

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Российский государственный профессионально-педагогический  
университет»

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ**

Выпускная квалификационная работа бакалавра  
направления подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям)  
профиля подготовки «Энергетика»  
специализации «Энергохозяйство предприятий, организаций, учреждений и  
энергосберегающие технологии»

Идентификационный код ВКР: 545

Екатеринбург 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Российский государственный профессионально-педагогический  
университет»  
Институт инженерно-педагогического образования  
Кафедра энергетики и транспорта

К ЗАЩИТЕ ДОПУСКАЮ:  
Заведующая кафедрой ЭТ  
\_\_\_\_\_ А.О. Прокубовская  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**  
**ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ**

Исполнитель:  
студент группы ЗЭС- 404С  
  
Руководитель:  
доцент кафедры ЭТ  
  
Нормоконтролер:  
ст. преподаватель кафедры ЭТ

А.С. Вотяков  
  
А.А. Емельянов  
  
Т.В. Лискова

Екатеринбург 2018

## **АННОТАЦИЯ**

Выпускная квалификационная работа выполнена на 50 страницах, содержит 50 страниц машинописного текста, 19 рисунков, 15 таблиц, 30 источников информации, а также 4 приложения на 4 листах.

**Ключевые слова:** ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ, ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ, ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ, СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ, ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Вотяков А.С. Проектирование системы электроснабжения лаборатории электромеханики: выпускная квалификационная работа / А.С. Вотяков; Рос. гос. проф.-пед. ун-т, Ин-т инж.-пед. образования, Каф. энергетики и транспорта. – Екатеринбург, 2018. – 50 с.

Краткая характеристика содержания ВКР:

1. Тема выпускной квалификационной работы «Проектирование системы электроснабжения лаборатории электромеханики». В работе рассмотрен путь решения необходимых задач для того, чтобы произвести подготовку лаборатории электромеханики к работе со студентами.

2. Цель работы: разработать схему электроснабжения лаборатории электромеханики.

3. В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана схема электроснабжения лаборатории, также выполнен расчет электрических нагрузок, произведен выбор необходимых кабелей, защитного оборудования и разработана инструкция по центровке валов электрических двигателей.

4. Результаты данной работы можно использовать при реальном проектировании электроснабжения лаборатории электромеханики кафедры ЭТ в Российском государственном профессионально-педагогическом университете.

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	7
1.1 Характеристики трансформатора ТПТ 40/50 ПК .....	7
1.2 Характеристики электрических машин лаборатории .....	10
1.3 Характеристики других стендов лаборатории.....	12
2 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ.....	14
2.1 Расчёт номинальных нагрузок стендов .....	14
2.2 Расчёт электрических нагрузок .....	16
2.3 Выбор трехфазного диодного выпрямителя .....	19
2.4 Расчет и выбор кабелей для подключения стендов.....	22
2.5 Расчет и выбор предохранителей .....	24
2.6 Расчет и выбор автоматов защиты .....	27
2.7 Расчёт токов короткого замыкания.....	28
2.8 Расчет и выбор защитного заземления .....	31
3 РАЗРАБОТКА ИНСТРУКЦИИ ПО ЦЕНТРОВКЕ ВАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	49
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	51
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	54
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	55
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	57

## **ВВЕДЕНИЕ**

Лабораторные работы по дисциплине «Электрические машины» знакомят учащихся с устройством трансформаторов и электрических машин и позволяют экспериментально проверить основные положения теории, приобрести навыки по сборке электрических схем, включающих в себя электрические машины, трансформаторы, пускорегулирующую аппаратуру, измерительные устройства. Непосредственное участие в экспериментах вырабатывает у учащихся практические навыки по методике проведения опытов и обработке их результатов. По полученным результатам лабораторного исследования учащиеся должны научиться оценивать свойства трансформатора и электрической машины.

Предварительная подготовка учащихся к каждой лабораторной работе и понимание ее цели и содержания – важнейшее условие. Поэтому прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, учащийся должен: тщательно изучить содержание работы и порядок ее выполнения; повторить теоретический материал, связанный с выполнением данной работы; подготовить таблицы с необходимым количеством граф для занесения результатов наблюдений и вычислений.

Учащийся должен иметь отдельную рабочую тетрадь для записей материалов по выполняемым работам, необходимых для составления отчета о проделанной работе.

Лабораторная работа завершается составлением отчета и сдачей зачета по ней. Лабораторная работа засчитывается, если отчет содержит необходимые схемы, таблицы и графики, выполненные правильно и аккуратно, и если учащийся ответил на вопросы преподавателя, обнаружив знания устройства и принципа работы объекта исследования и понимание физических процессов, объясняющих полученные по данной работе

результаты. Кроме того, учащийся должен знать назначение всех элементов схемы и уметь объяснять порядок действий при выполнении любого эксперимента в лабораторной работе.

Объектом исследования является лаборатория электромеханики.

Предметом исследования является разработка схемы электроснабжения лаборатории электромеханики.

Цель выпускной квалификационной работы: разработать схему электроснабжения лаборатории электромеханики.

Задачи:

- рассчитать электрические нагрузки;
- выбрать схему электроснабжения;
- выбрать кабели и провода;
- выбрать защитное оборудование;
- разработать инструкцию по центровке валов электрических двигателей.

# **1 КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Учебная лаборатория электрических машин представляет собой современную лабораторию, позволяющую проводить занятия в ней фронтальным методом с комплексным использованием технических средств обучения. Она оснащена универсальными лабораторными стендами (УЛС), рассчитанными на проведение лабораторных работ для студентов всех электротехнических специальностей по полной учебной и сокращенным учебным программам. Каждый лабораторный стенд обеспечивает выполнение бригадой по 4-5 студентов, более 15 лабораторных работ по: машинам постоянного тока, трансформаторам и машинам переменного тока.

## **1.1 Характеристики трансформатора ТПТ 40/50 ПК**

В лаборатории с самого основания был установлен трансформатор ТПТ 40/50 ПК. Трансформаторы ТПТ состоят из двух тороидальных сердечников из ленты железоникелевого сплава (пермаллоя) с высокой магнитной проницаемостью, на каждом из которых намотана рабочая обмотка. Рабочие обмотки соединены встречно. Управляющей обмоткой служат один или несколько кабелей, пропускаемых через центральное отверстие трансформатора. Сердечники с рабочими обмотками, и арматура для крепления угольников залиты эпоксидным компаундом. Параметры трансформатора ТПТ 40/50 ПК указаны в таблице 1. Схема электрическая принципиальная показана на рисунке х, а его габаритные размеры указаны на рисунке у. Трансформатор ТПТ 40/50 ПК является для лаборатории понижающим трансформатором на питающие напряжения УЛС.

