

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 промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов

Обучающийся

И.Р. Корнилов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.п.н., доцент, М.Н. Третьякова

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

Консультант

к.филол.н., доцент, О.В. Мурдускина

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

Тольятти 2022

## Аннотация

Представлены результаты выполнения выпускной квалификационной работы направленной на разработку системы электроснабжения промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов.

Выполнен расчет нагрузок предприятия с учетом всех высоковольтных потребителей. Для распределительной, внутризаводской сети, выбрано напряжение класса 20 кВ, которое является перспективным с точки зрения снижения потерь, а также оптимизации расхода электрической энергии и оборудования при проектировании систем электроснабжения. Выбраны распределительные трансформаторы для цеховых трансформаторных подстанций. Для установки приняты распределительные трансформаторы марки ТМГ с классом напряжения обмоток 20/0,4 кВ. Выбраны кабели распределительной сети марки АСБГ. Выполнен расчет трехфазных токов короткого замыкания, на основании которого выполнен выбор коммутационных аппаратов, устанавливаемых на ТП. Для установки на ТП выбраны выключатели нагрузки марки KLF20/630-275.

Выполнен расчет подстанции глубокого ввода с выбором силовых трансформаторов марки ТДН 63000/110/20 кВ, коммутационной аппаратуры на стороне 20 кВ марки ВВУ-СЭЩ 20. Для питания трансформаторов ПГВ выбраны два кабеля из сшитого полиэтилена марки ПвПг 185/95. Выполнен расчет уставок релейной защиты отходящих от ПГВ кабельных линий. Спроектирована система молниезащиты ПГВ выполненная двумя молниеотводами СМ-25 высотой 25 м.

Пояснительная записка выполнена на 64 листах, включает 16 таблиц и 6 рисунков. Графическая часть выполнена на шести листах формата А1.

## **Abstract**

The results of the graduation work aimed at developing a power supply system for an industrial enterprise with a group of iron foundries are presented.

The calculation of the loads of the enterprise was carried out, taking into account all high-voltage consumers. For the distribution, intra-factory network, a voltage of 20 kV class was chosen, which is promising in terms of reducing losses, as well as optimizing the consumption of electrical energy and equipment when designing power supply systems. Distribution transformers for workshop transformer substations have been selected. Distribution transformers of the TMG brand with a winding voltage class of 20/0.4 kV were adopted for installation. Distribution network cables of the ASBG brand were selected. The calculation of three-phase short-circuit currents was performed, on the basis of which the choice of switching devices installed on the transformer substation was made. Load break switches of brand KLF20/630-275 were selected for installation at the transformer substation.

The calculation of a deep input substation with a choice of power transformers of the TDN 63000/110/20 kV brand, switching equipment on the 20 kV side of the VVU-SESH 20 brand was performed. Two cables made of cross-linked polyethylene of the PvPg 185/95 brand were selected to power the PGV transformers. The calculation of the relay protection settings for cable lines outgoing from the PGW is carried out. The PGV lightning protection system was designed, made with two SM-25 lightning rods 25 m high.

The explanatory note is made on 63 pages, includes 16 tables and 6 figures. The graphic part is made on six sheets of A1 format.

## Содержание

Введение.....	5
1 Анализ промышленного предприятия .....	7
1.1 Характеристика климатической зоны размещения промышленного предприятия .....	7
1.2 Характеристика внешнего электроснабжения промышленного предприятия .....	7
1.3 Описание состава промышленного предприятия .....	8
1.4 Описание производимой продукции .....	9
2 Система электроснабжения предприятия .....	12
2.1 Определение класса напряжения распределительной сети предприятия .....	12
2.2 Определение электрических нагрузок промышленного предприятия ..	15
2.3 Цеховые трансформаторные подстанции предприятия .....	18
2.4 Проектирование распределительной сети промышленного предприятия .....	21
2.5 Токи короткого замыкания в распределительной сети.....	24
2.6 Коммутационные аппараты цеховых ТП .....	29
3 Проектирование электрической части главной подстанции промышленного предприятия .....	34
3.1 Силовые трансформаторы .....	34
3.2 Выбор питающих кабелей для ПГВ напряжением 110 кВ .....	47
3.3 Выбор коммутационных аппаратов.....	50
3.4 Релейная защита .....	51
3.5 Система молниезащиты ПГВ.....	55
Заключение.....	59
Список используемых источников .....	62

## Введение

В условиях быстрого изменения спроса на различные товары, производимые на промышленных предприятиях, а также учитывая условия роста конкуренции необходимо совершенствовать старые и строить новые промышленные предприятия способные к быстрой смене номенклатуры производимой продукции, а также обеспечивающие высокие уровни энергетической эффективности в процессе производства, которая не может быть достигнута без обеспечения высокой энергетической эффективности системы электроснабжения предприятия.

Разработка проектов электроснабжения промышленных предприятий производящих продукцию для автомобилестроения, а также машиностроения и использование в проектах систем электроснабжения современные высокотехнологичные, высокоэффективные решения позволит обеспечить не только низкую себестоимость производимой продукции, но и открыть перед предприятием новые мировые рынки, так как в перспективе планируется оценка углеродного следа для каждого из видов производимой продукции, а предприятия с устаревшими технологиями не смогут участвовать на рынке.

При проектировании системы электроснабжения необходимо соблюдать требования по безопасности и надежности электроснабжения каждого производства с определением их категорий надежности на этапе разработки проекта. Исходя из вышеперечисленного определим цель выпускной квалификационной работы.

Целью выпускной квалификационной работы (ВКР) является разработка проекта электроснабжения предприятия промышленного предприятия с группой чугунно-литейных цехов.

Поставленная в рамках выполнения ВКР цель достигается за счет решения следующих задач:

- Анализ особенностей промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов для определения требований к проектируемой системе электроснабжения.
- Расчет требуемых параметров и выбор оборудования по каталогам производителей для проектируемой системы электроснабжения промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов.
- Проектирование главной подстанции промышленного предприятия с выбором компоновки и типа подстанции, а также с выбором оборудования.
- Достижение поставленной в рамках ВКР цели и задач выполняется за счет использования современных и действующих методик, а также современного высоковольтного электротехнического оборудования российского производства.

Для выполнения выпускной квалификационной работы использованы исходные данные для учебного проектирования. Использован план промышленного предприятия представленный в [2], а также перечень используемых электроприемников представленный также в [2].

## **1 Анализ промышленного предприятия**

Для проектирования системы электроснабжения промышленного предприятия необходимо учесть все особенности технологического процесса, представить перечень выпускаемой продукции, а также определить параметры климата характерные для места размещения промышленного предприятия. Также необходимо определить категории надежности электроснабжения для каждого цеха промышленного предприятия и для всего предприятия в целом.

### **1.1 Характеристика климатической зоны размещения промышленного предприятия**

Объект выпускной квалификационной работы – промышленное предприятие расположено в регионе Средняя Волга согласно исходным данным представленным в [2]. К региону Средняя Волга относится регион Среднее Поволжье, в котором преобладает умеренно-континентальный климат. Средняя температура июля:  $+25^{\circ}\text{C}$ , а января, наиболее холодного месяца:  $-15^{\circ}\text{C}$ . Данные климатические показатели предполагают использование оборудования, которое планируется к размещению на открытом воздухе с климатическим исполнением типа УХЛ1.

### **1.2 Характеристика внешнего электроснабжения промышленного предприятия**

Для питания проектируемой системы электроснабжения, согласно [2], используется узловая подстанция напряжением 220/110/10 кВ. Для питания предприятия с данной подстанции используется воздушные линии напряжением 110 кВ. Так как напряжение питания проектируемой системы электроснабжения определено, выбор рационального напряжения внешнего

электроснабжения выполняться в рамках ВКР не будет. Подстанция напряжением 220/110/10 кВ от которой выполняется питание промышленного предприятия расположена в 20 км – это расстояние будет использована при расчете токов короткого замыкания.

### 1.3 Описание состава промышленного предприятия

Промышленное предприятие для которого проектируется система электроснабжения в рамках выполнения ВКР включает в себя следующие цеха: Ремонтно-литейный цех (Цех №1); Агрегатный цех (Цех №2); Ремонтно-механический цех (Цех №3); Сварочно-сборочный цех (Цех №4); Прессовый цех (Цех №5); Электроремонтный цех (Цех №6) Чугунолитейный цех (Цех №7). К высоковольтным электроприемникам предприятия также относятся электропечи для плавки. В таблице 1 представлены установленные активные мощности ( $P_{уст}$ ) для каждого цеха предприятия и приведенное число электроприемников ( $n_g$ ). В таблице 2 представлены данные для высоковольтных электроприемников – электропечи для плавки. На рисунке 1 представлен генеральный план объекта ВКР – промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов, обозначение на генеральном плане выполнено согласно таблице 1.

Таблица 1 - Мощности высоковольтных приемников предприятия

Наименование цеха	$P_{уст}$ , кВт
Цех №1	4945
Цех №2	6900
Цех № 3	356
Цех № 4	2269
Цех № 5	9585
Цех № 6	925
Цех № 7	10240
Цех № 8	19500

Таблица 2 - Данные высоковольтных электроприемников

Наименование высоковольтного электроприемника	$P_{ном.ВВ}$ , кВт
Печь-1	4000
Печь-2	4000

#### 1.4 Описание производимой продукции

В состав промышленного предприятия входят несколько цехов задействованных непосредственно в производстве продукции. К этим, основным, цехам относятся:

- Сварочно-сборочный цех (Цех №4)
- Прессовый цех (Цех №5);
- Чугунолитейный цех (Цех №7).

К вспомогательным цехам промышленного предприятия относятся:

- Ремонтно-литейный цех (Цех №1);
- Агрегатный цех (Цех №2);
- Ремонтно-механический цех (Цех №3);
- Электроремонтный цех (Цех №6)

Всю продукцию, производимую предприятием, можно сгруппировать следующим образом:

- Продукция бытового и гражданского использования
- Продукция для отрасли машино- и автомобилестроения.

Продукция бытового и гражданского использования включает в себя следующую номенклатуру: чугунные люки и обечайки чугунных люков; дождеприемники; напольная чугунная плитка.

