

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 машиностроительного предприятия с группой сталелитейных цехов

Обучающийся

М.Р. Кадыров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., В.И. Платов

(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

Выполнен проект электроснабжения машиностроительного предприятия с группой сталелитейных цехов расположенного в регионе Средняя Волга.

Дана краткая характеристика предприятия и описание производимой продукции. Для проектирования системы электроснабжения выполнен расчет электрических нагрузок предприятия, с учетом выбранных установок компенсации реактивной мощности. Для установки в цеховых трансформаторах приняты трансформаторы масляные напряжением 6/0,4 кВ.

Для питания системы электроснабжения предприятия выбраны два силовых трансформатора марки ТДТН 63000/110/35/6. Обмотка 35 кВ обеспечивает питание печных трансформаторов сталеплавильных печей. Для распределительной сети используются обмотки напряжением 6 кВ.

Выполнен расчет токов короткого замыкания. Так как на предприятии установлены высоковольтные синхронные электрические двигатели, то для линий питающих этих потребителей расчет токов короткого замыкания выполнен с учетом подпитки тока КЗ.

Выбраны кабельные линии для распределительной сети предприятия. Выбраны преимущественно кабели с алюминиевыми жилами, однако для части цехов, с высокой нагрузкой выбраны кабели с медными жилами.

Выбраны электрические аппараты: вакуумные выключатели, трансформаторы тока и трансформаторы напряжения. Представлен расчет технико-экономических показателей проектируемой системы электроснабжения промышленного предприятия.

Выпускная квалификационная работы выполнена на 62 листе формата А4, содержит 4 рисунка и 15 таблиц. Графическая часть представлена шестью листами формата А1.

## Abstract

A power supply project was completed for a machine-building enterprise with a group of steel foundries located in the Middle Volga region.

A brief description of the enterprise and a description of the products produced are given. For the design of the power supply system, the calculation of the electrical loads of the enterprise was carried out, taking into account the selected reactive power compensation settings. For installation in workshop transformers, oil transformers with a voltage of 6/0.4 kV are accepted.

Two power transformers of the TDTN 63000/110/35/6 brand were selected to power the power supply system of the enterprise. The 35 kV winding provides power to the furnace transformers of the steelmaking furnaces. For the distribution network, windings with a voltage of 6 kV are used.

The calculation of short-circuit currents is carried out. Since high-voltage synchronous electric motors are installed at the enterprise, for the lines supplying these consumers, the calculation of short-circuit currents is made taking into account the short-circuit current feeding.

Cable lines for the distribution network of the enterprise have been selected. Mostly cables with aluminum conductors were selected, however, for some workshops with a high load, cables with copper conductors were selected.

Selected electrical devices: vacuum circuit breakers, current transformers and voltage transformers. The calculation of technical and economic indicators of the designed power supply system of an industrial enterprise is presented.

The final qualifying work is made on 62 sheets of A4 format, contains 4 figures and 15 tables. The graphic part is represented by six sheets of the A1 format.

## Содержание

Введение.....	3
1 Описание объекта проектирования .....	5
2 Выбор трансформаторов и компенсирующих устройств .....	9
3 Схема электроснабжения промышленного предприятия .....	15
4 Электрические нагрузки предприятия .....	19
5 Трансформаторы ГПП .....	24
6 Распределительная сеть .....	25
7 Токи короткого замыкания.....	30
8 Электрические аппараты системы электроснабжения.....	40
9 Техничко-экономические показатели .....	46
Заключение .....	54
Список используемых источников.....	58

## Введение

Промышленный сектор России включает в себя большое число предприятий различных отраслей. При этом продукция выпускаемая на одних предприятиях является основой для строительства новых предприятий других отраслей. Рассматриваемое в рамках выпускной квалификационной работы (ВКР) промышленное предприятие – машиностроительное предприятие с группой сталелитейных цехов обеспечивает оборудованием предприятия горно-добывающей отрасли. В рамках выполнения ВКР, на первом этапе проектирования системы электроснабжения необходимо выполнить анализ проектируемого предприятия, а также дать краткое описание производимой им продукции. При проектировании системы электроснабжения необходимо верно определить категории надежности электроснабжения потребителей для предприятия в целом, а также для каждого цеха предприятия в частности согласно [7] и [1].

Объектом ВКР является машиностроительное предприятие с группой сталелитейных цехов.

Предметом ВКР является система электроснабжения машиностроительного предприятия с группой сталелитейных цехов.

Целью ВКР является разработка проекта системы электроснабжения машиностроительного предприятия с группой сталелитейных цехов. С четом поставленной цели сформулируем задачи ВКР:

- Описание машиностроительного предприятия для которого проектируется система электроснабжения;
- Расчет электрических нагрузок промышленного предприятия и определение необходимости компенсации реактивной мощности;
- Проектирование распределительной сети промышленного предприятия с выбором числа цеховых трансформаторных подстанций, места размещения главной понизительной подстанции

предприятия, выбором сечений кабельных линий, выбором оборудования;

- Определение технико-экономических показателей спроектированной системы электроснабжения промышленного предприятия.

Объект выпускной квалификационной работы – это типовое машиностроительное предприятие.

Исходные данные для выполнения выпускной квалификационной работы получены из [1].

При проектировании системы электроснабжения машиностроительного предприятия с группой сталелитейных цехов необходимо учесть специфику технологического процесса плавки и литья для группы сталелитейных цехов, а также обеспечить питание сталеплавильных печей.

При разработке проекта электроснабжения использованы действующие нормативные акты: стандарты, инструкции, методические указания, что позволило выполнить проект реконструкции удовлетворяющий требованиям надежности и безопасности, а также высоким показателям технико-экономической эффективности в первую очередь за счет использования оборудования российского производства.

## 1 Описание объекта проектирования

Описание объекта проектирования при выполнении выпускной квалификационной работы (ВКР) позволит определить исходные данные для разработки проекта электроснабжения предприятия.

Объект ВКР - машиностроительное предприятие с группой сталелитейных цехов включает в себя не только сталелитейный, но и чугунолитейный цех. Предприятие расположено в регионе Среднее Поволжье. Климат региона размещения промышленного предприятия - умеренно континентальный, т.е. лето тёплое, со среднемесячной температурой воздуха июля от +22° до +25°С; зима довольно холодная, среднемесячная температура воздуха января и февраля от -10° до -15°С. Данный климат не накладывает необходимости выбора оборудования системы электроснабжения с повышенными требованиями по климатическому исполнению.

Продукция производимая на предприятии относится к оборудованию используемому на горно-обогачительных комбинатах:

- шаровые мельницы со стальными мелющими шарами диаметром от 100 до 120 мм и массой от 4 до 8 кг;
- легированные чугунные мелющие шары;
- низколегированные чугунные мелющие шары.

Основными цехами задействованными в производстве готовой продукции являются:

- Чугунолитейный цех (Цех №2);
- Сталелитейный цех (Цех №1);
- Шаропрокатный цех (Цех №7);
- Кузнечно-прессовый цех (Цех №6).

Для электроснабжения промышленного предприятия будет использована подстанция энергосистемы расположенная в 18 км от объекта ВКР. Питание системы электроснабжения предприятия будет выполнено на напряжении 110 кВ. Генеральный план промышленного предприятия с

группой сталелитейных цехов показан на рисунке 1 в масштабе 1:1000. Обозначение цехов промышленного предприятия по генеральному плану (рисунок 1) представлено в таблице 1. На промышленном предприятии установлены высоковольтные электроустановки перечень которых представлен в таблице электроприемники высокого напряжения. Перечень этих электроприемников представлен в таблице Установленные мощности и приведенное число электроприемников для всех цехов предприятия представлены в .

Таблица 1 - Состав предприятия

Краткое название цеха	Полное название цеха
Цех №1	Сталелитейный цех
Цех №2	Чугунолитейный цех
Цех №3	Компрессорная
Цех №4	Учебный корпус
Цех №5	Склад готовой продукции
Цех №6	Кузнечно-прессовый цех
Цех №7	Шаропрокатный цех
Цех №8	Ремонтно-механический цех
Цех №9	Термообрубной цех
Цех №10	Котельная
Цех №11	Модельный цех
Цех №12	Блок механических цехов
Цех №13	Заводоуправление
Цех №14	Кислородная станция

Таблица 2 - Высоковольтные электроприемники

Наименование ЭП	$P_n$ , кВт	$Q_n$ , квар	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	$k_3$	$U_n$ , кВ	Кол-во ЭП
Электродуговые печи с печными трансформаторами	15000	37500	0,40	2,29	0,50	35	2
Синхронные электродвигатели чугунолитейного цеха	1000	540	0,88	0,54	0,70	6	4
Дуговые чугуноплавильные печи	2000	4150	0,4	2,29	0,5	6	2
Синхронные электродвигатели шаропрокатного цеха	400	216	0,88	0,54	0,75	6	2



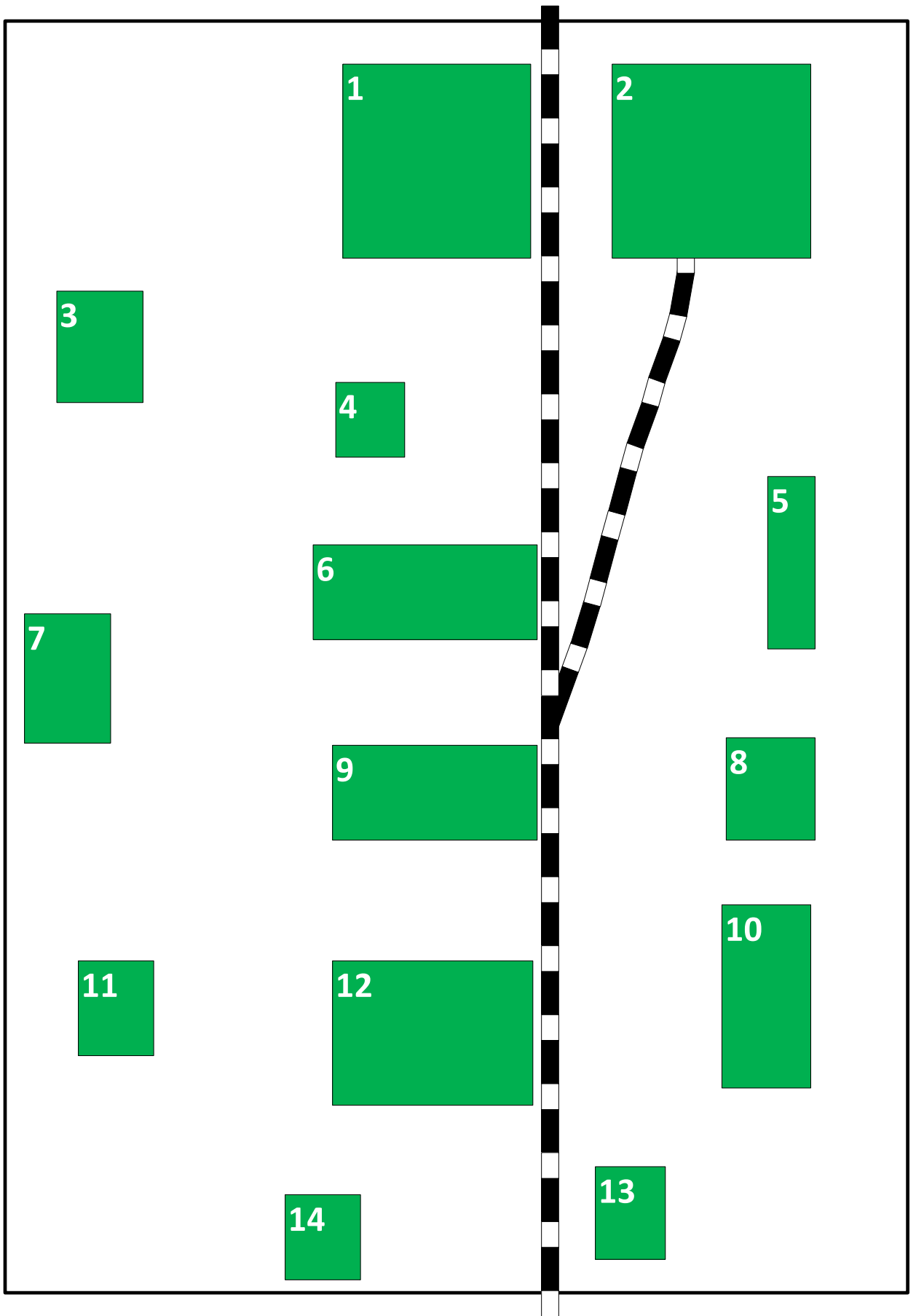


Рисунок 1 – Генеральный план (масштаб 1:1000)

