяжелого машиностроения $S_{\text{ПТМ}} = 137,5 \cdot 10^3 \text{ (м}^2\text{)}$.

Согласно описанию и характеристике производств предприятий тяжелого машиностроения представленному во введении выпускной квалификационной работы необходимо выделить цеха и корпуса, относящиеся заготовительному производству.

К заготовительным цехам и производствам предприятия тяжелого машиностроения как было определено во введении относятся цеха реализующие технологические процессы производства заготовок из металла. По данным таблицы 1 составим таблицу 2 в которую занесем только те цеха и корпуса, которые относятся к заготовительному производству предприятия тяжелого машиностроения – объекту выпускной квалификационной работы.

Таблица 2 - Перечень цехов заготовительного производства предприятия тяжелого машиностроения

Номер производственного цеха или корпуса	Наименование производственного цеха или корпуса
3	Сварочный цех
4	Литейный цех
5	Кузнечный цех
7	Цех деревообработки

В литейном цехе (Цех №4) присутствуют высоковольтные электротермические технологические установки, питание которых, должно быть выполнено по линиям на напряжении 6 кВ.

Исходя из того, что на предприятии присутствует три цеха в которых установлены высоковольтные потребители на напряжение 6 кВ

распределительную сеть по территории предприятия тяжелого машиностроения предлагается выполнить именно на напряжении 6 кВ для снижения числа оборудования, обеспечивающего трансформацию напряжения и уменьшения числа линий электропередачи [19].

Исходными данными для выполнения выпускной квалификационной работы и достижения поставленной цели являются:

- генеральный план предприятия тяжелого машиностроения (рисунок 1);
- перечень цехов и корпусов предприятия тяжелого машиностроения (таблица 1) и заготовительное производства (таблица 2);
- значения установленной мощности $P_{уст.}$ каждого цеха, корпуса и высоковольтного электроприемника предприятия тяжелого машиностроения;
- площадь $S_{цеха}$ каждого цеха и корпуса предприятия тяжелого машиностроения;
- типовые суточные графики электрических нагрузок предприятия тяжелого машиностроения;
- коэффициенты активной мощности $\cos \varphi$ каждого цеха, корпуса и высоковольтного электроприемника предприятия тяжелого машиностроения;
- коэффициенты спроса K_c каждого цеха, корпуса и высоковольтного электроприемника предприятия тяжелого машиностроения.

Для определения типовых суточных графиков электрических нагрузок предприятия тяжелого машиностроения воспользуемся данными из [18]. Данные по относительным значениям активной мощности (P_i) и реактивной мощности (Q_i) типового суточного графика нагрузок предприятия тяжелого машиностроения представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Данные суточных графиков нагрузки

Номер ступени типового суточного графика	Данные суточных графиков нагрузки, %	
	Активная мощность, P_i	Реактивная мощность, Q_i
1	78	90
2	70	86
3	79	93
4	60	96
5	86	90
6	81	95
7	85	100
8	89	96
9	80	90
10	79	100
11	95	98
12	90	100
13	100	98
14	90	100
15	100	90
16	100	98
17	78	100
18	80	87
19	90	95
20	95	100
21	72	85
22	100	95
23	90	90
24	83	88

Типовые суточные графики нагрузок построенные по данным таблицы 3 показаны на рисунках 2 и 3 соответственно.

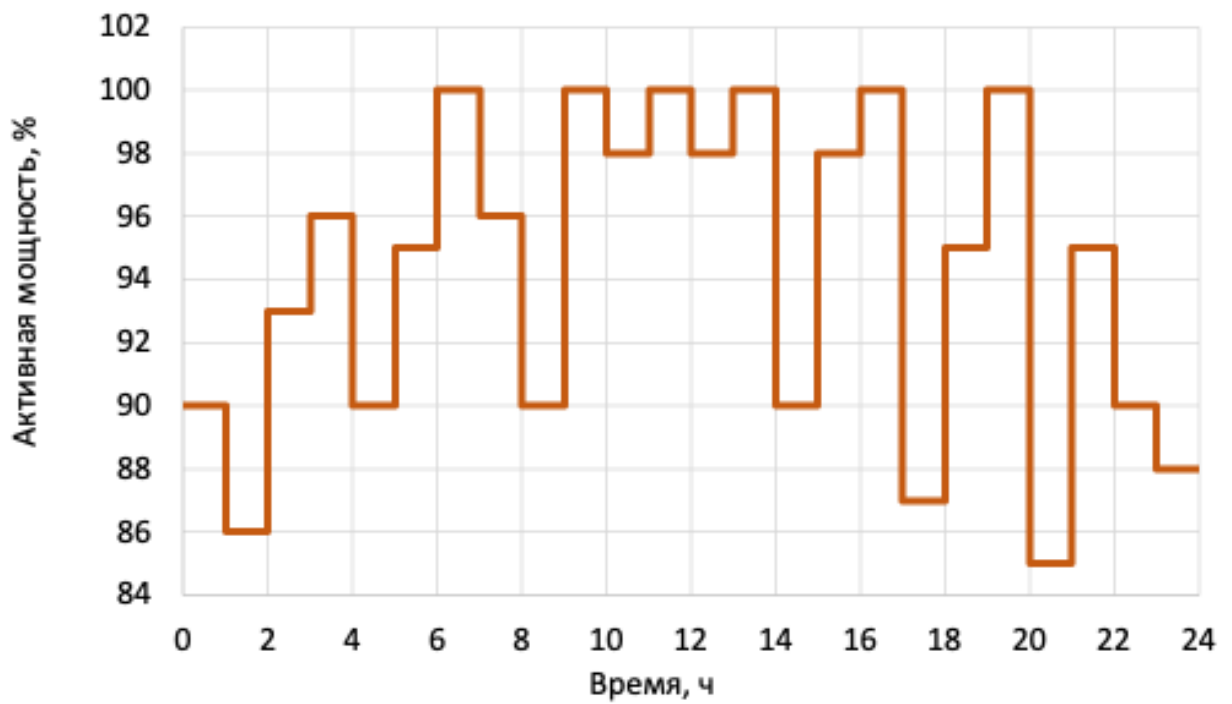


Рисунок 2 - Типовой суточный график активной мощности предприятия тяжелого машиностроения

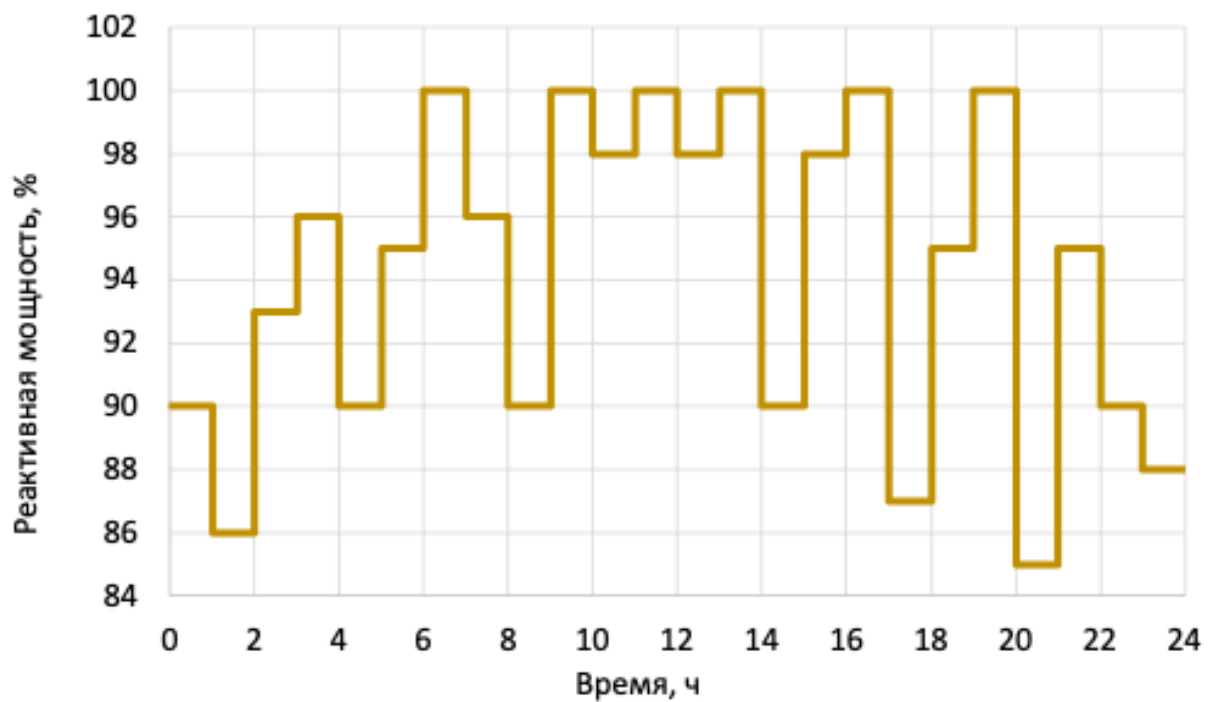


Рисунок 3 - Типовой суточный график реактивной мощности предприятия тяжелого машиностроения

Для определения установленных мощностей цехов, корпусов и высоковольтных электроприемников предприятия тяжелого машиностроения

воспользуемся [10], [12], [20] и на основании таблицы 1 составим таблицу 4 в которую занесем данные по установленной мощности ($P_{уст.}$) каждого цеха, корпуса и высоковольтного электроприемника предприятия (тяжелого машиностроения), данные по коэффициентам активной мощности ($\cos \varphi$) каждого цеха, корпуса и высоковольтного электроприемника предприятия тяжелого машиностроения, данные по коэффициентам спроса (K_c) каждого цеха, корпуса и высоковольтного электроприемника предприятия тяжелого машиностроения, также с использованием генерального плана (рисунок 1) определим площадь каждого цеха и корпуса предприятия тяжелого машиностроения.

Таблица 4 – Исходные данные по цехам и корпусам предприятия тяжелого машиностроения

Номер производственного цеха или корпуса	Наименование производственного цеха или корпуса	$P_{уст.},$ кВт	$\cos \varphi$	K_c	$S_{цеха}, м^2$
1	Главный корпус	4600	0,7	0,4	14117,88
2	Блок вспомогательных цехов	3400	0,7	0,35	4346,98
3	Сварочный цех	1600	0,6	0,45	4346,98
4	Литейный цех (0,4 кВ)	2000	0,8	0,55	4610,23
	Литейный цех (6 кВ)	3100			
5	Кузнечный цех	3200	0,75	0,4	3597,88
6	Экспериментальный цех	1400	0,7	0,2	1560,76
7	Цех деревообработки	300	0,66	0,43	1039,24
8	Компрессорная (0,4 кВ)	2400	0,8	0,75	659,5
	Компрессорная (6 кВ)	2880			
9	Склад	100	0,8	0,3	1529,94
10	Хранение сжатых газов	240	0,8	0,87	324,23
11	Насосная (0,4 кВ)	120	0,8	0,75	42,51
	Насосная (6 кВ)	3600			
12	Склад и регенерация масел	240	0,7	0,65	173,18
13	Склад химикатов	100	0,5	0,2	276,01
14	Железнодорожное депо	130	0,75	0,3	157,25
15	Столовая	110	0,9	0,5	976,8
16	Заводоуправление	70	0,8	0,8	710,12
17	Проходная	10	0,4	0,14	165,18
18	Центральная заводская лаборатория	250	0,6	0,4	710,12
19	Гараж	120	0,7	0,2	371,86
20	Ремонтно-механический цех	180	0,65	0,35	2053,47

Выводы по разделу.

Представлена характеристика предприятия тяжелого машиностроения, расположенного в Свердловской области.

Определен состав и расположение цехов и корпусов предприятия тяжелого машиностроения.

Общая площадь территории, занимаемой предприятием тяжелого машиностроения, составляет $S_{\text{ПТМ}} = 137,5 \cdot 10^3 \text{ (м}^2\text{)}$. Также по генеральному плану определена площадь каждого цеха и корпуса предприятия тяжелого машиностроения.

Проведенный анализ состава цехов и корпусов предприятия тяжелого машиностроения позволил установить, что к заготовительному производству относятся четыре цеха: сварочный цех (Цех №3), литейный цех (Цех №4), кузнечный цех (Цех №5) и цех деревообработки (Цех №7).

На предприятии тяжелого машиностроения в литейном цехе (Цех №4), насосной (Цех №11), а также в компрессорной (Цех №8) установлены высоковольтные электроприемники напряжением 6 кВ: электротермические установки – печи (литейный цех), асинхронные электродвигатели приводов компрессоров (компрессорная) и насосов (насосная). Учитывая наличие потребителей 6 кВ принято решение внутризаводскую распределительную сеть выполнить на классе напряжения 6 кВ.

Для всех цехов и корпусов предприятия тяжелого машиностроения определены исходные данные необходимы для расчета электрических нагрузок и выбора оборудования проектируемой системы электроснабжения: площадь цеха ($S_{\text{цеха}}$), коэффициент спроса каждого цеха (K_c), коэффициент активной мощности каждого цеха ($\cos \varphi$) и установленная мощность каждого цеха ($P_{\text{уст.}}$). Также определены данные типовых суточных графиков активной и реактивной нагрузок по всему предприятию.

2 Электрические нагрузки предприятия тяжелого машиностроения с картограммой нагрузок

В рамках выполнения второго раздела выпускной квалификационной работы представлены результаты расчета электрических нагрузок объекта выпускной квалификационной работы. На основании данных по электрическим нагрузкам построена картограмма нагрузок позволившая определить оптимальное место размещения центра питания проектируемой системы электроснабжения – подстанции глубокого ввода.

2.1 Электрические нагрузки

Расчет электрических нагрузок выполняется на основании исходных данных, представленных в первом разделе выпускной квалификационной работы в таблице 4. Электрическая мощность каждого цеха предприятия складывается из мощности технологических потребителей, а также мощности системы освещения [3]. При этом необходимо учитывать режим и характер работы производственного помещения с помощью коэффициента спроса [4]:

$$P_{\text{цех}.i} = K_{\text{с}.i} \cdot P_{\text{уст}.i} + P_{\text{осв.цех}.i} \quad (1)$$

где $K_{\text{с}.i}$ – коэффициент спроса, принимается согласно данным таблицы 4;

$P_{\text{уст}.i}$ – установленная мощность технологических потребителей i -го цеха, принимается согласно данным таблицы 4, кВт;

$P_{\text{осв.цех}.i}$ – установленная мощность системы освещения i -го цеха, кВт.

Для расчета установленной мощности системы освещения каждого из цехов предприятия тяжелого машиностроения может быть использована упрощенная методика, основанная на использовании удельного показателя освещенности каждого из цехов [1]:

$$P_{\text{осв.цех.}i} = \omega_{\text{уд.осв.цех.}i} \cdot S_{\text{цех.}i} \quad (2)$$

где $\omega_{\text{уд.осв.цех.}i}$ показатель удельной мощности системы освещения i -го цеха предприятия тяжелого машиностроения. Принимается согласно справочным данным на основании типа производства, размещенного в данном цехе, $\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$;

$S_{\text{цех.}i}$ – площадь i -го цеха предприятия тяжелого машиностроения.

Принимается согласно данных таблицы 4, м^2 .

Для расчета установленной мощности каждого из цехов предприятия тяжелого машиностроения выполним расчет установленной мощности системы освещения для этого воспользуемся выражением (2), а также таблицей 5 в которую занесем установленные мощности системы освещения для каждого цеха предприятия тяжелого машиностроения.