Таблица 1- Параметры трансформатора ТПТ 40/50 ПК

Ступени	Мощность, кВА	Сторона ВН			Сторона НН					
		I <sub>1</sub> , А	U <sub>1</sub> , В	Соединение выводов	Соединение Δ			Соединение Y		
					I <sub>2</sub> , А	U <sub>2</sub> , В	Соед. выводов	I <sub>2</sub> , А	U <sub>2</sub> , В	Соед. выводов
1	40	60,8	380	A-Z3; B-X3; C-Y3	445	51,9	a-z; b-x; c-y	257	89,8	x-y-z
2	33,6	51,1	X6-Z3; Y6-X3; Z6-Y3	43,6		75,4				
3	29,2	44,4	X5-Z3; Y5-X3; Z5-Y3	37,9		65,6				
4	24,8	37,7	X4-Z3; Y4-X3; Z4-Y3	32,2		55,7				
5	23,2	35,3	X3-Y3-Z3	30,1		52,1				
6	19,6	29,8	X2-Y2-Z2	25,4		44,0				
7	16,8	25,5	X1-Y1-Z1	21,8		37,7				
8	14,4	21,9	X-Y-Z	18,7		32,3				

Общий вид трансформатора ТПТ 40/50 ПК показан на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид трансформатора ТПТ 40/50 ПК

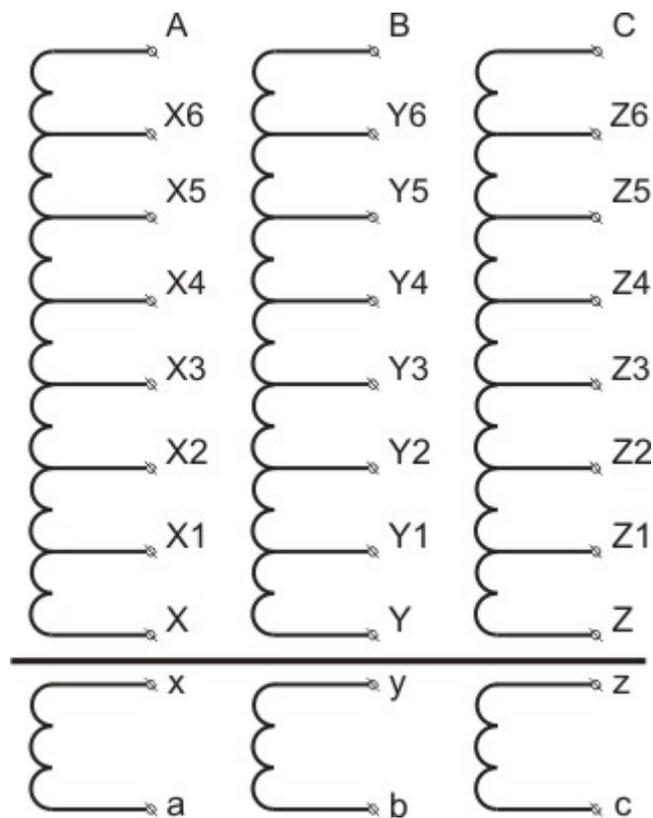


Рисунок 2 - Схема электрическая принципиальная трансформатора ТПТ 40/50

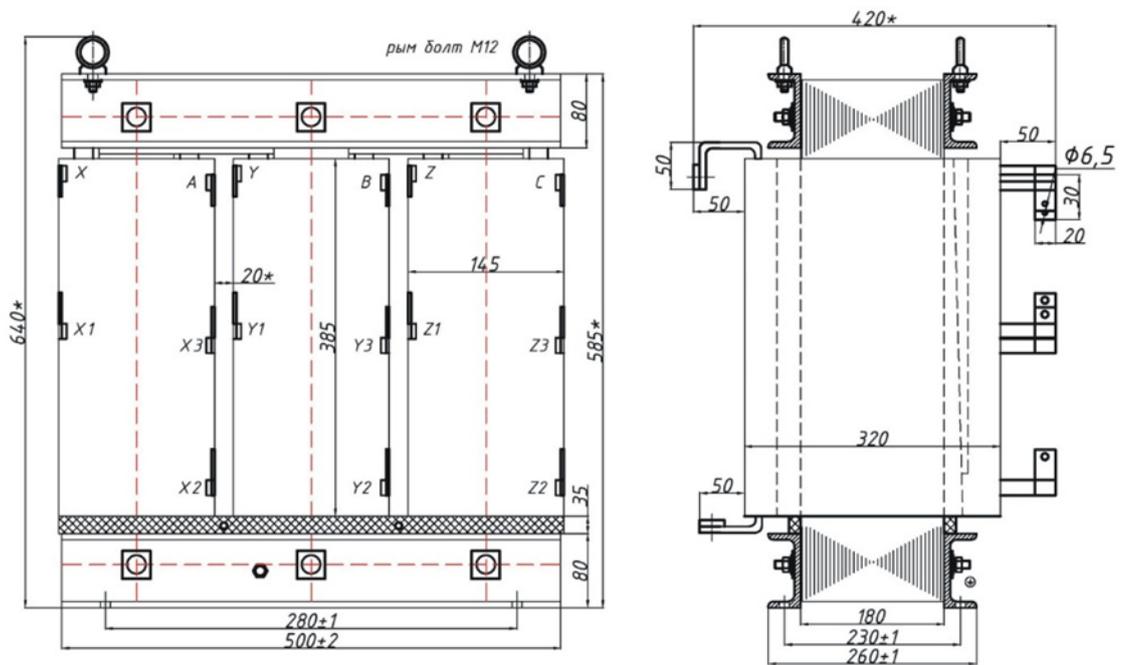


Рисунок 3 - Габаритный чертеж трансформатора

## 1.2 Характеристики электрических машин лаборатории

Силовое оборудование является объектом изучения и предназначено для испытаний основных типов электрических машин в соответствии с программой лабораторного практикума. Оно размещено на отдельно стоящих швеллерах и выполнено в виде двух линий вращающихся электрических машин по три машины в каждой линии.

На первой ближайшей к пульту управления линии УЛС установлены две машины постоянного тока смешанного возбуждения (МПТ1 и МПТ2), асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД с КР1).

На второй линии от пульта управления 1,2,4 УЛС расположены асинхронный двигатель с фазным ротором (АД с ФЗ), машина постоянного тока смешанного возбуждения (МПТ 3) и синхронная машина(СМ).

На второй линии от пульта управления 3 УЛС две машины постоянного тока смешанного возбуждения (МПТ3 и МПТ4), асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АСД с КР2). Так же установлены два трансформатора (ТР1 и ТР2)

Синхронная машина выполнена на базе серийного асинхронного двигателя 4А112МА6 путем конструктивного изменения ротора. На втором швеллере от пульта управления на стойках над трансформаторами установлен блок сопротивлений нагрузки (БСН), используемый в двигателе постоянного тока для ограничения тока при пуске и для защиты двигателя от перегрузок.