Таблица 3 - Мощность цехов предприятия

Наименование цеха	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	$k_{и.ср}$	$n_э$	$I_p$ , А
Цех №1	8589	13398	0,54	1,56	0,57	52	22970
Цех №2	5423	9381	0,50	1,73	0,55	37	15639
Цех №3	537	472	0,75	0,88	0,72	9	1031
Цех №4	496	372	0,80	0,75	0,82	53	894
Цех №5	47	38	0,78	0,80	0,33	3	87
Цех №6	5322	6758	0,62	1,27	0,61	41	12415
Цех №7	1419	1660	0,65	1,17	0,56	14	3152
Цех №8	951	789	0,77	0,87	0,50	17	1235
Цех №9	1797	3228	0,48	1,83	0,55	17	5332
Цех №10	647	659	0,70	1,02	0,68	12	1332
Цех №11	2062	1649	0,78	0,80	0,54	38	3810
Цех №12	2416	2754	0,66	1,14	0,63	48	5287
Цех №13	206	161	0,79	0,78	0,72	5	377
Цех №14	760	668	0,75	0,88	0,67	17	1460

Выводы по разделу 1. Представлена краткая характеристика объекта выпускной квалификационной работы – промышленного предприятия с группой сталелитейных цехов. Определено, что предприятие расположено в регионе с умеренно-континентальным климатом, поэтому при проектировании системы электроснабжения может быть использовано оборудование класса УХЛ1. Представлено краткое описание продукции производимой промышленным предприятием, а также определены цеха задействованные в основном процессе производства продукции: чугунолитейный цех (Цех №2); сталелитейный цех (Цех №1); шаропрокатный цех (Цех №7); кузнечно-прессовый цех (Цех №6). Для каждого цеха определены исходные значения мощностей, а также представлен перечень высоковольтных электроприемников установленных на объекте ВКР.

## 2 Выбор трансформаторов и компенсирующих устройств

Число и мощность трансформаторов необходим для расчета электрических нагрузок промышленного предприятия. Методика расчета представлена в [5]. Рассмотрим методику выбора трансформаторов для питания нагрузок каждого цеха на примере сталелитейного цеха, для остальных цехов предприятия выбор будет произведен аналогично, а результаты сведем в итоговую ведомость выбора трансформаторов.

Число цеховых трансформаторных подстанций (ЦТП):

$$N_{ТП} = \frac{P_p}{k_3 \cdot S_{т.ном}} \quad (1)$$

где  $P_p$  – нагрузка цеха на стороне 0,4 кВ;

$k_3$  – коэффициент загрузки цеховых трансформаторов, при установке двух трансформаторов принимается равным 0,7;

$S_{т.ном}$  – номинальная мощность одного трансформатора, устанавливаемого на ЦТП, кВА.

Рассмотрим для установки в ЦТП сталелитейного цеха трансформаторов марки ТМ-2500/6 с номинальной мощностью 2500 кВА производства ООО «Тольяттинский Трансформатор», тогда по выражению (1):

$$N_{ТП} = \frac{8589}{0,7 \cdot 2500} = 4,9 \approx 5 \text{ (шт.)} \quad (2)$$

Из (2) получено, что для обеспечения питания нагрузок сталелитейного цеха необходимо принять пять ЦТП с двумя трансформаторами на каждой из ЦТП.

Итоговая ведомость выбранных трансформаторов для установки на ЦТП каждого цеха представлена в таблице 4.

Таблица 4 - Ведомость цеховых трансформаторов

Краткое название цеха	Кол-во ЦТП	Тип трансформаторов ЦТП	Число трансформаторов на ЦТП	Общее число трансформаторов для питания цеха
Цех №1	5	ТМ-2500/6	2	10
Цех №2	3	ТМ-2500/6	2	6
Цех №3	1	ТМГ-630/6	2	2
Цех №4	1	ТМГ-630/6	2	2
Цех №5	1	ТМГ-63/6	2	2
Цех №6	3	ТМ-2500/6	2	6
Цех №7	1	ТМ-2500/6	2	2
Цех №8	1	ТМ-2500/6	2	2
Цех №9	1	ТМ-2500/6	2	2
Цех №10	1	ТМГ-1600/6	2	2
Цех №11	1	ТМ-2500/6	2	2
Цех №12	1	ТМ-2500/6	2	2
Цех №13	1	ТМГ-400/6	2	2
Цех №14	1	ТМГ-1000/6	2	2

Трансформаторы питающие высоковольтные электрические печи выбираются с учетом коэффициента загрузки и мощности печей [6]. Особенности выбора печных трансформаторов связаны с тем, что они должны обеспечивать питание потребителей относящихся к переменной нагрузке.

Мощность печного трансформатора чугунолитейного цеха:

$$S_{ЭПТ} = k_n \cdot S_n = 1,3 \cdot 5000 = 6500 \text{ (кВА)} \quad (3)$$

где  $k_n$  – суточное число ударных толчков, принимаем равным 1,3;

$S_n$  - полная мощность электрической печи, кВА.

Для питания печей чугунолитейного цеха выбираем 2 печных трансформатора ЭТЦПК-7500/6 производства АО «Уралэлектротяжмаш».

Потери мощности в трансформаторах ЦТП определим по выражению [6]:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{XX} + \Delta P_{K3} \cdot k_3 \quad (4)$$

где  $\Delta P_{XX}$  - паспортное значение потерь холостого хода для выбранного трансформатора ЦТП, кВт;

$\Delta P_{K3}$  – паспортное значение потерь короткого замыкания для выбранного трансформатора ЦТП, кВт.

По (4) для сталелитейного цеха получим:

$$\Delta P_{\Sigma} = 3,9 + 23,5 \cdot 0,7 = 20,35 \text{ (кВт)} \quad (5)$$

Потери реактивной мощности в трансформаторах ЦТП определим по выражению [6]:

$$\Delta Q_{\Sigma} = \left( \frac{I_0}{100} + k_3 \cdot \frac{U_k}{100} \right) \cdot S_n \quad (6)$$

где  $I_0$  – паспортное значение тока холостого хода трансформатора, устанавливаемого на ЦТП, %;

$U_k$  – паспортное значение напряжения короткого замыкания трансформатора, устанавливаемого на ЦТП, %.

По (6) для сталелитейного цеха получим:

$$\Delta Q_{\Sigma} = \left( \frac{5,5}{100} + k_3 \cdot \frac{10,5}{100} \right) \cdot 2500 = 321,0 \text{ (квар)} \quad (7)$$

Расчет потерь для трансформаторов ЦТП всех цехов предприятия выполним по аналогии с расчетом для сталелитейного цеха согласно методике (4) и (6), результаты расчетов занесем в итоговую таблицу 5.

Таблица 5 - Ведомость расчетных потерь в трансформаторах ЦТП

Краткое название цеха	Тип трансформатора	Число трансформаторов на ТП	$\Delta P_{\Sigma}$ , кВт	$\Delta Q_{\Sigma}$ , квар
Цех №1	ТМ-2500/6	10	20,35	321,0
Цех №2	ТМ-2500/6	6	20,35	321,0
Цех №3	ТМГ-630/6	2	6,01	210,1
Цех №4	ТМГ-630/6	2	6,01	210,1
Цех №5	ТМГ-63/6	2	1,24	16,4
Цех №6	ТМ-2500/6	6	20,35	321,0
Цех №7	ТМ-2500/6	2	20,35	321,0
Цех №8	ТМ-2500/6	2	20,35	321,0
Цех №9	ТМ-2500/6	2	20,35	321,0
Цех №10	ТМГ-1600/6	2	12,36	293,6
Цех №11	ТМ-2500/6	2	20,35	321,0
Цех №12	ТМ-2500/6	2	20,35	321,0
Цех №13	ТМГ-400/6	2	11,45	196,6
Цех №14	ТМГ-1000/6	2	15,40	278,7

«Компенсация реактивной мощности – это очень важное мероприятие как в системах внутриводского электроснабжения, так и в системах электроснабжения общего назначения. Мероприятия по компенсации реактивной мощности позволяют снижать токовую нагрузку на линии электропередачи, повышать пропускную способность по активной мощности этих линий электропередачи» [7].

Представим методику выбора установок компенсации реактивной мощности (УКРМ), подробный расчет выбора мощности УКРМ выполним для сталелитейного цеха. Методика выбора требуемой мощности УКРМ включает в себя определение максимальной реактивной мощности, которая может быть передана через ЦТП, а затем определяется необходимая мощность УКРМ. В качестве УКРМ используются конденсаторные батареи (БК).

Максимальной реактивная мощность для ЦТП:

$$Q_T = \sqrt{(1,1 \cdot S_T \cdot N_T \cdot k_3)^2 - P_p^2} \quad (8)$$

где  $S_T$  - мощность трансформатора ЦТП, кВА;

$N_T$  - число ЦТП для питания нагрузок цеха, шт;

$k_3$  - коэффициент загрузки трансформаторов на ЦТП;

$P_p$  - активная мощность на стороне 0,4 кВ цеха, кВт.

Требуемая мощность УКРМ:

$$Q_{\text{БК}} = Q_p - Q_T \quad (9)$$

Для сталелитейного цеха по (8) и (9) получим:

$$Q_T = \sqrt{(1,1 \cdot 2500 \cdot 10 \cdot 0,7)^2 - 8589^2} = 17227 \text{ (квар)} \quad (10)$$

$$Q_{\text{БК}} = 13398 - 17227 = -3829 \text{ (квар)} \quad (11)$$

По значению полученному в (11) можно сделать вывод о том, что установка УКРМ в цеховой системе электроснабжения сталелитейного цеха не требуется.

В цеховой сети сталелитейного цеха компенсация реактивной мощности не требуется. Для остальных цехов расчет проводится аналогично. Результаты расчета сведены в таблицу 6.

Таблица 6 - Ведомость выбранных УКРМ

Краткое название цеха	Расчетная мощность УКРМ, квар	Тип УКРМ	Число УКРМ, шт	Реактивная мощность, квар
1	2	3	4	5
Цех №1	-3829	-	-	13398
Цех №2	816	УКРМ-850	1	8565
Цех №3	336	УКРМ-375	1	136
Цех №4	461	УКРМ-475	1	89
Цех №5	46	УКРМ-48,6	1	8

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5
Цех №6	3429	УКРМ-2000	2	3266
Цех №7	-1918	-	-	1660
Цех №8	-2941	-	-	789
Цех №9	177	УКРМ-180	1	3051
Цех №10	-1718	-	-	659
Цех №11	1602	УКРМ-2000	1	47
Цех №12	243	УКРМ-250	1	2511
Цех №13	-419	-	-	161
Цех №14	671	УКРМ-800	1	3

Выводы по разделу 2. Для питания электрических нагрузок каждого цеха промышленного предприятия определено расчетное число ЦТП, а также для каждой ЦТП выбраны цеховые трансформаторы. Для всех ЦТП принято к установке двух трансформаторов. Выбраны печные трансформаторы для чугуноплавильных печей чугунолитейного цеха - ЭТЦПК-7500/6. Для всех трансформаторов ЦТП выполнен расчет потерь активной и реактивной мощностей. Для каждой ЦТП предприятия выполнен выбор мощности и числа установок компенсации реактивной мощности – батарей конденсаторов.