Таблица 5 - Удельные мощности системы освещения цехов предприятия тяжелого машиностроения

Номер производственного цеха или корпуса, i	Площадь цеха, $S_{\text{цех.}i}, \text{м}^2$	Уровень нормируемой освещенности, $E_{\text{норм.}}$, лк	$\omega_{\text{уд.осв.норм.}i},$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$
1	14117,88	200	14,4
2	4346,98	200	14,4
3	4346,98	200	14,4
4	4610,23	150	14,4
5	3597,88	200	14,4
6	1560,76	300	14,4
7	1039,24	150	14,4
8	659,5	150	14,4
9	1529,94	75	14,4
10	324,23	75	13,5
11	42,51	100	13,5
12	173,18	75	13,5
13	276,01	75	13,5
14	157,25	150	14,4
15	976,8	200	13,5

Продолжение таблицы 5

Номер производственного цеха или корпуса, i	Площадь цеха, $S_{\text{цеха}}, \text{м}^2$	Уровень нормируемой освещенности, $E_{\text{норм}},$ лк	$\omega_{\text{уд.осв.норм.}i},$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$
16	710,12	300	13
17	165,18	200	13
18	710,12	500	13,5
19	371,86	100	14,4
20	2053,47	300	14,4

Значения установленной мощности системы освещения $\omega_{\text{уд.осв.норм.}i}$ представленные в таблице 5 являются нормируемыми значениями и не учитывают типы применяемых светильников в системе внутреннего освещения каждого из цехов, кроме того эти значения удельной мощности не учитывают характер производства и характер окружающей среды внутри каждого цеха, поэтому для использования выражения (2) данные таблицы 5 необходимо привести к значениям для каждого цеха используя выражение [6]:

$$\omega_{\text{уд.осв.цех.}i} = \omega_{\text{уд.осв.норм.}i} \cdot \frac{E_{\text{норм}} \cdot K_1}{100 \cdot \eta_{\text{свет.}} \cdot K_2} \cdot K_{\text{п}} \quad (3)$$

где $E_{\text{норм}}$ – нормируемый уровень освещенности i -го цеха предприятия тяжелого машиностроения согласно данным таблицы 5, лк;

K_1 – коэффициент запаса, определяемый для каждого i -го цеха предприятия тяжелого машиностроения;

$\eta_{\text{свет.}}$ – коэффициент полезного действия используемого светильника, %;

K_2 – реальное значение коэффициента запаса светильника;

$K_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий отражение светового потока от ограждающих конструкций i -го цеха предприятия тяжелого машиностроения.

Используя выражение (3) и данные таблицы 5 выполним расчет значения удельной мощности для главного корпуса предприятия тяжелого

машиностроения с учетом использования светодиодных светильников с коэффициентом полезного действия 96% [13]:

$$\omega_{\text{уд.осв.цех.1}} = \omega_{\text{уд.осв.норм.1}} \cdot \frac{E_{\text{норм}} \cdot K_1}{100 \cdot \eta_{\text{свет.}} \cdot K_2} \cdot K_{\text{п}} = 14,4 \cdot \frac{200 \cdot 1,05}{100 \cdot 96 \cdot 1,02} \cdot 0,84,$$

$$\omega_{\text{уд.осв.цех.1}} = 0,259 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right)$$

Тогда по выражению (2) для главного корпуса предприятия тяжелого машиностроения с учетом значения $\omega_{\text{уд.осв.цех.1}} = 0,259 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right)$ получим:

$$P_{\text{осв.цех.1}} = \omega_{\text{уд.осв.цех.1}} \cdot S_{\text{цеха.1}} = 0,259 \cdot 14117,88 = 3660 \text{ (Вт)} = 3,6 \text{ (кВт)}$$

Расчеты мощности системы освещения для всех цехов выполним аналогично расчетам мощности системы освещения главного корпуса предприятия тяжелого машиностроения, результаты расчетов сведем в таблицу 6.

Для главного корпуса предприятия тяжелого машиностроения, по выражению (1) с учетом данных таблиц 6 и 4 получим:

$$P_{\text{цех.1}} = K_{\text{с.1}} \cdot P_{\text{уст.1}} + P_{\text{осв.цех.1}} = 0,4 \cdot 4600 + 3,6 = 1843,6 \text{ (кВт)}$$

Кроме того, для каждого цеха предприятия тяжелого машиностроения необходимо выполнить расчет значения реактивной и полной мощности.

Таблица 6 - Результаты расчета мощности системы освещения цехов предприятия тяжелого машиностроения

i	$S_{\text{цеха}}, \text{м}^2$	$\omega_{\text{уд.осв.норм.}i}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$E_{\text{норм}}, \text{лк}$	K_1	K_2	$\eta_{\text{свет.}}, \%$	$K_{\text{п}}$	$\omega_{\text{уд.осв.цех.}i}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$P_{\text{осв.цех.}i}, \text{кВт}$
1	14117,88	14,4	200	1,05	1,02	96	0,84	0,259412	3,66
2	4346,98	14,4	200	1,05	1,02	96	0,84	0,259412	1,13
3	4346,98	14,4	200	1,05	1,02	96	0,84	0,259412	1,13
4	4610,23	14,4	150	1,05	1,02	96	0,84	0,194559	0,9
5	3597,88	14,4	200	1,05	1,02	96	0,84	0,259412	0,93
6	1560,76	14,4	300	1,05	1,02	96	0,84	0,389118	0,61
7	1039,24	14,4	150	1,05	1,02	96	0,84	0,194559	0,2
8	659,5	14,4	150	1,05	1,02	96	0,84	0,194559	0,13
9	1529,94	14,4	75	1,05	1,02	96	0,84	0,097279	0,15
10	324,23	13,5	75	1,05	1,02	96	0,84	0,091199	0,03
11	42,51	13,5	100	1,05	1,02	96	0,84	0,121599	0,01
12	173,18	13,5	75	1,05	1,02	96	0,84	0,091199	0,02
13	276,01	13,5	75	1,05	1,02	96	0,84	0,091199	0,03
14	157,25	14,4	150	1,05	1,02	96	0,84	0,194559	0,03
15	976,8	13,5	200	1,05	1,02	96	0,84	0,243199	0,24
16	710,12	13	300	1,05	1,02	96	0,84	0,351287	0,25
17	165,18	13	200	1,05	1,02	96	0,84	0,234191	0,04
18	710,12	13,5	500	1,05	1,02	96	0,84	0,607996	0,43
19	371,86	14,4	100	1,05	1,02	96	0,84	0,129706	0,05
20	2053,47	14,4	300	1,05	1,02	96	0,84	0,389118	0,8

Реактивная мощность для каждого цеха предприятия тяжелого машиностроения определим с использованием выражения [7]:

$$Q_{\text{цех}.i} = K_{\text{с}.i} \cdot P_{\text{уст}.i} \cdot \text{tg } \varphi + P_{\text{осв.цех}.i} \cdot \text{tg } \varphi_{\text{осв}} \quad (4)$$

где $\text{tg } \varphi$ – коэффициент реактивной мощности i -го цеха предприятия тяжелого машиностроения, определяется по величине коэффициента активной мощности $\cos \varphi$ согласно таблице 4;

$\text{tg } \varphi_{\text{осв}}$ – коэффициент реактивной мощности системы освещения i -го цеха предприятия тяжелого машиностроения. Для всех цехов принимаем $\text{tg } \varphi_{\text{осв}} = 0,2$.

Полная мощность для каждого цеха предприятия тяжелого машиностроения определим с использованием выражения [15]:

$$S_{\text{цех}.i} = \sqrt{Q_{\text{цех}.i}^2 + P_{\text{цех}.i}^2} \quad (5)$$

Выполним расчет реактивной мощности главного корпуса предприятия тяжелого машиностроения по выражению (4) с учетом данных таблиц 4 и 6:

$$\begin{aligned} Q_{\text{цех}.1} &= K_{\text{с}.1} \cdot P_{\text{уст}.1} \cdot \text{tg } \varphi + P_{\text{осв.цех}.1} \cdot \text{tg } \varphi_{\text{осв}} \\ Q_{\text{цех}.1} &= 0,4 \cdot 4600 \cdot 1,02 + 3,66 \cdot 0,2 = 1876,8 \text{ (квар)} \end{aligned}$$

Полная мощность главного корпуса предприятия тяжелого машиностроения по выражению (5):

$$S_{\text{цех}.1} = \sqrt{Q_{\text{цех}.1}^2 + P_{\text{цех}.1}^2} = \sqrt{1876,8^2 + 1843,6^2} = 2630,82 \text{ (кВА)}$$

Для всех остальных цехов предприятия тяжелого машиностроения расчет значений реактивной и полной мощности выполним аналогично расчета для главного корпуса. Результаты расчета сведем в таблицу 7. Кроме того, таблицу 7 дополним расчетом суммарных значений активной, реактивной и полной мощностей по всему предприятию тяжелого машиностроения. Расчеты в таблице 7 выполнены без учета мощности высоковольтных потребителей на стороне 6 кВ.

2.2 Картограмма электрических нагрузок предприятия тяжелого машиностроения

Построение картограммы нагрузок предприятия тяжелого машиностроения необходимо выполнить с учетом мощности высоковольтных потребителей. Высоковольтные потребители на предприятии тяжелого машиностроения расположены в трех производственных цехах:

- литейном цехе (Цех №4);
- насосной (Цех №11);
- компрессорной (Цех №8).

Расчетную мощность высоковольтных потребителей определим по выражению:

$$P_{\text{ВВ.цех.}i} = P_{\text{уст.}i} \cdot K_{\text{с.}i} \quad (6)$$

где $P_{\text{уст.}i}$ – установленная активная мощность высоковольтного потребителя расположенного в i -м цехе предприятия тяжелого машиностроения, принимается по таблице 4 кВт;

$K_{\text{с.}i}$ – коэффициент спроса для высоковольтного потребителя расположенного в i -м цехе предприятия тяжелого машиностроения, принимается по таблице 4.

Таблица 7 - Результаты расчета нагрузок предприятия на стороне 0,4 кВ

i	Наименование цеха предприятия тяжелого машиностроения	$P_{уст.i},$ кВт	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$K_{с.i}$	$P_{осв.i},$ кВт	$\operatorname{tg} \varphi_{осв}$	$P_{цех.i},$ кВт	$Q_{цех.i},$ квар	$S_{цех.i},$ кВА
1	Главный корпус	4600	0,7	1,02	0,4	3,66	0,2	1843,66	1877,53	2631,39
2	Блок вспомогательных цехов	3400	0,7	1,02	0,35	1,13		1191,13	1214,03	1700,78
3	Сварочный цех	1600	0,6	1,33	0,45	1,13		721,13	957,83	1198,94
4	Литейный цех (0,4 кВ)	2000	0,8	0,75	0,55	0,9		1100,9	825,18	1375,83
5	Кузнечный цех	3200	0,75	0,88	0,4	0,93		1280,93	1126,59	1705,87
6	Экспериментальный цех	1400	0,7	1,02	0,2	0,61		280,61	285,72	400,47
7	Цех деревообработки	300	0,66	1,14	0,43	0,2		129,2	147,1	195,78
8	Компрессорная (0,4 кВ)	2400	0,8	0,75	0,75	0,13		1800,13	1350,03	2250,12
9	Склад	100	0,8	0,75	0,3	0,15		30,15	22,53	37,64
10	Хранение сжатых газов	240	0,8	0,75	0,87	0,03		208,83	156,61	261,03
11	Насосная (0,4 кВ)	120	0,8	0,75	0,75	0,01		90,01	67,5	112,51
12	Склад и регенерация масел	240	0,7	1,02	0,65	0,02		156,02	159,12	222,85
13	Склад химикатов	100	0,5	1,73	0,2	0,03		20,03	34,61	39,99
14	Железнодорожное депо	130	0,75	0,88	0,3	0,03		39,03	34,33	51,98
15	Столовая	110	0,9	0,48	0,5	0,24		55,24	26,45	61,25
16	Заводоуправление	70	0,8	0,75	0,8	0,25		56,25	42,05	70,23
17	Проходная	10	0,4	2,29	0,14	0,04		1,44	3,21	3,52
18	Центральная заводская лаборатория	250	0,6	1,33	0,4	0,43		100,43	133,09	166,73
19	Гараж	120	0,7	1,02	0,2	0,05		24,05	24,49	34,32
20	Ремонтно-механический цех	180	0,65	1,17	0,35	0,8		63,8	73,87	97,61
Суммарная активная мощность электроприемников на стороне 0,4 кВ, кВт								9192,97	-	-
Суммарная реактивная мощность электроприемников на стороне 0,4 кВ, квар									8561,87	-
Суммарная полная мощность электроприемников на стороне 0,4 кВ, кВА								12618,84		

Реактивная мощность высоковольтных потребителей:

$$Q_{\text{ВВ.цех.}i} = P_{\text{уст.}i} \cdot K_{\text{с.}i} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (7)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент реактивной мощности высоковольтного потребителя расположенного в i -м цехе, принимается по таблице 4 с учетом значения коэффициента активной мощности, $\cos \varphi$.

Полная мощность высоковольтного:

$$S_{\text{ВВ.цех.}i} = \sqrt{Q_{\text{ВВ.цех.}i}^2 + P_{\text{ВВ.цех.}i}^2} \quad (8)$$

Выполним расчет мощности высоковольтных потребителей для литейного цеха предприятия тяжелого машиностроения.

Расчетная активная мощность высоковольтных потребителей литейного цеха по (6) с учетом данных таблицы 4 получим:

$$P_{\text{ВВ.цех.}4} = P_{\text{уст.}4} \cdot K_{\text{с.}4} = 3100 \cdot 0,55 = 1705 \text{ (кВт)}$$

Расчетная реактивная мощность высоковольтных потребителей литейного цеха по (7) с учетом данных таблицы 4 получим:

$$Q_{\text{ВВ.цех.}4} = P_{\text{уст.}4} \cdot K_{\text{с.}4} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 3100 \cdot 0,55 \cdot 0,75 = 1278,75 \text{ (квар)}$$

Расчетная полная мощность высоковольтных потребителей литейного цеха по (8):

$$S_{\text{ВВ.цех.}4} = \sqrt{Q_{\text{ВВ.цех.}4}^2 + P_{\text{ВВ.цех.}4}^2} = \sqrt{1278,75^2 + 1705^2} = 2131,25 \text{ (кВА)}$$

Для насосной и компрессорной расчеты выполняются аналогично расчетам для литейного цеха. Результаты расчета мощностей высоковольтных потребителей сведем в таблицу 8.