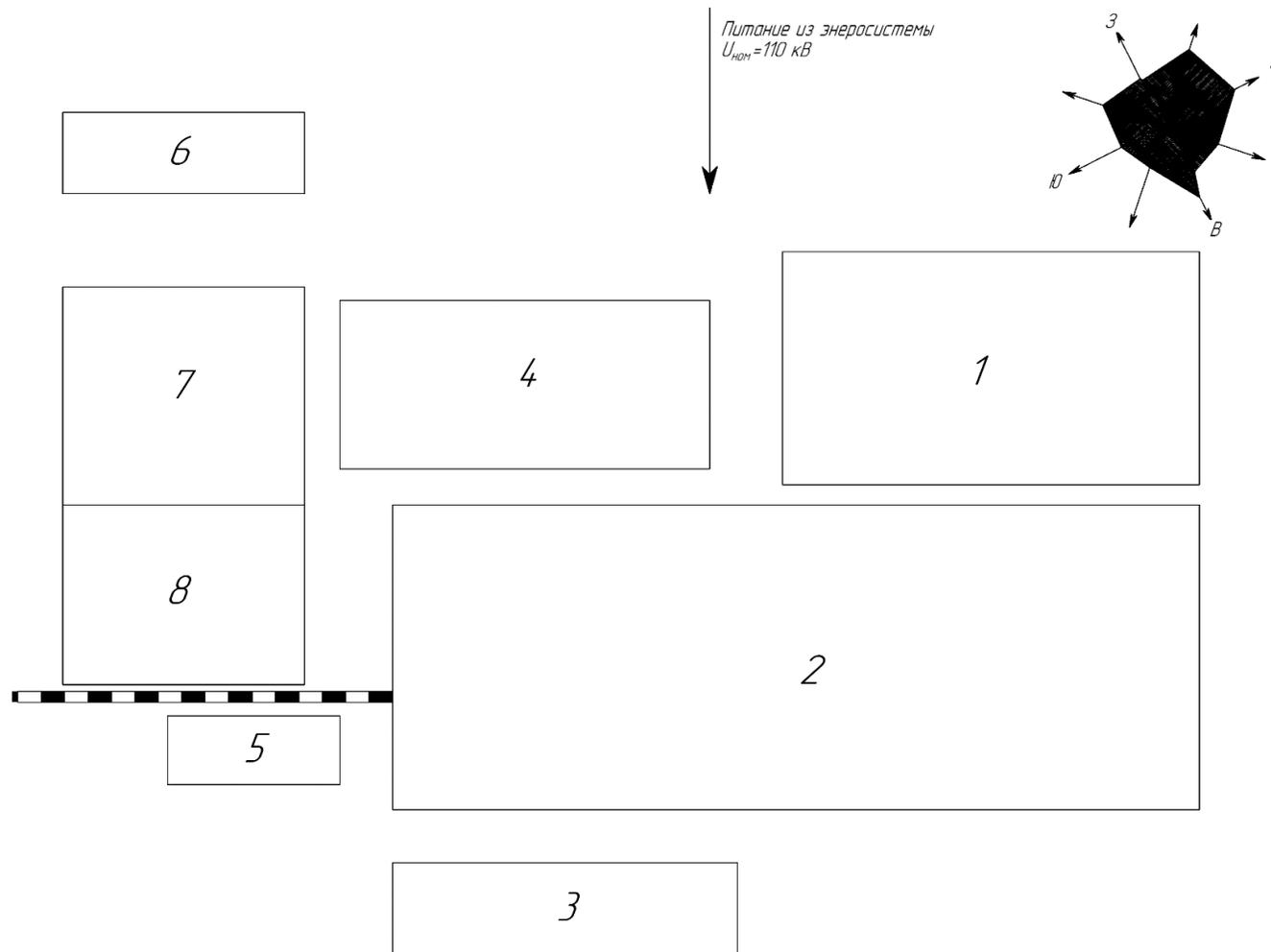


Рисунок 1 – Генеральный план

Продукция для отрасли машиностроения и автомобилестроения включает в себя следующую номенклатуру: поршневые кольца, прокладочные кольца, гильзы, прокатные валки для черновой клетки проволочного и редуцированных станков, рабочие валки полосовых станков, дробильное оборудование, комплектующие стеклоформирующих машин.

Продукция, производимая предприятием не ограничена указанным перечнем и может быть расширена по требованию заказчиков.

Выводы по разделу 1. Для объекта выпускной квалификационной работы представлено описание производимой продукции, а также определены цеха промышленного предприятия относящиеся к основным и вспомогательным. Представлен подробный генеральный план промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов.

Согласно исходных данных определена районная узловая подстанция с классом напряжения 220/110/10 кВ которая обладает достаточной мощностью для покрытия нужд промышленного предприятия в электрической мощности. Определено, то подстанция расположена на расстоянии 20 км от предприятия и на генеральном плане указано ближайшее место прихода питающей линии напряжением 110 кВ с подстанции к предприятию.

Для предприятия составлен перечень цехов и определены установленные мощности и эффективное число электроприемников для каждого цеха. Эти данные будут использованы при проектировании системы электроснабжения промышленного предприятия.

Представлена краткая характеристика климата региона, в котором планируется расположение промышленного предприятия, для которого проектируется система электроснабжения.

## 2 Система электроснабжения предприятия

### 2.1 Определение класса напряжения распределительной сети предприятия

Для проектируемой системы электроснабжения рассмотрим возможность применения для распределительной, внутризаводской, системы электроснабжения напряжения 20 кВ. Класс напряжения 20 кВ находит широкое применение в системах электроснабжения крупных мегаполисов и объектов, где необходимо передача больших мощностей. Напряжение 20 кВ является оптимальным для системы электроснабжения рассматриваемого предприятия. Класс напряжения 20 кВ является промежуточным между классом напряжения 10 кВ и классом напряжения 35 кВ. При использовании класса напряжения 20 кВ повышается эффективность использования оборудования распределительных сетей, при этом уровень изоляции для данного класса напряжения будет ниже, чем для 35 кВ, а потери мощности и электрической энергии в сети снижаются. [15].

Выполним базовое сравнение показателей характеризующих применение напряжения 10 кВ и 20 кВ в системе электроснабжения [21].

Выражение (1), которое показывает зависимость уровня потерь напряжения ( $\Delta U$ ) от класса напряжения:

$$\Delta U = \frac{(P_p \cdot R + Q_p \cdot X) \cdot l}{U_{ном}}, \quad (1)$$

где  $P_p$  - расчетная активная мощность в питающей линии, кВт;

$R$  – погонное активное сопротивление питающей линии, Ом/км;

$l$  – длина питающей линии, км;

$Q_p$  - расчетная реактивная мощность в питающей линии, квар;

$X$  – погонное индуктивное сопротивление питающей линии, Ом/км;

$U_{ном}$  - номинальное напряжение питающей линии, кВ.

Выполним сравнение потерь напряжения для однотипных питающих линий с различным классами напряжения: 10 кВ и 20 кВ. Для этого используем следующие параметры:

- расчетная активная мощность в питающей линии: 4950 кВт;
- погонное активное сопротивление питающей линии: 0,121 Ом/км;
- длина питающей линии: 0,25 км;
- расчетная реактивная мощность в питающей линии: 3857 квар;
- погонное индуктивное сопротивление питающей линии: 0,09 Ом/км.

Используя выражение (1) выполним расчет для номинального напряжения 10 кВ:

$$\Delta U_{10} = \frac{4945 \cdot 0,121 \cdot 0,25 + 3857 \cdot 0,09 \cdot 0,25}{10} = 23,6 \text{ (В)} \quad (2)$$

Используя выражение (1) выполним расчет для номинального напряжения 20 кВ:

$$\Delta U_{20} = \frac{4945 \cdot 0,121 \cdot 0,25 + 3857 \cdot 0,09 \cdot 0,25}{20} = 11,8 \text{ В} \quad (3)$$

Уровень потерь активной мощности в питающей линии определяется выражением:

$$\Delta P = \frac{P_p^2 + Q_p^2}{U_{ном}^2} \cdot R, \quad (4)$$

где  $P_p$  - расчетная активная мощность в питающей линии, кВт;

$R$  – погонное активное сопротивление питающей линии, Ом/км;

$Q_p$  - расчетная реактивная мощность в питающей линии, квар;

$U_{ном}$  - номинальное напряжение питающей линии, кВ.

Используя выражение (4) определим для сравнения потери активной мощности при напряжении питающей линии 10 кВ:

$$\Delta P_{10} = \frac{4945^2 + 3857^2}{10^2} \cdot 0,121 = 47 \text{ кВт} \quad (5)$$

Используя выражение (4) определим для сравнения потери активной мощности при напряжении питающей линии 20 кВ:

$$\Delta P_{20} = \frac{4945^2 + 3857^2}{20^2} \cdot 0,121 = 11 \text{ кВт} \quad (6)$$

Сравним уровень потерь напряжения для питающих линий напряжением 10 кВ и 20 кВ:

$$U_{\%} = \frac{\Delta U_{10} - \Delta U_{20}}{\Delta U_{10}} \cdot 100 = \frac{11,8 - 23,6}{11,8} \cdot 100 = 100 (\%) \quad (7)$$

По (7) можно утверждать, что потери напряжения при использовании напряжения 20 кВ в два раза меньше чем на напряжении 10 кВ.

Сравним потери активной мощности в питающих линиях для класса напряжения 10 кВ и 20 кВ:

$$P_{\%} = \frac{\Delta P_{10} - \Delta P_{20}}{\Delta P_{10}} \cdot 100 = \frac{47 - 11}{47} \cdot 100 = 76,59 (\%) \quad (8)$$

Значение полученное в (8) позволяет утверждать, что потери активной мощности в сети напряжением 20 кВ ниже на 76,59 % чем в сети напряжением 10 кВ. Полученные данные хорошо коррелируются с известными источниками [16]. Таким образом для проектируемой системы электроснабжения промышленного предприятия будет использовано напряжение 20 кВ как более эффективное.

## 2.2 Определение электрических нагрузок промышленного предприятия

В данном разделе необходимо определить общее значение электрических нагрузок промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов. Для определения электрических нагрузок используются методики представленные в [10], [13], [17].

Общее значение расчетной активной мощности промышленного предприятия с группой чугунолитейных цехов при известной установленной активной мощности каждого из цехов предприятия определяется выражением:

$$P_{p\Sigma} = P_{уст\Sigma} + P_{ном.ВВ\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{уст.i} + \sum_{j=1}^m P_{ном.ВВ j} \quad (9)$$

где  $n$  - число цехов промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов, определяем согласно генерального плана (рисунок 1) или таблицы 1, принято равным 8, шт;

$P_{уст.i}$  - установленная активная мощность  $i$ -го цеха промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов, определяется по таблице 1, кВт;

$m$  - число высоковольтных электроприемников на промышленном предприятии, определяется таблицей 2, принято равным 2, шт;

$P_{ном.ВВj}$  - номинальная активная мощность j-го высоковольтного электроприемника, принимается согласно таблице 2.

Используя выражение (9) выполним расчет суммарной активной мощности цехов предприятия в таблице 3, а расчет суммарной активной мощности высоковольтных электроприемников выполним в таблице 4.

Таблица 3 - Расчет суммарной активной мощности предприятия

Наименование цеха	$P_{уст}$ , кВт
Цех №1	4945
Цех №2	6900
Цех № 3	356
Цех № 4	2269
Цех № 5	9585
Цех № 6	925
Цех № 7	10240
Цех № 8	1950
$P_{уст\Sigma}$ , кВт	37170

Таблица 4 - Расчет суммарной активной мощности высоковольтных электроприемников предприятия

Наименование высоковольтного электроприемника	$P_{ном.ВВ}$ , кВт
Печь-1	4000
Печь-2	4000
$P_{ном.ВВ\Sigma}$ , кВт	8000

Расчетная активная мощность высоковольтных электроприемников промышленного предприятия, представленных в таблице 4, определяется с учетом коэффициента загрузки по выражению:

$$P_{р.ВВ} = P_{ном.ВВ\Sigma} \cdot k_3 = 8000 \cdot 0,5 = 4000 \text{ кВт} \quad (10)$$

где  $P_{ном.ВВ\Sigma}$  – номинальная суммарная мощность высоковольтных электроприемников промышленного предприятия, определено в таблице 4, кВт;

$k_3$  – коэффициент загрузки высоковольтных электроприемников, принят равным 0,44.

Используя (9), а также данные полученные в таблицах 3 и 4 получим:

$$P_{p\Sigma} = P_{учм\Sigma} + P_{p.ВВ} = 37170 + 4000 = 41170 \text{ кВт} \quad (11)$$

Значение полной расчетной мощности предприятия определяется выражением:

$$S_p = \sqrt{P_{p\Sigma}^2 + Q_{p\Sigma}^2} \quad (12)$$

где  $Q_{p\Sigma}$  – расчетное значение реактивной мощности промышленного предприятия, квар.

Расчетное значение реактивной мощности определяется выражением:

$$Q_{p\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_{p.i} + P_{p.ВВ} \cdot \tan \varphi_{ВВ} = \sum_{i=1}^n P_{учм.i} \cdot \tan \varphi_i + P_{p.ВВ} \cdot \tan \varphi_{ВВ} \quad (13)$$

где  $n$  – число цехов промышленного предприятия с группой чугунолитейных цехов, определяем согласно генерального плана (рисунок 1) или таблицы 1, принято равным 8, шт;

$\tan \varphi_{ВВ}$  – коэффициент реактивной мощности высоковольтных электроприемников промышленного предприятия, принято равным 0,5;

$P_{учм.i}$  – установленная мощность цехов промышленного предприятия, принята равной согласно таблице 1;

$\tan \varphi_i$  - коэффициент реактивной мощности  $i$ -го цеха промышленного предприятия.

Значение расчетного тока, для каждого из цехов промышленного предприятия, а также для каждого высоковольтного электроприемника определяется выражением:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (14)$$

где  $S_p$  – значение полной расчетной мощности, А;

$U_{ном}$  – величина номинального напряжения распределительной сети промышленного предприятия, принята равной 20 кВ.

Расчет электрических нагрузок промышленного предприятия используя представленную методику (9) - (14) выполним в таблице 5.

### 2.3 Цеховые трансформаторные подстанции предприятия

Выбор числа и мощности распределительных трансформаторов системы электроснабжения промышленного предприятия выполним согласно методике представленной в [13]. Все трансформаторные подстанции (ТП) предлагается выполнить двухтрансформаторными.