### 3 Схема электроснабжения промышленного предприятия

«Схема электроснабжения является одним из наиболее важных этапов разработки проекта электроснабжения промышленного предприятия. От качества разработки этой схемы зависит надежность электроснабжения потребителей, простота в эксплуатации системы электроснабжения, расход материалов при монтаже системы электроснабжения и наконец денежные затраты» [8].

Первым этапом в проектировании схемы электроснабжения промышленного предприятия является определение места расположения центра электрических нагрузок (ЦЭН).

Координаты ЦЭН определяются выражениями:

$$X_0 = \frac{\sum P_{pi} \cdot x_i}{\sum P_{pi}} \quad (12)$$

$$Y_0 = \frac{\sum P_{pi} \cdot y_i}{\sum P_{pi}} \quad (13)$$

где  $P_{pi}$  – активная нагрузка цеха, кВт;

$x_i$  - координата цех по оси абсцисс, м;

$y_i$  - координата цех по оси ординат, м.

Используя генеральный план предприятия (рисунок 1), а также данные таблицы 3 определим ЦЭН по выражениям (12) и (13):

По значениям полученным в (14) и (15) получено, что координаты ЦЭН попадают на территорию кузнечнопрессового цеха. Так как в цеху невозможно размещение главной понизительной подстанции предприятия (ГПП) то место размещения ГПП сносится в сторону линии от подстанции энергосистемы. Размещение ГПП показано на рисунке 2.

Координата по оси абсцисс по (12):

$$\begin{aligned}
X_0 &= \frac{(8589 \cdot 0,52) + (5423 \cdot 0,52) + (537 \cdot 0,43) + (496 \cdot 0,41)}{8589 + 5423 + 537 + 496} = \\
&= \frac{(47 \cdot 0,34) + (5322 \cdot 0,32) + (1419 \cdot 0,28) + (1419 \cdot 0,23) +}{+47 + 5322 + 1419 + 1419 +} = \\
&= \frac{(1797 \cdot 0,23) + (647 \cdot 0,14) + (2062 \cdot 0,12) + (2416 \cdot 0,12) +}{+1797 + 647 + 2062 + 2416 +} = \\
&= \frac{(206 \cdot 0,037) + (760 \cdot 0,025)}{+1797 + 760} = 0,34 \text{ км}
\end{aligned} \tag{14}$$

Координата по оси ординат (13):

$$\begin{aligned}
Y_0 &= \frac{(8589 \cdot 0,20) + (5423 \cdot 0,33) + (537 \cdot 0,044) + (496 \cdot 0,17) +}{8589 + 5423 + 537 + 496 +} = \\
&= \frac{(47 \cdot 0,36) + (5322 \cdot 0,20) + (1419 \cdot 0,029) + (1419 \cdot 0,35) +}{+47 + 5322 + 1419 + 1419 +} = \\
&= \frac{(1797 \cdot 0,19) + (647 \cdot 0,35) + (2062 \cdot 0,051) + (2416 \cdot 0,19) +}{+1797 + 647 + 2062 + 2416 +} = \\
&= \frac{(206 \cdot 0,29) + (760 \cdot 0,14)}{+1797 + 760} = 0,19 \text{ км}
\end{aligned} \tag{15}$$

Для проектирования системы электроснабжения необходимо определить точки питания высоковольтных потребителей. Высоковольтных потребителей шаропрокатного цеха запитаем напрямую с шин ГПП, так как данный цех расположен непосредственно с местом размещения ГПП.

Высоковольтные приемники сталелитейного и чугунолитейного цехов из-за их удаления от места размещения ГПП предлагается запитать от распределительного пункта (РП), который предлагается разместить около данных цехов. Эти решения позволят уменьшить число отходящих от ГПП линий. Составим ведомости ячеек для ГПП и РП предприятия в которой определим число ячеек отходящих линий для ГПП и число ячеек отходящих линий на РП без учета резервных ячеек, секционных ячеек и вводных ячеек.

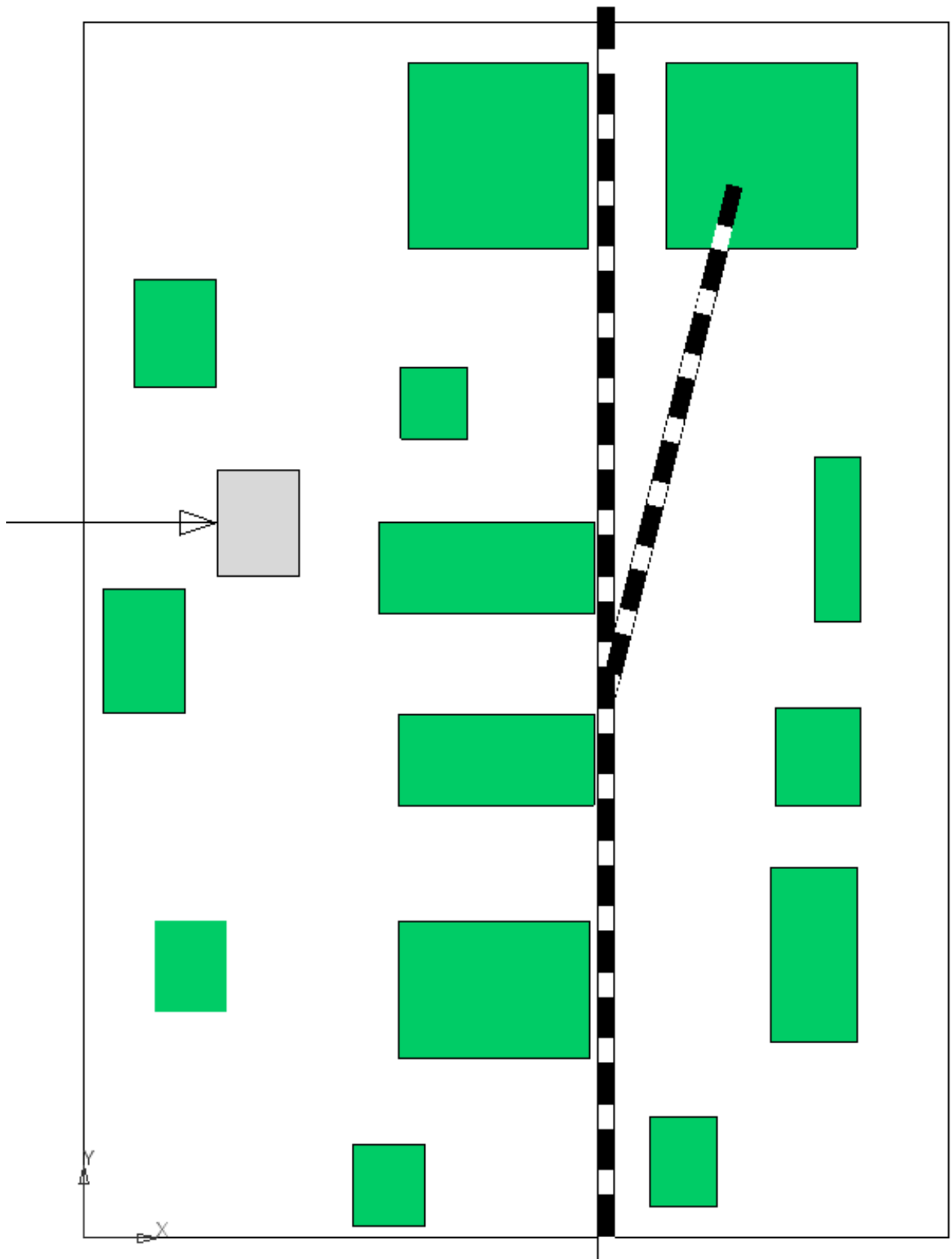


Рисунок 2 - Размещение ГПП

Для питания печных трансформаторов необходимо размещение распределительного устройства 35 кВ на территории предприятия.

Таблица 7 - Ведомость ячеек ГПП и РП

Наименование присоединения	Номер ячейки присоединения
Ячейки отходящих линий ГПП	
РП-1	1
ТП-1	2
ТП-2	3
ТП-3	4
ТП-4	5
СД-1 ШПЦ	6
СД-2 ШПЦ	7
ДЧП-1	8
ДЧП-2	9
Итого ячеек на РУ ГПП	9
Ячейки отходящих линий РП	
ТП-6 СЛЦ	1
ТП-7 СЛЦ	2
ТП-8 СЛЦ	3
ТП-9 ЧЛЦ	4
СД-1 ЧЛЦ	5
СД-2 ЧЛЦ	6
ТП-10 КПЦ	7
Итого ячеек в РП	7

Выводы по разделу 3. Определено расчетное значение координат центра электрических нагрузок предприятия. Однако расчетные координаты ЦЭН попадают на территорию кузнечно-прессового цеха. Так как в цехе невозможно размещение главной понизительной подстанции предприятия (ГПП), то место размещения ГПП сносится в сторону линии от подстанции энергосистемы. Проектом предложено, высоковольтных потребителей шаропрокатного цеха запитать напрямую с шин ГПП, так как данный цех расположен в непосредственной близости от ГПП. Питание высоковольтных приемников сталелитейного и чугунолитейного цехов, из-за их удаления от места размещения ГПП, предлагается выполнить от распределительного пункта (РП), который предлагается разместить около данных цехов. Эти решения позволят уменьшить число отходящих от ГПП линий.

#### 4 Электрические нагрузки предприятия

В данном разделе ВКР будет выполнен расчет электрических нагрузок в целом по промышленному предприятию согласно нормативным документам [9], [10], а также с использованием [4].

Определим среднесменные активную и реактивную нагрузки для высоковольтных электроприемников (ЭП) предприятия

Среднесменная активная нагрузка высоковольтных ЭП:

$$P_c = k_3 \cdot P_p \quad (16)$$

где  $k_3$  – значение коэффициента загрузки согласно данным таблицы 2;

$P_p$  - значение активной мощности высоковольтного ЭП согласно данным таблицы 2, кВт.

Среднесменная реактивная нагрузка высоковольтных ЭП:

$$Q_c = k_3 \cdot Q_p \quad (17)$$

где  $k_3$  – значение коэффициента загрузки согласно данным таблицы 2;

$Q_p$  - значение реактивной мощности высоковольтного ЭП согласно данным таблицы 2, кВт.

Для синхронных электрических двигателей, установленных в шаропрокатном цехе по (16) получим:

$$P_c = 0,75 \cdot 400 = 300 \text{ (кВт)} \quad (18)$$

Для синхронных электрических двигателей, установленных в шаропрокатном цехе по (17)(16) получим:

$$Q_c = 0,75 \cdot 216 = 162 \text{ (квар)} \quad (19)$$

Полная мощность высоковольтных ЭП определяется выражением по данным с использованием выражений (16) и (17):

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad (20)$$

где  $P_c$  - среднесменная активная нагрузка высоковольтных ЭП, полученная по выражению (16), кВт;

$Q_c$  - среднесменная реактивная нагрузка высоковольтных ЭП, полученная по выражению (17), квар.

По (20) для синхронных двигателей шаропрокатного цеха с использованием значений полученных в (18) и (19) получим:

$$S_c = \sqrt{300^2 + 162^2} = 340 \text{ (кВА)} \quad (21)$$

Теперь определим ток высоковольтных ЭП определяется выражением:

$$I = \frac{S_c}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} \quad (22)$$

где  $S_c$  - полная мощность высоковольтного ЭП, кВА;

$U_{ном}$  - номинальное напряжение внутризаводской распределительной сети, принято равным 6 кВ.

По (22) для высоковольтных ЭП шаропрокатного цеха получим:

$$I = \frac{340}{\sqrt{3} \cdot 6} = 33 \text{ (А)} \quad (23)$$

Результаты расчета выполненных по методике представленной выражениями (16), (17), (20) и (22) для всех высоковольтных ЭП предприятия сведем в итоговую ведомость – – таблица 8.

Расчетные активная и реактивная мощности высоковольтных ЭП, питаемых от РП согласно таблице 42 определяются следующими выражениями.