Таблица 8 - Расчет мощности высоковольтных потребителей предприятия тяжелого машиностроения

Наименование цеха	$P_{уст.i},$ кВт	$\cos \varphi$	$K_{с.i}$	$\operatorname{tg} \varphi$	$P_{ВВ.цех.i},$ кВт	$Q_{ВВ.цех.i},$ квар	$S_{ВВ.цех.i},$ кВА
Литейный цех (6 кВ)	3100	0,8	0,55	0,75	1705	1278,75	2131,25
Компрессорная (6 кВ)	2880	0,8	0,75	0,75	2160	1620	2700
Насосная (6 кВ)	3600	0,8	0,75	0,75	2700	2025	3375
Суммарная активная мощность, кВт					6565	-	-
Суммарная реактивная мощность, квар						4923,75	-
Суммарная полная мощность, кВА							8206,25

В рамках построения картограммы электрических нагрузок выполняется расчет координат центра электрических ($X_{ЦЭН.расч.}; Y_{ЦЭН.расч.}$), определяемых выражениями [2]:

$$\begin{aligned}
 X_{ЦЭН.расч.} &= \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot (P_{цех.i} + P_{ВВ.цех.i})}{\sum_{i=1}^n (P_{цех.i} + P_{ВВ.цех.i})} \\
 Y_{ЦЭН.расч.} &= \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot (P_{цех.i} + P_{ВВ.цех.i})}{\sum_{i=1}^n (P_{цех.i} + P_{ВВ.цех.i})}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

где n – общее число цехов предприятия тяжелого машиностроения, определяется по таблице 1 шт.;

X_i – значение координаты по оси абсцисс i -го цеха предприятия тяжелого машиностроения, определяется по генеральному плану, представленному на рисунке 1;

$P_{цех.i}$ – расчетная активная мощность i -го цеха предприятия тяжелого машиностроения. Определена в таблице 7, кВт;

$P_{ВВ.цех.i}$ – мощность высоковольтных потребителей (при наличии) в i -го цеха предприятия тяжелого машиностроения. Определена в таблице 8, кВт;

Y_i - значение координаты по оси ординат i -го цеха предприятия тяжелого машиностроения, определяется по генеральному плану, представленному на рисунке 1.

Дополнительно на картограмме электрических нагрузок наносятся круги, радиус которых, отражает значение расчетной активной мощности. Радиус каждого круга определяется по выражению [2]:

$$r_i = \sqrt{\frac{(P_{\text{цех}.i} + P_{\text{ВВ.цех}.i})}{\pi \cdot m}} \quad (10)$$

Доля осветительной нагрузки цеха определяется выражением:

$$\alpha_{\text{осв}.i} = \frac{P_{\text{осв}.i} \cdot 360}{\pi \cdot r_i^2 \cdot m} \quad (11)$$

Расчет картограммы электрических нагрузок по выражениям (9), (10) и (11) выполним с использованием MS Excel. Результаты расчета сведем в таблицу 9. Согласно данным расчета центр электрических нагрузок находится в точке с координатами (199,71;125,74). Картограмму нагрузок предприятия с центром электрических нагрузок, построенную по результатам расчетов, выполненных в таблице 9, представим на рисунке 4.

Таблица 9 - Результаты расчета центра электрических нагрузок предприятия тяжелого машиностроения

Наименование цеха предприятия тяжелого машиностроения	X_i , мм	Y_i , мм	$P_{\text{цех},i}$, кВт	$X_i \cdot P_{\text{цех},i}$, мм·кВт	$Y_i \cdot P_{\text{цех},i}$, мм·кВт	r_i , мм	$P_{\text{осв},i}$, кВт	$\alpha_{\text{осв},i}$
Главный корпус	186,6899	212,5007	1843,66	344192,76	391778,99	54,17	3,66	0,72
Блок вспомогательных цехов	48,27666	212,5007	1191,13	57503,78	253115,93	43,54	1,13	0,34
Сварочный цех	354,7911	212,5007	721,13	255850,49	153240,61	33,88	1,13	0,56
Литейный цех (0,4 кВ)	155,379	74,5365	2805,9	435977,92	209141,97	66,83	0,9	0,12
Кузнечный цех	386,7815	83,03779	1280,93	495439,97	106365,6	45,15	0,93	0,26
Экспериментальный цех	404,5893	330,9931	280,61	113531,81	92879,97	21,13	0,61	0,78
Цех деревообработки	430,4938	243,7601	129,2	55619,8	31493,8	14,34	0,2	0,56
Компрессорная (0,4 кВ)	259,7044	95,2138	3960,13	1028463,11	377059,04	79,39	0,13	0,01
Склад	488,2372	212,5007	30,15	14720,35	6406,9	6,93	0,15	1,79
Хранение сжатых газов	52,71075	106,0165	208,83	11007,59	22139,43	18,23	0,03	0,05
Насосная (0,4 кВ)	52,76265	69,76652	2790,01	147208,33	194649,28	66,64	0,01	0
Склад и регенерация масел	536,2436	248,5139	156,02	83664,73	38773,14	15,76	0,02	0,05
Склад химикатов	536,2436	188,2269	20,03	10740,96	3770,19	5,65	0,03	0,54
Железнодорожное депо	466,1124	19,55346	39,03	18192,37	763,17	7,88	0,03	0,28
Столовая	48,27666	330,9931	55,24	2666,8	18284,06	9,38	0,24	1,56
Заводоуправление	128,5097	330,9931	56,25	7228,67	18618,36	9,46	0,25	1,6
Проходная	186,6899	323,7676	1,44	268,83	466,23	1,51	0,04	10,06
Центральная заводская лаборатория	244,8701	330,9931	100,43	24592,31	33241,64	12,64	0,43	1,54
Гараж	319,1846	325,1199	24,05	7676,39	7819,13	6,19	0,05	0,75
Ремонтно-механический цех	508,6317	334,8731	63,8	32450,7	21364,9	10,08	0,8	4,51
$\sum_{i=1}^n (P_{\text{цех},i} + P_{\text{ВВ},\text{цех},i})$, кВт			15757,97	-	-	-	-	-
$\sum_{i=1}^n X_i \cdot (P_{\text{цех},i} + P_{\text{ВВ},\text{цех},i})$, мм·кВт				3146997,67	-	-	-	-
$\sum_{i=1}^n Y_i \cdot (P_{\text{цех},i} + P_{\text{ВВ},\text{цех},i})$, мм·кВт					1981372,34	-	-	-

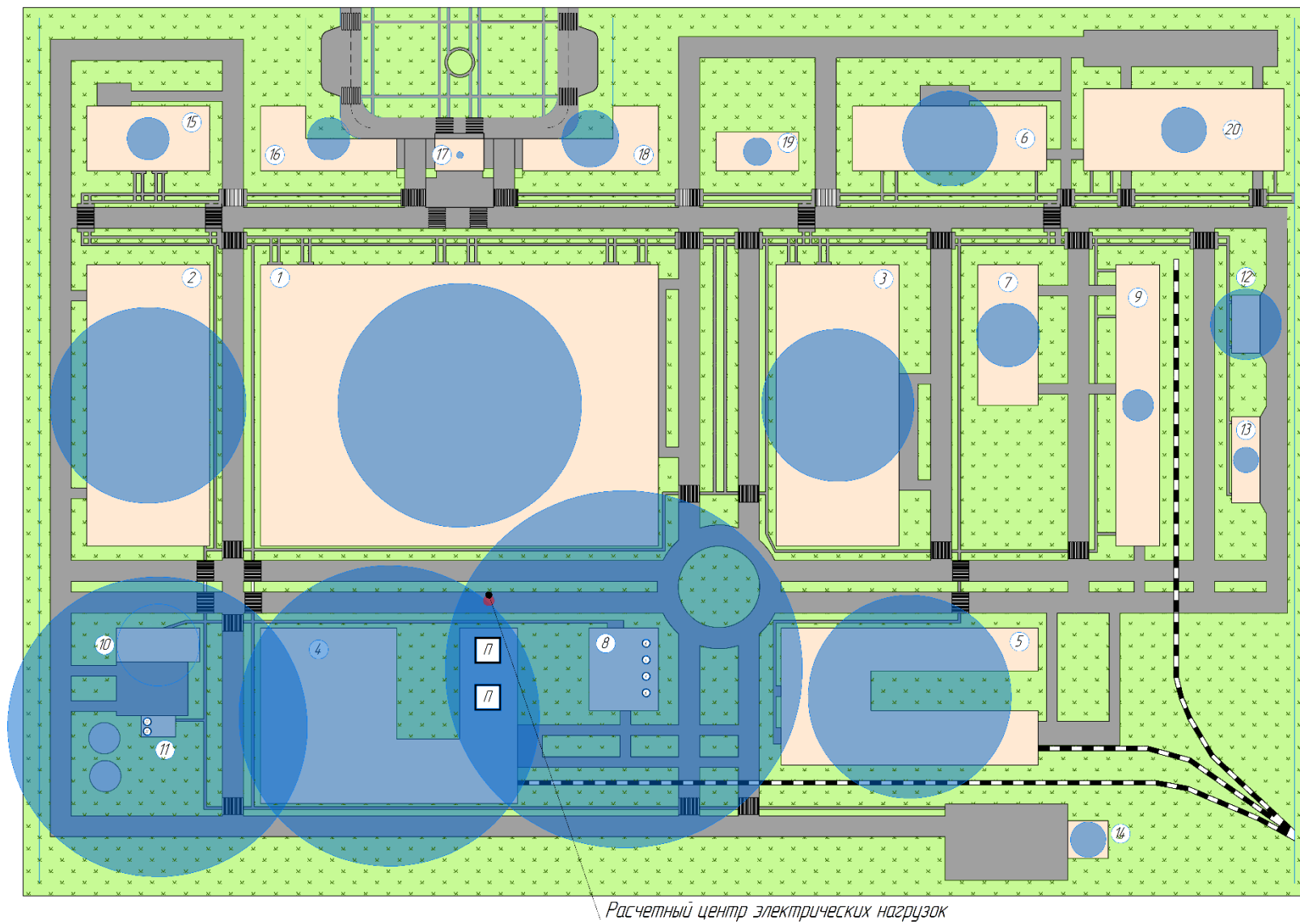


Рисунок 4 - Картограмма нагрузок предприятия тяжелого машиностроения

Выводы по разделу.

Представлен расчет электрических нагрузок предприятия тяжелого машиностроения, по результатам которого построена картограмма нагрузок и определен расчетный центр электрических нагрузок с координатами (199,71;125,74). Расчетный центр электрических нагрузок является оптимальным местом для размещения главной понизительной подстанции предприятия тяжелого машиностроения. Положение расчетной точки центра электрических нагрузок попадает на проезжую часть в районе цехов №1 и №4, поэтому размещение центра питания в данной точке невозможно. Размещение центра питания необходимо скорректировать на дальнейшем этапах проектирования системы электроснабжения предприятия тяжелого машиностроения.

По результатам расчета электрических нагрузок на стороне 0,4 кВ с учетом нагрузок внутренней системы освещения получено, что суммарная активная мощность потребителей 0,4 кВ предприятия тяжелого машиностроения составляет 9,192,97 кВт, реактивная мощность 8561,87 квар, а полная мощность составляет 12618,84 кВА.

Также получены значения расчетной активной, реактивной и полной мощностей высоковольтных потребителей электрической энергии, расположенных в цехах №4, №8 и №11. Суммарная мощность высоковольтных потребителей составила: активная мощность 6565 кВт, реактивная мощность 4923 квар и полная мощность 8206,25 квар.

Для снижения полной мощности предприятия тяжелого машиностроения необходимо выполнить компенсацию реактивной мощности.

3 Выбор мощности цеховых трансформаторов и компенсация реактивной мощности

Для выбора мощности и типа цеховых трансформаторов системы электроснабжения предприятия тяжелого машиностроения необходимо рассмотреть вопрос компенсации реактивной мощности на стороне 0,4 кВ. Применение установок компенсации реактивной мощности на цеховых трансформаторных подстанциях позволит снизить перетоки реактивной мощности в системе электроснабжения и снизить расчетную мощность цеховых трансформаторов, а также трансформаторов главной понизительной подстанции.

3.1 Выбор мест размещения цеховых трансформаторных подстанций

Места размещения всех цеховых трансформаторных подстанций представим на рисунке 5.

Группировку цехов по трансформаторным подстанциям представим в таблице 10.

На плане расположения трансформаторных подстанций (рисунок 5) также укажем места размещения подстанции глубокого ввода (ПГВ). Размещение ПГВ выполним с учетом расчета картограммы электрических нагрузок и сместим размещение ПГВ от расчетного центра электрических нагрузок с координатами (199,71;125,74) в направлении источника питания – подстанции внешней электроэнергетической системы.

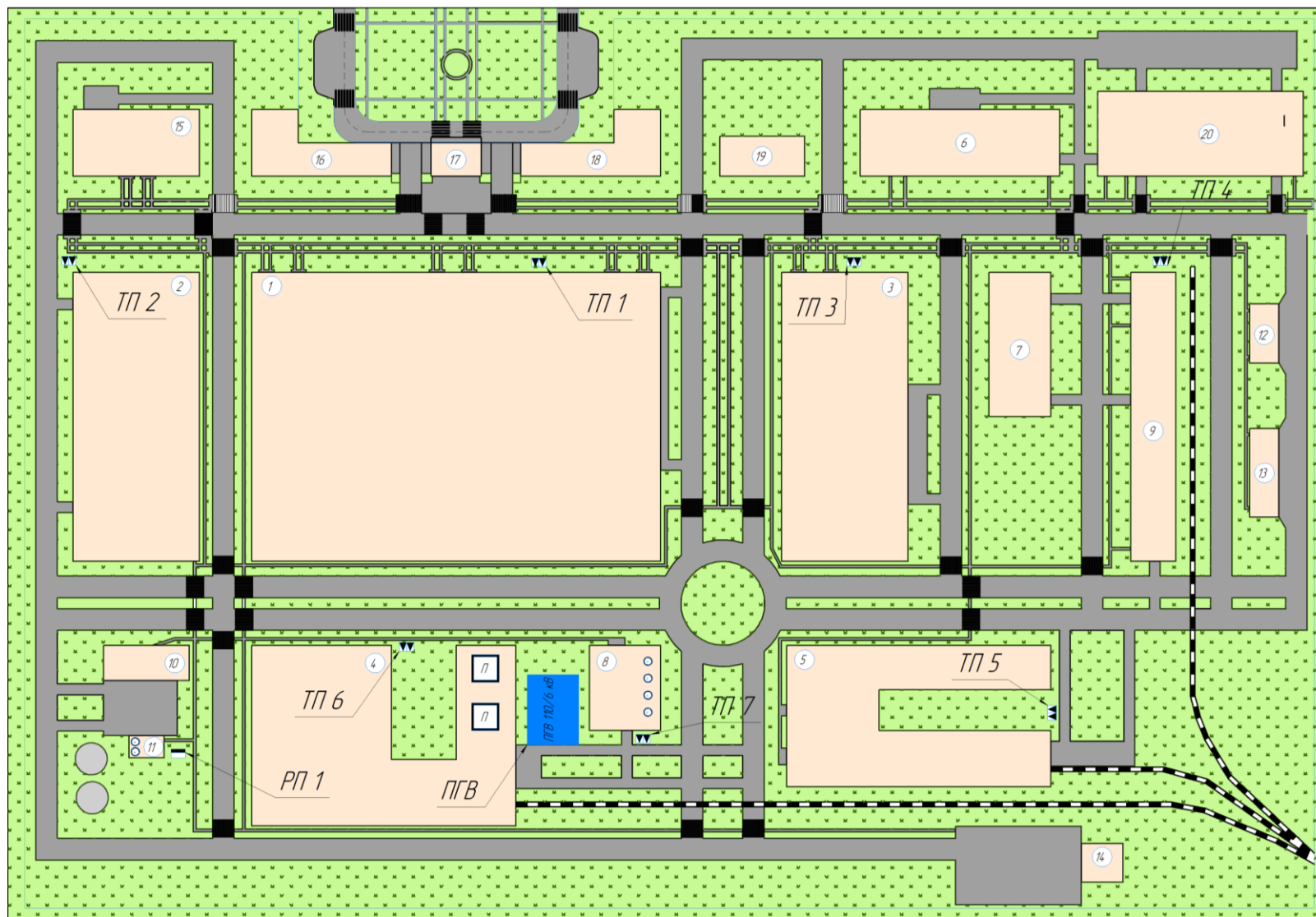


Рисунок 5 - План размещения центров питания на генеральном плане предприятия

Таблица 10 - Распределение цехов предприятия по трансформаторным подстанциям

Номер ТП	Наименование цеха
ТП 1	Главный корпус, Проходная
ТП 2	Блок вспомогательных цехов, Столовая, Заводоуправление
ТП 3	Сварочный цех, Экспериментальный цех, Центральная заводская лаборатория, Гараж
ТП 4	Цех деревообработки, Экспериментальный цех, Склад, Склад и регенерация масел, Склад химикатов, Ремонтно-механический цех
ТП 5	Кузнечный цех, Железнодорожное депо
ТП 6	Литейный цех, Хранение сжатых газов, Насосная
ТП 7	Компрессорная

От цеховых трансформаторных подстанций питаются только потребители на напряжении 0,4 кВ. Так как на предприятии также присутствуют высоковольтные потребители, то для их питания дополнительно необходимо разместить высоковольтный распределительный пункт (РП). На плане размещения ТП (рисунок 5) высоковольтный распределительный пункт – РП 1 разместим вблизи цеха № 11 (Насосная).