Для регулировки напряжения около пульта управления установлены: индукционный регулятор (ИР) и реостат жидкостной нагрузки (ЖР).

Все паспортные данные на данное оборудование представлены в таблицах 2-4.

Таблица 2 – Комплектация 1 учебного лабораторного стенда

Наименование ЭП	$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$I_n$ , А	$\cos\varphi$	кол-во, шт
МПТ 1 и 2 П 42	2,2	220	13,1	-	2
МПТ 3 П 32	2,2	220	12,2	-	1
АД с КЗ МТКФ – 012 – 6	2,2	380	6,5	0,69	1
		220	11		
АД с ФР МТФ – 012 – 6	2,2	380	7,5	0,67	1
СМ	1,6	220	3,5	0,8	1
ТР ТСИЗ 2,5	0,15	-	-	-	2
ИР ФР52	2	380	-	-	1
РЖН	2,2	380	-	1	1
БСН	3	380	-	1	1

Таблица 3 - Комплектация 2 и 4 учебного лабораторного стенда

Наименование ЭП	$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$I_n$ , А	$\cos\varphi$	кол-во, шт
МПТ 1, 2, 3 П 42	2,2	220	13,1	-	3
АД с КЗ МТКФ – 012 – 6	2,2	380	6,5	0,69	1
		220	11		
АД с ФР МТФ – 012 – 6	2,2	380	7,5	0,67	1
СМ	1,6	220	3,5	0,8	1
ТР ТСИЗ 2,5	0,15	-	-	-	2
ИР ФР52	2	380	-	-	1
РЖН	2,2	380	-	1	1
БСН	3	380	-	1	1

Таблица 4- Комплектация 3 учебного лабораторного стенда

Наименование ЭП	$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$I_n$ , А	$\cos\varphi$	Кол-во, шт
1	2	3	4	5	6
МПТ 1 и 2 П 42	2,2	220	13,1	-	3
МПТ 3 П 32	2,2	220	12,2	-	1
АД с КЗ1 МТКФ – 012 – 6	2,2	380	6,5	0,69	1
		220	11		

Окончание таблицы 4

1	2	3	4	5	6
АД с КЗ2 4А112МА6	3	380	7,4	0,76	1
ТР ТСИЗ 2,5	0,15	-	-	-	2
ИР ФР52	2	380	-	-	1
РЖН	2,2	380	-	1	1
БСН	3	380	-	1	1

В таблицах на трансформаторы ТСИЗ 2,5 приведена мощность при опыте короткого замыкания. А мощность индукционного регулятора не будет учтена при расчетах, только будет указана на плане расположения электрооборудования.

### 1.3 Характеристики других стендов лаборатории

ECL Comfort – это электронный регулятор температуры с погодной компенсацией семейства регуляторов ECL Comfort, предназначенных для использования в системах централизованного теплоснабжения, центрального отопления и охлаждения. Экономия энергии достигается за счет правильного регулирования температуры подачи в системах теплоснабжения и охлаждения.

Предусмотрена возможность регулирования до трех контуров. С помощью функции погодной компенсации в регуляторах ECL Comfort производится измерение температуры наружного твоздуха и, соответственно, регулирование температуры подачи в систему теплоснабжения.

Система теплоснабжения с погодной компенсацией повышает уровень комфорта и обеспечивает экономию энергии.

Настройка регулятора ECL Comfort для выбранного приложения производится с помощью ключа приложения ECL. Регулятор ECL Comfort разработан для обеспечения комфортной температуры, оптимального

энергопотребления, простой установки с помощью ключа приложения ECL (по технологии Plug-and-Play) и удобства в пользовании.

Уменьшение энергопотребления достигается за счет погодной компенсации, регулировки температуры в соответствии с графиком, оптимизации, а также за счет ограничения температуры обратки, ограничения расхода и мощности. В регуляторе заложены такие функциональные возможности, как регистрация данных и подача аварийных сигналов.

Легкость управления регулятором ECL Comfort обеспечивается диском (многофункциональной кнопкой) или блоком дистанционного управления (БДУ). Поворотная кнопка и дисплей с подсветкой помогают пользователю переходить по текстовому меню на выбранном языке.

В регуляторе ECL Comfort среди прочего имеется электронный выход для управления клапаном с электроприводом, релейный выход для управления циркуляционным насосом / предохранительным клапаном, а также аварийный выход.

Предусмотрена возможность подключения шести температурных датчиков Pt 1000. Кроме того, при загрузке приложения производится настройка конфигурации двух входов. Предусмотрена возможность настройки конфигурации входа температурного датчика Pt 1000, аналогового входа (0 – 10 В) или цифрового входа.

Максимальная нагрузка на стенды 10 кВт, коэффициент нагрузки 0,65.

## 2 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

### 2.1 Расчёт номинальных нагрузок стендов

В лаборатории представлены 5 номиналов питающих напряжений (рисунок 4) выведенных на панель управления. Учитывая лабораторные работы по предметам: электрические машины и электрический привод; рассчитаем номинальные электрические нагрузки всех стендов по номиналам напряжений.



Рисунок 4 – Панель управления учебного лабораторного стенда

Номинальные значения питающих напряжений будут равны максимальной мощности подключенных электроприемников в данной лабораторной работе.

$$P_H = \sum P_{ЭП}. \quad (1)$$

Рассчитаем номинальные мощности питающих напряжений для первого стенда.

$$P_{H \sim 380} = 2,2 + 3 = 5,2 \text{ кВт};$$

$$P_{H\sim 220} = 2,2 + 3 = 5,2 \text{ кВт} ;$$

$$P_{H-220} = 2,2 + 3 = 5,2 \text{ кВт} ;$$

$$P_{H-110} = 2,2 + 3 = 5,2 \text{ кВт} ;$$

$$P_{H-36} = 0,15 + 0,8 = 0,95 \text{ кВт} .$$

Коэффициент нагрузки для нагрузки на переменном напряжении принимаем от двигателя с его наименьшим значением, результаты расчетов сводим в таблицу 5.

Таблица 5 - Номинальные нагрузки стенов

Наименование электроприемника	U <sub>н</sub> , В	P <sub>н</sub> , кВт	cosφ
Учебный лабораторный стенд - 1	~380	5,2	0,67
	~220	5,2	0,67
	-220	5,2	-
	-110	5,2	-
	-36	0,95	-
Учебные лабораторные стенды – 2 и 4	~380	5,2	0,67
	~220	5,2	0,67
	-220	5,2	-
	-110	5,2	-
	-36	0,95	-
Учебный лабораторный стенд - 3	~380	6	0,76
	~220	6	0,76
	-220	5,2	-
	-110	5,2	-
	-36	0,95	-

Нагрузки приняты исходя из нагрузки на лабораторных работах.