Число трансформаторных подстанций для каждого цеха промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов определим по выражению:

$$N_{ТП} = \frac{P_p}{k_3 \cdot S_{т.ном}}, \quad (15)$$

где  $P_p$  – расчетная активная мощность цеха предприятия, полученная в таблице 5, кВт;

$k_3$  – экономически эффективный коэффициент загрузки распределительного трансформатора ТП;

$S_{т.ном}$  – номинальная мощность распределительного трансформатора, устанавливаемого на цеховой ТП, кВА.

Таблица 5 - Расчет электрических нагрузок промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов

Наименование нагрузки	$k_n$	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА	$I_p$ , А
Цех №1	0,55	0,79	0,73	4945	3609,85	6122,421	176,7391
Цех №2	0,68	0,73	0,76	6900	5244	8666,576	250,1825
Цех № 3	0,34	0,78	0,75	356	267	445	12,84604
Цех № 4	0,54	0,69	0,94	2269	2132,86	3114,073	89,89555
Цех № 5	0,61	0,71	0,89	9585	8530,65	12831,38	370,4099
Цех № 6	0,3	0,8	0,87	925	804,75	1226,07	35,39359
Цех № 7	0,62	0,68	1,05	10240	10752	14848	428,6248
Цех № 8	0,69	0,72	0,95	1950	1852,5	2689,657	77,64372
Печь-1	0,44	0,5	1,67	2000	3340	3893,019	112,3818
Печь-2	0,44	0,5	1,67	2000	3340	3893,019	112,3818
Итого	-	-	-	41170	39873,61	57729,21	1666,499

Согласно выражению (15) и данным таблицы 5 определим число цеховых ТП необходимых для питания нагрузки ремонтно-литейный цех (Цех №1):

$$N_{ТП} = \frac{6122,42}{0,7 \cdot 2500} = 3,49 \approx 3 \quad (16)$$

По выражению (16) для питания электрической нагрузки ремонтно-литейного цеха (цеха №1) принимаем 3 двухтрансформаторных ТП.

Аналогично выбору числа цеховых ТП для и ремонтно-литейного цеха (Цех №1), выполненного в выражении (16) выполним выбор цеховых ТП в таблице 6.

Таблица 6 - Определение числа цеховых ТП промышленного предприятия

Наименование точки питания	Число цеховых ТП, шт	Число трансформаторов на ТП, шт	Тип и мощность, трансформаторов, кВА	Общее число трансформаторов, шт
Цех №1	3	2	ТМГ-2500/20	6
Цех №2	4	2	ТМГ-2500/20	8
Цех № 3	1	2	ТМГ-400/20	2
Цех № 4	1	2	ТМГ-2500/20	2
Цех № 5	5	2	ТМГ-2500/20	10
Цех № 6	1	2	ТМГ-1000/20	2
Цех № 7	6	2	ТМГ-2500/20	12
Цех № 8	1	2	ТМГ-2500/20	2

#### **2.4 Проектирование распределительной сети промышленного предприятия**

Для проектируемой системы электроснабжения промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов необходимо спроектировать распределительную сеть включающую в себя питающие линии. Методика выбора типа питающих линий, а также методика определения способа их прокладки представлена в [11].

Для распределительной сети предлагается использовать кабельные линии (КЛ). Выбор сечений КЛ выполняется по длительно допустимому току. Данная методика позволяет учесть способы прокладки кабельных линий по территории промышленного предприятия за счет учета дополнительных коэффициентов.

Для прокладки кабельных трасс по территории промышленного предприятия выбран способ прокладки в земле. Так как территория промышленного предприятия не имеет плотной застройки и отсутствуют риски разлива агрессивных жидкостей.

Рассмотрим методику выбора кабельных линий на примере КЛ питающей ТП-6.

В таблице 5 были определены значения расчетных токов. Для питания нагрузки цеха №6 принята трансформаторная подстанция – ТП-6. Расчетный ток для данной подстанции  $I_{рТП6} = 35,4$  А. Используя справочные табличные данные представленные в [11] определяем ближайшее значение равное 38 А. Данное значение тока соответствует сечению КЛ равное  $2,5 \text{ мм}^2$ . Для высоковольтных кабелей, согласно [6], минимальное сечение составляет  $16 \text{ мм}^2$ , поэтому для питания ТП-6 предварительно выбираем кабель с сечением токоведущей жилы  $16 \text{ мм}^2$  марки АСБГ-3×16.

Для выбранной КЛ необходимо определить потери напряжения. Для этого используется выражение (1), а также значения реактивной и активной мощности, протекающей по КЛ из таблицы 5 для цеха №6.

Используя (1) получим:

$$\Delta U_{ПГВ-ТП6} = \frac{P_p \cdot R \cdot l + Q_p \cdot X \cdot l}{U_{ном}} = \frac{925 \cdot 0,206 \cdot 0,11 + 693 \cdot 0,143 \cdot 0,11}{20} = 2 \text{ В}, \quad (17)$$

Определим относительное значение потери напряжения в выбранной КЛ по выражению:

$$\Delta U_{(\%) } = \frac{P_p \cdot R \cdot l + Q_p \cdot X \cdot l}{U_{ном}^2}, \quad (18)$$

Для КЛ питающей ТП-6 по (18) получим:

$$\Delta U_{(\%) ПГВ-ТП6} = \frac{925 \cdot 0,206 \cdot 0,11 + 693 \cdot 0,143 \cdot 0,11}{20^2} = 0,08\%, \quad (19)$$

Значения полученные в (18) и (19) позволяют утверждать, что выбранное сечение КЛ выбрано верно, так как обеспечиваются минимальные потери напряжения.

Выбор всех кабелей для питания трансформаторных подстанций промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов сведем в таблицу 7. Расчет в таблице 7 выполним согласно выражениям (1), (17) -(19).

Таблица 7 - Выбор кабелей для распределительной сети предприятия

Участок распределительной сети	Наименование линии	Длительно допустимый ток кабеля, А	Марка кабеля	l, км	$\Delta U$ , В	$\Delta U_{(\%)}$ , %
1	2	3	4	5	6	7
ПГВ-ТП-1	Линия 1	150	АСБГ-3×25	0,7	5	0,09
ТП-1-ТП-2	Линия 2	115	АСБГ-3×16	0,65	5	0,09
ПГВ-ТП-3	Линия 3	115	АСБГ-3×16	0,78	7	0,11
ПГВ-ТП-4	Линия 4	115	АСБГ-3×16	0,35	4	0,1
ПГВ-ТП-5	Линия 5	115	АСБГ-3×16	0,37	5	0,09
ПГВ-ТП-6	Линия 6	115	АСБГ-3×16	0,11	2	0,08
ПГВ-ТП-7	Линия 7	115	АСБГ-3×16	0,34	3	0,09
ТП-7-ТП-8	Линия 8	150	АСБГ-3×25	0,44	5	0,1
ПГВ-ТП-9	Линия 9	150	АСБГ-3×25	0,35	2	0,08

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5	6	7
ПГВ-ТП-10	Линия 10	150	АСБГ- 3×25	0,29	3	0,09
ТП-10-ТП-11	Линия 11	115	АСБГ- 3×16	0,37	2	0,07
ТП-9-ТП-12	Линия 12	115	АСБГ- 3×16	0,41	3	0,08
ПГВ-ТП-13	Линия 13	150	АСБГ- 3×25	0,34	4	0,08
ПГВ-ТП-14	Линия 14	150	АСБГ- 3×25	0,38	5	0,09
ТП-14-ТП-15	Линия 15	150	АСБГ- 3×25	0,33	5	0,09
ТП-15-ТП-16	Линия 16	150	АСБГ- 3×16	0,13	2	0,07
ТП-4-ТП-17	Линия 17	150	АСБГ- 3×16	0,14	3	0,07
ТП-17-ТП-18	Линия 18	150	АСБГ- 3×16	0,15	4	0,08
ПГВ-Печь-1	Линия 19	150	АСБГ- 3×16	0,15	2	0,08
ПГВ-Печь-2	Линия 20	150	АСБГ- 3×16	0,15	2	0,08

### 2.5 Токи короткого замыкания в распределительной сети

Методика расчета токов короткого замыкания (ТКЗ) представлена в [3], [14]. Составим схему замещения (СЗ) для расчета ТКЗ, схема замещения представлена на рисунке 2.

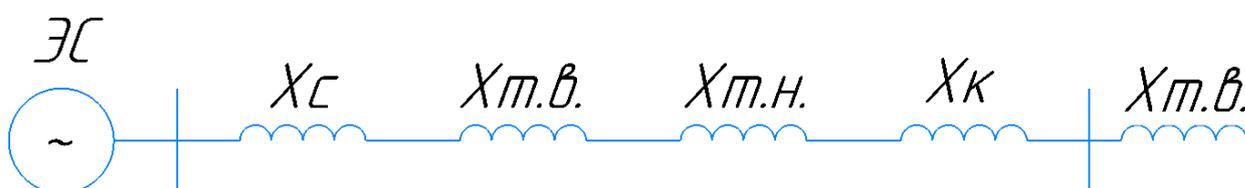


Рисунок 2 – Схема замещения для расчета ТКЗ

Выполним расчет ТКЗ по методике представленной в [3], [14] для ТП-6, питающей электрические нагрузки Цеза №6. Расчет выполним до шин 110 кВ

подстанции глубокого ввода (ПГВ) предприятия до шин 0,4 кВ ТП-6 согласно [20]. Расчет ТКЗ выполним в именованных единицах.

Определим индуктивное сопротивление энергосистемы:

$$x_c = \frac{U_c^2}{S_{кmax}}, \quad (20)$$

где  $U_c$  – напряжение энергосистемы, согласно исходных данных принято 110 кВ;

$S_{кmax}$  - мощность КЗ по данным энергосистемы, кВА.

По (20) получим:

$$x_c = \frac{115^2}{860 \cdot 10^6} = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (21)$$

Сопротивление обмотки ВН трансформатора ПГВ:

$$x_{тр.вн} = 0,125 \cdot x_m, \quad (22)$$

где  $x_m$  – сопротивление силового трансформатора, Ом.

По (22) для трансформатора ПГВ получим:

$$x_{тр.вн} = 0,125 \cdot 0,27 = 0,03 \text{ Ом} \quad (23)$$

Сопротивление обмотки НН трансформатора ПГВ:

$$x_{тр.нн} = 1,75 \cdot x_m \quad (24)$$

где  $x_m$  – сопротивление силового трансформатора, Ом.

По (24) получим:

$$x_{тр.нн} = 1,75 \cdot 0,40 = 0,70 \text{ Ом} \quad (25)$$

Индуктивное сопротивление кабельной линии определяется выражением:

$$x_{кл} = x_{уд} \cdot l \quad (26)$$

где  $x_{уд}$  - удельное сопротивление кабельной линии, Ом/км.

$l$  - длина кабельной линии, км.

Для КЛ от ПГВ до ТП-6 по (26) получим:

$$x_{кл} = 0,143 \cdot 0,11 = 0,02 \text{ Ом} \quad (27)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ВН трансформатора, установленного в ТП-6, определим по выражению (22):

$$x_{тр.вн} = 0,125 \cdot 2,2 = 0,27 \text{ Ом} \quad (28)$$

Определим результирующее сопротивление согласно СЗ представленной на рисунке 2 по выражению используя значения полученные в(20) - (28) для ТП-6:

$$x_{\Sigma} = x_c + x_{тр.вн} + x_{тр.нн} + x_{кл} + x_{тр.вн} \quad (29)$$

$$x_{\Sigma} = 0,00001 + 0,03 + 0,70 + 0,02 + 0,27 = 1,02 \text{ Ом} \quad (30)$$

Трехфазный ТКЗ на шинах 20 кВ трансформаторной подстанции определится согласно представленной методике по выражению:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot x_{\Sigma}}, \quad (31)$$

где  $x_{\Sigma}$  - результирующее сопротивление до расчетной точки, Ом

$U_{ном}$  - номинальное напряжение распределительной сети, принято равным 20 кВ.

Согласно (31) для ТП-6 получим:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 1,02} = 1,1 \text{ кА} \quad (32)$$

Ударный ток трехфазного КЗ определим по выражению:

$$i_{y\partial} = \sqrt{2} \cdot I_{\kappa}^{(3)} \cdot K_{y\partial} \quad (33)$$

где  $I_{\kappa}^{(3)}$  - периодическая составляющая трехфазного ТКЗ, определяется выражением (32), кА;

$K_{y\partial}$  – ударный коэффициент, принимаем равным 1,2.