Активная мощность высоковольтных ЭП питаемых от РП-1:

$$P_p = k_o \cdot P_c \quad (24)$$

где  $k_o$  - коэффициент одновременности, справочное значение, которое зависит от типа ЭП и его режима работы;

$P_c$  - мощность высоковольтного ЭП, согласно данным таблицы 2, кВт.

Реактивная мощность высоковольтных ЭП питаемых от РП-1:

$$Q_p = k_o \cdot Q_c \quad (25)$$

где  $k_o$  - коэффициент одновременности, справочное значение, которое зависит от типа ЭП и его режима работы;

$Q_c$  - мощность высоковольтного ЭП, согласно данным таблицы 2, кВт.

По (24) для РП получим:

$$P_p = 0,95 \cdot 20734 = 19697 \text{ (кВт)} \quad (26)$$

По (25) для РП получим:

$$Q_p = 0,95 \cdot 26792 = 25452 \text{ (квар)} \quad (27)$$

Расчетная полная мощность ЭП подключенных к РП:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (28)$$

где  $P_p$  - активная мощность потребителей, подключенных к РП, получено по выражению (24), кВт;

$Q_p$  - реактивная мощность потребителей, подключенных к РП, получено по выражению (24), кВт.

По (28) с использованием значений полученных в (26) и (27) для РП получим:

$$S_p = \sqrt{19697^2 + 25452^2} = 32183 \text{ (кВА)} \quad (29)$$

По (22) ток на шинах РП с использованием значения полученного в (29):

$$I = \frac{32183}{\sqrt{3} \cdot 6} = 3096 \text{ (А)} \quad (30)$$

Расчет для всего предприятия выполняется по методике представленной выражениями (22), (24) и (25). Результаты расчетов сведем в итоговую ведомость нагрузок – таблица 8.

Выводы по разделу 4. Выполнен расчет электрических нагрузок по всему предприятию с учетом всех высоковольтных электроприемников. Расчет нагрузки распределен по распределительным пунктам: РП-1, РУ-10 кВ ГПП, РУ 35 кВ ГПП. Полученные значения мощностей и токов необходимы для выбора трансформаторов ГПП, а также сечения кабельных линий распределительной сети предприятия.





Таблица 8 - Итоговая ведомость нагрузок предприятия

Наименование точки питания	Коэффициент одновременности	Расчетные значения			
		Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, квар	Полная мощность, кВА	Расчетный ток, А
ГПП (110 кВ)					
РП-1	0,95	19697	25452	32183	3096
ТП-1	0,65	2452	1885	3092	297
ТП-2	0,61	966	829	1272	122
ТП-3	0,71	760	668	1011	97
ТП-4	0,43	647	659	923	88
СД-1 Шаропрокатный цех	0,70	700	540	884	85
СД-2 Шаропрокатный цех	0,70	700	540	884	85
ДЧП-1	0,50	1000	2075	2303	241
ДЧП-2	0,50	1000	2075	2303	241
Итого по ГПП	0,90	24499	31250	40396	3960
РП-1 (6 кВ)					
ТП-6 Сталелитейный цех	0,57	1717	4466	4784	460
ТП-7 Сталелитейный цех	0,57	1717	4466	4784	460
ТП-8 Сталелитейный цех	0,57	5151	13398	14354	1381
ТП-9 Чугунолитейный цех	0,55	5423	8568	10139	975
СД-1 Чугунолитейный цех	0,70	700	378	795	76
СД-2 Чугунолитейный цех	0,70	700	378	795	76
ТП-10 Кузнечно-прессовый цех	0,61	5322	3266	6244	600
Итого по РП	0,95	19697	25452	32183	3096
ГПП (35 кВ)					
Печные трансформаторы сталелитейного цеха	0,75	15000	37500	40388	667

## 5 Трансформаторы ГПП

В данном разделе ВКР выполним выбор силовых трансформаторов, которые должны быть установлены на ГПП для обеспечения электроснабжения всех потребителей промышленного предприятия с группой сталелитейных цехов. При выборе силовых трансформаторов будем учитывать расчетные значения мощностей, полученных в таблице 8, а также класс напряжения потребителей высоковольтной части внутриводской системы электроснабжения. Учтем что питание высоковольтных потребителей должно быть обеспечено на напряжении 35 кВ – печные трансформаторы, а также 6 кВ – все ЦТП предприятия, а также все высоковольтные ЭП. Согласно данным раздела 1 ВКР, питание от энергосистемы осуществляется на напряжении 110 кВ. Таким образом необходимо, чтобы выбранные трансформаторы имели три класса напряжения 110 кВ, 35 кВ и 6 кВ. Данным условиям соответствуют трехобмоточные трансформаторы. Так как на предприятии имеются потребители всех категорий надежности электроснабжения, включая первую то согласно ПУЭ необходимо на ГПП установить два трехобмоточных трансформатора.

Расчетная мощность силового трансформатора ГПП:

$$S_{\tau} = k_{an} \cdot S_p = 1,4 \cdot 40396 = 56554 \text{ (кВА)} \quad (31)$$

где  $k_{an}$  - коэффициент допустимой аварийной перегрузки, для двухтрансформаторных подстанций принимается равным 1,4;  
 $S_p$  - расчетное значение полной мощности всех потребителей промышленного предприятия, определяется для проектируемой системы согласно данным таблицы 8, кВА.

По значению полученному в (31) к установке на ГПП принимаем два силовых трехобмоточных трансформатора марки ТДТН-63000/110/35/6 кВ [3].

## 6 Распределительная сеть

«Выбор типа линий электропередачи внутризаводской системы электроснабжения является важным шагом. От выбранного типа линий электропередачи зависит безопасность эксплуатационного персонала машиностроительного завода» [11].

На промышленном предприятии, по результатам анализа генерального плана и учитывая технологический процесс предприятия целесообразно для распределительной сети применять кабельные линии (КЛ) [21]. Для распределительной сети предлагается использовать кабели с алюминиевыми жилами [12]. Выбор сечений КЛ выполним по методике представленной в [1].

Рассмотрим методику выбора сечения КЛ по длительно допустимому току на примере КЛ питающей ТП-1 от шин ГПП.

Определим способ прокладки кабельной линии от шин ГПП до ТП-1: прокладка в земле.

По данным таблицы 8 расчетный ток для ТП-1 составляет: 297 А.

Для алюминиевого кабеля прокладываемого в земле ближайшее большее значение длительно допустимого тока составляет 335 А [22].

Сечение кабеля соответствующего току 335 А: 150 мм<sup>2</sup>. По каталогу производителя кабелей ООО «Севкабель» выбираем трехжильный кабель марки АВБВ 3×150/25.

Определяем согласно генеральному плану машиностроительного предприятия (рисунок 1) длину КЛ от ГПП до ТП-1:  $l=85$  м.

Далее определяются абсолютные и относительные значения потери напряжения в КЛ.

Абсолютные потери напряжения в линии:

$$\Delta U = \frac{P_p \cdot R \cdot l + Q_p \cdot X \cdot l}{U_{ном}} \quad (32)$$

где  $P_p$  - расчетная активная мощность КЛ, кВт;

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

$l$  – длина кабельной линии, км;

$Q_p$  - расчетная реактивная мощность КЛ, квар;

$X$  – реактивное погонное сопротивление, Ом/км.

Значение относительных потерь напряжения в линии:

$$\Delta U = \frac{P_p \cdot R \cdot l + Q_p \cdot X \cdot l}{U_{ном}^2} \quad (33)$$

где  $P_p$  - расчетная активная мощность КЛ, кВт;

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

$l$  – длина кабельной линии, км;

$Q_p$  - расчетная реактивная мощность КЛ, квар;

$X$  – реактивное погонное сопротивление, Ом/км.

По (32) для выбранного кабеля АВБВ 3×150/25 от ГПП до ТП-1 получим:

$$\Delta U = \frac{2452 \cdot 0,206 \cdot 0,085 + 1885 \cdot 0,143 \cdot 0,085}{6} = 11 \text{ (В)} \quad (34)$$

По (33) для выбранного кабеля АВБВ 3×150/25 от ГПП до ТП-1 получим:

$$\Delta U (\%) = \frac{2452 \cdot 0,206 \cdot 0,085 + 1885 \cdot 0,143 \cdot 0,085}{6^2} = 2 \text{ (\%)} \quad (35)$$

Значения полученные в (34) и (35) для выбранного сечения КЛ от ГПП до ТП-1 позволяют сделать заключение, что выбранное сечение обеспечивает

допустимые потери напряжения и может быть принято к установке в распределительной сети машиностроительного предприятия.

По методике, описанной в данном разделе выполним выбор КЛ для всех точек питания, результаты выбора и проверки кабельных линий сведем в итоговую ведомость – таблица 9.

Выводы по разделу 6. Для распределительной сети машиностроительного предприятия и обеспечения качественного электроснабжения всех потребителей (цехов и высоковольтных потребителей) предприятия выбраны кабельные линии различного сечения. Выбор кабельных линий выполнялся по длительно допустимому току с учетом способа прокладки. При выборе кабельных линий предпочтение отдавалось кабелям с алюминиевыми токоведущими жилами, однако для части потребителей были выбраны кабели с медными жилами. Такими потребителями оказались: ТП-6, ТП-7, ТП-8, ТП-18, ТП-19 сталелитейного цеха, а также ТП-9 чугунолитейного цеха, ТП-10 кузнечно-прессового цеха, а также сталеплавильные печи. Медные кабельные линии были выбраны по причине высокой мощности и соответственного тока. Использование алюминиевых КЛ в данном случае нецелесообразно.

Таблица 9 - Итоговая ведомость кабельных линий машиностроительного предприятия

Наименование точки начала КЛ	Наименование точки питания	Способ прокладки	Длительно допустимый ток, А	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Марка кабеля	Длина КЛ, км	Краткое наименование линии	$\Delta U$ , В	$\Delta U$ (%), %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГПП	ТП-1	в земле	335	150	АВБВ 3×150/25	0,085	КЛ 1	11	2,0
ТП-1-	ТП-11	в земле	295	120	АВБВ 3×120/25	0,082	КЛ 2	11	2,0
ТП-11-	ТП-12	в земле	210	70	АВБВ 3×70/25	0,083	КЛ 3	15	2,5
ГПП-	ТП-2	в земле	140	35	АВБВ 3×35/25	0,134	КЛ 4	21	3,0
ТП-2-	ТП-13	в земле	115	25	АВБВ 3×25/25	0,182	КЛ 5	23	3,0
ТП-13-	ТП-14	в земле	115	25	АВБВ 3×25/25	0,083	КЛ 6	13	2,0
ГПП-	ТП-3	в земле	140	35	АВБВ 3×35/25	0,324	КЛ 6	53	4,6
ТП-3-	ТП-15	в земле	90	16	АВБВ 3×16/25	0,157	КЛ 7	5	0,9
ГПП-	ТП-4	в земле	90	16	АВБВ 3×16/25	0,330	КЛ 8	31	3,8
ТП-4-	ТП-16	в земле	90	16	АВБВ 3×16/25	0,092	КЛ 9	14	2,2
ТП-16-	ТП-17	в земле	90	16	АВБВ 3×16/25	0,029	КЛ 10	7	0,6
ГПП-	СД-1 ШПЦ	в земле, под полом	90	16	АВБВ 3×16/25	0,129	КЛ 11	6	0,6
ГПП-	СД-2 ШПЦ	в земле, под полом	90	16	АВБВ 3×16/25	0,129	КЛ 12	6	0,6
РП-1	ДЧП-1	в земле, под полом	255	95	АВБВ 3×95/25	0,380	КЛ 13	55	4,8
РП-1	ДЧП-2	в земле, под полом	255	95	АВБВ 3×95/25	0,380	КЛ 14	55	4,8
РП-1	ТП-6 СЛЦ	в земле, под полом	500	185	ВБбШв 3×185-1	0,135	КЛ 15	38	4,1
РП-1-	ТП-7 СЛЦ	в земле, под полом	500	185	ВБбШв 3×185-1	0,145	КЛ 16	39	4,1