## 2.2 Расчёт электрических нагрузок

Одним из основных этапов проектирования систем электроснабжения объекта, является правильное определение ожидаемых электрических нагрузок, как отдельных ЭП, так и узлов нагрузки на всех уровнях системы электроснабжения.

Расчетные значения нагрузок - это нагрузки, соответствующие такой неизменной токовой нагрузке ( $I_p$ ), которая эквивалентна фактической изменяющейся во времени нагрузке по наибольшему тепловому воздействию (не превышая допустимых значений) на элемент системы электроснабжения.

Зная электрические нагрузки, можно выбрать нужную мощность силовых трансформаторов, мощность и место подключения компенсирующих устройств, выбрать и проверить токоведущие части по условию допустимого нагрева, рассчитать потери и колебания напряжения, выбрать виды защит.

Существуют различные методы расчета электрических нагрузок, которые в свою очередь делятся на:

- основные;
- вспомогательные.

Основные методы расчета электрических нагрузок следующие:

- по номинальной мощности и коэффициенту использования;
- по номинальной мощности и коэффициенту спроса;
- по средней мощности и расчетному коэффициенту;
- по средней мощности и отклонению расчетной нагрузки от средней;
- по средней мощности и коэффициенту формы графика нагрузки.

Применение того или иного метода определяется допустимой погрешностью расчетов и наличия исходных данных.

Расчет электрических нагрузок ведется по уровням проектирования.

Воспользуемся методом по номинальной мощности и коэффициенту использования. Расчет выполняется, используя формулу Ф636-90. Расчет электрических нагрузок электроприемников  $U < 1 \text{ кВ}$  производится для каждого узла питания, а также в целом по лаборатории. При наличии в справочниках интервальных значений  $K_{и}$  следует принимать для расчета наибольшее значение. Расчет производим для нагрузок напряжениями переменного тока 220В и для постоянного тока, для последующего сравнения мощности трансформатора.

Расчетная активная мощность УЛС определяется по формуле:

$$P_p = P_c \cdot K_p, \quad (2)$$

где  $K_p$  - коэффициент расчетной мощности;

$P_c$  - групповая средняя активная мощность, кВт.

$$P_p = 3,02 \cdot 1,96 = 5,93 \text{ кВт}.$$

Групповая средняя активная мощность определяется по формуле:

$$P_c = \sum P_n \cdot K_{и}, \quad (3)$$

где  $\sum P_n$  - суммарная номинальная мощность, кВт;

$K_{и}$  - коэффициент использования.

$$P_c = 21,6 \cdot 0,14 = 3,02 \text{ кВт}.$$

Суммарная средняя реактивная мощность определяется по формуле:

$$Q_c = P_c \cdot \text{tg} \varphi; \quad (4)$$

$$Q_c = 3,02 \cdot 1,05 = 3,17 \text{ квар}.$$

Расчетная реактивная мощность определяется при  $n_3 \leq 10$  по формуле (5), при  $n_3 > 10$  по формуле (6):

$$Q_p = 1,1 Q_c; \quad (5)$$

$$Q_p = 1,1 \cdot 3,17 = 3,49 \text{ квар}.$$

$$n_3 = (2 \cdot \sum P_n) / P_{\text{max.н}}, \quad (6)$$

где  $n_3$  – эффективное число электроприемников, шт;

$$n_3 = (2 \cdot 21,6) / 6 = 7,2 \text{ шт.}$$

Определяем полную расчетную мощность:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}; \quad (7)$$

$$S_p = \sqrt{5,93^2 + 3,49^2} = 6,88 \text{ кВА.}$$

Расчеты по формулам (2-7) сводим в таблицы 2 и 3.

Таблица 6 – Расчет электрических нагрузок

Наименование узлов питания и групп ЭП	Количество приемников рабочих/резервных, n	Установленная мощность, кВт			$K_{и}$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$
		Одного ЭП наименьшего, наибольшего		Общая рабочих / резервных $\sum P_n$ , кВт			
		$P_{н\text{min}}$ , кВт	$P_{н\text{max}}$ , кВт				
ЭП ~220	4	5,2	6,0	21,6	0,14	0,69	1,05
ЭП -220	4	5,2	5,2	20,8	0,14	1	0
ЭП -110	4	5,2	5,2	20,8	0,14	1	0
ЭП -36	4	0,95	0,95	3,8	0,14	1	0
Общее:	16	0,95	6,0	67,0	0,14	0,95	0,34

Таблица 7 – Расчет электрических нагрузок

Наименование узлов питания и групп ЭП	Средняя нагрузка		$n_3$	$K_p$	Максимальная нагрузка		
	$P_c$ , кВт	$Q_c$ , квар			$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА
ЭП ~220	3,02	3,17	7,20	1,96	5,93	3,49	6,88
ЭП -220	2,91	0,00	8,00	1,78	5,18	0,00	5,18
ЭП -110	2,91	0,00	8,00	1,78	5,18	0,00	5,18
ЭП -36	0,53	0,00	8,00	1,78	0,95	0,00	0,95
Общее:	9,38	3,17	22,3	1,66	15,57	3,49	15,96

Так как мы пользуемся 4 ступенями трансформатора будем сравнивать по наибольшей 7 ступени ( $U_{2н}$  – наименьшее).

$$S_p \leq S_{н.тр} \quad (8)$$

$$15,6 \text{ кВА} \leq 16,8 \text{ кВА}$$

Это грубое сравнение так как в основном работает на меньших ступенях ( $U_{2н}$  – наибольшие значения)

Установлено что эффективный  $\text{tg}\varphi=0,33$ . В нашем случае  $\text{tg}\varphi=0,34$ . Следовательно лаборатория в компенсации реактивной мощности – не нуждается.

### 2.3 Выбор трехфазного диодного выпрямителя

Трехфазные выпрямители по сравнению с однофазными выпрямителями имеют меньшую пульсацию выпрямленного напряжения и могут использоваться без фильтров. Кроме этого трехфазные выпрямители имеют более высокие энергетические показатели.

Наибольшее распространение получила трехфазная мостовая схема выпрямления (рисунок 5а), Схема трехфазного мостового выпрямителя (схема Ларионова) содержит выпрямительный мост из шести вентиляей. Вентили V2, V4, V6, у которых электрически соединены анода, образуют анодную группу. Вентили V1, V3, V5 с объединенными катодами образуют катодную группу. Нагрузку включают между точками соединения катодов и анодов вентиляей.