По (33) определим ударный ток для линии ПГВ-ТП-6 и значению периодической составляющей трехфазного ТКЗ полученному в выражении (32):

$$i_{y\partial} = \sqrt{2} \cdot 1,1 \cdot 1,2 = 1,8 \text{ кА} \quad (34)$$

Для выбора и проверки коммутационных аппаратов необходимо определить аperiodическую составляющую трехфазного ТКЗ по выражению:

$$i_{a0} = \sqrt{2} \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \quad (35)$$

где  $I_{\kappa}^{(3)}$  - периодическая составляющая трехфазного ТКЗ, определяется выражением (32), кА.

По (35) с учетом значения трехфазного ТКЗ, полученного в выражении (32) получим:

$$i_{a0} = \sqrt{2} \cdot 1,1 = 1,5 \text{ кА} \quad (36)$$

Для всех остальных питающих линий распределительной сети промышленного предприятия расчеты значений периодической и аperiodической составляющих тока КЗ, а также значение ударного ТКЗ выполним по аналогии согласно выражениям (31), (33) и (35), результаты расчетов сведем в таблицу 8.

Таблица 8 - Токи короткого замыкания

Расчетная линия	$I_{\kappa}^{(3)}$ , кА	$i_{уд}$ , кА	$i_{a0}$ , кА
Линия 1	1,2	2,2	1,7
Линия 2	0,8	1,1	0,9
Линия 3	1,1	1,7	1,5
Линия 4	1,3	2,1	1,7
Линия 5	1,2	1,9	1,6
Линия 6	1,1	1,8	1,5
Линия 7	1,2	1,8	1,6
Линия 8	1,3	1,8	2,1
Линия 9	1,1	1,7	1,4
Линия 10	1,2	1,9	1,5
Линия 11	0,9	1,5	1,1
Линия 12	0,8	1,4	1,1
Линия 13	1,0	1,6	1,4
Линия 14	1,1	1,8	1,4
Линия 15	0,9	1,5	1,2
Линия 16	0,7	1,3	1,0
Линия 17	0,9	1,5	1,2
Линия 18	0,9	1,4	1,2
Линия 19	1,7	2,9	2,1
Линия 20	1,7	2,9	2,1

## 2.6 Коммутационные аппараты цеховых ТП

Для внутривозовских систем электроснабжения напряжением 6-10 кВ в качестве коммутационных аппаратах могут применяться: выключатели нагрузки, а также разъединители с предохранителями. Применение разъединителей с предохранителями являются менее надежным звеном внутривозовской системы электроснабжения, поэтому рекомендуется применение выключателей нагрузки [7]. Так как система внутривозовского электроснабжения рассчитана на номинальное напряжение 20 кВ, то необходимо выполнить поиск подходящего типа выключателей нагрузки. Анализ производителей позволил определить производителя оборудования UESA [19], в номенклатуре производимой продукции которого присутствуют требуемые выключатели нагрузки на напряжение 20 кВ.

Рассмотрим подробную методику выбора выключателей нагрузки для распределительной сети промышленного предприятия с группой чугунолитейных цехов и подробный выбор коммутационных аппаратов для ТП-6, питающей нагрузки цеха 6.

Расчетное значение ТКЗ для выбора выключателя нагрузки определяется по выражению:

$$i = I_{\kappa}^{(3)} + i_a \quad (37)$$

где,  $I_{\kappa}^{(3)}$  - периодическая составляющая трехфазного тока короткого замыкания, определяемая по выражению (31), кА;

$i_a$  - аperiodическая составляющая трехфазного тока короткого замыкания, определяемая по выражению (35), кА.

Для ТП-6 согласно данным расчетной таблицы 5 полный расчетный ТКЗ по (37):

$$i = I_{\kappa}^{(3)} + i_a = 1,1 + 1,5 = 2,6 \text{ кА} \quad (38)$$

Далее необходимо определить расчетное значение теплового импульса для проверки коммутационного аппарата на термическую стойкость к ТКЗ. Тепловой импульс определяется по выражению:

$$B_{\kappa} = I_{\kappa}^{(3)2} \cdot \tau \quad (39)$$

где  $I_{\kappa}^{(3)}$  - периодическая составляющая трехфазного тока короткого замыкания, определяемая по выражению (31), кА;

$\tau$  - время отключения коммутационного аппарата, принимается равным 0,1, с

Для ТП-6 по выражению (39) с использованием значения полученного в (32) получим:

$$B_{\kappa} = 1,1^2 \cdot 0,1 = 1,21 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \quad (40)$$

По [19] выбираем выключатель нагрузки для ТП-6 типа KLF20/630-275. Выполним сравнение расчетных параметров с номинальными для выбранного выключателя нагрузки, остальные расчеты сведем в таблицу 6:

Проверка по отключающей способности:

$$i = 2,6 < i_{ном} = 40 \quad (41)$$

где  $i$  - значение расчетного ТКЗ для ТП-6, полученное по выражению (38), кА;

$i_{ном}$  - номинальный ток отключения, определен по каталогу производителя [19], кА.

Проверка на термическую стойкость ТКЗ:

$$B_k = 1,21 < B_{\text{кном}} = 512 \quad (42)$$

где  $B_k$  - расчетное значение теплового импульса по выражению (39), кА;

$B_{\text{кном}}$  - каталожное значение теплового импульса, определено по каталогу производителя [19], кА.

Проверка по номинальному току:

$$I_p = 35,39 < I_{\text{ном}} = 630 \quad (43)$$

где  $I_p$  - расчетное значение тока, полученное в таблице 5, А;

$I_{\text{ном}}$  - номинальный ток выключателя нагрузки определен по каталогу производителя [19], А.

Выбор коммутационных аппаратов для всех ТП промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов проводится аналогично выбору для ТП-6 по методике определенной выражениями (37), (39), (41), (42) и (43). Результаты выбора коммутационных аппаратов сведем в таблицу 9.

Таблица 9 - Выбор коммутационных аппаратов

Наименование точки установки	Расчетные значения			Каталожные значения		
	$i$ , кА	$B_k$ , кА <sup>2</sup> ·с	$I_p$ , А	$i_{\text{ном}}$ , кА	$B_{\text{кном}}$ , кА <sup>2</sup> ·с	$I_{\text{ном}}$ , А
1	2	3	4	5	6	7
ТП-1	2,9	1,2	181	42,3	512	630
ТП-2	1,7	8,0	273	42,3	512	630
ТП-3	2,6	1,1	13	42,3	512	630
ТП-4	3	1,3	95	42,3	512	630
ТП-5	2,8	1,2	389	42,3	512	630
ТП-6	2,6	1,21	35	42,3	512	630
ТП-7	2,8	1,20	12	42,3	512	630
ТП-8	3,4	1,30	12	42,3	512	630
ТП-9	2,5	1,1	11	42,3	512	630
ТП-10	2,7	1,2	10	42,3	512	630

ТП-11	2	0,9	12	42,3	512	630
-------	---	-----	----	------	-----	-----

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4	5	6	7
ТП-12	1,9	0,8	13	42,3	512	630
ТП-13	2,4	1,0	11	42,3	512	630
ТП-14	2,5	1,1	12	42,3	512	630
ТП-15	2,1	0,9	14	42,3	512	630
ТП-16	1,7	0,7	15	42,3	512	630
ТП-17	2,1	0,9	12	42,3	512	630
ТП-18	2,1	0,9	13	42,3	512	630

Выводы по разделу 2. Для проектируемой системы электроснабжения промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов выполнен выбор напряжения распределительной сети 20 кВ.

Использование в сети предприятия класса напряжения 20 кВ позволяет снизить потери мощности примерно на 76% по сравнению с кабельными линиями напряжением 10 кВ, которые в основном применяются в распределительных сетях промышленных предприятий, а потери напряжения в кабельных линиях снижаются в два раза по сравнению с классом напряжения 10 кВ. Исходя из этого применение класса напряжения 20 кВ для системы внутриводского электроснабжения промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов является оптимальным.

Выполнен расчет нагрузок промышленного предприятия, который позволил определить расчетные активные, реактивные и полные мощности всех цехов предприятия, а также определить расчетные токи каждого цеха и высоковольтного электроприемника, к которым, согласно заданию, относятся две печных установки.

Определены суммарные значения активной мощности по предприятию  $P_{\Sigma} = 41170$  кВт, значение реактивной мощности  $Q_{\Sigma} = 39873,61$  квар и значение полной мощности  $S_{\Sigma} = 57729,21$  кВА. Эти значения будут использованы при разработке проекта ПГВ предприятия с группой чугуно-литейных цехов.

Для распределительной сети предприятия выполнен выбор требуемого сечения и типов кабельных линий, а также определен способ прокладки питающих кабельных линий по территории предприятия с группой чугунолитейных цехов. Для внутризаводской системы электроснабжения выбрана прокладка кабельных линий в земле. Выбор кабельных линий внутризаводской системы электроснабжения проведен по длительно допустимому току, а проверка выбранных сечений кабельных линий выполнена по потере напряжения. Для применения во внутризаводской распределительной сети выбраны кабели марки АСБГ различных сечений, в зависимости от мощности ТП.

Выполнен расчет трехфазных токов короткого замыкания, результаты которого использованы при выборе коммутационных аппаратов. В качестве коммутационных аппаратов в ВКР приняты выключатели нагрузки, так как они обладают более высокой надежностью чем применение на вводе в ТП разъединителя-предохранителя, для установки на ТП выбраны выключатели нагрузки типа KLF20/630-275.

### **3 Проектирование электрической части главной подстанции промышленного предприятия**

Для проектируемой системы электроснабжения промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов принято в работе использовать подстанцию глубокого ввода (ПГВ). Подстанции глубокого ввода на промышленных предприятиях позволяют отказаться от использования коммутационного оборудования на стороне высокого напряжения, тем самым упростив конструкцию и снизить площадь, занимаемую подстанцией. В данном разделе ВКР для проектирования электрической части ПГВ необходимо выбрать тип и мощность силовых трансформаторов с учетом рассчитанных в разделе 2 ВКР нагрузок, выбрать оборудование электрической части ПГВ, а также выбрать линии для питания подстанции глубокого ввода промышленного предприятия.

#### **3.1 Силовые трансформаторы**

В разделе 2 ВКР были определены исходные данные необходимые для выбора силовых трансформаторов. По результатам расчета электрических нагрузок определены суммарные значения активной мощности по предприятию  $P_{\Sigma} = 41170$  кВт, значение реактивной мощности  $Q_{\Sigma} = 39873,61$  квар и значение полной мощности  $S_{\Sigma} = 57729,21$  кВА.

Согласно результатам расчета нагрузок предприятия определим требуемую мощность силовых трансформаторов по выражению:

$$S_m = \frac{S_{\Sigma} \cdot K_{I-II}}{k_{an} \cdot (n-1)}, \quad (44)$$

где  $S_{\Sigma}$  - суммарное значение полной мощности, полученное по результатам расчета нагрузок промышленного предприятия, кВА;

$K_{I-II}$  - коэффициент, учитывающий наличие на промышленном предприятии потребителей первой и второй категорий надежности электроснабжения, принимаем равным 0,85 [12];

$k_{an}$  - коэффициент допустимой аварийной перегрузки силового трансформатора, для при числе трансформаторов на подстанции 2 [8], значение коэффициента принимается равным 1,4;

$n$  - количество силовых трансформаторов, устанавливаемых на подстанции, принимается равным 2, шт.

По (44) для проектируемой подстанции получим:

$$S_m = \frac{S_{\Sigma} \cdot K_{I-II}}{k_{an} \cdot (n-1)} = \frac{57729,21 \cdot 0,85}{1,4 \cdot (2-1)} = 35049,88 (\text{кВА}) \quad (45)$$

По значению мощности полученном в выражении (45), опираясь на шкалу типовых мощностей трансформаторов [4] определим типовую мощность силового трансформатора исходя из условия:

$$S_m \leq S_{m.ном} \quad (46)$$

где  $S_m$  - расчетное значение мощности силового трансформатора, полученное в выражении (45), кВА;

$S_{m.ном}$  - значение типовых мощностей трансформатора согласно [4], кВА.

Условию (46) удовлетворяют две типовых мощности силового трансформатора – 40000 кВА и 63000 кВА. Далее по каталогам производителей выберем силовые трансформаторы указанных мощностей с классами напряжения обмоток 110 кВ и 20 кВ.