3.2 Компенсация реактивной мощности в системе электроснабжения предприятия тяжелого машиностроения

Для снижения перетоков реактивной мощности в проектируемой системе электроснабжения, а также для снижения мощности трансформаторов, устанавливаемых на цеховых ТП выполним расчет требуемой мощности установок компенсации реактивной мощности. В расчетах числа установок компенсации для каждой ТП примем, что все подстанции имеют двух трансформаторную компоновку, поэтому мощность установок компенсации будем рассматривать с учетом равномерного распределения между шинами 0,4 кВ цеховой трансформаторной подстанции.

Для расчета мощности установок компенсации также примем, что требуемый коэффициент реактивной мощности предприятия $\operatorname{tg} \varphi = 0,2$, что соответствует коэффициенту активной мощности $\cos \varphi = 0,98$.

Расчетная мощность установки компенсации реактивной мощности определяется выражением:

$$Q_{\text{УКРМ.ТП-j.расч.}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\text{цех.i}} \cdot (\tan \varphi_i - \text{tg } \varphi_{\text{ЭЭС}})}{n_{\text{УКРМ}}} \quad (12)$$

где j – номер цеховой ТП, для которой выполняется расчет мощности установки компенсаций;

n – число цехов подключенных к j -й цеховой трансформаторной подстанции, шт.;

$Q_{\text{цех.i}}$ – расчетное значение реактивной мощности i -го цеха предприятия без учета использования установок компенсации, принимается согласно данным таблицы 7, квар;

$\tan \varphi_i$ – расчетный коэффициент реактивной мощности без учета использования установок компенсации, принимается согласно данным таблицы 7;

$\text{tg } \varphi_{\text{ЭЭС}}$ – коэффициент реактивной мощности после компенсации.

Принят в расчетах для всех цеховых ТП $\text{tg } \varphi_{\text{ЭЭС}} = 0,2$.

$n_{\text{УКРМ}}$ – расчетное значение количества установок компенсации на j -й цеховой трансформаторной подстанции. Значение $n_{\text{УКРМ}}$ должно быть кратно 2.

По значению полученному в (12) необходимо выбрать номинальную мощность установки компенсации - $Q_{\text{УКРМ.ТП-j.ном.}}$, по каталогам производителей установок компенсации реактивной мощности.

Полная мощность цеховой ТП с учетом использования установок компенсации реактивной мощности определим по выражению:

$$S_{\text{ТП-j}}^{\text{КРМ}} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n P_{\text{цех.i}}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n Q_{\text{цех.i}} - (Q_{\text{УКРМ.ТП-j.ном.}} \cdot n_{\text{УКРМ}})\right)^2} \quad (13)$$

где j – номер цеховой ТП, для которой выполняется расчет мощности установки компенсаций;

n – число цехов подключенных к j -й цеховой трансформаторной подстанции, шт.;

$P_{\text{цех}.i}$ – активная расчетная мощность i -го цеха предприятия, принимается согласно данным таблицы 7, кВт;

$Q_{\text{цех}.i}$ – расчетное значение реактивной мощности i -го цеха предприятия без учета использования установок компенсации, принимается согласно данным таблицы 7, квар;

$Q_{\text{УКРМ.ТП}-j.\text{ном.}}$ – номинальная мощность установки компенсации реактивной мощности, принятая по каталогам производителей оборудования, квар;

$n_{\text{УКРМ}}$ – принятое значение количества установок компенсации на j -й цеховой трансформаторной подстанции.

Выполним расчет мощности установок компенсации согласно методике представленной выражениями (12) и (13) для цеховой трансформаторной подстанции ТП 1 питающей главный корпус и проходную согласно данным таблицы 10.

По выражению (12) получим:

$$Q_{\text{УКРМ.ТП1.расч.}} = \frac{(Q_{\text{цех.1}} \cdot (\tan \varphi_1 - \text{tg } \varphi_{\text{ЭЭС}})) + (Q_{\text{цех.17}} \cdot (\tan \varphi_{17} - \text{tg } \varphi_{\text{ЭЭС}}))}{n_{\text{УКРМ}}}$$
$$Q_{\text{УКРМ.ТП1.расч.}} = \frac{(1876,8 \cdot (1,02 - 0,2)) + (3,2 \cdot (2,29 - 0,2))}{4}$$
$$Q_{\text{УКРМ.ТП1.расч.}} = 378 \text{ (квар)}$$

Данным каталогов производителей установок компенсации реактивной мощности соответствует установка с номинальной мощностью $Q_{\text{УКРМ.ТП1.ном.}} = 400$ (квар). Таким образом примем к установке на цеховой

ТП 1 конденсаторные установки типа АУКРМ-VE-0,4-400-50У3 IP31 с номинальной мощностью $Q_{\text{УКРМ.ТП1.ном.}} = 400$ (квар) в количестве $n_{\text{УКРМ}} = 4$ (шт.) [8].

По (13) выполним расчет величины полной мощности цеховой ТП 1 с учетом подключения на шинах 0,4 кВ четырех установок компенсации:

$$S_{\text{ТП-1}}^{\text{КРМ}} = \sqrt{(P_{\text{цех.1}} + P_{\text{цех.17}})^2 + ((Q_{\text{цех.1}} + Q_{\text{цех.17}}) - (Q_{\text{УКРМ.ТП1.ном.}} \cdot n_{\text{УКРМ}}))^2}$$

$$S_{\text{ТП-1}}^{\text{КРМ}} = \sqrt{(1840 + 1,4)^2 + ((1876,8 + 3,2) - (400 \cdot 4))^2}$$

$$S_{\text{ТП-1}}^{\text{КРМ}} = 1862,57 \text{ (кВА)}$$

Расчеты для цеховых ТП 2 – ТП 7 выполняются аналогично расчетам для ТП 1, результаты сведем в таблицу 11.

По результатам расчета для всех цеховых ТП принимаем автоматические установки компенсации реактивной мощности с фильтрами гармоник типа АУКРМ-VE-Ф. Установки типа АУКРМ-VE-Ф являются контакторными установками компенсации реактивной мощности, что допускает их установку в отдельно стоящем здании цеховых ТП, а наличие фильтра высших гармоник позволяет регулировать коэффициент активной мощности в сети в широком диапазоне с компенсацией гармонических искажений. На цеховых ТП согласно расчетам приняты следующие модели установок компенсации типа АУКРМ-VE-Ф:

- ТП 1: 4×АУКРМ-VE-0,4-400-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 579,7 \text{ A};$
- ТП 2: 4×АУКРМ-VE-0,4-275-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 398,5 \text{ A};$
- ТП 3: 4×АУКРМ-VE-0,4-300-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 434,8 \text{ A};$

Таблица 11 - Результаты расчета мощности установок компенсации

Наименование цеховой ТП	Наименование цеха	$Q_{\text{цех},i}$, квар	$P_{\text{цех},i}$, кВт	$\text{tg } \varphi_i$	$Q_{\text{УКРМ.ТП}-j.\text{расч.}}$, квар	$Q_{\text{УКРМ.ТП}-j.\text{ном.}}$, квар	$n_{\text{УКРМ}}$, шт.	$S_{\text{ТП}-1}^{\text{КРМ}}$, кВА
ТП 1	Главный корпус	1876,8	1840	1,02	378	400	4	1862,57
	Проходная	3,206	1,4	2,29				
ТП 2	Блок вспомогательных цехов	975,8	1190	1,02	256	275	4	1298,66
	Столовая	15,4	55	0,48				
	Заводоуправление	30,8	56	0,75				
ТП 3	Сварочный цех	957,6	720	1,33	294	300	4	1105,94
	Экспериментальный цех	285,6	280	1,02				
	Центральная заводская лаборатория	133	100	1,33				
	Гараж	24,48	24	1,02				
ТП 4	Цех деревообработки	147,06	129	1,14	294	300	3	666,83
	Экспериментальный цех	285,6	280	1,02				
	Склад	22,5	30	0,75				
	Склад и регенерация масел	159,12	156	1,02				
	Склад химикатов	34,6	20	1,73				
	Ремонтно-механический цех	73,71	63	1,17				
ТП 5	Кузнечный цех	1126,4	1280	0,88	448,46	450	2	1292,98
	Железнодорожное депо	34,32	39	0,88				
ТП 6	Литейный цех	825	1100	0,75	384,67	400	2	1376,44
	Хранение сжатых газов	156,6	208,8	0,75				
	Насосная	67,5	90	0,75				
ТП 7	Компрессорная	1350	1800	0,75	990	500	2	1689,85

- ТП 4: 4×АУКРМ-VE-0,4-300-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 434,8 \text{ A}$;
- ТП 5: 2×АУКРМ-VE-0,4-450-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 652,2 \text{ A}$;
- ТП 6: 2×АУКРМ-VE-0,4-400-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 579,7 \text{ A}$;
- ТП 7: 2×АУКРМ-VE-0,4-500-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 724,6 \text{ A}$.

3.3 Выбор типа мощности цеховых трансформаторов

Определение мощности трансформаторов цеховых ТП выполним с учетом использования на стороне 0,4 кВ установок компенсации реактивной мощности, и результатов расчета полной мощности цеховых ТП из таблицы 11.

Согласно ПУЭ [17], допустимый коэффициент аварийной перегрузки без учета температуры окружающей среды для трансформатора определяется значением $K_{\text{ДАП}} = 1,4$, а коэффициент допустимой номинальной загрузки трансформаторов не должен превышать $K_{\text{ДЗ}} = 0,7$. Для определения значения расчетной полной мощности трансформатора цеховой ТП используется выражение:

$$S_{\text{транс.расч.ТП-j}} = \frac{S_{\text{ТП-j}}^{\text{КРМ}}}{K_{\text{ДЗ}} \cdot (n_{\text{транс.}} - 1)} \quad (14)$$

где $S_{\text{ТП-j}}^{\text{КРМ}}$ – расчетная полная мощность j -й цеховой трансформаторной подстанции после выбора установок компенсации с учетом выражения (13), кВА;

$K_{дз}$ – коэффициент допустимой загрузки трансформатора при двухтрансформаторной компоновке подстанции. Принят для всех цеховых ТП $K_{дз} = 0,7$;

$n_{\text{транс.}}$ – число трансформаторов установленных на j -й цеховой трансформаторной подстанции. Для всех ТП принято $n_{\text{транс.}} = 2$, шт.

С учетом полученного по выражению (14) расчетного значения полной мощности трансформатора, по каталогам производителей, а также по стандартным значениям мощности трансформаторов необходимо выбрать номинальную мощность трансформатора исходя из условия [9]:

$$S_{\text{транс.расч.ТП-j}} \leq S_{\text{транс.ном.ТП-j}} \quad (15)$$

где $S_{\text{транс.ном.ТП-j}}$ – номинальная полная мощность трансформатора, принимаемого к установке на j -й цеховой трансформаторной подстанции. Определяется по каталогам производителей трансформаторного оборудования и по стандартным значениям мощностей трансформаторов, кВА.

Выбранный по условию (15) трансформатор необходимо дополнительно проверить по величине коэффициента загрузки в максимальном режиме. При этом коэффициент загрузки в максимальном режиме, т.е. при отключении одного из трансформаторов цеховой ТП, не должен превышать нормируемое значение коэффициента допустимой аварийной перегрузки ($K_{\text{ДАП}}$), т.е. должно выполняться условие:

$$K_{з.расч.ТП-j.макс} < K_{\text{ДАП}} \quad (16)$$

Расчетный коэффициент загрузки трансформатора цеховой ТП в максимальном режиме определяется выражением:

$$K_{3,\text{расч.ТП-j.макс}} = \frac{S_{\text{ТП-j}}^{\text{KPM}}}{S_{\text{транс.ном.ТП-j}}} \quad (17)$$

С учетом значений полной мощности с учетом использования установок компенсации для цеховой ТП 1 по (14) получим:

$$S_{\text{транс.расч.ТП-1}} = \frac{S_{\text{ТП-1}}^{\text{KPM}}}{K_{\text{ДАП}} \cdot (n_{\text{транс.}} - 1)}$$

$$S_{\text{транс.расч.ТП-1}} = \frac{1862,57}{1,4 \cdot (2 - 1)} = 1330,407143 \text{ (кВА)}$$

Расчетному значению мощности трансформатора для ТП 1 соответствует трансформатор с номинальной мощностью 1600 кВА. Для установки на цеховой ТП 1 примем два трансформатора марки ТМГ с мощностью 1600 кВА и номинальными напряжениями 6 кВ (для обмотки высокого напряжения) и 0,4 кВ (для обмотки низкого напряжения). Выбранный для ТП 1 трансформатор проверим на соответствие условию (16) определив предварительно коэффициент загрузки по выражению (17):

$$K_{3,\text{расч.ТП-1.макс}} = \frac{S_{\text{ТП-1}}^{\text{KPM}}}{S_{\text{транс.ном.ТП-1}}} = \frac{1862,57}{1600} = 1,16$$

$$K_{3,\text{расч.ТП-1.макс}} = 1,6 < K_{\text{ДАП}} = 1,4$$

Таким образом для цеховой ТП 1 окончательно принимаем установке два трансформатора ТМГ-1600/6/0,4 (рисунок 6).

Для всех цеховых ТП 2 – ТП 7 расчеты по выбору трансформаторов выполняются аналогично выбору трансформаторов для ТП 1. Результаты расчета сведем в таблицу 12.

Параметры выбранных трансформаторов для цеховых ТП сведем в таблицу 13.