В любой момент времени работают два вентиля. В катодной группе в открытом состоянии будет находиться вентиль с наибольшим положительным потенциалом на аноде, в анодной группе работает вентиль, катод которого имеет наиболее отрицательный потенциал. Например, после момента времени  $\omega t_1$  наибольший положительный потенциал имеет фаза а, поэтому в катодной группе работает вентиль V1, а наибольший отрицательный потенциал имеет фаза "b", поэтому в анодной группе работает вентиль V4. Отметим на временных диаграммах фазных напряжений (рисунок 5б) интервалы проводимости вентиляей: на интервале  $\omega t_1 — \omega t_2$  проводят вентили V1, V4, на интервале  $\omega t_2 — \omega t_3 —$  вентили V1, V6, на интервале,  $\omega t_3 — \omega t_4 —$  вентили V6, V3, на интервале и  $\omega t_4 — \omega t_5 —$  вентили V3, V2 и т.д. Таким образом, интервал проводимости каждого

вентиля составляет  $2\pi/3$ , а интервал совместной работы двух вентилях равен  $2\pi/6$ . За период напряжения питания происходят шесть переключений вентилях, т. е. частота пульсации выпрямленного напряжения  $U_0$  равна  $6f$  сети (300 Гц, рисунок 5в).

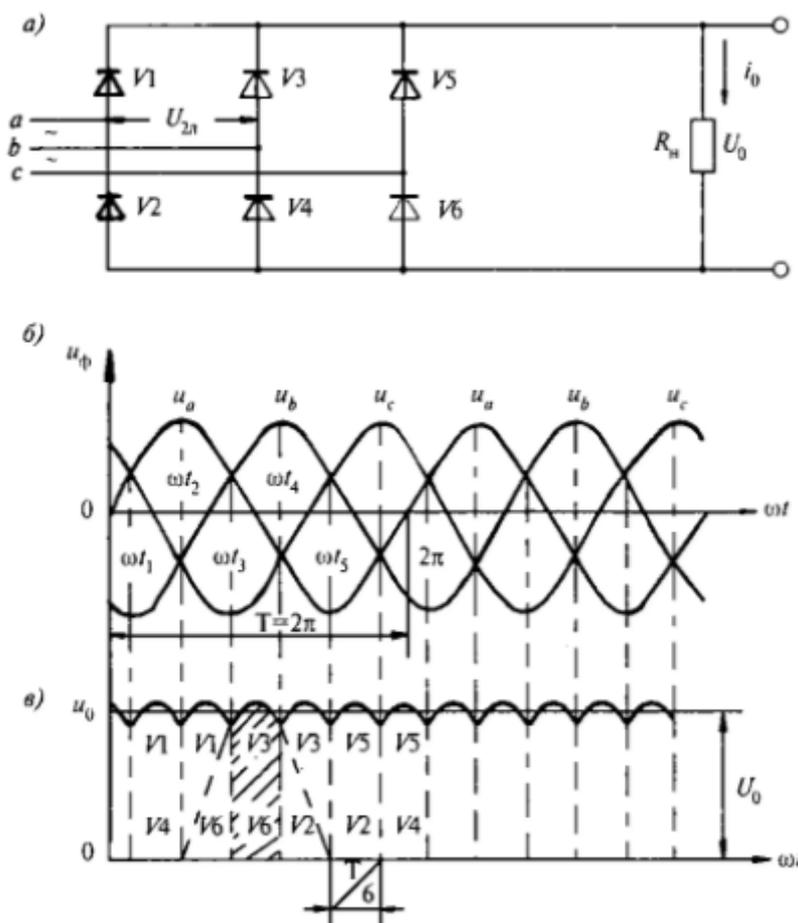


Рисунок 5 – Трехфазная схема мостового выпрямителя и ее временные диаграммы:

- а) Трехфазная схема мостового выпрямителя, б) фазных напряжений, в) выпрямленного напряжения

В настоящее время выбор трехфазных выпрямителей довольно широк, выберем выпрямители универсальные для всех номиналов напряжений, а также при выборе их в одном корпусе не надо забывать о об их охлаждении, для этого дополнительно установим радиаторы охлаждения.

Выбираем трехфазный мостовой выпрямитель VS-26MT80. Внешний вид показан на рисунке 6. Характеристики указаны в таблице 8.

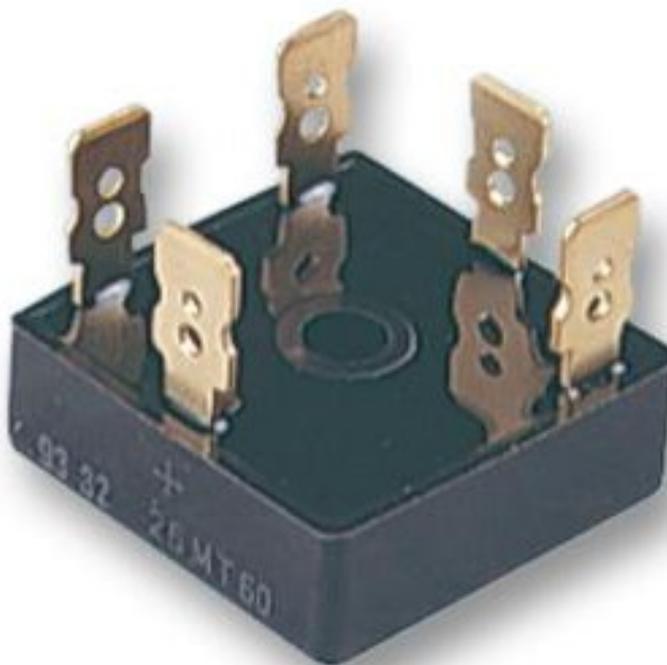


Рисунок 6 – Внешний вид трехфазного мостового выпрямителя марки VS-26MT80

Таблица 8 - Паспортные данные выпрямителя марки VS-26MT80

Наименование	Значение
Количество фаз	Три
Линия продукции	VS-26 Series
Максимальная рабочая температура	150°C
Количество выводов	5выводов
Средний прямой ток	25А
Максимальное прямое напряжение	1.26В
Максимальное Значение Напряжения $V_{ггм}$	800В
Стиль корпуса мостового выпрямителя	D-63

Для охлаждения выпрямителя выбираем профиль АВ0092.

## 2.4 Расчет и выбор кабелей для подключения стендов

Расчетный ток  $I_p$  А, нагрузки определяются по следующим формулам:

- для трехфазной цепи переменного тока:

$$I_p = P / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi); \quad (9)$$

- для цепи постоянного тока:

$$I_p = P / U, \quad (10)$$

где  $P$  - расчетная максимальная нагрузка, Вт;

$U$  - номинальное напряжение сети, В;

$\cos \varphi$  - коэффициент мощности.

Расчетный ток ЭП ~380 УЛС 1 определяется по формуле (8):

$$I_p = 5200 / \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,67 = 11,87 \text{ А}.$$

Аналогичным способом рассчитаем другие ЭП и занесем данные в таблицу 9.