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РП-1-	ТП-8 СЛЦ	в земле, ПОД ПОЛОМ	2x500	185	2× ВБ6ШВ 3×185-1	0,155	КЛ 17	43	4,6
ТП-8 СЛЦ-	ТП-18 СЛЦ	ПОД ПОЛОМ	500	185	ВБ6ШВ 3×185	0,026	КЛ 18	19	2,9
ТП-18 СЛЦ-	ТП-19 СЛЦ	ПОД ПОЛОМ	500	185	ВБ6ШВ 3×185	0,024	КЛ 19	19	2,9
РП-1	ТП-9 ЧЛЦ	в земле	2x500	185	2× ВБ6ШВ 3×185	0,072	КЛ 20	42	4,6
ТП-9 ЧЛЦ-	ТП-20 ЧЛЦ	в земле	210	70	АВБВ 3×70/25	0,053	КЛ 21	31	3,8
ТП-20 ЧЛЦ-	ТП-21 ЧЛЦ	в земле	210	70	АВБВ 3×70/25	0,053	КЛ 22	31	3,8
РП-1	СД-1 ЧЛЦ	в земле, ПОД ПОЛОМ	90	16	АВБВ 3×16/25	0,075	КЛ 23	10	0,8
РП-1	СД-2 ЧЛЦ	в земле, ПОД ПОЛОМ	90	16	АВБВ 3×16/25	0,075	КЛ 24	10	0,8
РП-1-	ТП-10 КПЦ	в земле	500	185	2× ВБ6ШВ 3×185	0,114	КЛ 25	45	4,6
ТП-10 КПЦ	ТП-22 КПЦ	в земле	385	185	АВБВ 3×185/25	0,045	КЛ 26	42	4,5
ТП-22 КПЦ-	ТП-23 КПЦ	в земле	175	50	АВБВ 3×50/25	0,045	КЛ 27	41	4,4
ГПП	ЭСП СЛЦ	в земле, ПОД ПОЛОМ	2x500	185	2× ВБ6ШВ 3×185	0,150	КЛ 28	53	4,7



## 7 Токи короткого замыкания

Расчет токов короткого замыкания выполним для распределительной сети питающей цеховые ТП, а также для сети питающей высоковольтные синхронные двигатели. По результатам расчетов токов короткого замыкания будет приниматься окончательное решение о выборе коммутационных аппаратов системы электроснабжения, а также другого высоковольтного оборудования [13]. В ВКР использована методика расчета токов короткого замыкания представленная в [14], дополненная согласно [2].

Для расчета токов короткого замыкания без учета подпитки от СД составим схему замещения, представленную на рисунке 3, обмотка СН не учитывается так как питает только печные трансформаторы сталелитейного цеха.

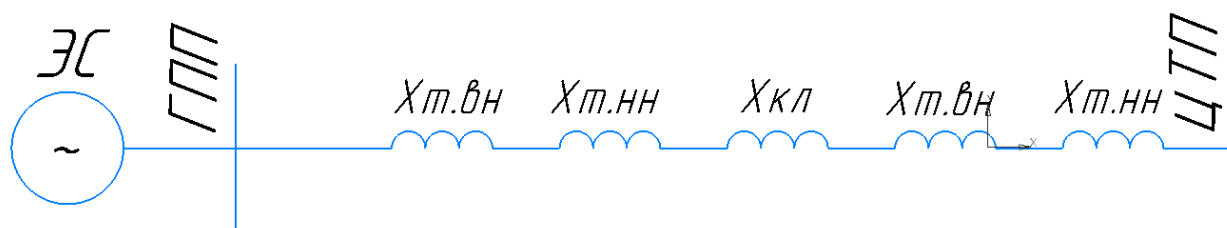


Рисунок 3 - Схема замещения для расчета токов короткого замыкания без учета синхронных двигателей

Представим методику расчета токов короткого замыкания (ТКЗ) в сети машиностроительного предприятия без учета синхронных двигателей на примере расчета для линии от ГПП до ТП-1. Расчет ТКЗ выполним в именованных единицах.

Сопротивление системы:

$$x_c = \frac{U_c^2}{S_k} \quad (36)$$

где  $U_c^2$  - напряжение энергосистемы, кВ;

$S_k$  - мощность КЗ со стороны энергосистемы, кВА.

По (36) получим:

$$x_c = \frac{115^2}{860000} = 0,01 \text{ (Ом)} \quad (37)$$

Сопротивление обмотки 110 кВ (ВН) трансформатора ГПП:

$$x_{\text{тр.вн}} = 0,125 \cdot x_T \quad (38)$$

где  $x_m$  – индуктивное сопротивление силового трансформатора, Ом.

По (38) для трансформатора ТДТН 63000:

$$x_{\text{тр.вн}} = 0,125 \cdot 0,45 = 0,05 \text{ (Ом)} \quad (39)$$

Сопротивление обмотки 6 кВ (НН) трансформатора ГПП:

$$x_{\text{тр.нн}} = 1,75 \cdot x_T \quad (40)$$

где  $x_m$  – индуктивное сопротивление силового трансформатора, Ом.

По (40) для трансформатора ТДТН 63000:

$$x_{\text{тр.нн}} = 1,75 \cdot 0,45 = 0,78 \text{ (Ом)} \quad (41)$$

Сопротивление кабельной линии:

$$x_{\text{кл}} = x_{\text{уд}} \cdot l \quad (42)$$

где  $x_{y\partial}$  - удельное индуктивное сопротивление КЛ, Ом/км.

$l$  - длина КЛ, км.

По (42) для КЛ от ГПП до ТП-1:

$$x_{\text{кл}} = 0,143 \cdot 0,085 = 0,01 \text{ (Ом)} \quad (43)$$

Сопротивление обмотки ВН трансформатора, установленного на ТП-1 по (38):

$$x_{\text{тр.вн}} = 0,125 \cdot 3,8 = 0,5 \text{ (Ом)} \quad (44)$$

Сопротивление обмотки НН трансформатора, установленного на ТП-1 по (40):

$$x_{\text{тр.нн}} = 1,75 \cdot 3,8 = 6,65 \text{ (Ом)} \quad (45)$$

Определим результирующие сопротивления до расчетной точки КЗ согласно схемы замещения (рисунок 3):

$$x_{\Sigma} = x_c + x_{\text{тр.вн}} + x_{\text{тр.нн}} + x_{\text{кл}} + x_{\text{тр.вн}} + x_{\text{тр.нн}} \quad (46)$$

где  $x_c$  - сопротивление системы, выражение (36), Ом;

$x_{\text{тр.вн}}$  - сопротивление обмотки ВН трансформатора ГПП, выражение (38), Ом;

$x_{\text{тр.нн}}$  - сопротивление обмотки НН трансформатора ГПП, выражение (40), Ом;

$x_{\text{кл}}$  - сопротивление КЛ, выражение (42), Ом;

$x_{\text{тр.вн}}$  - сопротивление обмотки ВН трансформатора ТП, выражение (38), Ом;

$x_{\text{тр.нн}}$  - сопротивление обмотки НН трансформатора ТП, выражение (40), Ом.

По (46) для линии от ГПП до ТП-1 получим:

$$x_{\Sigma} = 0,01 + 0,05 + 0,78 + 0,01 + 0,05 + 6,65 = 7,55 \text{ (Ом)} \quad (47)$$

Периодическая составляющая трехфазного ТКЗ:

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{U_{\text{с}}}{\sqrt{3} \cdot x_{\Sigma}} \quad (48)$$

где  $x_{\Sigma}$  - результирующее сопротивление до расчетной точки, выражение (46), Ом;

$U_{\text{с}}$  - номинальное напряжение распределительной сети, 6 кВ.

По (48) для ТП-1:

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 7,55} = 458 \text{ (А)} \quad (49)$$

Ударный ток трехфазного ТКЗ:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{к}}^{(3)} \cdot K_{\text{уд}} \quad (50)$$

где  $I_{\text{к}}^{(3)}$  - периодическая составляющая трехфазного ТКЗ, выражение (48), А;

$K_{\text{уд}}$  – ударный коэффициент, выражение (51).

Ударный коэффициент определим для данной ступени распределительной сети по выражению:

$$K_{\text{уд}} = 1 + e^{\frac{0,01}{T_a}} \quad (51)$$

где  $T_a$  - постоянная времени, принимаем для данной ступени напряжения равной 0,01 с.

По (50) для ТП-1:

$$K_{\text{уд}} = 1 + e^{\frac{0,01}{0,01}} = 3,71 \quad (52)$$

Тогда с учетом значения полученного в (52) ударный ТКЗ согласно (50) для ТП-1:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 458 \cdot 3,71 = 2395 \quad (53)$$

Апериодическая составляющую ТКЗ:

$$i_{a0} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{к}}^{(3)} \quad (54)$$

где  $I_{\text{к}}^{(3)}$  - периодическая составляющая трехфазного ТКЗ, выражение (48), А.

По (54) для ТП-1 с учетом значения полученного в (49):

$$i_{a0} = \sqrt{2} \cdot 458 = 645 \text{ (А)} \quad (55)$$

Для расчета ТКЗ с учетом подпитки от высоковольтных синхронных двигателей составим схему замещения, представленную на рисунке 4 учитывающую особенности расчета [15].

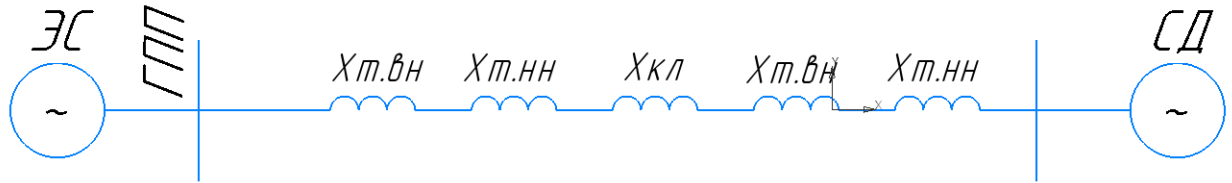


Рисунок 4 -Схема замещения для расчета токов короткого замыкания без учета синхронных двигателей

Все высоковольтные СД при расчете ТКЗ заменяются сверхпереходной ЭДС определяемой выражением:

$$E_{*q}'' = \sqrt{1 + 2 \cdot x_{*d}'' \cdot \sin \varphi_0 + x_{*d}''^2} \quad (56)$$

где  $x_{*d}''$  - сверхпереходное сопротивление синхронной машины, о.е.;

$\varphi_0$  - номинальный угол мощности СД.

Сверхпереходное сопротивление СД:

$$x_{*d}'' = \frac{1}{K_n} \quad (57)$$

где  $K_n$  - кратность пускового тока СД.

Периодическая составляющая трехфазного ТКЗ с учетом подпитки СД:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{E_q''}{\sqrt{3} \cdot x_d'' + x_{\Sigma}} \quad (58)$$

где  $E_q''$  - сверхпереходная ЭДС СД, В;

$x_d''$  - сверхпереходное сопротивление СД, Ом;

$x_{\Sigma}$  - результирующее сопротивление до точки КЗ согласно схемы замещения, рисунок 4.

Так как расчет ТКЗ выполняется в именованных единицах, а выражения (56) и (57) позволяют определить значения в относительных единицах, необходимо выполнить пересчет.

Пересчет сверхпереходной ЭДС для СД из относительных в именованные единицы:

$$E_q'' = E_{*q}'' \cdot U_c \quad (59)$$

где  $E_{*q}''$  - сверхпереходная ЭДС в относительных единицах, полученная в выражении (56), о.е;

$U_c$  - напряжение сети, 6 кВ.

Сверхпереходное сопротивление СД в именованных единицах:

$$x_d'' = x_{*d}'' \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} \quad (60)$$

где  $x_{*d}''$  - сверхпереходное сопротивление СД, полученное в выражении (57), о.е;

$U_{ном}$  - номинальное напряжение СД, кВ;

$S_{ном}$  - номинальная мощность СД, кВА.

По методике представленной выражениями (56) - (60) выполним расчет ТКЗ для СД-1 расположенного в чугуно-литейном цехе.