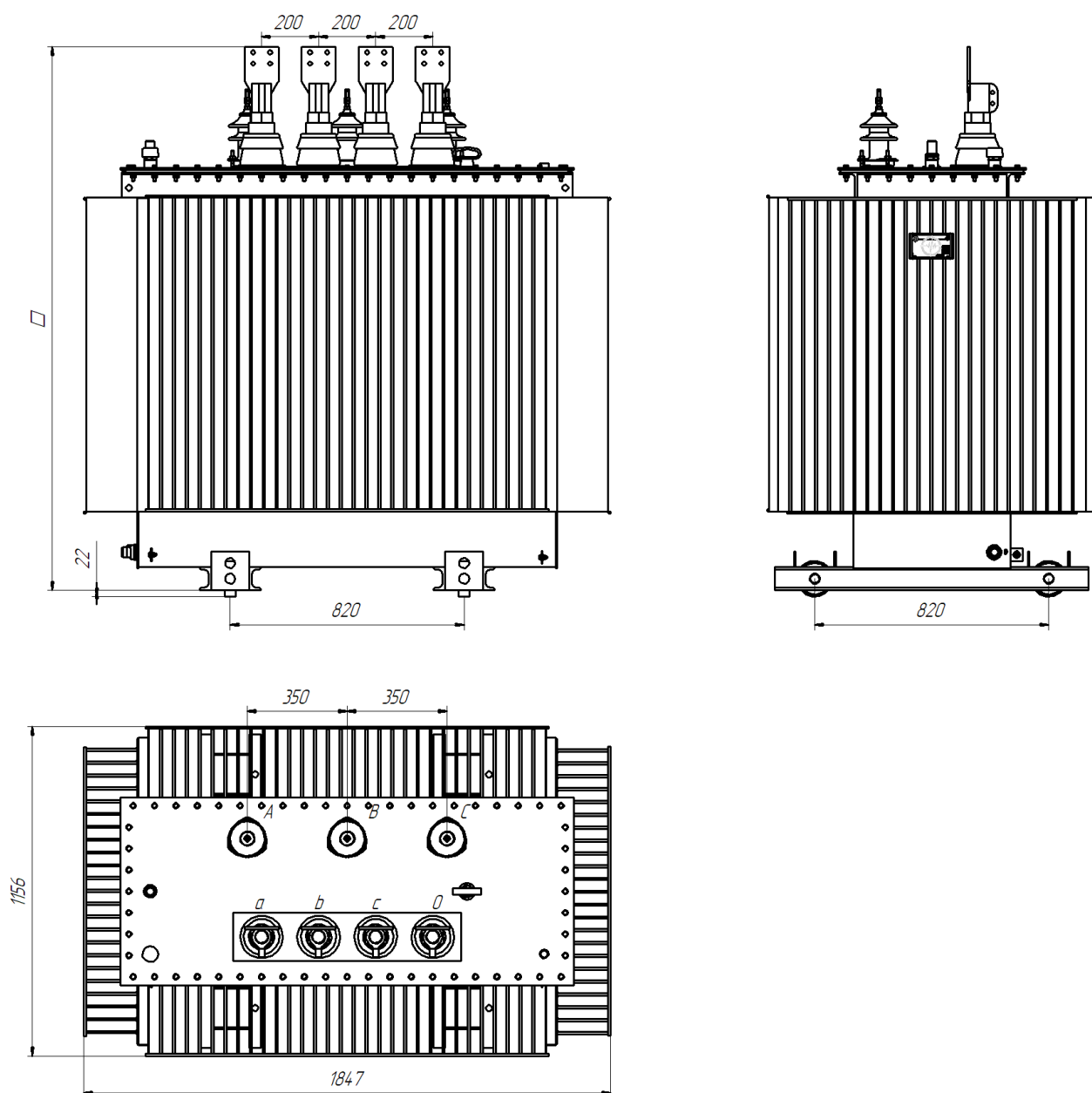


Рисунок 6 - Габаритный чертеж трансформатора ТМГ-1600/6/0,4 кВ
принятого к установке на цеховой ТП 1

Таблица 12 - Расчет мощности цеховых ТП

Наименование цеховой ТП	$S_{ТП-1}^{КРМ}$, кВА	$S_{транс.расч.ТП-j}$, кВА	$S_{транс.ном.ТП-j}$, кВА	$n_{транс.}$, шт.	$K_{з.расч.ТП-j.макс}$
ТП 1	1862,57	1330,407143	1600	2	1,16
ТП 2	1298,66	927,6142857	1000	2	1,3
ТП 3	1105,94	789,9571429	1000	2	1,11
ТП 4	666,83	476,3071429	630	2	1,06
ТП 5	1292,98	923,5571429	1000	2	1,29
ТП 6	1376,44	983,1714286	1000	2	1,38
ТП 7	1689,85	1207,035714	1250	2	1,35

Таблица 13 - Параметры трансформаторов принятых к установке на цеховых ТП

Наименование цеховой ТП	Тип трансформатора	Паспортные данные по каталогу производителя						
		Номинальная мощность, кВА	Класс обмотки высокого напряжения, кВ	Класс обмотки низкого напряжения, кВ	Ток холостого хода, %	Напряжение короткого замыкания, %	Потери холостого хода, Вт	Потери короткого замыкания, Вт
ТП 1	ТМГ	1600	6	0,4	0,5	6,0	1950	16000
ТП 2	ТМГ	1000	6	0,4	0,6	5,5	1400	10600
ТП 3	ТМГ	1000	6	0,4	0,6	5,5	1400	10600
ТП 4	ТМГ	630	6	0,4	0,7	5,5	1000	7600
ТП 5	ТМГ	1000	6	0,4	0,6	5,5	1400	10600
ТП 6	ТМГ	1000	6	0,4	0,6	5,5	1400	10600
ТП 7	ТМГ	1250	6	0,4	0,5	6,0	1650	13500

Выводы по разделу.

Представлены результаты распределения цехов предприятия тяжелого машиностроения между цеховыми трансформаторными подстанциями. Для питания цехов принято разместить на предприятии тяжелого машиностроения семь цеховых трансформаторных подстанций с двухтрансформаторной компоновкой. Питание цехов заготовительного производства предприятия тяжелого машиностроения выполняется от ТП 3, ТП 4, ТП 5, ТП 6.

Выполнен расчет и выбор установок компенсации реактивной мощности. Все установки компенсации реактивной мощности выбраны на напряжение 0,4 кВ и устанавливаются на шинах низкого напряжения цеховых трансформаторных подстанций. К установке на цеховых ТП приняты:

- ТП 1: 4×АУКРМ-VE-0,4-400-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 579,7 \text{ A}$;
- ТП 2: 4×АУКРМ-VE-0,4-275-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 398,5 \text{ A}$;
- ТП 3: 4×АУКРМ-VE-0,4-300-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 434,8 \text{ A}$;
- ТП 4: 4×АУКРМ-VE-0,4-300-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 434,8 \text{ A}$;
- ТП 5: 2×АУКРМ-VE-0,4-450-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 652,2 \text{ A}$;
- ТП 6: 2×АУКРМ-VE-0,4-400-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 579,7 \text{ A}$;
- ТП 7: 2×АУКРМ-VE-0,4-500-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 724,6 \text{ A}$.

Для всех цеховых ТП предприятия тяжелого машиностроения выбраны трансформаторы марки ТМГ различных номинальных мощностей.

Для цеховых ТП, питающих заготовительное производство предприятия тяжелого машиностроения приняты:

ТП 3: 2×ТМГ-1000/6/0,4 кВ;

ТП 4: 2×ТМГ-630/6/0,4 кВ;

ТП 5: 2×ТМГ-1000/6/0,4 кВ;

ТП 6: 2×ТМГ-1000/6/0,4 кВ.

Все выбранные трансформаторы цеховых ТП проверены по максимально допустимому коэффициенту перегрузки, который соответствует режиму с одним трансформатором цеховой ТП, оставшимся в работе.

Для всех трансформаторов цеховых ТП определены паспортные характеристики:

- номинальная мощность, кВА;
- номинальные напряжения обмоток высокого и низкого напряжений, кВ;
- потери короткого замыкания и холостого хода, Вт;
- напряжение короткого замыкания и ток холостого хода, %.

4 Выбор оборудования подстанции глубокого ввода

Для питания проектируемой системы электроснабжения предприятия тяжелого машиностроения необходимо выполнить выбор оптимальной мощности силовых трансформаторов, устанавливаемых на подстанции глубокого ввода. Для выбора оптимальной мощности силовых трансформаторов необходимо учесть мощность всех цеховых ТП, а также характер режима работы предприятия. В первом разделе выпускной квалификационной работы определены суточные графики нагрузок предприятия тяжелого машиностроения. С учетом суточных графиков и полученных расчетных значений мощностей каждой из цеховых ТП необходимо построить годовые графики мощности предприятия тяжелого машиностроения, на основании которых выполнить выбор мощности силовых трансформаторов ПГВ. Кроме того, на подстанции глубокого ввода необходимо выбрать оборудование, предназначенное для распределения электрической мощности между потребителями и выполнить его проверку по результатам расчета токов короткого замыкания [11].

4.1 Построение годового графика нагрузок предприятия

В первом разделе ВКР определены типовые суточные графики предприятия тяжелого машиностроения по активной и реактивной мощностям (рисунки 2 и 3). Данные графики соответствуют зимнему режиму работы предприятия тяжелого машиностроения. Также в первом разделе выпускной квалификационной работы регионом размещения предприятия тяжелого машиностроения определена Свердловская область. Для Свердловской области число зимний период длится 230 дней, а летний период 135 дней.

Для построения суточных графиков нагрузок предприятия тяжелого машиностроения необходимо определить суммарные значения активной и реактивной мощностей всех цехов предприятия, а также высоковольтных

электроприемников. Используя данные таблиц 7 и 11 составим таблицу 14 в которой определим суммарные значения активной и реактивной мощностей по всему предприятию тяжелого машиностроения.

Таблица 14 - Определение суммарных нагрузок по предприятию тяжелого машиностроения

Наименование потребителя	Q , квар	P , кВт	S , кВА
Цеховая ТП 1	280,006	1841,4	1862,57
Цеховая ТП 2	-78	1301	1298,66
Цеховая ТП 3	24,12	1124	1105,94
Цеховая ТП 4	-13,01	678	666,83
Цеховая ТП 5	3,08	1319	1292,98
Цеховая ТП 6	-30,66	1398,8	1376,44
Цеховая ТП 7	-10	1800	1689,85
Литейный цех (6 кВ)	1278,75	1705	2131,25
Компрессорная (6 кВ)	1620	2160	2700
Насосная (6 кВ)	2025	2700	3375
Реактивная мощность по всему предприятию, квар	5099,286	-	-
Активная мощность по всему предприятию, кВт	16027,2		-
Полная мощность по всему предприятию, кВА			17499,52

Используя данные таблиц 3, 11 и 14 построим суточные графики активной и реактивной мощностей предприятия на рисунках 7 и 8 соответственно.

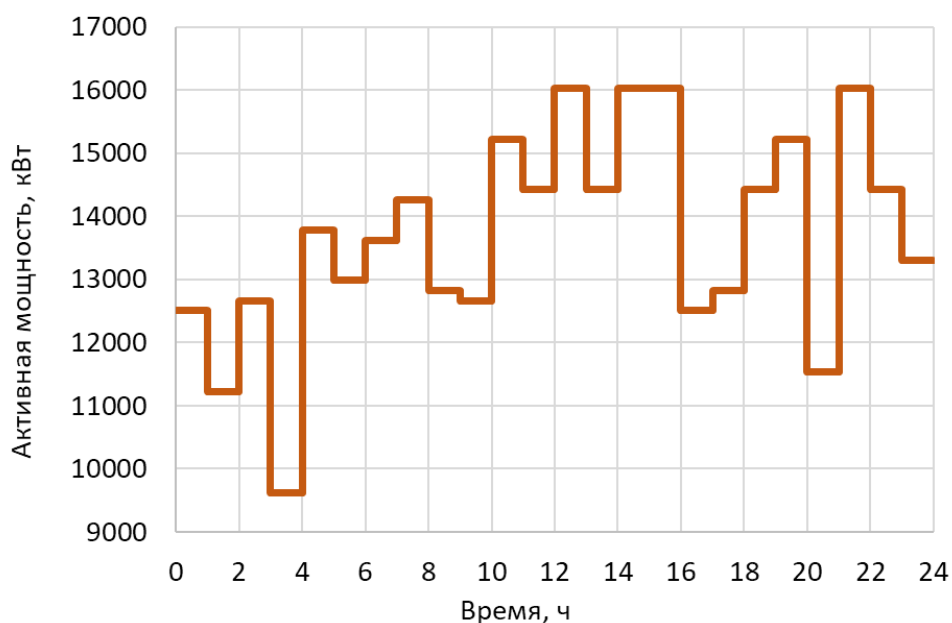


Рисунок 7 - Суточные график активной мощности предприятия тяжелого машиностроения

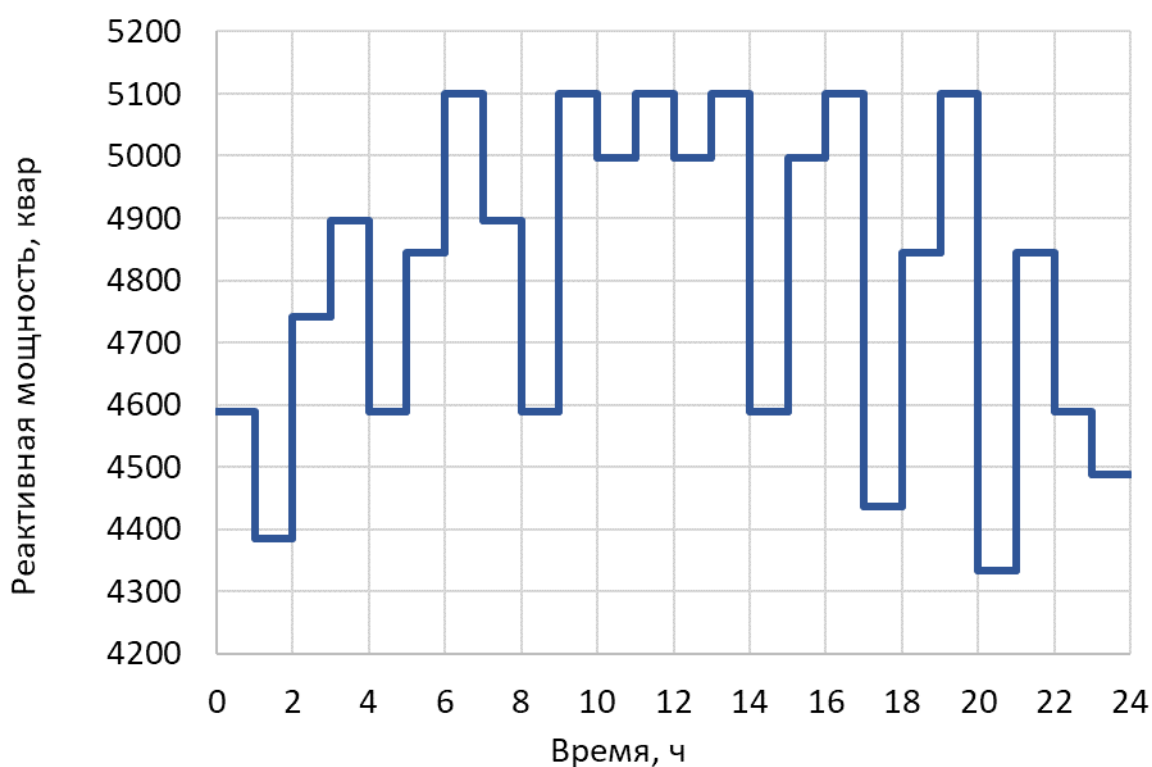


Рисунок 8 - Суточные график реактивной мощности предприятия тяжелого машиностроения

Данные суточных графиков нагрузки (рисунки 7, 8) представлены в таблице 15.