Диаметр жилы кабеля выбираем согласно следующему условию, а данные заносим в таблицу 9.

$$I_{\text{д.к.}} \geq I_p. \quad (11)$$

Выбираю кабель марки КГ(3х4,1х2,5) сечением  $S=4\text{мм}^2$ ,  $I_{\text{д.к.}} = 50\text{А}$ .

$$50\text{А} > 11,87\text{А}.$$

Условие выполняется, следовательно, провод выбран правильно.

Так же выбранный кабель необходимо проверить на потерю напряжения по следующей формуле:

$$\Delta U = \left( \frac{10^5}{U_{\text{ном}}^2 \cdot \cos \varphi} \right) \cdot P_{\text{ном}} \cdot l \cdot (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi), \quad (12)$$

где  $U_{\text{ном}}$  - номинальное напряжение сети, В;

$P_{\text{ном}}$  - номинальная мощность электроприемника, кВт;

$l$  - длина питающей линии, км;

$r_0$  - активное сопротивление проводника, мОм/м;

$x_0$  - реактивное сопротивление проводника, мОм/м.

Проверяю выбранный провод для электроплиты на потерю напряжения по формуле (12):

$$\Delta U = \frac{2 \cdot 10^5}{380^2 \cdot 0,67} \cdot 5,2 \cdot 0,011 \cdot ((4,65 \cdot 0,67 + 0,095 \cdot 0,74) \cdot 10^{-3}) = 0,37\% .$$

Так как  $\Delta U < 5\%$ , то следует что кабель выбран верно.

Таблица 9 - Выбор кабелей для подключения стенов

Наименование ЭП	$P_H$ , кВт	$I_p$ , А	$\cos\phi$	Марка кабеля	$I_{доп}$ , А	$I_{факт}$ , М	$\Delta U$ , %	
УЛС1	ЭП ~380	5,20	11,81	0,67	КГ(3x4,1x2,5)	50	11	0,37
	ЭП ~220	5,20	20,39	0,67	КГ(3x4,1x2,5)	50	11	0,37
	ЭП -220	5,20	23,64	1,00	КГ(2x4)	55	11	1,10
	ЭП -110	5,20	47,27	1,00	КГ(2x4)	55	11	4,40
	ЭП -36	0,95	23,75	1,00	КГ(2x4)	55	11	3,89
УЛС2	ЭП ~380	5,20	11,81	0,67	КГ(3x4,1x2,5)	50	9	0,30
	ЭП ~220	5,20	20,39	0,67	КГ(3x4,1x2,5)	50	9	0,30
	ЭП -220	5,20	23,64	1,00	КГ(2x4)	55	9	0,90
	ЭП -110	5,20	47,27	1,00	КГ(2x4)	55	9	3,60
	ЭП -36	0,95	23,75	1,00	КГ(2x4)	55	9	3,18
УЛС3	ЭП ~380	6,00	12,01	0,76	КГ(3x4,1x2,5)	50	7	0,27
	ЭП ~220	6,00	20,74	0,76	КГ(3x4,1x2,5)	50	7	0,27
	ЭП -220	5,20	23,64	1,00	КГ(2x4)	55	7	0,70
	ЭП -110	5,20	47,27	1,00	КГ(2x4)	55	7	2,80
	ЭП -36	0,95	23,75	1,00	КГ(2x4)	55	7	2,47
УЛС4	ЭП ~380	5,20	11,81	0,67	КГ(3x4,1x2,5)	50	5	0,17
	ЭП ~220	5,20	20,39	0,67	КГ(3x4,1x2,5)	50	5	0,17
	ЭП -220	5,20	23,64	1,00	КГ(2x4)	55	5	0,50
	ЭП -110	5,20	47,27	1,00	КГ(2x4)	55	5	2,00
	ЭП -36	0,95	23,75	1,00	КГ(2x4)	55	5	1,77
Насосные установки	10,00	22,23	0,65	КГ(3x4,1x2,5)	50	15	0,97	
Трансформатор	21,60	35,59	0,88	КГ(3x10, 1x6)	55	3	0,17	
Ввод	31,60	52,69	0,87	КГ(3x10, 1x6)	55	10	0,81	

## 2.5 Расчет и выбор предохранителей

Использование предохранителей в цепях постоянного тока имеет свои особенности, т.к. из-за большой скорости процессов и отсутствия нулевых переходов тока цепи на работу предохранителя значительно влияют реактивные параметры цепи. Индуктивность в цепи постоянного напряжения ограничивает скорость нарастания тока. Время, затрачиваемое на достижение током 63% от конечного значения, называется постоянной времени, обозначаемой соотношением  $L/R$ . Скорость же нарастания тока влияет на начальную энергию плавления элемента предохранителя. Это определяет как время-токовую характеристику плавления, так и максимальный пропускаемый ток (рисунок 7).

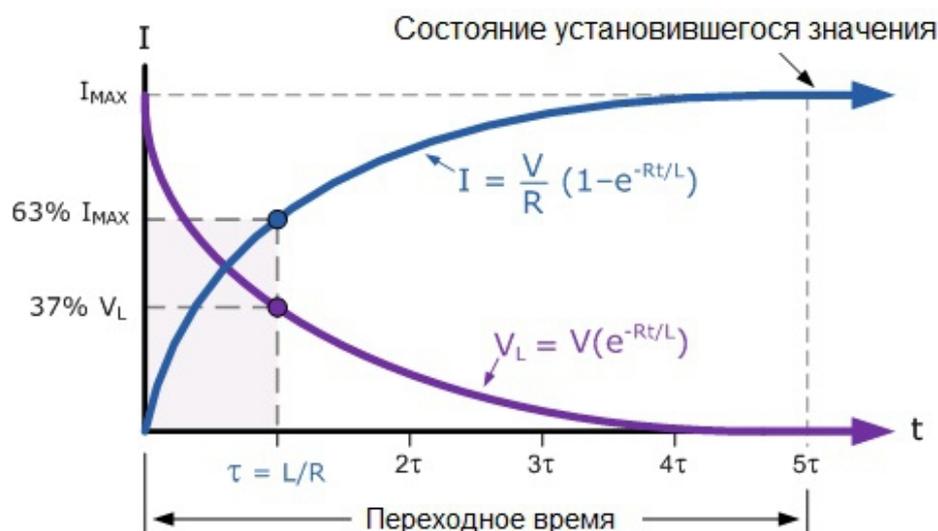


Рисунок 7 – Время-токовая характеристика цепи постоянного тока

Большинство схем имеют постоянную времени между 10 и 20 миллисекундами, исходя из чего спецификации МЭК (международной электротехнической комиссии) требуют тестирования в этих пределах. Константы времени больше чем 20 мс встречаются не часто, за исключением тяговых решений электротранспорта, где большая длина контактной сети

даёт чрезвычайно высокое соотношение индуктивности к сопротивлению. При коротких замыканиях, в условиях срабатывания предохранителя, значение постоянной времени цепи может отличаться от постоянного времени в «нормальных» рабочих условиях.