По (57) для СД-1 чугунолитейного цеха:

$$x_{*d}'' = \frac{1}{K_{\Pi}} = \frac{1}{7} = 0,14 \text{ (о.е)} \quad (61)$$

Сверхпереходная ЭДС для СД-1 чугунолитейного цеха по (56):

$$E_{*q}'' = \sqrt{1 + 2 \cdot 0,14 \cdot \sin 0,7 + 0,14^2} = 1 \text{ (о.е)} \quad (62)$$

Сверхпереходная ЭДС для СД-1 чугунолитейного цеха в именованных единицах по (59):

$$E_q'' = 1 \cdot 6 = 6000 \text{ (В)} \quad (63)$$

Сверхпереходное сопротивление для СД-1 чугунолитейного цеха в именованных единицах по (60):

$$x_d'' = 0,14 \cdot \frac{6^2}{1000} = 0,005 \text{ (Ом)} \quad (64)$$

Периодическая составляющая трехфазного ТКЗ с учетом подпитки от СД по (58):

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 0,005 + 0,85} = 4080 \text{ (А)} \quad (65)$$

Ударный коэффициент по (51) для участка с СД-1 чугунолитейного цеха:

$$K_{\text{уд}} = 1 + e^{\frac{0,01}{0,1}} = 2,1 \quad (66)$$



Ударный ток трехфазного ТКЗ участка с СД-1 чугуно-литейного цеха по (53):

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 4080 \cdot 2,1 = 12080 \text{ (А)} \quad (67)$$

Апериодическая составляющая трехфазного ТКЗ участка с СД-1 чугуно-литейного цеха по (55):

$$i_{a0} = \sqrt{2} \cdot 4080 = 5769 \text{ (А)} \quad (68)$$

Расчеты для всех кабельных линий и высоковольтных ЭП выполним аналогично, все результаты сведем в итоговую ведомость токов короткого замыкания - таблица 10.

Таблица 10 - Итоговая ведомость расчета ТКЗ

Краткое наименование линии	Расположение расчетной точки ТКЗ	$I_k^{(3)}$ , А	$i_{уд}$ , А	$i_{a0}$ , А
1	2	3	4	5
КЛ-30	шины РП-1	8999	19888	12444
КЛ 1	ТП-1	458	2391	645
КЛ 2	ТП-11	111	1211	210
КЛ 3	ТП-12	109	1111	222
КЛ 4	ТП-2	422	2395	667
КЛ 5	ТП-13	101	999	203
КЛ 6	ТП-14	98	981	199
КЛ 6	ТП-3	388	2221	656
КЛ 7	ТП-15	110	1345	333
КЛ 8	ТП-4	460	2898	660
КЛ 9	ТП-16	118	1400	301
КЛ 10	ТП-17	120	1450	296
КЛ 11	СД-1 ШПЦ	3279	11980	5476
КЛ 12	СД-2 ШПЦ	3279	11980	5476
КЛ 13	ДЧП-1	4567	15450	7656
КЛ 14	ДЧП-2	4567	15450	7656
КЛ 15	ТП-6 СЛЦ	471	3001	677
КЛ 16	ТП-7 СЛЦ	470	2998	689
КЛ 17	ТП-8 СЛЦ	471	3001	700
КЛ 18	ТП-18 СЛЦ	121	1113	231
КЛ 19	ТП-19 СЛЦ	125	1127	305

Продолжение таблицы 10

1	2	3	4	5
КЛ 20	ТП-9 ЧЛЦ	399	2989	599
КЛ 21	ТП-20 ЧЛЦ	129	1545	477
КЛ 22	ТП-21 ЧЛЦ	126	1500	321
КЛ 23	СД-1 ЧЛЦ	4080	12080	5769
КЛ 24	СД-2 ЧЛЦ	4080	12080	5769
КЛ 25	-ТП-10 КПЦ	402	3569	702
КЛ 26	ТП-22 КПЦ	201	1788	541
КЛ 27	ТП-23 КПЦ	200	1788	241
КЛ 28	ЭСП СЛЦ	4676	13556	7656

Выводы по разделу 7. Представлена методика расчета трехфазных токов короткого замыкания в именованных единицах для распределительной сети машиностроительного предприятия напряжением 6 кВ. Согласно представленной методике выполнен расчет периодической и апериодической составляющих трехфазных токов короткого замыкания в начальный момент времени на шинах всех ТП предприятия, кроме того определены значения ударных токов для каждой расчетной точки. Также представлена методика расчета трехфазных токов короткого замыкания с учетом подпитки от высоковольтных синхронных двигателей, так как на предприятии такие двигатели установлены. Для участков распределительной сети напряжением 6 кВ, питающих высоковольтные синхронные двигатели также выполнен расчет периодической и апериодической составляющих трехфазных токов короткого замыкания в начальный момент времени и значения ударных токов трехфазного КЗ. Все результаты расчетов сведены в итоговую ведомость ТКЗ.

## 8 Электрические аппараты системы электроснабжения

Заключительным этапом проектирования системы электроснабжения промышленного предприятия является выбор коммутационного и измерительного оборудования системы электроснабжения [16], [17], [18].

Критериями выбора оборудования являются:

- Номинальное напряжение;
- Номинальный ток;
- Термическая стойкость ТКЗ;
- Отключающая способность – только для коммутационных аппаратов.

Выполним выбор коммутационных аппаратов внутризаводской системы электроснабжения. В качестве коммутационных аппаратов проектом предлагается использовать высоковольтные выключатели напряжением 6 кВ.

Представим методику выбора коммутационных аппаратов на примере выбора выключателей для установки на РП-1, так как для данного объекта наивысшие значения ТКЗ, а следовательно самые высокие значения тока отключения выключателей. Для Предприятия предлагается использовать однотипные выключатели на напряжение 6 кВ, так как это повысит ремонтпригодность системы электроснабжения, а также снизит эксплуатационные затраты и затраты на обслуживание.

Расчетный ток отключения выключателя:

$$i = I_{\kappa}^{(3)} + i_a \quad (69)$$

где  $I_{\kappa}^{(3)}$  - расчетное значение периодической составляющей трехфазного ТКЗ, по выражению (58), А;

$i_a$  - аperiodическая составляющая трехфазного ТКЗ по (55), А.

Для отходящей на ТП-6 (сталелитейный цех) от РП-1 линии по (69):

$$i = 471 + 677 = 1148 \text{ (A)} \quad (70)$$

Тепловой импульс от действия трехфазного ТКЗ:

$$B_k = \left( I_k^{(3)} \right)^2 \cdot \tau \quad (71)$$

где  $I_k^{(3)}$  - расчетное значение периодической составляющей трехфазного ТКЗ, по выражению (58), А;

$\tau$  - собственное время отключения выключателя, принимаем  $\tau = 0,07$ , с.

Для отходящей на ТП-6 (сталелитейный цех) от РП-1 линии по (71):

$$B_k = 471^2 \cdot 0,07 = 15528 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)} \quad (72)$$

По каталогу АО «Электроцит Самара» выберем выключатель марки ВВУ-СЭЦ-10. Для выбранного выключателя выполним сравнение расчетных и каталожных параметров:

$$i < i_{\text{НОМ}} = 1148 \text{ (A)} < 42300 \text{ (A)} \quad (73)$$

$$B_k < B_{\text{кНОМ}} = 15528 < 28000000 \quad (74)$$

$$I_p < I_{\text{НОМ}} = 297 < 1000 \quad (75)$$

где  $i$  - полный расчетный ток отключения выключателя, по (70), А;

$i_{\text{НОМ}}$  - номинальный ток отключения выбранного выключателя, каталожное значение, А;

$B_k$  - расчетное значение теплового импульса трехфазного ТКЗ, по (72), кА<sup>2</sup>·с;

$B_{\text{кНОМ}}$  - паспортное значение теплового импульса трехфазного ТКЗ для выбранного выключателя, кА<sup>2</sup>·с;

$I_p$  - расчетный ток коммутируемой линии, А;

$I_{ном}$  - номинальный ток выключателя, каталожное значение для выбранного выключателя, А.

Выбранный выключатель ВВУ-СЭЦ-10 удовлетворяет требованиям, так как условия (73) - (75) выполняются. Для коммутации остальных линий распределительной сети предприятия выбранные выключатели сведем в итоговую ведомость выключателей 6 кВ – таблица 11.

Таблица 11 - Итоговая ведомость выбранных высоковольтных выключателей

Место установки выключателя	Конечная точка питающей линии	Напряжение сети, кВ	Каталожные данные выключателя ВВУ-СЭЦ-10			Расчетные значения для выбора выключателя		
			$I_{ном}$ , А	$B_k$ , А <sup>2</sup> /с	$i_{ном}$ , кА	$I_p$ , А	$B_{кном}$ , А <sup>2</sup> /с	$i$ , кА
ГПП	РП-1	6	1000	152,7	42,3	3096	$28 \cdot 10^6$	18,9
	ТП-1		1000	15,5	42,3	297	$28 \cdot 10^6$	1,0
	ТП-2		1000	19,8	42,3	1223	$28 \cdot 10^6$	1,2
	ТП-3		1000	16,1	42,3	97	$28 \cdot 10^6$	1,0
	ТП-4		1000	16,4	42,3	88	$28 \cdot 10^6$	1,0
	СД-1 ШПЦ		1000	99,8	42,3	85	$28 \cdot 10^6$	9,2
	СД-2 ШПЦ		1000	99,8	42,3	85	$28 \cdot 10^6$	9,2
	ДЧП-1		1000	102,3	42,3	241	$28 \cdot 10^6$	10,8
	ДЧП-2		1000	102,3	42,3	241	$28 \cdot 10^6$	10,8
	ЭСП-СЛЦ	35	1000	104,6	42,3	667	$28 \cdot 10^6$	12,4
РП-1	ТП-6 СЛЦ	6	1000	15,5	42,3	460	$28 \cdot 10^6$	1,1
	ТП-7 СЛЦ		1000	20,5	42,3	460	$28 \cdot 10^6$	2,0
	ТП-8 СЛЦ		2000	13,4	42,3	1381	$28 \cdot 10^6$	0,9
	ТП-9 ЧЛЦ		1000	12,6	42,3	975	$28 \cdot 10^6$	0,9
	СД-1 ЧЛЦ		1000	100,0	42,3	76	$28 \cdot 10^6$	10,0
	СД-2 ЧЛЦ		1000	100,0	42,3	76	$28 \cdot 10^6$	10,0
	ТП-10 КПЦ		1000	15,0	42,3	600	$28 \cdot 10^6$	1,1

Выберем измерительные трансформаторы тока, которые должны соответствовать следующим критериям:

- Номинальное напряжение;

- Электродинамическая стойкость;
- Термическая стойкость.

Трансформаторы тока устанавливаются там же где и выключатели, поэтому методику выбора измерительных трансформаторов рассмотрим на примере линии питающей ТП-1 от РП-1. Так как в качестве коммутационного аппарата выбран вакуумный выключатель марки ВВУ-СЭЩ 10, производства АО «Самарский Электроцит», то рассмотрим вариант установки измерительного трансформатора тока также производства АО «Самарский Электроцит» марки ТПЛ-СЭЩ-10.

Выполним сравнение расчетных и каталожных параметров для трансформатора тока ТПЛ-СЭЩ-10:

$$I_p < I_{ном1} = 297 < 3000 \quad (76)$$

$$i_{уд} < i_{эс} = 3001 < 40000 \quad (77)$$

$$B_k < B_{ном} = 15528 < 112000000 \quad (78)$$

где  $I_p$  - расчетный ток линии, А;

$I_{ном1}$  - номинальный первичный ток измерительного трансформатора тока, каталожное значение, А;

$i_{уд}$  - расчетное значение ударного тока трехфазного КЗ;

$i_{эс}$  - ток электродинамической стойкости, паспортное значение выключателя, каталожное значение, кА;

$B_k$  - расчетное значение теплового импульса от действия трехфазного ТКЗ, кА<sup>2</sup>·с;

$B_{ном}$  - паспортное значение теплового импульса, которое выдерживает трансформатор тока, паспортное значение, кА<sup>2</sup>·с.