Таблица 15 - Данные типовых суточных графиков активной и реактивной мощности предприятия тяжелого машиностроения

Номер ступени суточного графика, i	Относительные значения, %		Именованные значения	
	Активная мощность, P_i	Реактивная мощность, Q_i	Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, квар
1	78	90	12501,22	4589,357
2	70	86	11219,04	4385,386
3	79	93	12661,49	4742,336
4	60	96	9616,32	4895,315
5	86	90	13783,39	4589,357
6	81	95	12982,03	4844,322
7	85	100	13623,12	5099,286
8	89	96	14264,21	4895,315
9	80	90	12821,76	4589,357
10	79	100	12661,49	5099,286
11	95	98	15225,84	4997,3
12	90	100	14424,48	5099,286
13	100	98	16027,2	4997,3

Продолжение таблицы 15

Номер ступени суточного графика, i	Относительные значения, %		Именованные значения	
	Активная мощность, P_i	Реактивная мощность, Q_i	Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, квар
14	90	100	14424,48	5099,286
15	100	90	16027,2	4589,357
16	100	98	16027,2	4997,3
17	78	100	12501,22	5099,286
18	80	87	12821,76	4436,379
19	90	95	14424,48	4844,322
20	95	100	15225,84	5099,286
21	72	85	11539,58	4334,393
22	100	95	16027,2	4844,322
23	90	90	14424,48	4589,357
24	83	88	13302,58	4487,372

По данным суточных графиков нагрузки предприятия тяжелого машиностроения для зимнего периода, определим значение активных и реактивных мощностей в летний период с учетом снижения нагрузки в летний период на 25% от зимней нагрузки (максимальной). Используя принятое допущения построим годовые упорядоченные графики реактивной (рисунок 9), активной (рисунок 10) и полной (рисунок 11) мощностей предприятия тяжелого машиностроения. Используя график упорядоченный годовой график активной мощности предприятия тяжелого машиностроения определим значение потребляемой энергии по выражению:

$$W_{\text{год,расч.}} = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i \quad (18)$$

где n – число ступеней годового графика активной мощности, шт.;

W_i – потребление электрической энергии i -й ступени годового упорядоченного графика активной мощности, $\frac{\text{кВт}}{\text{ч}}$;

P_i – активная мощность i -й ступени годового упорядоченного графика активной мощности, кВт;

t_i – длительность i -й ступени годового упорядоченного графика активной мощности, ч.

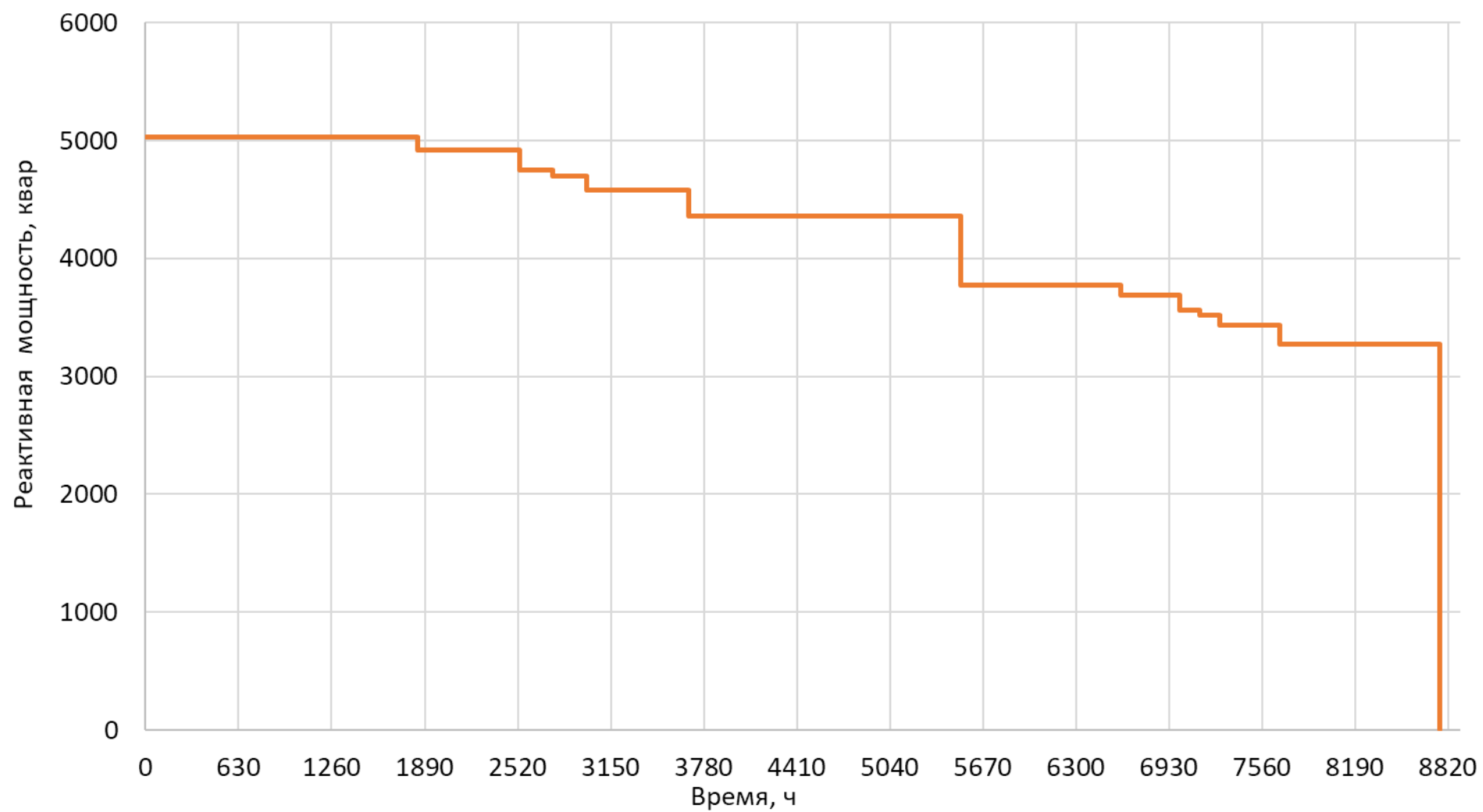


Рисунок 9 – Упорядоченный годовой график реактивной мощности предприятия тяжелого машиностроения

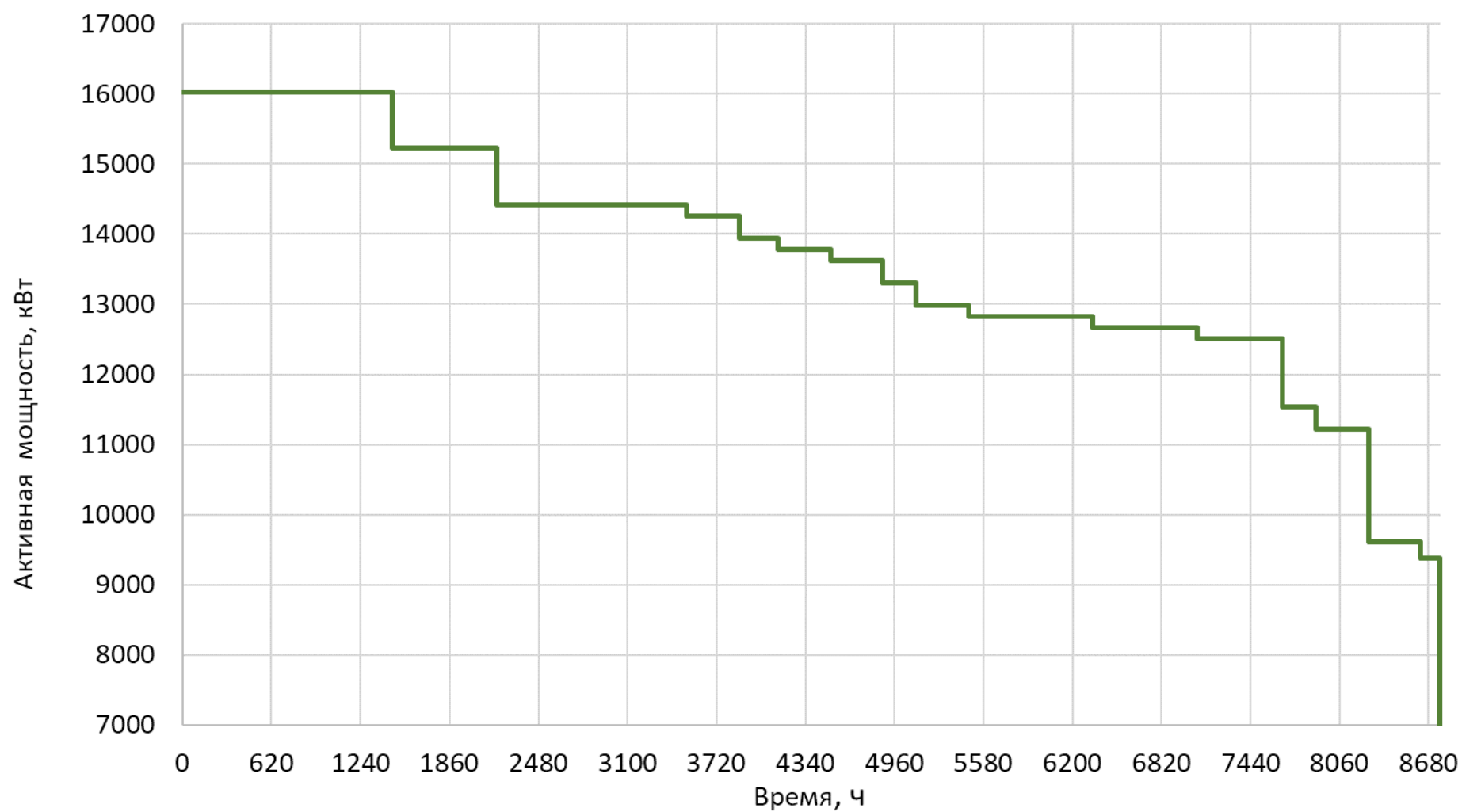


Рисунок 10 – Упорядоченный годовой график активной мощности предприятия тяжелого машиностроения

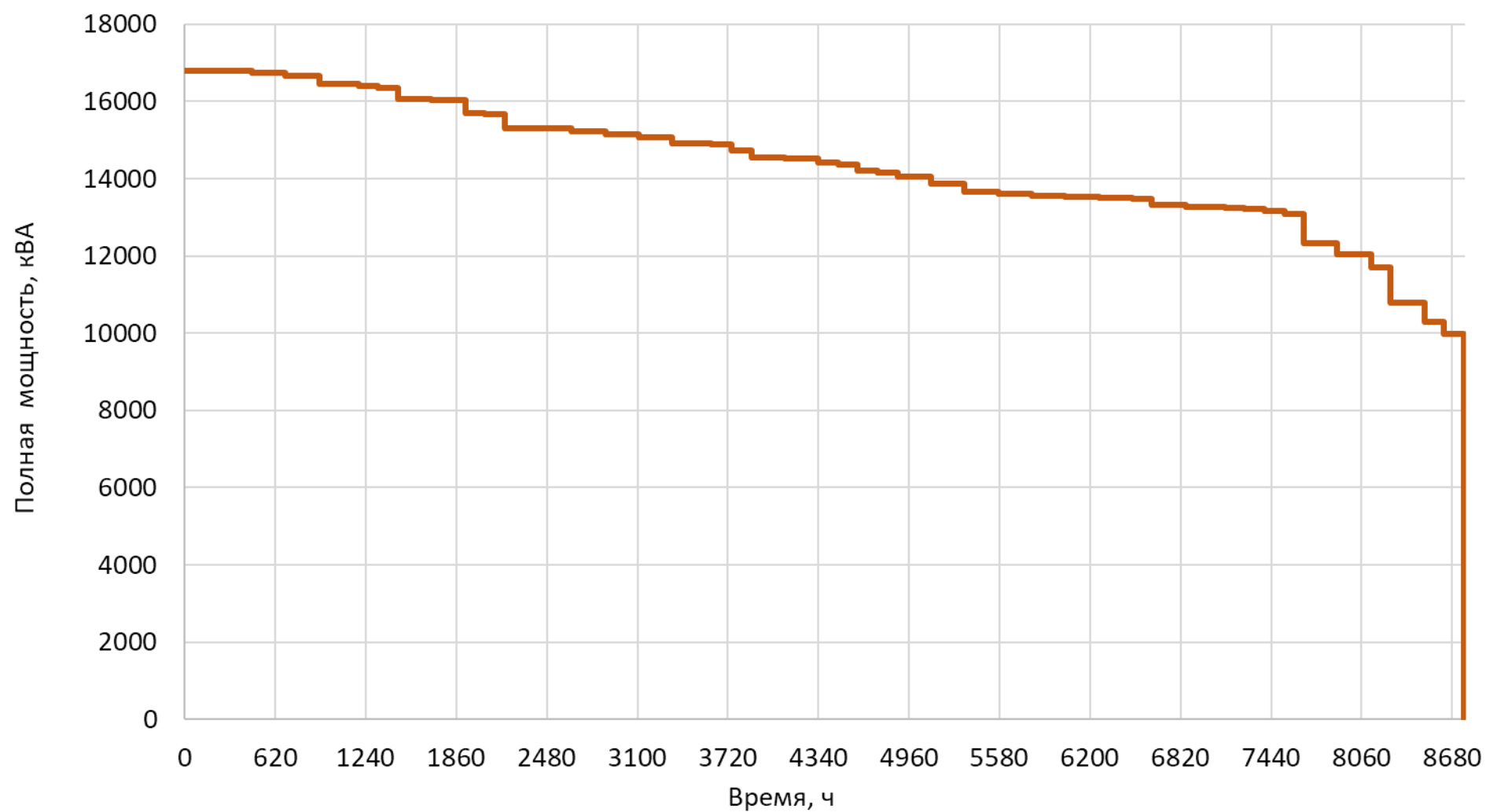


Рисунок 11 – Упорядоченный годовой график полной мощности предприятия тяжелого машиностроения

По годовому упорядоченному графику активной мощности (рисунок 10) составим таблицу 16 для определения суммарного годового потребления электрической энергии предприятием тяжелого машиностроения по выражению (18).

Таблица 16 - Расчет годового потребления электрической энергии предприятием тяжелого машиностроения

P_i , кВт	t_i , ч	$W_i, \frac{\text{кВт}}{\text{ч}}$
16027,2	1460	23399712
15225,84	730	11114863,2
14424,48	1325	19112436
14264,21	365	5206435,92
13943,66	270	3764789,28
13783,39	365	5030938,08
13623,12	365	4972438,8
13302,58	230	3059592,48
12982,03	365	4738441,68
12821,76	865	11090822,4
12661,49	730	9242886,24
12501,22	595	7438223,52
11539,58	230	2654104,32
11219,04	365	4094949,6
9616,32	365	3509956,8
9375,912	135	1265748,12
$W_{\text{год.расч.}}, \frac{\text{кВт}}{\text{ч}}$		119696338,4

По результатам расчета (таблица 16) получим, что расчетное значение годового потребления электрической энергии предприятием тяжелого машиностроения составляет $W_{\text{год.расч.}} = 119696338,4 \left(\frac{\text{кВт}}{\text{ч}} \right)$.

Годовой упорядоченный график полной мощности используем для выбора мощности силовых трансформаторов подстанции глубокого ввода предприятия тяжелого машиностроения.