Во многих выпрямительных схемах, даже в условиях срабатывания, плавкая вставка будет под воздействием переменного напряжения (когда напряжение стремится к нулю или близко к нулю с регулярностью, соответствующей частоте питания).

В этих условиях, гашение дуги внутри плавкой вставки в случае срабатывания упрощается снижением напряжения до нуля. Когда предохранитель установлен в цепи постоянного тока, процесс гашения дуги при срабатывании не будет упрощаться периодическим снижением напряжения до 0, как в ситуации с переменным напряжением. При постоянном токе погасить дугу гораздо сложнее, вот почему и предохранитель в этом случае, как правило, должен быть гораздо больше по размерам.

Напряжение, при котором плавкая вставка может безопасно работать, таким образом, зависит от постоянного времени цепи. Следует отметить, что при малых значениях постоянной времени номинал тока предохранителя при постоянном напряжении иногда может оказаться больше, чем при переменном (согласно стандартам, IEC или UL). Однако для большинства случаев номинал предохранителей при постоянном токе не превышает 75% от номинала при переменном токе, и по мере увеличения постоянной времени он снижается.

Напряжение дуги, возникшей внутри плавкой вставки во время срабатывания, будет меняться по отношению к напряжению системы. Изменение напряжения дуги в результате самоиндукции относительно приложенного напряжения будет также различным для цепей переменного и постоянного тока. Если это специально не предусмотрено конструкцией,

предохранители не рекомендуется применять для защиты от незначительных перегрузок в цепях постоянного тока. Производительность в этой области может быть ограничивающим фактором при выборе предохранителя.

Определяем номинальный ток для каждого потребителя

$$I_n = P_n / (\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi); \quad (13)$$

где  $P_n$  - номинальная мощность приемника, кВт;

$U_n$  - номинальное напряжение, кВ;

$\cos \varphi$  - коэффициент мощности.

$$I_n = 5,2 / (\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,67) = 20,4 \text{ А}.$$

Определяем пусковой ток:

$$I_n = I_n \cdot K_{II}, \quad (14)$$

$$I_n = 20,4 \cdot 3 = 61 \text{ А}.$$

3) Производим расчет тока плавкой ставки предохранителя:

$$I_{\text{пл.вст.}} = I_n / k, \quad (15)$$

где  $k$  - коэффициент снижения пускового тока, который при легком пуске принимается равным - 2,5; а при тяжелом пуске - 1,6.

$$I_{\text{пл.вст.}} = 61 / 2,5 = 24,5 \text{ А}.$$

По результатам расчета, исходя из тока плавкой вставки, выбираем предохранитель ПР32-32-25 ЗР. Результаты расчетов сводим в таблицу 10.

Таблица 10 – Выбор предохранителей

Наименование ЭП	$P_n$ , кВт	$I_n$ , А	$\cos \varphi$	$I_{II}$ , А	$\alpha$	$I_{\text{пл.вст.}}$ , А	Марка защитного аппарата
1	2	3	4	5	6	7	8
УЛС1, УЛС2 ~220	5,2	20,4	0,67	61	2,5	24,5	ПР32-32-25 ЗР
УЛС3, УЛС4 ~220	6,0	23,5	0,67	71	2,5	28,2	ПР32-32-32 ЗР
УЛС1, УЛС2 ~115	5,2	25,0	1,00	75	2,5	30,1	ПР32-32-32 ЗР
УЛС3, УЛС4 ~115	5,2	25,0	1,00	75	2,5	30,1	ПР32-32-32 ЗР
УЛС1, УЛС2 -220	5,2	23,6	1,00	71	2,5	28,4	ПР32-32-32 2Р
УЛС3, УЛС4 -220	5,2	23,6	1,00	71	2,5	28,4	ПР32-32-32 2Р

Окончание таблицы 10

1	2	3	4	5	6	7	8
УЛС1, УЛС2 ~58	5,2	26,1	1,00	78	2,5	31,4	ПР32-32-32 3Р
УЛС3, УЛС4 ~58	5,2	26,1	1,00	78	2,5	31,4	ПР32-32-32 3Р
УЛС1, УЛС2 -110	5,2	26,1	1,00	78	2,5	31,4	ПР32-32-32 2Р
УЛС3, УЛС4 -110	5,2	26,1	1,00	78	2,5	31,4	ПР32-32-32 2Р
УЛС1, УЛС2 ~19	0,95	25,0	1,00	75	2,5	30,0	ПР32-32-32 3Р
УЛС3, УЛС4 ~19	0,95	25,0	1,00	75	2,5	30,0	ПР32-32-32 3Р
УЛС1, УЛС2 -36	0,95	26,4	1,00	79	2,5	31,7	ПР32-32-32 2Р
УЛС3, УЛС4 -36	0,95	26,4	1,00	79	2,5	31,7	ПР32-32-32 2Р
Ввод	31,6	52,5	0,87	157	2,5	63,0	ЯВ3-31-100-63

## 2.6 Расчет и выбор автоматов защиты

Определяем номинальный ток по формуле (13):

$$I_n = 5,2 / (\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,67) = 20,4 \text{ А}.$$

Выбираем автоматический выключатель по следующему условию, а данные заносим в таблицу 11:

$$I_{т.р} \geq 1,1 \times I_n. \quad (16)$$

Выбираю автоматический выключатель для ЭП~380: 3Р 16А тип С 4,5кА ВА 47-29,  $I_{т.р.}=A$  с дополнительной дифференциальной защитой.

$$I_{т.р} = 1,1 \cdot 36,36 = 39,99 \text{ А}.$$

$$40 \text{ А} > 39,99 \text{ А}.$$

Условие выполняется, следовательно, автоматический выключатель выбран правильно.