Анализ производителей трансформаторного оборудования позволил определить наличие силовых трансформаторов требуемой мощности и класса напряжения в номенклатуре производимой продукции «Группа - СВЭЛ» [5].

Согласно каталогу [5] определим паспортные данные трансформаторов мощность 40000 кВА и 63000 кВА и занесем их в таблицу 10.

Таблица 10 - Паспортные данные трансформаторов

Марка	Номинальная мощность	Напряжение короткого замыкания, %	Напряжение обмоток, кВ		Потери короткого замыкания, кВт	Потери холостого хода, кВт	Ток холостого хода, %
			ВН	НН			
ТДН	40000	10,5	115	22	175	37	0,55
ТДН	63000	10,5	115	22	191	39	0,5

Выбор силовых трансформаторов выполним на основании оптимального коэффициента загрузки [23] определяемого выражением:

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{P_x}{P_k}} \quad (47)$$

где  $P_x$  – паспортное значение потерь холостого хода, кВт;

$P_k$  – паспортное значение потерь короткого замыкания, кВт.

По (47) для силового трансформатора ТДН 40000 получим:

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{P_x}{P_k}} = \sqrt{\frac{37}{175}} = 0,46. \quad (48)$$

По (47) для силового трансформатора ТДН 63000 получим:

$$k_{omn} = \sqrt{\frac{P_x}{P_k}} = \sqrt{\frac{39}{191}} = 0,45 \quad (49)$$

На основании типовых графиков нагрузок промышленных предприятий различных отраслей, составим суточный график нагрузки для промышленного предприятия с группой-чугунолитейных цехов учитывая суммарные значения мощностей полученных в таблице 5. На рисунке 3 показан суточный график полной мощности соответствующий зимнему периоду, а на рисунке 4 суточный график полной мощности для летнего периода.

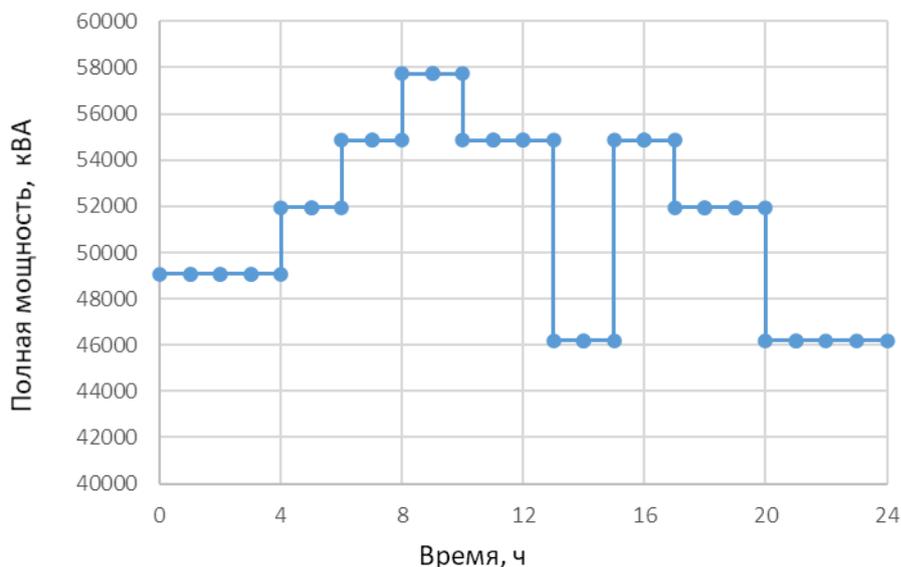


Рисунок 3 – Суточный график полной мощности для зимнего периода

Данные суточных графиков полной мощности промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов представлены в 11.

Согласно данным суточных графиков, представленным в таблице 11, построим годовой график полной мощности предприятия с учетом продолжительности зимнего периода для региона размещения предприятия 150 дней, а летнего периода 205 дней.

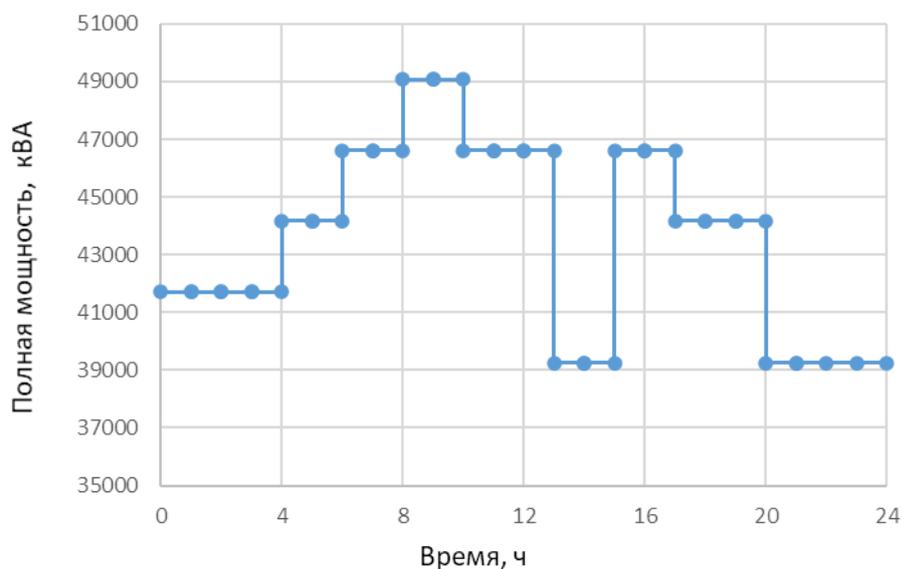


Рисунок 4 – Суточный график мощности для летнего периода

Таблица 11 - Данные суточных графиков полной мощности

Номер часа	Полная мощность для зимнего графика, кВА	Полная мощность для летнего графика, кВА
1	49069,83	41709,35
2	49069,83	41709,35
3	49069,83	41709,35
4	49069,83	41709,35
5	51956,29	44162,85
6	51956,29	44162,85
7	54842,75	46616,34
8	54842,75	46616,34
9	57729,21	49069,83
10	57729,21	49069,83
11	54842,75	46616,34
12	54842,75	46616,34
13	54842,75	46616,34
14	46183,37	39255,86
15	46183,37	39255,86
16	54842,75	46616,34
17	54842,75	46616,34
18	51956,29	44162,85
19	51956,29	44162,85
20	51956,29	44162,85
21	46183,37	39255,86
22	46183,37	39255,86
24	46183,37	39255,86

По данным, представленным в таблице, построим годовой упорядоченный график полной мощности учитывая продолжительность летнего периода  $T_{лето} = 205$  дней, а зимнего  $T_{зима} = 160$  дней. Определение продолжительности каждой ступени годового графика выполняется по выражениям:

- для летнего периода:

$$t_{год,i} = T_{лето} \cdot t_{ч} \quad (50)$$

где  $T_{лето}$  - продолжительность летнего периода в регионе расположения предприятия, принято равным  $T_{лето} = 205$ ;

$t_{ч}$  - продолжительность каждой ступени летнего графика нагрузки, согласно рисунка 3, принимается равным 1 ч.

$i$  - номер ступени годового графика нагрузки.

- для зимнего периода:

$$t_{год,i} = T_{зима} \cdot t_{ч} \quad (51)$$

где  $T_{зима}$  - продолжительность зимнего периода в регионе расположения предприятия, принято равным  $T_{зима} = 160$ ;

$t_{ч}$  - продолжительность каждой ступени зимнего графика нагрузки, согласно рисунка 4, принимается равным 1 ч.

$i$  - номер ступени годового графика нагрузки.

Расчет и построение годового графика полной мощности проектируемого предприятия по суточным графикам выполним в MS Excel. При построении годового графика число ступеней определяется суммой ступеней суточных графиков, для графиков показанных на рисунках 3 и 4 общее число ступеней годового графика равно 48, так как суточные графики являются часовыми графиками. Для построения годового графика

необходимо выполнить сортировку колонки мощностей по убыванию. Результаты расчетов для построения годового графика полной мощности (рисунок 5) представлены в таблице 13. Кроме того, необходимо построить годовой график активной мощности. Для построения годового упорядоченного графика активной мощности используем выражение:

$$P_i = S_i \cdot \cos \varphi \quad (52)$$

где  $i$  - номер ступени годового графика нагрузки;

$S_i$  - значение полной мощности  $i$ -й ступени годового графика нагрузок, кВА;

$\cos \varphi$  - средневзвешенное значение коэффициента активной мощности для проектируемой системы электроснабжения.

Определим средневзвешенный коэффициент активной мощности согласно данным таблицы 12, для этого составим таблицу 12 в которую внесем значения коэффициентов активной мощности для каждого цеха и определим в ней значения весов для каждого потребителя. Распределение весов выполним согласно расчетным значениям полной мощности, чем выше это значение тем выше размер веса. Средневзвешенное значение коэффициента активной мощности определим по выражению:

$$\cos \varphi = \frac{\sum_{i=1}^{n=10} \cos \varphi_i \cdot p_i}{\sum_{i=1}^{n=10} p_i} \quad (53)$$

где  $i$  - порядковый номер потребителя предприятия;

$p_i$  - весовой коэффициент определенной для каждого потребителя согласно значению расчетной полной мощности;

$\cos \varphi_i$  - коэффициент активной мощности  $i$ -го потребителя;

$n$  - число цехов предприятия с учетом высоковольтных потребителей, согласно таблицам 3 и 4 принято равным 10.

Для удобства выполнения все расчеты по выражению (53) выполним в таблице 12.

Таблица 12 - Расчет средневзвешенного коэффициента активной мощности

Наименование нагрузки	$\cos\varphi$	$S_p$ , кВА	Весовой коэффициент, $p_i$	Произведение $\cos\varphi$ и весового коэффициента $p_i$
Цех №1	0,79	6122,421	3	2,37
Цех №2	0,73	8666,576	3	2,19
Цех № 3	0,78	445	1	0,78
Цех № 4	0,69	3114,073	2	1,38
Цех № 5	0,71	12831,38	4	2,84
Цех № 6	0,8	1226,07	1	0,8
Цех № 7	0,68	14848	4	2,72
Цех № 8	0,72	2689,657	2	1,44
Печь-1	0,5	3893,019	2	1
Печь-2	0,5	3893,019	2	1
Итого	-	57729,21	24	16,52
Средневзвешенный коэффициент активной мощности				0,688333333

Полученное значение средневзвешенного коэффициента активной мощности используем для построения годового упорядоченного графика активной мощности (рисунок 6) предприятия с группой чугуно-литейных цехов. Составим таблицу 13 данных графика полной мощности, в которую с учетом полученного значения средневзвешенного коэффициента активной мощности рассчитаем значение активной мощности на каждой ступени используя выражение (52).