4.2 Выбор и проверка трансформаторов подстанции глубокого ввода

Для выбора оптимальной мощности силовых трансформаторов подстанции глубокого ввода предприятия тяжелого машиностроения для

графика, представленного на рисунке 11 составим таблицу 17, в которую занесем значения продолжительности и мощности каждой ступени.

Таблица 17 - Данные годового упорядоченного графика полной мощности предприятия тяжелого машиностроения

Номер ступени i	S_i , кВА	t_i , ч
1	16671,33	920
2	16459,6	270
3	16392,64	135
4	16353,56	135
5	16024,96	460
6	15680,35	270
7	15299,29	460
8	15216,21	230
9	15136,97	230
10	15080,84	230
11	14922,87	270
12	14875,01	135
13	14729,14	135
14	14546,21	230
15	14527,36	230
16	14409,24	135
17	14362,22	135
18	14206,67	135
19	14149,77	135
20	14039,05	230
21	13856,43	230
22	13649,76	230
23	13618,36	230
24	13567,57	230
25	13520,47	230
26	13501,23	230
27	13480,86	135
28	13317,0	230
29	13275,73	135
30	13256,1	135
31	13246,45	135
32	13226,48	135
33	13151,57	135
34	13073,14	135
35	12326,76	230
36	12045,68	230
37	11691,22	135
38	10790,63	230
39	10293,37	135
40	9987,753	135

Для выбора силового трансформатора подстанции глубокого ввода используем значение первой степени ($i = 1$) годового упорядоченного графика полной мощности (рисунок 11). Согласно данным таблицы 17 первой ступени соответствует значение полной мощности $S_1 = 16671,33$ (кВА).

Воспользуемся выражением (14) и определим расчетное значение мощности силового трансформатора:

$$S_{\text{транс.расч.ПГВ}} = \frac{S_1}{K_{\text{ДАП}} \cdot (n_{\text{транс.}} - 1)} = \frac{16671,33}{1,4 \cdot (2 - 1)} = 11908,09 \text{ (кВА)}$$

Значению $S_{\text{транс.расч.ПГВ}} = 11908,09$ (кВА) по условию (15) соответствует стандартное значение мощности силового трансформатора $S_{\text{транс.ном.ПГВ}} = 16000$ (кВА) [5]. По каталогам производителей принимаем к установке на подстанции глубокого ввода два силовых трансформатора типа ТДН-16000/110/6 [14]. Паспортные данные трансформатора ТДН-16000/110/6 представим в таблице 18.

Таблица 18 – Паспортные (гарантированные) характеристики трансформатора ТДН 16000/110/6

Наименование параметра	Обозначение параметра	Единица измерения параметра	Значение параметра
Номинальная мощность	$S_{\text{транс.ном.}}$	кВА	16000
Номинальное напряжение обмотки высокого напряжения	$U_{\text{ВН.ном}}$	кВ	115
Номинальное напряжение обмотки высокого напряжения	$U_{\text{НН.ном}}$	кВ	11
Потери короткого замыкания	$P_{\text{КЗ.ном}}$	кВт	85
Потери холостого хода	$P_{\text{0.ном}}$	кВт	14
Напряжение короткого замыкания	$u_{\text{КЗ.}\%}$	%	10,5
Ток холостого хода	$i_{\text{0.}\%}$	%	0,55
Схема соединения обмотки высокого напряжения	-	-	Ун
Схема соединения обмотки низкого напряжения	-	-	Д
Группа соединения обмоток	-	-	11
Наличие регулировки напряжения под нагрузкой	-	-	Да

Определим коэффициент загрузки выбранного трансформатора типа ТДН 16000/110/6 по выражению:

$$K_{3,\text{расч.ПГВ}} = \frac{S_1}{n_{\text{транс.}} \cdot S_{\text{транс.ном.}}} = \frac{11908,09}{2 \cdot 16000} = 0,37$$

Полученное значение $K_{3,\text{расч.ПГВ}} = 0,37$ не превышает нормируемое значение $K_{ДЗ} = 0,7$.

Загрузка силового трансформатора ТДН 16000/110/6 в режиме «N – 1», т.е. при отключении одного из трансформаторов составит:

$$K_{3,N-1,\text{ПГВ}} = \frac{S_1}{S_{\text{транс.ном.}}} = \frac{11908,09}{16000} = 0,74$$

Значение $K_{3,N-1,\text{ПГВ}} = 0,74$ не превышает нормируемое значение допустимой аварийной перегрузки $K_{ДАП} = 1,4$.

Исходя из расчетов, к установке на подстанции глубокого ввода принимается два силовых трансформатора типа ТДН-16000/110/6 кВ.

Выводы по разделу.

Построены суточные графики нагрузки предприятия тяжелого машиностроения, на основании которых определены годовые упорядоченные графики полной, активной и реактивной мощностей предприятия. По годовому упорядоченному графику активной мощности получено, что величина годового потребления электрической энергии составит $W_{\text{год.расч.}} = 119696338,4 \left(\frac{\text{кВт}}{\text{ч}} \right)$. По годовому графику полной мощности получено, что наибольшая мощность, соответствующая первой степени годового упорядоченного графика, составляет $S_1 = 16671,33$ (кВА). По данному значению к установке на подстанции глубокого ввода принято два силовых трансформатора типа ТДН-16000/110/6.

5 Выбор типа и сечения кабелей распределительной сети 6 кВ

Для питания цеховых ТП, а также высоковольтных электроприемников для системы электроснабжения необходимо выбрать кабельные линии, а также определить топологию сети.

Для проектируемой системы электроснабжения принята смешенная схема распределительной сети. Высоковольтные электроприемники цехов №4 и №8, которые расположены в непосредственной близости от подстанции глубокого ввода, принято запитать по двум кабельным линиям с разных секций шин.

Все остальные потребители – цеховые ТП и РП 1 будут запитаны по кольцевой схеме. Всего для системы электроснабжения принято два кольца, в которых размещены по 4 потребителя.

Первое кольцо включает в себя следующих потребителей:

- цеховая ТП 6;
- распределительный пункт РП 1;
- цеховая ТП 7;
- цеховая ТП 5.

Второе кольцо включает в себя следующих потребителей:

- цеховая ТП 2;
- цеховая ТП 1;
- цеховая ТП 3;
- цеховая ТП 4.

Для выбора типа и сечения кабельной линии необходимо определить перетоки мощности в каждом из колец проектируемой системы электроснабжения предприятия тяжелого машиностроения.

Расчет перетоков мощности в каждом из колец проектируемой распределительной сети предприятия тяжелого машиностроения воспользуемся методикой расчета перетоков по правилу моментов. Переток в первой линии от ПГВ до потребителя определим, используя выражение:

$$S_{\text{ПГВ}-j} = \frac{S_1(L_2 + L_3 + L_4) + S_2(L_3 + L_4) + S_3 \cdot L_4}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4} \quad (19)$$

где S_1, S_2, S_3 – полная мощность первого, второго и третьего потребителей в кольце, кВА;

L_1, L_2, L_3, L_4 – длины линий до всех потребителей кольца, м.

После определения мощности в первой линии перетоки во всех остальных линиях определяются по выражению:

$$S_{j-m} = S_{i-j} - S_j \quad (20)$$

где S_{i-j} – полная мощность, протекающая в линии от i -го до j -го потребителей, кВА;

S_j – полная мощность j -го потребителей, кВА.

Используя методику (19), (20) выполним расчет для принятых топологий сети, результаты расчета представим на рисунке 12, где в числителе показана полная мощность протекающая по линии, а в знаменателе указана длина линии.

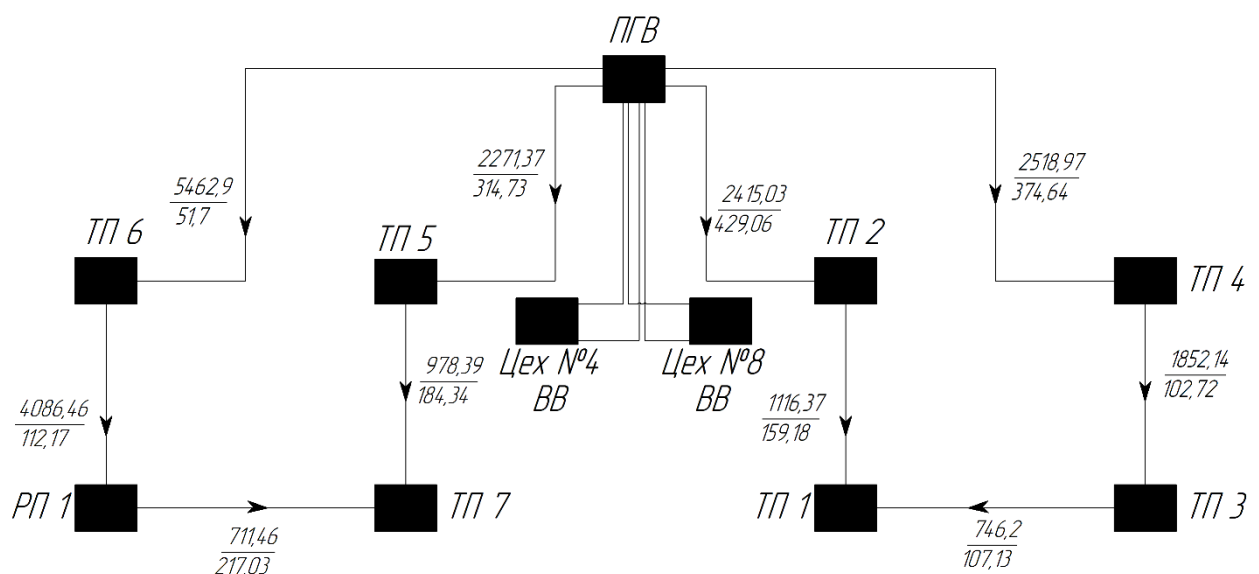


Рисунок 12 - Результаты расчета перетоков мощности в кольцевых частях сети

После определения переток мощности в распределительной сети необходимо выполнить расчет требуемого сечения линии. Для расчета сечения линии воспользуемся выражением:

$$F_{\text{расч.}i-j} = \frac{S_{i-j}}{\sqrt{3} \cdot j_{\text{эк.эф}} \cdot U_{\text{ном.сети}}} \quad (21)$$

где S_{i-j} – полная мощность, протекающая в линии от i -го до j -го потребителя, кВА;

$j_{\text{эк.эф}}$ – экономическая плотность тока $\frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$;

$U_{\text{ном.сети}}$ – номинальное напряжение распределительной сети предприятия тяжелого машиностроения. Принято для распределительной сети $U_{\text{ном.сети}} = 6$, кВ.

По величине расчетного сечения необходимо выбрать кабели, соответствующие расчетному значению и условию:

$$F_{\text{расч.}i-j} < F_{\text{ном}} \quad (22)$$

где $F_{\text{ном}}$ – каталожное сечение кабельной линии, мм^2 .

Для распределительной сети предприятия примем использовать кабели с медной токоведущей жилой и изоляцией из сшитого полиэтилена.

Для определения экономически эффективной плотности тока необходимо определить число часов использования максимума нагрузки. Число часов максимума нагрузки определим по всему предприятию используя годовые упорядоченные графики мощности из четвертого раздела выпускной квалификационной работы (рисунки 9, 10 и 11), а также результаты расчета годового потребления электрической энергии предприятием тяжелого машиностроения (таблица 16) и значение максимальной активной мощности.

Расчет числа часов использования максимума нагрузок выполним по выражению:

$$T_{\text{макс.}} = \frac{W_{\text{год.расч.}}}{P_1} = \frac{119696338,4}{16027,2} = 746,8 \text{ (ч)}$$

где P_1 – активная мощность, соответствующая первой ступени годового упорядоченного графика активной мощности, кВт.

Расчетному значению $T_{\text{макс.}} = 746,8 \text{ (ч)}$ соответствует экономическая плотность тока для медных проводников $j_{\text{эк.эф}} = 3,0 \left(\frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \right)$.

Выполним расчет сечения для линии ПГВ – ТП 6 по выражению (21) и данным представленным на рисунке 12:

$$F_{\text{расч.ПГВ-ТП 6}} = \frac{S_{\text{ПГВ-ТП 6}}}{\sqrt{3} \cdot j_{\text{эк.эф}} \cdot U_{\text{ном.сети}}} = \frac{5462,9}{\sqrt{3} \cdot 3,0 \cdot 6,0} = 175,22 \text{ (мм}^3\text{)}$$

Расчетному сечению $F_{\text{расч.ПГВ-ТП 6}} = 175,22 \text{ (мм}^3\text{)}$ соответствует каталожное стандартное значение $F_{\text{ном}} = 185 \text{ (мм}^3\text{)}$. Для выбранного сечения выполняется условие (22):

$$F_{\text{расч.ПГВ-ТП 6}} = 175,22 < F_{\text{ном}} = 185$$

Для всех остальных линий расчет выполняется аналогично линии от ПГВ до ТП 6. Результаты расчета и выбора номинального сечения и марки кабелей сведем в таблицу 19. Для всех кабельных линий примем кабели типа ПвКП с медными токоведущими жилами, с изоляцией из сшитого полиэтилена, с проволочной стальной броней с наружной оболочкой из полиэтилена. Данный тип кабелей применяется для прокладки в земляных траншеях, по кабельным трассам, имеющим сложную конфигурацию, а также проложенных в пучинистых и просадочных грунтах.

Таблица 19 - Результаты выбора кабельных линий

Наименование линии		Длина, м	Полная мощность в линии, кВА	Расчетное сечение, мм ²	Номинальное сечение, мм ²	Марка кабеля
Начало	Конец					
ПГВ	Цех№4(1)	10,92	1065,625	34,18	50	ПвКП- 3×50/25
ПГВ	Цех№4(2)	9,87	1065,625	34,18	50	ПвКП- 3×50/25
ПГВ	Цех№8(1)	49,6	1350	43,3	50	ПвКП- 3×50/25
ПГВ	Цех№8(1)	51,97	1350	43,3	50	ПвКП- 3×50/25
ПГВ	ТП 6	51,701	5462,9	175,22	185	ПвКП- 3×185/25
ТП6	РП 1	112,1692	4086,46	131,07	150	ПвКП- 3×150/25
РП 1	ТП 7	217,035	711,46	22,82	50	ПвКП- 3×50/25
ТП 7	ТП 5	184,34	978,39	31,38	50	ПвКП- 3×50/25
ТП 5	ПГВ	314,73	2271,37	72,85	95	ПвКП- 3×95/25
ПГВ	ТП 2	429,065	2415,03	77,46	95	ПвКП- 3×95/25
ТП 2	ТП 1	159,1785	1116,37	35,81	50	ПвКП- 3×50/25
ТП 1	ТП 3	107,133	746,2	23,93	50	ПвКП- 3×50/25
ТП 3	ТП 4	102,7195	1852,14	59,41	70	ПвКП- 3×70/25
ТП 4	ПГВ	374,6405	2518,97	80,8	95	ПвКП- 3×95/25

Выбранные кабельные линии необходимо проверить по падению напряжения. Падение напряжения в линии определяется выражением:

$$\Delta U_{i-k} = \frac{(P_{i-k} \cdot r_{0.i-k} + Q_{i-k} \cdot x_{0.i-k}) \cdot L_{i-k}}{U_{ном}} \quad (23)$$

где P_{i-k} – активная мощность в линии от пункта i до пункта k , кВт;

$r_{0.i-k}$ – удельное активное сопротивление линии от пункта i до пункта k , $\frac{\text{Ом}}{\text{км}}$;

Q_{i-k} – реактивная мощность в линии от пункта i до пункта k , квар;

$x_{0,i-k}$ – индуктивное сопротивление кабельной линии от пункта i до пункта k , $\frac{\text{Ом}}{\text{км}}$;

L_{i-k} – длина кабельной линии от пункта i до пункта k , км.