Согласно условиям (76) - (78) выбранный трансформатор тока ТПЛ-СЭЩ-10 удовлетворяет условиям выбора. Все выбранные трансформаторы

тока устанавливаемые в системе электроснабжения сведем в итоговую ведомость – таблица 12.

Таблица 12 - Итоговая ведомость выбранных трансформаторов тока

Наименование	Присоединение	U <sub>ном</sub> , кВ	I <sub>ном1</sub> , А	I <sub>ном2</sub> , А	I <sub>эс</sub> , кА	B <sub>кном</sub> , А <sup>2</sup> /с	B <sub>к</sub> , А <sup>2</sup> /с
ГПП	РП-1	6	3000	5	40	112000	152,7
	ТП-1		400	5	40	112000	15,5
	ТП-2		1500	5	40	112000	19,8
	ТП-3		150	5	40	112000	16,1
	ТП-4		150	5	40	112000	16,4
	СД-1 ШПЦ	6	150	5	40	112000	99,8
	СД-2 ШПЦ	6	150	5	40	112000	99,8
	ДЧП-1		300	5	40	112000	102,3
	ДЧП-2		300	5	40	112000	102,3
		ЭСП-СЛЦ	35	1000	5	40	112000
РП-1	ТП-6 СЛЦ	6	600	5	40	112000	15,5
	ТП-7 СЛЦ		600	5	40	112000	20,5
	ТП-8 СЛЦ		2000	5	40	112000	13,4

Выберем измерительные трансформаторы напряжения, при этом необходимо определить мощность измерительных приборов. Суммарную полную мощность подключаемых измерительных приборов определим по выражению:

$$S_{\text{приб.}\Sigma} = \sqrt{P_{\text{приб}}^2 + Q_{\text{приб}}^2} \quad (79)$$

где  $P_{\text{приб.}\Sigma}$  - активная мощность измерительных приборов, кВт;

$Q_{\text{приб.}\Sigma}$  - реактивная мощность измерительных приборов, квар.

По (79) для РП-1 получим:

$$S_{\text{приб.}\Sigma} = \sqrt{0,66^2 + 0,30^2} = 0,72 \text{ (кВА)} \quad (80)$$

По каталогу АО «Электроцит-Самара» к установке на РП-1 примем трансформаторы напряжения марки ЗНОЛ-СЭЩ-6. Проверим мощность трансформаторов напряжения:

$$S_{\text{приб.}\Sigma} < S_{\text{ТН.ном}} = 0,72 < 0,8 \quad (81)$$

где  $S_{\text{приб.}\Sigma}$  - расчетное значение мощности подключаемых измерительных приборов, кВА;

$S_{\text{ТН.ном}}$  - номинальная мощность трансформаторов напряжения, кВА.

Трансформатор напряжения ЗНОЛ-СЭЩ-6 удовлетворяет условию (81) и может быть установлен на РП-1. Все выбранные трансформаторы напряжения сведем в итоговую ведомость – таблица 13.

Таблица 13 - Итоговая ведомость трансформаторов напряжения

Точка установки трансформаторов напряжения	Каталожные значения		Расчетное значение
	U <sub>ном</sub> , кВ	S <sub>ТН.ном</sub> , кВА	S <sub>приб.Σ расч</sub> , кВА
ГПП	6	0,8	0,78
	35	0,5	0,31
РП-1	6	0,8	0,72

Выводы по разделу 8. Выполнен выбор высоковольтных коммутационных аппаратов для системы электроснабжения машиностроительного предприятия с группой сталелитейных цехов. Выбраны вакуумные выключатели марки ВВУ СЭЩ-10. Выполнен выбор измерительных трансформаторов тока и напряжения для установки на главной понизительной подстанции и на распределительном пункте – РП-1. Выбраны трансформаторы тока ТПЛ СЭЩ-10 и трансформаторы напряжения ЗНОЛ СЭЩ-6. Использование оборудования одного производителя позволит упростить обслуживание и повысит ремонтпригодность распределительных устройств.



## 9 Техничко-экономические показатели

Выполнение данного раздела в рамках ВКР продиктовано требованиями бережливого отношения к ресурсам, используемых в проектной и производственной деятельности [19].

Для спроектированной системы электроснабжения необходимо определить стоимость потерь активной мощности в кабельных линиях [20]:

$$C_{\text{КЛ}} = \Delta P_{\text{КЛ}} \cdot C \quad (82)$$

где  $C$  - стоимость потерь активной мощности, руб/кВт;

$\Delta P_{\text{КЛ}}$  - потери мощности в КЛ, кВт.

Потери активной мощности в кабельной линии определяются выражением:

$$\Delta P_{\text{КЛ}} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot r \quad (83)$$

где  $P$  - активная мощность, протекающая по кабельной линии, кВт;

$Q$  - реактивная мощность, протекающая в кабельной линии, квар;

$U$  - номинальное напряжение сети, кВ;

$r$  - активное сопротивление кабельной линии, Ом.

Для КЛ от РП-1 до ТП-6 (сталелитейный цех) по (83) получим:

$$\Delta P_{\text{КЛ}} = \frac{1717^2 + 4466^2}{6^2} \cdot 0,0467 = 0,296 \text{ (кВт)} \quad (84)$$

По (82) с учетом значения полученного в (84) для КЛ от РП-1 до ТП-6 ТП-6 (сталелитейный цех):

$$C_{\text{КЛ}} = 0,296 \cdot 0,44 = 0,130 \text{ (тыс. руб.)} \quad (85)$$

Стоимость потерь активной мощности в КЛ в течении года определяется выражением:

$$C_{\text{КЛ.год}} = C_{\text{КЛ}} \cdot \tau = C_{\text{КЛ}} \cdot \left( 0,124 \cdot \frac{T_{\text{М}}}{10000} \right)^2 \cdot T_{\text{Г}} \quad (86)$$

где  $C_{\text{КЛ}}$  - стоимость потерь активной мощности в кабельных линиях, по выражению (82), руб.;

$\tau$  - число часов максимальных потерь в год, ч;

$T_{\text{М}}$  - число часов максимальной мощности, ч;

$T_{\text{Г}}$  - число часов в году, 8760 ч.

Стоимость потерь активной мощности в кабельной линии от РП-1 до ТП-6 (сталелитейный цех) по выражению (86) с учетом значения полученного в (85):

$$C_{\text{КЛ.год}} = 0,296 \cdot \left( 0,124 \cdot \frac{6000}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 14,35 \text{ (тыс. руб.)} \quad (87)$$

Приведенные затраты на кабельные линии:

$$Z_{\text{КЛ}} = E \cdot (K \cdot l) + C_{\text{КЛ.год}} \quad (88)$$

где  $C_{\text{КЛ.год}}$  - стоимость годовых потерь мощности в кабельной линии, тыс. руб.;

$E$  - коэффициент дисконтирования;

$K$  - стоимость одного километра кабельной линии без учета прокладки, тыс. руб.

По (88) для кабельной линии от РП-1 до ТП-6 (сталелитейный цех) используя значения полученные в (87) получим:

$$Z_{\text{кл}} = 0,33 \cdot (33 \cdot 0,135) + 14,35 = 15,8 \text{ (тыс. руб.)} \quad (89)$$

Расчет технико-экономических показателей по методике представленной выражениями (82), (83), (86) и (88) для всех кабельных линий предприятия проводится аналогично расчету для КЛ от РП-1 до ТП-6 (сталелитейный цех) выполненному в выражениях (84), (85), (87) и (89). Расчет для всех КЛ предприятия сведем в итоговую ведомость расчета потерь – таблица 14.

Выполним расчет технико-экономических показателей для в цеховых трансформаторов.

Стоимость потерь активной мощности в цеховых трансформаторах определяется выражением:

$$C_{\text{т}} = n_{\text{т}} \cdot \Delta P_{\text{т}} \cdot C_{\text{э}} \quad (90)$$

где  $n_{\text{т}}$  – число трансформаторов, установленных в ЦТП, шт.;

$\Delta P_{\text{т}}$  - полные потери активной мощности в трансформаторе, кВт;

$C_{\text{э}}$  - стоимость потерь, руб./кВт.

По (90) для ТП-6 (сталелитейный цех) получим:

$$C_{\text{т}} = 2 \cdot 20,35 \cdot 0,44 = 17,98 \text{ (тыс.руб.)} \quad (91)$$

Таблица 14 - Итоговая ведомость расчета потерь и приведенных затрат для кабельных линий

Наименование КЛ		Стоимость потерь активной мощности в кабельной линии, тыс. руб.	Стоимость потерь активной электроэнергии в кабельных линиях, тыс. руб.	Приведенные эксплуатационные затраты, тыс. руб.
Точка подключения КЛ (начало КЛ)	Точка питания КЛ (конец КЛ)			
1	2	3	4	5
ГПП	ТП-1	0,140	0,108	1,26
ТП-1	ТП-11	0,136	0,105	1,29
ТП-11	ТП-12	0,128	0,98	1,28
ГПП	ТП-2	0,127	0,97	1,34
ТП-2	ТП-13	0,133	0,101	1,34
ТП-13	ТП-14	0,121	0,92	1,21
ГПП	ТП-3	0,123	0,95	1,18
ТП-3	ТП-15	0,127	0,98	1,17
ГПП	ТП-4	0,138	0,92	1,10
ТП-4	ТП-16	0,131	0,99	1,20
ТП-16	ТП-17	0,128	0,97	1,21
ГПП	СД-1 ШПЦ	0,134	0,108	1,55
ГПП	СД-2 ШПЦ	0,134	0,108	1,55
ГПП	ДЧП-1	0,159	0,110	3,56
ГПП	ДЧП-2	0,159	0,110	3,56
РП-1	ТП-6 СЛЦ	0,130	0,99	1,87
РП-1	ТП-7 СЛЦ	0,130	0,99	1,85
РП-1	ТП-8 СЛЦ	0,126	0,98	1,87
ТП-8 СЛЦ	ТП-18 СЛЦ	0,127	0,98	2,12
ТП-18 СЛЦ	ТП-19 СЛЦ	0,125	0,96	2,13
РП-1	ТП-9 ЧЛЦ	0,129	0,99	1,67
ТП-9 ЧЛЦ	ТП-20 ЧЛЦ	0,126	0,98	1,68
ТП-20 ЧЛЦ	ТП-21 ЧЛЦ	0,128	0,96	1,54
РП-1	СД-1 ЧЛЦ	0,123	0,92	1,65

Продолжение таблицы 14

1	2	3	4	5
РП-1	СД-2 ЧЛЦ	0,123	0,92	1,65
РП-1	ТП-10 КПЦ	0,139	0,108	1,71
ТП-10 КПЦ	ТП-22 КПЦ	0,137	0,107	1,23
ТП-22 КПЦ	ТП-23 КПЦ	0,136	0,107	1,23
ГПП	ЭСП СЛЦ	0,164	0,115	4,64

Стоимость годовых потерь активной мощности в цеховых трансформаторах определяется по выражению:

$$C_{\text{ЭТ}} = \tau \cdot C_T = C_T \cdot \left( 0,124 \cdot \frac{T_M}{10000} \right)^2 \cdot T_r \quad (92)$$

где  $C_T$  - стоимость потерь активной мощности в трансформаторах, по выражению (90), руб.;

$\tau$  - число часов максимальных потерь в год, ч;

$T_M$  - число часов максимальной мощности, ч;

$T_r$  - число часов в году, 8760 ч.

По (92) стоимость годовых потерь активной мощности для ТП-6 (сталелитейного цеха) используя значение полученное в (91):

$$C_{\text{ЭТ}} = 17,98 \cdot \left( 0,124 \cdot \frac{6000}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 871,8 \text{ (тыс. руб.)} \quad (93)$$

Приведенные эксплуатационные затраты на цеховые трансформаторные подстанции:

$$Z_r = E \cdot K + C_{\text{ЭТ}} \quad (94)$$

где  $C_{\text{ЭТ}}$  - стоимость годовых потерь мощности в трансформаторах ЦТП, тыс. руб.;

$E$  - коэффициент дисконтирования;

$K$  - стоимость трансформаторов, установленных в ЦТП, тыс. руб.