Таблица 13 - Данные годовых графиков полной и активной мощности

$T_i$	Номер ступени $i$	Длительность ступени, ч	$S_i$ , кВА	$P_i$ , кВт
1	2	3	4	5
150	1	150	57729,21	39736,93955
300	2	150	57729,21	39736,93955
450	3	150	57729,21	39736,93955

Продолжение таблицы 13

1	2	3	4	5
600	4	150	54842,75	37750,09257
750	5	150	54842,75	37750,09257
900	6	150	54842,75	37750,09257
1050	7	150	54842,75	37750,09257
1200	8	150	54842,75	37750,09257
1350	9	150	54842,75	37750,09257
1500	10	150	54842,75	37750,09257
1650	11	150	51956,29	35763,2456
1800	12	150	51956,29	35763,2456
1950	13	150	51956,29	35763,2456
2100	14	150	51956,29	35763,2456
2250	15	150	51956,29	35763,2456
2400	16	150	49069,83	33776,39862
2550	17	150	49069,83	33776,39862
2700	18	150	49069,83	33776,39862
2850	19	150	49069,83	33776,39862
3065	20	215	49069,83	33776,39862
3280	21	215	49069,83	33776,39862
3495	22	215	46616,34	32087,57869
3710	23	215	46616,34	32087,57869
3925	24	215	46616,34	32087,57869
4140	25	215	46616,34	32087,57869
4355	26	215	46616,34	32087,57869
4570	27	215	46616,34	32087,57869
4785	28	215	46616,34	32087,57869
4935	29	150	46183,37	31789,55164
5085	30	150	46183,37	31789,55164
5235	31	150	46183,37	31789,55164
5385	32	150	46183,37	31789,55164
5535	33	150	46183,37	31789,55164
5750	34	215	44162,85	30398,75876
5965	35	215	44162,85	30398,75876
6180	36	215	44162,85	30398,75876
6395	37	215	44162,85	30398,75876
6610	38	215	44162,85	30398,75876
6825	39	215	41709,35	28709,93882
7040	40	215	41709,35	28709,93882
7255	41	215	41709,35	28709,93882
7470	42	215	41709,35	28709,93882
7685	43	215	39255,86	27021,11889
7900	44	215	39255,86	27021,11889
8115	45	215	39255,86	27021,11889
8330	46	215	39255,86	27021,11889
8545	47	215	39255,86	27021,11889
8760	48	215	39255,86	27021,11889

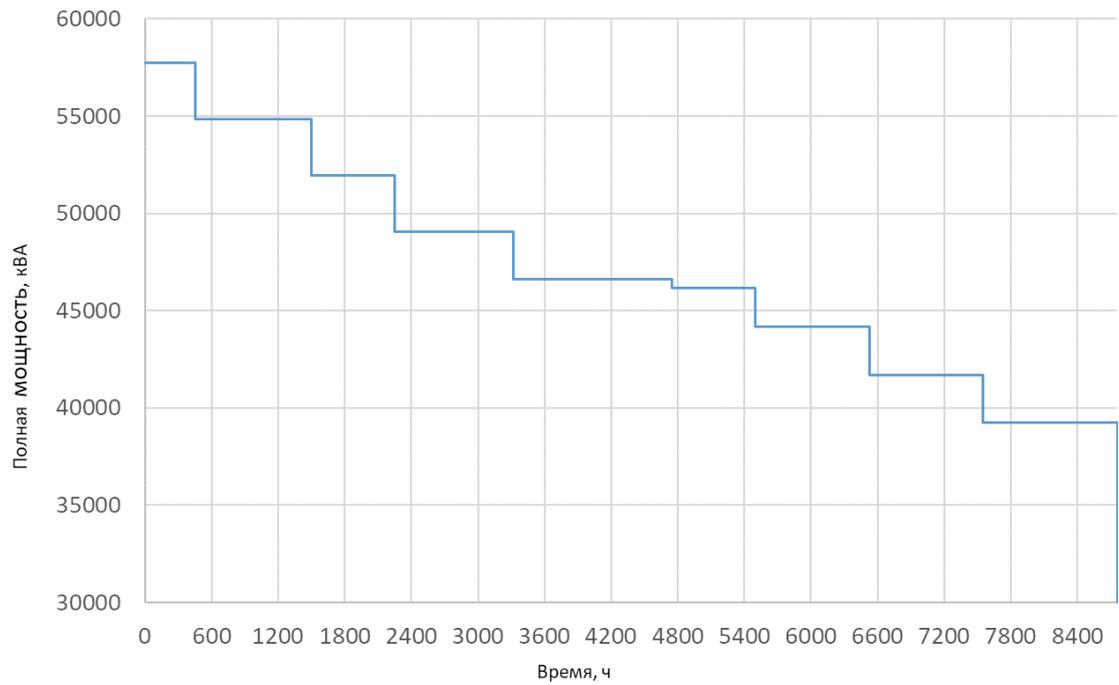


Рисунок 5 – Годовой график полной мощности

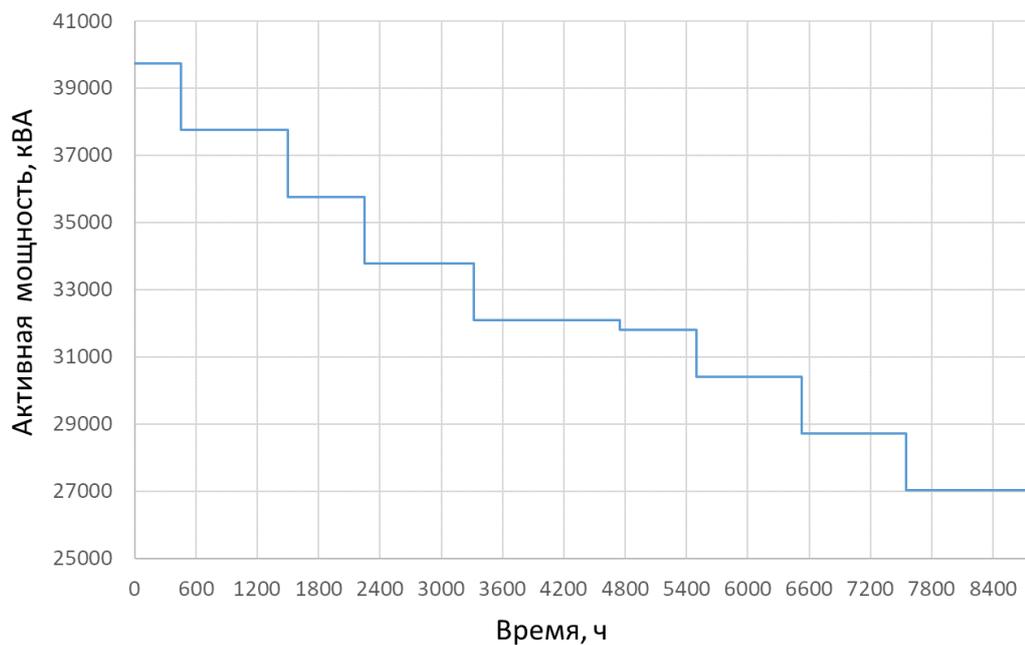


Рисунок 6 – Годовой график активной мощности

Выполним расчет коэффициента загрузки для каждой степени годового графика полной мощности по выражению:

$$k_{zi} = \frac{S_i}{n \cdot S_{T.ном}}, \quad (54)$$

где  $i$  - порядковый номер ступени годового графика полной мощности;  
 $S_i$  - значение полной мощности соответствующей ступени годового графика (рисунок 5), кВА.  
 $S_{T.ном}$  - паспортное значение мощности рассматриваемых к установке силовых трансформаторов;  
 $n$  - число трансформаторов на ПГВ, принимаем равным 2.

Также определим для полученного годового графика активной мощности годовое потребление электрической энергии промышленным предприятием с группой чугуно-литейных цехов:

$$W_{год} = \sum_{i=1}^{n=48} W_i = \sum_{i=1}^{n=48} P_i \cdot t_i, \quad (55)$$

где  $i$  - номер ступени годового графика активной мощности;  
 $n$  - Общее число ступеней годового графика активной мощности, принято равным 48 шт.;  
 $W_i$  - потребление электрической энергии на  $i$ -й ступени годового графика активной мощности, кВт·ч;  
 $P_i$  - активная мощность на  $i$ -й ступени годового графика активной мощности, кВт;  
 $t_i$  - продолжительность  $i$ -й ступени годового графика активной мощности, ч.

Среднее значение коэффициента загрузки, определяется для каждого из выбранным вариантам установки силовых трансформаторов ТДН40000/110/20 или ТДН 63000/110/20:

$$\hat{k}_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n=48} k_i}{n}, \quad (56)$$

где  $i$  – номер ступени годового графика мощности;

$n$  - Общее число ступеней годового графика активной мощности, принято равным 48 шт.;

$k_i$  – коэффициент загрузки на  $i$ -й ступени годового графика нагрузок.

Все расчеты по выражениям (54) - (56) выполним используя данные таблицы 13 в MS Excel, результаты занесем в таблицу 14.

Таблица 14 - Расчет потребления электрической энергии и коэффициентов загрузки

Длительность ступени, ч	S <sub>i</sub> , кВА	P <sub>i</sub> , кВт	W <sub>i</sub> , кВт·ч	ТДН 63000	ТДН 40000
				$k_{3i}$	$k_{3i}$
1	2	3	4	5	6
150	57729,21	39736,94	5960541	0,458168	0,721615
150	57729,21	39736,94	5960541	0,458168	0,721615
150	57729,21	39736,94	5960541	0,458168	0,721615
150	54842,75	37750,09	5662514	0,43526	0,685534
150	54842,75	37750,09	5662514	0,43526	0,685534
150	54842,75	37750,09	5662514	0,43526	0,685534
150	54842,75	37750,09	5662514	0,43526	0,685534
150	54842,75	37750,09	5662514	0,43526	0,685534
150	54842,75	37750,09	5662514	0,43526	0,685534
150	54842,75	37750,09	5662514	0,43526	0,685534
150	51956,29	35763,25	5364487	0,412352	0,649454
150	51956,29	35763,25	5364487	0,412352	0,649454
150	51956,29	35763,25	5364487	0,412352	0,649454
150	51956,29	35763,25	5364487	0,412352	0,649454
150	51956,29	35763,25	5364487	0,412352	0,649454
150	49069,83	33776,4	5066460	0,389443	0,613373
150	49069,83	33776,4	5066460	0,389443	0,613373
150	49069,83	33776,4	5066460	0,389443	0,613373
150	49069,83	33776,4	5066460	0,389443	0,613373
215	49069,83	33776,4	7261926	0,389443	0,613373
215	49069,83	33776,4	7261926	0,389443	0,613373

Продолжение таблицы 14

1	2	3	4	5	6
215	46616,34	32087,58	6898829	0,369971	0,582704
215	46616,34	32087,58	6898829	0,369971	0,582704
215	46616,34	32087,58	6898829	0,369971	0,582704
215	46616,34	32087,58	6898829	0,369971	0,582704
215	46616,34	32087,58	6898829	0,369971	0,582704
215	46616,34	32087,58	6898829	0,369971	0,582704
215	46616,34	32087,58	6898829	0,369971	0,582704
150	46183,37	31789,55	4768433	0,366535	0,577292
150	46183,37	31789,55	4768433	0,366535	0,577292
150	46183,37	31789,55	4768433	0,366535	0,577292
150	46183,37	31789,55	4768433	0,366535	0,577292
150	46183,37	31789,55	4768433	0,366535	0,577292
215	44162,85	30398,76	6535733	0,350499	0,552036
215	44162,85	30398,76	6535733	0,350499	0,552036
215	44162,85	30398,76	6535733	0,350499	0,552036
215	44162,85	30398,76	6535733	0,350499	0,552036
215	44162,85	30398,76	6535733	0,350499	0,552036
215	41709,35	28709,94	6172637	0,331027	0,521367
215	41709,35	28709,94	6172637	0,331027	0,521367
215	41709,35	28709,94	6172637	0,331027	0,521367
215	41709,35	28709,94	6172637	0,331027	0,521367
215	41709,35	28709,94	6172637	0,331027	0,521367
215	39255,86	27021,12	5809541	0,311554	0,490698
215	39255,86	27021,12	5809541	0,311554	0,490698
215	39255,86	27021,12	5809541	0,311554	0,490698
215	39255,86	27021,12	5809541	0,311554	0,490698
215	39255,86	27021,12	5809541	0,311554	0,490698
215	39255,86	27021,12	5809541	0,311554	0,490698
Годовое потребление электрической энергии, кВт·ч			283491770,8	-	-
Среднее годовое значение коэффициента загрузки				0,37891952	-
Среднее годовое значение коэффициента загрузки				0,59679825	

Проанализируем данные полученные в таблице 14, для этого будем использовать значения оптимальных коэффициентов загрузки полученные в выражениях (48) для трансформатора ТДН 40000/110/20 кВ и значение полученное в (49) для трансформатора ТДН 63000/110/20 кВ.

Определим отклонение среднегодового значения коэффициента загрузки для варианта с установкой на ПГВ двух трансформаторов марки ТДН 40000/110/20 кВ используя значение полученное в (48) и в таблице 14:

$$\Delta k_{\%,40} = \left( \frac{\hat{k}_{\Sigma,40}}{k_{onm}} - 1 \right) \cdot 100 = \left( \frac{0,56967}{0,46} - 1 \right) \cdot 100 = 29,7\% \quad (57)$$

Определим отклонение среднегодового значения коэффициента загрузки для варианта с установкой на ПГВ двух трансформаторов марки ТДН 63000/110/20 кВ используя значение полученное в (49) и в таблице 14:

$$\Delta k_{\%,63} = \left( 1 - \frac{\hat{k}_{\Sigma,63}}{k_{onm}} \right) \cdot 100 = \left( 1 - \frac{0,3789}{0,45} \right) \cdot 100 = 15,8\% \quad (58)$$

Так как значение полученное в (57) больше значения полученного в (58), то трансформатор марки ТДН 63000/110/20 кВ будет работать более эффективно, то есть ближе к максимальному значению КПД в течении года. Основываясь на этом сравнении, к установке на ПГВ промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов примем два силовых трансформатора марки ТДН 63000/110/20 кВ.