Для выбранных в таблице 19 кабельных линий определим активное и индуктивное удельные сопротивления по каталогам производителей [16], результаты занесем в таблицу 20.

Таблица 20 - Параметры выбранных кабельных линий

Наименование линии		Марка кабеля	Параметры кабельной линии	
Начало	Конец		$r_0, \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$	$x_0, \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$
ПГВ	Цех№4(1)	ПвКП-3×50/25	0,127	0,268
ПГВ	Цех№4(2)	ПвКП-3×50/25	0,127	0,268
ПГВ	Цех№8(1)	ПвКП-3×50/25	0,127	0,268
ПГВ	Цех№8(1)	ПвКП-3×50/25	0,127	0,268
ПГВ	ТП 6	ПвКП-3×185/25	0,099	0,0991
ТП6	РП 1	ПвКП-3×150/25	0,103	0,124
РП 1	ТП 7	ПвКП-3×50/25	0,127	0,268
ТП 7	ТП 5	ПвКП-3×50/25	0,127	0,268
ТП 5	ПГВ	ПвКП-3×95/25	0,112	0,193
ПГВ	ТП 2	ПвКП-3×95/25	0,112	0,193
ТП 2	ТП 1	ПвКП-3×50/25	0,127	0,268
ТП 1	ТП 3	ПвКП-3×50/25	0,127	0,268
ТП 3	ТП 4	ПвКП-3×70/25	0,119	0,268
ТП 4	ПГВ	ПвКП-3×95/25	0,112	0,193

Выполним расчет по выражению (23) и по данным таблицы 20 выполним расчет падения напряжения для линии ПГВ – ТП 6:

$$\Delta U_{\text{ПГВ-ТП 6}} = \frac{(P_{\text{ПГВ-ТП 6}} \cdot r_{0,\text{ПГВ-ТП 6}} + Q_{\text{ПГВ-ТП 6}} \cdot x_{0,\text{ПГВ-ТП 6}}) \cdot L_{\text{ПГВ-ТП 6}}}{U_{\text{ном}}},$$

$$\Delta U_{\text{ПГВ-ТП 6}} = \frac{(5175,647 \cdot 0,0991 + 1748,13 \cdot 0,099) \cdot 51,701 \cdot 10^{-3}}{6000}$$

$$\Delta U_{\text{ПГВ-ТП 6}} = 0,01 \text{ (В)}$$

Относительное отклонение напряжения в линии определяется выражением:

$$\Delta U_{i-j.\%} = 100 - \left(1 - \frac{\Delta U_{i-j}}{U_{\text{ном}}}\right) \cdot 100, \quad (24)$$

Для линии от ПГВ до ТП 6 по (24) получим:

$$\Delta U_{\text{ПГВ-ТП 6.\%}} = 100 - \left(1 - \frac{\Delta U_{\text{ПГВ-ТП 6}}}{U_{\text{ном}}}\right) \cdot 100,$$

$$\Delta U_{\text{ПГВ-ТП 6.\%}} = 100 - \left(1 - \frac{0,01}{6000}\right) \cdot 100 = 0,0 (\%)$$

Для всех остальных линий распределительной сети предприятия тяжелого машиностроения расчеты выполним аналогично расчетам для линии от ПГВ до ТП 6, результаты расчетов сведем в таблицу 21.

Таблица 21 - Расчет падений напряжения в линиях

Наименование линии		$\Delta U_{i-j}, \text{ В}$	$\Delta U_{i-j.\%}, \%$
Начало	Конец		
ПГВ	Цех №4(1)	0	0
ПГВ	Цех №4(2)	0	0
ПГВ	Цех №8(1)	0	0
ПГВ	Цех №8(1)	0	0
ПГВ	ТП 6	0,01	0
ТП 6	РП 1	0,01	0
РП 1	ТП 7	0,01	0
ТП 7	ТП 5	0,01	0
ТП 5	ПГВ	0,03	0
ПГВ	ТП 2	0,04	0
ТП 2	ТП 1	0,01	0
ТП 1	ТП 3	0	0
ТП 3	ТП 4	0,01	0
ТП 4	ПГВ	0,03	0

По результатам расчета получено, что все выбранные сечения кабельных линий проходят по величине падений напряжения и могут быть использованы в распределительной сети предприятия тяжелого машиностроения.

Выводы по разделу.

Для проектируемой системы электроснабжения принята смешенная схема распределительной сети. Высоковольтные электроприемники цехов №4 и №8, которые расположены в непосредственной близости от подстанции глубокого ввода, принято запитать по двум кабельным линиям с разных секций шин. Все остальные потребители получают питание по кольцевой схеме. В первое кольцо входят потребители: цеховая ТП 6, распределительный пункт РП 1, цеховая ТП 7 и цеховая ТП 5. Во второе кольцо входят потребители: цеховая ТП 2, цеховая ТП 1, цеховая ТП 3 и цеховая ТП 4. Для всех кабельных линий приняты кабели типа ПвКП с медными токоведущими жилами, с изоляцией из сшитого полиэтилена, с проволочной стальной броней с наружной оболочкой из полиэтилена. Данный тип кабелей применяется для прокладки в земляных траншеях, по кабельным трассам, имеющим сложную конфигурацию, а также проложенных в пучинистых и просадочных грунтах.

По результатам расчета падений напряжения в линиях все выбранные кабели могут быть использованы в распределительной сети. Все падения напряжений находятся на уровне 0%.

Заключение

Определен состав и расположение цехов и корпусов предприятия тяжелого машиностроения. Общая площадь территории, занимаемой предприятием тяжелого машиностроения, составляет $S_{\text{ПТМ}} = 137,5 \cdot 10^3 \text{ (м}^2\text{)}$. Также по генеральному плану определена площадь каждого цеха и корпуса предприятия тяжелого машиностроения.

Проведенный анализ состава цехов и корпусов предприятия тяжелого машиностроения позволил установить, что к заготовительному производству относятся четыре цеха: сварочный цех (Цех №3), литейный цех (Цех №4), кузнечный цех (Цех №5) и цех деревообработки (Цех №7).

На предприятии тяжелого машиностроения в литейном цехе (Цех №4), насосной (Цех №11), а также в компрессорной (Цех №8) установлены высоковольтные электроприемники напряжением 6 кВ: электротермические установки – печи (литейный цех), асинхронные электродвигатели приводов компрессоров (компрессорная) и насосов (насосная). Учитывая наличие потребителей 6 кВ принято решение внутризаводскую распределительную сеть выполнить на классе напряжения 6 кВ.

Для всех цехов и корпусов предприятия тяжелого машиностроения определены исходные данные необходимы для расчета электрических нагрузок и выбора оборудования проектируемой системы электроснабжения: площадь цеха ($S_{\text{цеха}}$), коэффициент спроса каждого цеха (K_c), коэффициент активной мощности каждого цеха ($\cos \varphi$) и установленная мощность каждого цеха ($P_{\text{уст.}}$).

Представлен расчет электрических нагрузок предприятия тяжелого машиностроения, по результатам которого построена картограмма нагрузок и определен расчетный центр электрических нагрузок с координатами (199,71;125,74). Расчетный центр электрических нагрузок является оптимальным местом для размещения главной понизительной подстанции предприятия тяжелого машиностроения. Однако, расчетная точка центра

электрических нагрузок попадает на проезжую часть в районе цехов №1 и №4, поэтому размещение главной понизительной подстанции в данной точке невозможно. Размещение главной понизительной подстанции необходимо скорректировать на дальнейших этапах проектирования системы электроснабжения предприятия тяжелого машиностроения.

По результатам расчета электрических нагрузок на стороне 0,4 кВ с учетом нагрузок внутренней системы освещения получено, что суммарная активная мощность потребителей 0,4 кВ предприятия тяжелого машиностроения составляет 9,192,97 кВт, реактивная мощность 8561,87 квар, а полная мощность составляет 12618,84 кВА.

Также получены значения расчетной активной, реактивной и полной мощностей высоковольтных потребителей электрической энергии, расположенных в цехах №4, №8 и №11. Суммарная мощность высоковольтных потребителей составила: активная мощность 6565 кВт, реактивная мощность 4923 квар и полная мощность 8206,25 квар.

Представлены результаты распределения цехов предприятия тяжелого машиностроения между цеховыми трансформаторными подстанциями. Для питания цехов принято разместить на предприятии тяжелого машиностроения семь цеховых трансформаторных подстанций с двухтрансформаторной компоновкой. Питание цехов заготовительного производства предприятия тяжелого машиностроения выполняется от ТП 3, ТП 4, ТП 5, ТП 6.

Выполнен расчет и выбор установок компенсации реактивной мощности. Все установки компенсации реактивной мощности выбраны на напряжение 0,4 кВ и устанавливаются на шинах низкого напряжения цеховых трансформаторных подстанций. К установке на цеховых ТП приняты:

- ТП 1: 4×АУКРМ-VE-0,4-400-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 579,7 \text{ А};$
- ТП 2: 4×АУКРМ-VE-0,4-275-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 398,5 \text{ А};$

- ТП 3: 4×АУКРМ-VE-0,4-300-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 434,8 \text{ A}$;
- ТП 4: 4×АУКРМ-VE-0,4-300-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 434,8 \text{ A}$;
- ТП 5: 2×АУКРМ-VE-0,4-450-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 652,2 \text{ A}$;
- ТП 6: 2×АУКРМ-VE-0,4-400-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 579,7 \text{ A}$;
- ТП 7: 2×АУКРМ-VE-0,4-500-50У3 IP31 с номинальным током $I_{\text{ном.УКРМ}} = 724,6 \text{ A}$.

Для всех цеховых ТП предприятия тяжелого машиностроения выбраны трансформаторы марки ТМГ различных номинальных мощностей.

Для цеховых ТП, питающих заготовительное производство предприятия тяжелого машиностроения приняты:

- ТП 3: 2×ТМГ-1000/6/0,4 кВ;
- ТП 4: 2×ТМГ-630/6/0,4 кВ;
- ТП 5: 2×ТМГ-1000/6/0,4 кВ;
- ТП 6: 2×ТМГ-1000/6/0,4 кВ.

Все выбранные трансформаторы цеховых ТП проверены по максимально допустимому коэффициенту перегрузки, который соответствует режиму с одним трансформатором цеховой ТП, оставшимся в работе.

Построены суточные графики нагрузки предприятия тяжелого машиностроения, на основании которых определены годовые упорядоченные графики полной, активной и реактивной мощностей предприятия. По годовому упорядоченному графику активной мощности получено, что величина годового потребления электрической энергии составит $W_{\text{год.расч.}} = 119696338,4 \left(\frac{\text{кВт}}{\text{ч}} \right)$. По годовому графику полной мощности получено, что наибольшая мощность, соответствующая первой степени годового упорядоченного графика, составляет $S_1 = 16671,33 \text{ (кВА)}$. По данному

значению к установке на подстанции глубокого ввода принято два силовых трансформатора типа ТДН-16000/110/6.

Для проектируемой системы электроснабжения принята смещенная схема распределительной сети. Высоковольтные электроприемники цехов №4 и №8, которые расположены в непосредственной близости от подстанции глубокого ввода, принято запитать по двум кабельным линиям с разных секций шин. Все остальные потребители получают питание по кольцевой схеме. В первое кольцо входят потребители: цеховая ТП 6, распределительный пункт РП 1, цеховая ТП 7 и цеховая ТП 5. Во второе кольцо входят потребители: цеховая ТП 2, цеховая ТП 1, цеховая ТП 3 и цеховая ТП 4. Кабельные линии системы электроснабжения принято выполнить высоковольтными кабелями ПвКП с медными токоведущими жилами, с изоляцией из сшитого полиэтилена, с проволоочной стальной броней с наружной оболочкой из полиэтилена. Данный тип кабелей применяется для прокладки в земляных траншеях, по кабельным трассам, имеющим сложную конфигурацию, а также проложенных в пучинистых и просадочных грунтах.

По результатам расчета падений напряжения в линиях все выбранные кабели могут быть использованы в распределительной сети. Все падения напряжений находятся на уровне 0%.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы цель достигнута, все поставленные задачи выполнены.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Анчарова Т.В., Рашевская М.А., Стебунова Е.Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений. 3-е изд. М.: Форум, 2020. 415 с.
2. Белых Г.Б., Шеметов А.Н. Электроснабжение отраслей. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского гос.тех.ун-та им. Г.И. Носова, 2013.
3. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2016. 78 с.
4. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Системы электроснабжения. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2015. 46 с.
5. ГОСТ 9680-77. Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВА и более. Ряд номинальных мощностей. М.: Изд-во Стандартов, 1977. 4 с.
6. Грунин В.К., Ощепков В.А., Осипов Д.С. Основы электроснабжения городов. Омск: Издательство ОмГТУ, 2012. 141 с.
7. Кокин С.Е., Дмитриев С.А., Хальясмаа А.И. Схемы электрических соединений подстанций : учебное пособие. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2015. 100 с.
8. Конденсаторные установки АУКРМ-0,4 [Электронный ресурс] // Официальный сайт завода "Элком-Энерго" : [сайт]. [2024]. URL: https://elcom-energo.ru/catalog/kondensatornye-ustanovki-0-4-kv-krm-ukrm-aukrm-ukm58-aku-kku-i-drugie/reguliruemye-kondensatornye-ustanovki-aukrm-0-4/?PAGEN_1=5 (дата обращения: 11.04.2025).
9. Конюхова Е.А. Электроснабжение. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. 510 с.
10. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. 2-е изд. М.: Интернет Инжиниринг, 2006. 672 с.
11. Кушкин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.

12. Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Изд-во Высшая Школа, 1990. 366 с.
13. Обзор серии светодиодных светильников ООО «Световые Технологии» [Электронный ресурс] // Официальный сайт производителя светодиодных светильников ООО «Световые Технологии»: [сайт]. [2025]. URL: <https://www.ltcompany.com/series/fregat-led> (дата обращения: 01.05.2025).
14. ООО «Тольяттинский Трансформатор». Трансформаторы силовые серии ТМГ // Официальный сайт производителя трансформаторного оборудования ООО "Тольяттинский Трансформатор". 2014. URL: https://www.transformator.com.ru/upload/iblock/6e1/2014_Transformatory-silovye-serii-TMG.pdf (дата обращения: 05.04.2025).
15. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов. М.: Форум, 2020. 416 с.
16. Официальный сайт ООО «Камский Кабель» // Настольная книга проектировщика. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6-35 кВ. 2023. URL: https://www.kamkabel.ru/netcat_files/userfiles/6-35-www.pdf (дата обращения: 10.04.2025).
17. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. Москва: Издательство Проспект, 2020. 832 с.
18. Степкина Ю.В., Салтыков В.М. Проектирование электрической части понижительной подстанции. Тольятти: ТГУ, 2007. 124 с.
19. Файбисович Д.Л., Карапетян И.Г., Шапиро И.М. Справочник по проектированию электрических сетей. 4-е изд. М.: ЭНАС, 2012.
20. Федоров А.А., Вершинина С.И. Сборник заданий для курсового проектирования по основам электроснабжения промышленных предприятий. Учебное пособие. 2-е изд. Чебоксары: Изд-во Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, 1998.