По (94) с учетом значения полученного в (93) для ТП-6 (сталелитейный цех) получим:

$$Z_{\tau} = 0,33 \cdot 200 + 871,8 = 937,8 \text{ (тыс. руб.)} \quad (95)$$

Расчет технико-экономических показателей по методике представленной выражениями (90), (92) и (94) для всех цеховых трансформаторных подстанций предприятия проводится аналогично расчету для ТП-6 (сталелитейный цех) выполненному в выражениях (91), (93) и (95). Расчет для всех ЦТП предприятия сведем в итоговую ведомость расчета потерь в трансформаторах ЦТП – таблица 15.

Выводы по разделу 9. Представлена методика расчета технико-экономических показателей для кабельных линий предприятия. Методика учитывает стоимость годовых потерь мощности в кабельной линии, а также затраты на ее строительство и эксплуатацию. Расчет технико-экономических показателей, в качестве примера использования методики, выполнен для кабельной линии питающей цеховую трансформаторную подстанцию (ЦТП) сталелитейного цеха – ТП-6 от распределительного пункта – РП-1.

Представлена методика определения технико-экономических показателей для трансформаторов ЦТП. Методика учитывает потери мощности в трансформаторе и стоимость этих потерь, а также приведенные затраты, которые включают в себя дополнительно к стоимости годовых потерь затраты на обслуживание.

Результатом выполнения раздела 9 ВКР составлены итоговые ведомости отражающие технико-экономические показатели для всех кабельных линий и всех ЦТП машиностроительного предприятия с группой сталелитейных цехов.

Таблица 15 - Итоговая ведомость расчета потерь и приведенных затрат для ЦТП

Наименование пункта питания	Стоимость годовых потерь активной электроэнергии, тыс. руб.	Стоимость потерь активной мощности в трансформаторах ЦТП, тыс. руб.	Приведенные эксплуатационные затраты, тыс. руб.
ЦТП питаемые от ГПП			
ТП-1	10,76	52,65	130,6
ТП-2	15,01	59,08	140,5
ТП-3	15,01	59,08	140,5
ТП-4	15,44	60,44	141,9
ТП-11	15,5	58,4	149,0
ТП-12	10,76	52,65	130,6
ТП-13	14,31	56,98	148,7
ТП-14	15,66	59,69	150,0
ТП-15	7,98	32,32	110,5
ТП-16	13,21	56,42	146,7
ТП-17	13,99	58,99	147,9
ЦТП питаемые от РП-1			
ТП-18 Сталелитейного цеха	17,98	68,30	152,4
ТП-19 Сталелитейного цеха	17,98	68,30	152,4
ТП-20 Чугунолитейного цеха	17,98	68,30	152,4
ТП-21 Чугунолитейного цеха	17,98	68,30	152,4
ТП-22 Кузнечно-прессового цеха	17,98	68,30	152,4
ТП-23 Кузнечно-прессового цеха	17,98	68,30	152,4
ТП-6 Сталелитейного цеха	17,98	68,30	152,4
ТП-7 Сталелитейного цеха	17,98	68,30	152,4
ТП-8 Сталелитейного цеха	17,98	68,30	152,4
ТП-9 Чугунолитейного цеха	17,98	68,30	152,4
ТП-10 Кузнечно-прессового цеха	17,98	68,30	152,4



## Заключение

В работе выполнен проект разработки системы электроснабжения машиностроительного предприятия с группой сталелитейных цехов. Для выполнения ВКР поставлены следующие задачи:

- Описание машиностроительного предприятия для которого проектируется система электроснабжения;
- Расчет электрических нагрузок промышленного предприятия и определение необходимости компенсации реактивной мощности;
- Проектирование распределительной сети промышленного предприятия с выбором числа цеховых трансформаторных подстанций, места размещения главной понизительной подстанции предприятия, выбором сечений кабельных линий, выбором оборудования;
- Определение технико-экономических показателей спроектированной системы электроснабжения промышленного предприятия.

Для выполнения всех задач ВКР на первом этапе представлена краткая характеристика объекта выпускной квалификационной работы – промышленного предприятия с группой сталелитейных цехов. Определено, что предприятие расположено в регионе с умеренно-континентальным климатом, поэтому при проектировании системы электроснабжения может быть использовано оборудование класса УХЛ1. Представлено краткое описание продукции производимой промышленным предприятием, а также определены цеха задействованные в основном процессе производства продукции: чугунолитейный цех (Цех №2); сталелитейный цех (Цех №1); шаропрокатный цех (Цех №7); кузнечно-прессовый цех (Цех №6). Для каждого цеха определены исходные значения мощностей, а также представлен перечень высоковольтных электроприемников установленных на объекте ВКР.

Для питания электрических нагрузок каждого цеха промышленного предприятия определено расчетное число ЦТП, а также для каждой ЦТП выбраны цеховые трансформаторы. Для всех ЦТП принято к установке двух трансформаторов. Выбраны печные трансформаторы для чугуноплавильных печей чугунолитейного цеха - ЭТЦПК-7500/6. Для всех трансформаторов ЦТП выполнен расчет потерь активной и реактивной мощностей. Для каждой ЦТП предприятия выполнен выбор мощности и числа установок компенсации реактивной мощности – батареей конденсаторов.

Определено расчетное значение координат центра электрических нагрузок предприятия. Однако расчетные координаты ЦЭН попадают на территорию кузнечно-прессового цеха. Так как в цехе невозможно размещение главной понизительной подстанции предприятия (ГПП), то место размещения ГПП сносится в сторону линии от подстанции энергосистемы. Проектом предложено, высоковольтных потребителей шаропрокатного цеха запитать напрямую с шин ГПП, так как данный цех расположен в непосредственной близости от ГПП. Питание высоковольтных приемников сталелитейного и чугунолитейного цехов, из-за их удаления от места размещения ГПП, предлагается выполнить от распределительного пункта (РП), который предлагается разместить около данных цехов. Эти решения позволят уменьшить число отходящих от ГПП линий.

Выполнен расчет электрических нагрузок по всему предприятию с учетом всех высоковольтных электроприемников. Расчет нагрузки распределен по распределительным пунктам: РП-1, РУ-6 кВ ГПП, РУ 35 кВ ГПП. Полученные значения мощностей и токов необходимы для выбора трансформаторов ГПП, а также сечения кабельных линий распределительной сети предприятия.

К установке на ГПП принято два силовых трехобмоточных трансформатора марки ТДТН-63000/110/35/6 кВ.

Для распределительной сети машиностроительного предприятия и обеспечения качественного электроснабжения всех потребителей (цехов и

высоковольтных потребителей) предприятия выбраны кабельные линии различного сечения. Выбор кабельных линий выполнялся по длительно допустимому току с учетом способа прокладки. При выборе кабельных линий предпочтение отдавалось кабелям с алюминиевыми токоведущими жилами, однако для части потребителей были выбраны кабели с медными жилами. Такими потребителями оказались: ТП-6, ТП-7, ТП-8, ТП-18, ТП-19 сталелитейного цеха, а также ТП-9 чугунолитейного цеха, ТП-10 кузнечно-прессового цеха, а также сталеплавильные печи. Медные кабельные линии были выбраны по причине высокой мощности и соответственного тока. Использование алюминиевых КЛ в данном случае нецелесообразно.

Представлена методика расчета трехфазных токов короткого замыкания в именованных единицах для распределительной сети машиностроительного предприятия напряжением 6 кВ. Согласно представленной методике выполнен расчет периодической и аperiodической составляющих трехфазных токов короткого замыкания в начальный момент времени на шинах всех ТП предприятия, кроме того определены значения ударных токов для каждой расчетной точки. Также представлена методика расчета трехфазных токов короткого замыкания с учетом подпитки от высоковольтных синхронных двигателей, так как на предприятии такие двигатели установлены. Для участков распределительной сети напряжением 6 кВ, питающих высоковольтные синхронные двигатели также выполнен расчет периодической и аperiodической составляющих трехфазных токов короткого замыкания в начальный момент времени и значения ударных токов трехфазного КЗ. Все результаты расчетов сведены в итоговую ведомость ТКЗ.

Выполнен выбор высоковольтных коммутационных аппаратов для системы электроснабжения машиностроительного предприятия с группой сталелитейных цехов. Выбраны вакуумные выключатели марки ВВУ СЭЩ-10. Выполнен выбор измерительных трансформаторов тока и напряжения для установки на главной понизительной подстанции и на распределительном пункте – РП-1. Выбраны трансформаторы тока ТПЛ СЭЩ-10 и

трансформаторы напряжения ЗНОЛ СЭЦ-6. Использование оборудования одного производителя позволит упростить обслуживание и повысить ремонтпригодность распределительных устройств.

Представлена методика расчета технико-экономических показателей для кабельных линий предприятия. Методика учитывает стоимость годовых потерь мощности в кабельной линии, а также затраты на ее строительство и эксплуатацию. Расчет технико-экономических показателей, в качестве примера использования методики, выполнен для кабельной линии питающей цеховую трансформаторную подстанцию (ЦТП) сталелитейного цеха – ТП-6 от распределительного пункта – РП-1.

Представлена методика определения технико-экономических показателей для трансформаторов ЦТП. Методика учитывает потери мощности в трансформаторе и стоимость этих потерь, а также приведенные затраты, которые включают в себя дополнительно к стоимости годовых потерь затраты на обслуживание.

Результатом выполнения раздела 9 ВКР составлены итоговые ведомости отражающие технико-экономические показатели для всех кабельных линий и всех ЦТП машиностроительного предприятия с группой сталелитейных цехов.

## Список используемых источников

1. Вахнина В.В. Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий. Методические указания к курсовому проектированию. Тольятти: ТГУ, 2006. 78 с.
2. РФ. 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: 28.02.2021).
3. РФ. ГОСТ 9680-77. Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и более. Ряд номинальных мощностей. М.: Издательство стандартов, 1977. 4 с.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие. Москва: Интернет-Инжиниринг, 2006. 671 с.
5. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. 5-е издание. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2014. 607 с.
6. Немировский А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций. Учебное пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 174 с.
7. Николаев В. Безаварийная и эффективная эксплуатация устройств компенсации реактивной мощности низкого напряжения // Я электрик. – 2009. – № 17. – С. 50–54.
8. НТП ЭПП-94. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий. Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс
9. Правила устройства электроустановок. 7-е издание / Ред. Л.Л. Жданова, Н. В. Ольшанская. М.: НЦ ЭНАС, 2013. 104 с.
10. Рожкова Л.Д., Карнеева Л.К., Чиркова Т.В. Электрооборудование электрических станций и подстанций. М.: Академия, 2013. 449 с.

11. 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
12. Сазыкин В.Г. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах. Учебное пособие. Краснодар: КубГАУ, 2017. 255 с.
13. Сафронов В.И. Электротехнологические установки. Учебное пособие. Челябинск: ЮУрГУ, 2014. 124 с.
14. Сивков А.А. Основы электроснабжения. Учебное пособие. Томск: Национальный исследовательский университет Томский политехнический университет, 2014. 184 с.
15. Справочные данные по расчетным коэффициентам электрических нагрузок, шифр М788-1069/ ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, 1990 г.
16. Степкина Ю.В., Салтыков В.М. Проектирование электрической части понизительной подстанции. Тольятти: ТГУ, 2007. 124 с.
17. Хрущев Ю.В. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических установках. Учебное пособие. Томск: Национальный исследовательский университет Томский политехнический университет, 2012. 160 с.
18. 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
19. Guo Y. Reignition overvoltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in offshore wind farms. International Journal of Electrical Power & Energy Systems
20. Hafner S. Emergence of New Economics Energy Transition Models: A Review. Ecological Economics
21. Liang R. Partial discharge location of power cables based on an improved single-terminal method. Electric Power Systems Research.

22. 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.