### 3.2 Выбор питающих кабелей для ПГВ напряжением 110 кВ

Согласно задания было определено значение уровня напряжения от внешней энергосистемы для промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов [24], [25]. Так как для предприятия выбрано размещение подстанции глубокого ввода (ПГВ), то необходимо определить способ питания. Предлагается использовать кабельные линии напряжением 110 кВ, которые будут проложены от границ промышленного предприятия с группой-чугуно-литейных цехов до ПГВ. Выбор кабельных линий является оптимальным и не требует установки на территории промышленного предприятия опор воздушных линий электропередачи.

Выбор кабелей напряжением 110 кВ будем производить по экономической плотности тока. Данная методика требует определения, на первом этапе выбора, числа часов использования максимальной мощности. Число часов использования максимальной мощности определим по выражению:

$$T_M = \frac{W_{год}}{P_{max}} = \frac{283491770,8}{39736,94} = 7134,212 \text{ ч}, \quad (59)$$

где  $W_{год}$  – годовое значение потребляемой энергии, определено в таблице 14, кВт·ч;

$P_{max}$  – значение максимально потребляемой активной мощности, равно значению первой ступени годового графика активной мощности предприятия, кВт.

По значению полученному в (59) определим значение экономической плотности тока  $j_{эк} = 2,7$  при условии использования в проекте кабеля из шитого полиэтилена с медными жилами.

Расчетный ток выбираемого кабеля определим по выражению учитывая, что каждый кабель должен обеспечивать передачу полной мощности предприятия:

$$I_{max} = \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{57729,21}{\sqrt{3} \cdot 110} = 302,99 \approx 303 \text{ А}, \quad (60)$$

где  $S_{max}$  – значение первой ступени годового графика полной мощности, кВА.

$U_{ном}$  – значение напряжения для кабельной линии, кВ.

Экономическое сечение кабеля определим по выражению:

$$F_э = \frac{I_{max}}{j_{эк}} = \frac{303}{2,7} = 112,22 \text{ мм}^2 \quad (61)$$

где  $I_{max}$  – расчетный ток выбираемого кабеля по выражению (60), А;

$j_{эк}$  – экономическая плотность тока, определена по числу часов использования максимальной мощности равной 2,7.

Выберем кабель из сшитого полиэтилена (СП) с номинальным напряжением 110 кВ марки ПвПг 185/95 с сечением жилы 185 мм<sup>2</sup>.

Выполним проверку выбранного кабеля на термическую стойкость. Длительно допустимый ток (ДДТ) кабеля при прокладке его в кабельных лотках равен  $I_{табл} = 610$  А.

Определим длительно допустимый ток для выбранного кабеля учитывая одновременную прокладку в одной траншее двух кабелей:

$$I_{ДД} = k_1 \cdot k_2 \cdot I_{табл} = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 610 = 494 \text{ А}, \quad (62)$$

где  $I_{табл}$  – табличное значение тока для выбранного сечения, для выбранного кабеля равно 610 А;

$k_1$  – коэффициент, учитывающий совместную прокладку двух цепей;

$k_2$  – коэффициент, учитывающий прокладку в закрытых лотках.

Значение длительно допустимого тока превышает значение максимального расчетного тока:

$$I_{ДД} = 494 > I_{max} = 303 \quad (63)$$

Исходя из условия (63) выбранный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена марки ПвПг 185/95 с сечением жилы 185 мм<sup>2</sup> прошел проверку по длительно допустимому току и может быть принят к использованию для питания ПГВ предприятия с группой чугуно-литейных цехов.

### 3.3 Выбор коммутационных аппаратов

Так как для системы электроснабжения предприятия с группой чугуно-литейных цехов выбрана подстанция глубокого ввода, на которой отсутствует распределительное устройство 110 кВ, то выбор коммутационных аппаратов выполним для распределительного устройства 20 кВ. В качестве коммутационных аппаратов в распределительном устройстве 20 кВ будем использовать выключатели. Предпочтение в проекте отдадим вакуумным выключателям из-за низкой вероятности появления коммутационных перенапряжений в системе электроснабжения [22], для выбора выключателей воспользуемся методиками и параметрами оборудования представленными в [1] и [9]. Методика выбора выключателей устанавливаемых на ПГВ предприятия с группой чугуно-литейных цехов аналогична методике представленной выражениями (37), (39), (41), (42) и (43). Используя данные выражения составим таблицу 15, в которой укажем расчетные и каталожные значения для выбираемых выключателей. Анализ каталогов производителей позволил определить в качестве используемых выключателей выключатель марки ВВУ-СЭЩ 20, производства завода «Самарский электрощит» [1].

Таблица 15 - Выключатели марки ВВУ-СЭЩ 20 отходящих линий ПГВ

Обозначение	Расчетные значения			Каталожные значения		
	$i$ , кА	$B_k$ , кА <sup>2</sup> ·с	$I_p$ , А	$i_{ном}$ , кА	$B_{кном}$ , кА <sup>2</sup> ·с	$I_{ном}$ , А
1	2	3	4	5	6	7
ТП-1	2,9	120	181	20	1200	1000
ТП-3	2,6	110	13	20	1200	1000
ТП-4	3	130	95	20	1200	1000
ТП-5	2,8	120	95	20	1200	1000
ТП-6	2,6	121	389	20	1200	1000

ТП-7	2,8	120	33	20	1200	1000
ТП-9	2,5	110	426	20	1200	1000
ТП-10	2,7	120	78	20	1200	1000
ТП-13	2,4	100	125	20	1200	1000

Продолжение таблицы 15

1	2	3	4	5	6	7
ТП-14	2,5	110	121	20	1200	1000
Печь-1	3,8	28,9	385	20	1200	1000
Печь-2	3,8	28,9	385	20	1200	1000

### 3.4 Релейная защита

В данном разделе будет выполнен расчет уставок для:

- Максимальной токовой защиты (МТЗ) отходящих линий;
- Токовой отсечки (ТО) отходящих линий;
- Защиты от перегрузки отходящих линий.

Методика расчета уставок максимальной токовой защиты отходящих линий ПГВ предприятия. Первое условие выбора уставки МТЗ:

$$I_{сз.мах} > I_{раб.мах} \quad (64)$$

где  $I_{сз.мах}$  – ток срабатывания реле, А;

$I_{раб.мах}$  – номинальный ток защищаемого участка, А.

Из (64), что ток срабатывания реле должен быть больше, чем номинальный ток защищаемого участка, иначе защита будет реагировать.

Второе условие выбора уставки МТЗ

$$I_{вз} > I_{сзэд} \quad (65)$$

где  $I_{вз}$  – ток возврата реле, А;

$I_{сзэд}$  – ток самозапуска электродвигателей, А.

Из (65) следует, что ток возврата реле должен быть больше, чем ток самозапуска электродвигателей на защищаемом участке, во избежание повторного срабатывания реле.

Ток срабатывания защиты:

$$I_{сз} = \frac{k_3 \cdot I_{сзП}}{k_6} \cdot I_{раб.мах}, \quad (66)$$

где  $k_3$  – коэффициент запаса, принимается равным 1,05;

$k_6$  – коэффициент возврата, принимается равным 0,92.

По (66) ток срабатывания защиты для линии питающей ТП-6 от ПГВ:

$$I_{сз} = \frac{1,02 \cdot 30}{1,5} \cdot 33 = 673 \text{ A} \quad (67)$$

Ток срабатывания реле:

$$I_{ср} = \frac{I_{сз} \cdot K_{сх}}{K_m}, \quad (68)$$

где  $I_{ср}$  - ток срабатывания реле, А;

$K_m$  - коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока.

По (68) ток срабатывания реле для линии питающей ТП-6 от ПГВ:

$$I_{ср} = \frac{673 \cdot 1,3}{20} = 4,7 \text{ A} \quad (69)$$

Коэффициент чувствительности МТЗ:

$$K_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{\text{к}}^{(3)}}{I_{\text{сз}}}, \quad (70)$$

где  $I_{\text{сз}}$  - ток срабатывания защиты, определенный по выражению (68), А;

$I_{\text{к}}^{(3)}$  - периодическая составляющая трехфазного тока короткого замыкания, определенная по выражению (31), А.

По (70) для линии питающей ТП-6 от ПГВ:

$$K_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1100}{673} = 1,5. \quad (71)$$

Согласно значению полученному в (71), так как коэффициент чувствительности выше 1 МТЗ питающей линии до ТП-6 от ПГВ работает.

Расчет уставок токовой отсечки для отходящих с ПГВ линий выполняется по следующей методике.

Ток срабатывания токовой отсечки:

$$I_{\text{ТО}} = k_{\text{з}} \cdot I_{\text{к}}^{(3)} \quad (72)$$

где  $k_{\text{з}}$  – коэффициент запаса, принимается равным 1,1;

$I_{\text{к}}^{(3)}$  - периодическая составляющая трехфазного тока короткого замыкания, определенная по выражению (31), А.

По (72) для линии питающей ТП-6 от ПГВ:

$$I_{\text{ТО}} = 1,1 \cdot 1100 = 1210 \text{ А} \quad (73)$$

Ток срабатывания реле для ТО определяется аналогично току срабатывания реле для МТЗ по выражению (68) для линии питающей ТП-6 от ПГВ:

$$I_{cp} = \frac{1210 \cdot 1,3}{20} = 4,5 \text{ A} \quad (74)$$

Коэффициент чувствительности для ТО определяется аналогично МТЗ по выражению (70) для линии питающей ТП-6 от ПГВ получим:

$$K_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1100}{1210} = 1,6 \quad (75)$$

Согласно значению полученному в (75), так как коэффициент чувствительности выше 1, ТО питающей линии до ТП-6 от ПГВ работает.

Расчет уставок защиты от перегрузки.

Ток срабатывания защиты:

$$I_{\text{п}} \geq \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{ном}}, \quad (76)$$

где  $k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки реле, принимается равным 1,2.

$k_{\text{в}}$  - коэффициент возврата, принимается равным 0,95;

$I_{\text{ном}}$  - номинальный расчетный ток в линии, принимается согласно данным таблицы **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

По (76) для питающей линии до ТП-6 от ПГВ:

$$I_{\text{п}} \geq \frac{1,2}{0,95} \cdot 38 = 48 \text{ A} \quad (77)$$

Для каждой отходящей от ПГВ линии расчеты выполним по аналогии, все результаты сведем в таблицу 16.

Таблица 16 - Уставки релейной защиты отходящих линий

Линия	Токи срабатывания			Токи защиты	
	$I_{МТЗ}, А$	$I_{ТО}, А$	$I_{п}, А$	$I_{МТЗ}, А$	$I_{ТО}, А$
ПГВ - ТП-1	787	1231	192	4,5	4,6
ПГВ - ТП-3	675	1211	283	4,2	4,3
ПГВ - ТП-4	875	1233	17	4,3	4,4
ПГВ - ТП-5	753	1222	103	4,5	4,4
ПГВ - ТП-6	673	1210	48	4,7	4,5
ПГВ - ТП-7	766	1245	407	4,8	4,7
ПГВ - ТП-9	674	1209	433	4,7	4,4
ПГВ - ТП-10	780	1240	82	4,3	4,3
ПГВ - ТП-13	587	1099	92	4,2	4,3
ПГВ - ТП-14	444	879	101	4,0	4,1
ПГВ - Печь-1	1343	1898	390	4,5	4,5
ПГВ - Печь-2	1343	1898	390	4,5	4,5

### 3.5 Система молниезащиты ПГВ

Упрощенная конструкция подстанции глубокого ввода (ПГВ) предприятия с группой чугуно-литейных цехов не позволяет отказаться от мер по обеспечению молниезащиты. Так как прямые удары молнии (ПУМ) опасны для силовых трансформаторов. Поэтому для защиты от ПУМ территорию ПГВ необходимо обеспечить молниеотводами требуемых параметров.

Для расчета системы молниезащиты используем методику [18]. Определим размеры ПГВ 21,56×29,76 м., а за высоту защищаемого объекта 9 м, так как такая высота оборудования, обеспечивающего ввод токоведущих частей в закрытое распределительное устройство 20 кВ.

Рассмотрим установку двух стальных молниеотводов марки СМ-25 с высотой  $h = 25$  м.

Предельное расстояние между молниеотводами (МО) принимаем согласно условию:

$$L < L_{MO} \quad (78)$$

где  $L$  - расстояние между двумя соседними молниеотводами, м;

$L_{MO}$  - высота выбранного молниеотвода, принята равной 25 м.

Определим высоту вершины конуса МО:

$$h_0 = 0,85 \cdot h = 0,85 \cdot 25 = 25,25 \text{ м}, \quad (79)$$

Определим высоту средней части зоны защиты:

$$h_c = h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} L_{MO})(L - L_{MO}). \quad (80)$$

Для проектируемой системы молниезащиты по (80) получим:

$$h_c = 25,25 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot 25)(20 - 25) = 26,14 \text{ м}. \quad (81)$$

Определим радиус зоны молниезащиты на уровне земли:

$$r_0 = (1,2 - 2 \cdot 10^{-3} L_{MO}) L_{MO} = (1,2 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 25) \cdot 25 = 28,75 \text{ м}. \quad (82)$$

Ширина средней части проектируемой зоны молниезащиты:

$$r_{cx} = r_0 (h_c - h_x) \frac{1}{h_c} = 28,75 \cdot (26,14 - 10) \frac{1}{26,14} = 17,75 \text{ м}. \quad (83)$$

Радиус проектируемой зоны молниезащиты на высоте защищаемого объекта:

$$r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} h)(h - 1,2 h_x) \quad (84)$$

По (84) получим:

$$r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 25)(25 - 1,2 \cdot 10) = 13,65 \text{ м} \quad (85)$$

Угол защиты для проектируемой системы молниезащиты:

$$a^{(A)} = \arctg \frac{r_0}{h_0} = \arctg \frac{28,75}{25,25} = 41,29^\circ. \quad (86)$$

Выводы по разделу 3. Для установки на подстанции глубокого ввода (ПГВ) предприятия с группой чугуно-литейных цехов выбраны силовые трансформаторы марки ТДН 63000/110/20 кВ.

Выбор силовых трансформаторов проводился по значению оптимального коэффициента загрузки, который соответствует минимуму потерь электрической энергии в трансформаторах.

Для трансформатора марки ТДН 40000 значение оптимального коэффициента загрузки определено равным 0,46, а отклонение от среднего расчетного значения коэффициента загрузки согласно годового графика составил  $\Delta k_{\%,40} = 29,7 \%$ . Для варианта с установкой на ПГВ двух трансформаторов марки ТДН 63000 отклонение от среднего расчетного значения коэффициента загрузки согласно годового графика составил  $\Delta k_{\%,63} = 15,8 \%$ .

Так как значение полученное для трансформаторов марки ТДН 400000 больше значения полученного для трансформаторов ТДН 63000, то было принято решение использовать именно трансформатор мощностью 63 МВА

для установки на ПГВ так как он будет работать более эффективно, то есть ближе к максимальному значению КПД в течении года.

Для питания трансформаторов ПГВ от линии 110 кВ энергосистемы выбраны два кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена марки ПвПг 185/95. Выполнена проверка по длительно допустимому току.

Прокладка кабелей предполагается по территории промышленного предприятия с устройством пункта перехода ВЛ 110 кВ от энергосистемы в КЛ 110 кВ на границе предприятия. Для установки в закрытом распределительном устройстве (ЗРУ) 20 кВ ПГВ выбраны вакуумные выключатели марки ВВУ-СЭЩ-20.

Для защиты отходящих от ПГВ кабельных линий рассчитаны уставки: максимальной токовой защита (МТЗ) отходящих линий, токовой отсечки (ТО) отходящих линий и защита от перегрузки отходящих линий. Для защиты ПГВ от ПУМ выполнен расчет системы молниезащиты выполненной двумя стержневыми молниеотводами марки СМ-25 с высотой 25 м.

## Заключение

Объектом выпускной квалификационной работы является промышленное предприятие с группой чугунолитейных цехов.

Для объекта выпускной квалификационной работы представлено описание производимой продукции, а также определены цеха промышленного предприятия относящиеся к основным и вспомогательным. Представлен подробный генеральный план промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов.

Согласно исходных данных определена районная узловая подстанция с классом напряжения 220/110/10 кВ которая обладает достаточной мощностью для покрытия нужд промышленного предприятия в электрической мощности. Определено, то подстанция расположена на расстоянии 20 км от предприятия и на генеральном плане указано ближайшее место прихода питающей линии напряжением 110 кВ с подстанции к предприятию.

Для предприятия составлен перечень цехов и определены установленные мощности и эффективное число электроприемников для каждого цеха. Эти данные будут использованы при проектировании системы электроснабжения промышленного предприятия.

Представлена краткая характеристика климата региона, в котором планируется расположение промышленного предприятия, для которого проектируется система электроснабжения.

Для проектируемой системы электроснабжения промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов выполнен выбор напряжения распределительной сети 20 кВ. Данный класс напряжения позволяет снизить потери мощности примерно на 76% по сравнению с кабельными линиями напряжением 10 кВ, которые в основном применяются в распределительных сетях промышленных предприятий, а потери напряжения в кабельных линиях снизятся в два раза по сравнению с классом напряжения 10 кВ. Исходя из этого применение класса напряжения 20 кВ для системы внутривозовского

электроснабжения промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов является оптимальным.

Выполнен расчет нагрузок промышленного предприятия, который позволил определить расчетные активные, реактивные и полные мощности всех цехов предприятия, а также определить расчетные токи каждого цеха и высоковольтного электроприемника, к которым, согласно заданию, относятся две печных установки. Также определены суммарные значения активной мощности по предприятию  $P_{\Sigma} = 41170$  кВт, значение реактивной мощности  $Q_{\Sigma} = 39873,61$  квар и значение полной мощности  $S_{\Sigma} = 57729,21$  кВА. Эти значения будут использованы при разработке проекта ПГВ предприятия с группой чугуно-литейных цехов.

Для распределительной сети предприятия выполнен выбор требуемого сечения и типов кабельных линий, а также определен способ прокладки питающих КЛ в земле. Выбор КЛ проведен по длительно допустимому току, а проверка выполнена по потери напряжения. Для распределительной сети выбраны кабели марки АСБГ различных сечений, в зависимости от мощности ТП.

Выполнен расчет трехфазных токов короткого замыкания, результаты которого использованы при выборе коммутационных аппаратов. В качестве коммутационных аппаратов в ВКР приняты выключатели нагрузки, так как они обладают более высокой надежностью чем применение на вводе в ТП разъединителя-предохранителя, для установки на ТП выбраны выключатели нагрузки типа KLF20/630-275.

Для установки на подстанции глубокого ввода (ПГВ) предприятия с группой чугуно-литейных цехов выбраны силовые трансформаторы марки ТДН 63000/110/20 кВ. Выбор силовых трансформаторов проводился по значению оптимального коэффициента загрузки, который соответствует минимуму потерь электрической энергии в трансформаторах. Для трансформатора марки ТДН 40000 значение оптимального коэффициента загрузки определено равным 0,46, а отклонение от среднего расчетного

значения коэффициента загрузки согласно годового графика составил  $\Delta k_{\%,40} = 29,7$  %. Для варианта с установкой на ПГВ двух трансформаторов марки ТДН 63000 отклонение от среднего расчетного значения коэффициента загрузки согласно годового графика составил  $\Delta k_{\%,63} = 15,8$  %. Так как значение полученное для трансформаторов марки ТДН 400000 больше значения полученного для трансформаторов ТДН 63000, то было принято решение использовать именно трансформатор мощностью 63 МВА для установки на ПГВ так как он будет работать более эффективно, то есть ближе к максимальному значению КПД в течении года. Для питания трансформаторов ПГВ от линии 110 кВ энергосистемы выбраны два кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена марки ПвПг 185/95. Выполнена проверка по длительно допустимому току. Прокладка кабелей предполагается по территории промышленного предприятия с устройством пункта перехода ВЛ 110 кВ от энергосистемы в КЛ 110 кВ на границе предприятия. Для установки в закрытом распределительном устройстве (ЗРУ) 20 кВ ПГВ выбраны вакуумные выключатели марки ВВУ-СЭЩ-20.

Для защиты отходящих от ПГВ кабельных линий рассчитаны уставки: максимальной токовой защита (МТЗ) отходящих линий, токовой отсечки (ТО) отходящих линий и защита от перегрузки отходящих линий. Для защиты ПГВ от ПУМ выполнен расчет системы молниезащиты выполненной двумя стержневыми молниеотводами марки СМ-25 с высотой 25 м.

В результате выполнения ВКР поставленные цели и задачи достигнуты – спроектирована система электроснабжения промышленного предприятия с группой чугуно-литейных цехов.

## Список используемых источников

1. АО «Группа компаний «Электрощит»-ТМ Самара». Каталог продукции. Вакуумные выключатели. // Веб-сайт компании АО «Группа компаний «Электрощит»-ТМ Самара». 2021. URL: <https://www.electroshield.ru/catalog/vakuumnie-vykluchateli/> (дата обращения: 21.05.2021).
2. Вахнина В.В. Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий. Методические указания к курсовому проектированию. Тольятти: ТГУ, 2006. 78 с.
3. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением ниже 1 кВ [Электронный ресурс] : утв. приказом от 21.10.1993. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-28249-93> (дата обращения: 14.02.2022).
4. ГОСТ 9680-77. Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и более. Ряд номинальных мощностей. М.: Издательство стандартов, 1977. 4 с.
5. Группа СВЭЛ. Каталог продукции // Веб-сайт компании "Группа СВЭЛ". 2021. URL: <https://svel.ru/catalog/> (дата обращения: 17.03.2022).
6. Завод «Севкабель». Каталог продукции // Веб-сайт компании Завод «Севкабель». 2021. URL: <https://sevkab.ru/catalog/> (дата обращения: 19.04.2022).
7. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие. Москва: Интернет-Инжиниринг, 2006. 671 с.
8. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. 5-е изд. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2014. 607 с.
9. Немировский А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций. Учебное пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 174 с.

10. Николаев В. Безаварийная и эффективная эксплуатация устройств компенсации реактивной мощности низкого напряжения // Я электрик. – 2009. – № 17. – С. 50–54.
11. Правила устройства электроустановок. 7-е издание / Ред. Л.Л. Жданова, Н. В. Ольшанская. М.: НЦ ЭНАС, 2013. 104 с.
12. Рожкова Л.Д., Карнеева Л.К., Чиркова Т.В. Электрооборудование электрических станций и подстанций. М.: Академия, 2013. 449 с.
13. РТМ 36.18.32.6-92. Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий. Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс
14. Сазыкин В.Г. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах. Учебное пособие. Краснодар: КубГАУ, 2017. 255 с.
15. Сафронов В.И. Электротехнологические установки. Учебное пособие. Челябинск: ЮУрГУ, 2014. 124 с.
16. Сивков А.А. Основы электроснабжения. Учебное пособие. Томск: Национальный исследовательский университет Томский политехнический университет, 2014. 184 с.
17. Справочные данные по расчетным коэффициентам электрических нагрузок, шифр М788-1069/ ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, 1990 г.
18. Степкина Ю.В., Салтыков В.М. Проектирование электрической части понизительной подстанции. Тольятти: ТГУ, 2007. 124 с.
19. Фирма «UESA» GMBH. Общий каталог продукции «UESA» GMBH // Веб-сайт компании Фирма «UESA» GMBH. 2021. URL: <https://www.uesa.de/ru/servis-skachivanie/katalogi-produkcii/> (дата обращения: 11.04.2022)
20. Хрущев Ю.В. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических установках. Учебное пособие. Томск: Национальный

исследовательский университет Томский политехнический университет, 2012. 160 с.

21. Geng Y. Three-phase modeling of 40.5-kV vacuum circuit breaker switching off shunt reactors and overvoltage suppression measure analysis. Electric Power Systems Research

22. Guo Y. Reignition over voltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in off-shore wind farms. International Journal of Electrical Power & Energy Systems

23. Hafner S. Emergence of New Economics Energy Transition Models: A Review. Ecological Economics

24. Liang R. Partial discharge location of power cables based on an improved single-terminal method. Electric Power Systems Research.

25. Seong M. Analysis of electric and magnetic fields distribution and safe work zone of 154 kV power line in underground power cable tunnel. Safety Science.