Таблица 11 - Расчет автоматов защиты

Наименование ЭП	$P_n$ , кВт	$I_n$ , А	$\cos\varphi$	$I_{т.р.}$ , А	Марка защитного аппарата
1	2	3	4	5	6
УЛС1, УЛС2 ~380	5,2	11,2	0,67	12,3	3Р 16А тип С 4,5кА ВА 47-29
УЛС3, УЛС4 ~380	6	11,4	0,76	12,5	3Р 16А тип С 4,5кА ВА 47-30
УЛС1, УЛС2 ~220	5,2	19,5	0,67	21,5	3Р 25А тип С 4,5кА ВА 47-31
УЛС3, УЛС4 ~220	6	19,8	0,76	21,8	3Р 25А тип С 4,5кА ВА 47-32
УЛС1, УЛС2 ~115	5,2	25,0	1,00	27,6	3Р 32А тип С 4,5кА ВА 47-33

## Окончание таблицы 11

1	2	3	4	5	6
УЛС3, УЛС4 ~115	5,2	25,0	1,00	27,6	ЗР 32А тип С 4,5кА ВА 47-34
УЛС1, УЛС2 ~58	5,2	30,1	1,00	31,6	ЗР 32А тип С 4,5кА ВА 47-35
УЛС3, УЛС4 ~58	5,2	30,1	1,00	31,6	ЗР 32А тип С 4,5кА ВА 47-36
УЛС1, УЛС2 ~19	0,95	15,3	1,00	16,8	ЗР 20А тип С 4,5кА ВА 47-37
УЛС3, УЛС4 ~19	0,95	15,3	1,00	16,8	ЗР 20А тип С 4,5кА ВА 47-38
Насосные установки	10	22,2	0,65	24,5	ЗР 25А тип С 4,5кА ВА 47-39
Трансформатор	21,6	35,5	0,88	39,0	АЕ2056М 40А

## 2.7 Расчёт токов короткого замыкания

Ток короткого замыкания может возникать в разных цепях, подключенных к различным источникам постоянного или переменного тока. Проще всего дело обстоит с обычным плюсом, который вдруг соединился с минусом, минуя полезную нагрузку. А вот с переменным током вариантов больше. Однофазный ток короткого замыкания возникает при соединении фазы с нейтралью или ее заземлении. В трехфазной сети может возникнуть нежелательный контакт между двумя фазами. Напряжение в 380 или более (при передаче энергии на большие расстояния по ЛЭП) вольт также может вызвать неприятные последствия, в том числе и дуговую вспышку в момент коммутации. Замкнуть может и все три (или четыре, вместе с нейтралью) провода одновременно, и ток трехфазного короткого замыкания будет течь по ним до тех пор, пока не сработает защитная автоматика. Но и это еще не все. В роторах и статорах электрических машин (двигателей и генераторов) и трансформаторах порой случается такое неприятное явление, как межвитковое замыкание, при котором соседние петли провода образуют своеобразное кольцо. Этот замкнутый контур обладает крайне низким сопротивлением в сети переменного тока. Сила тока короткого замыкания в витках растет, это становится причиной нагрева всей машины. Собственно, если такая беда произошла, не следует ждать, пока оплавится вся изоляция и электромотор задымится. Обмотки машины нужно перематывать, для этого

необходимо специальное оборудование. Это же касается и тех случаев, когда из-за «межвиткового» возник ток короткого замыкания трансформатора. Чем меньше обгорит изоляция, тем проще и дешевле будет перемотка.

При расчете токов короткого замыкания в сетях напряжением ниже 1000В необходимо учитывать индуктивные и активные сопротивления короткозамкнутой цепи.

На суммарное значение сопротивления значительно влияют: сопротивления автоматических выключателей, катушек трансформаторов тока, переходные сопротивления контактов, сопротивление проводников.

Составим схему замещения для цепи 380 В и изобразим на рисунке 8.

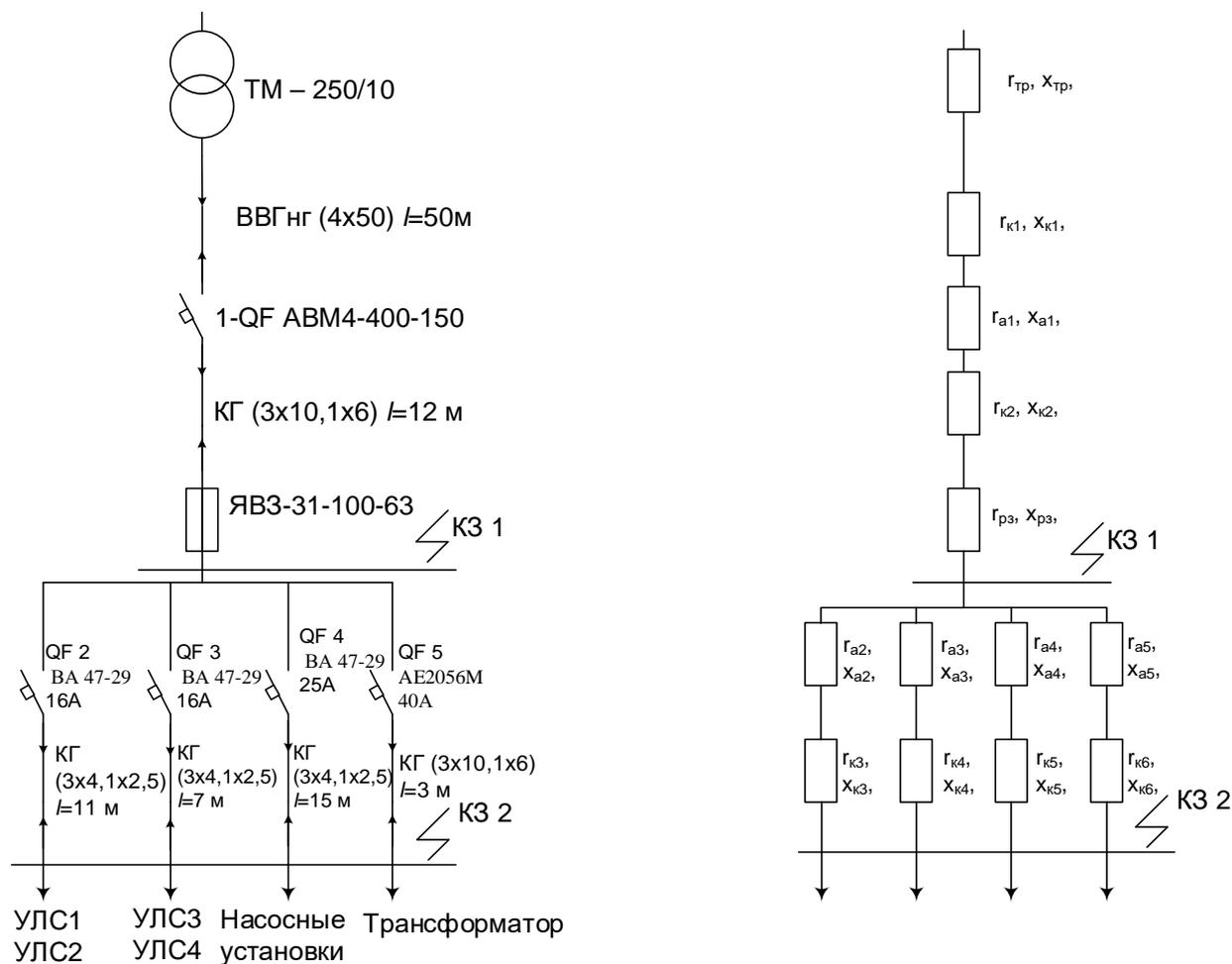


Рисунок 8 - Слева схема короткого замыкания, справа схема замещения

Выписываем активное удельное сопротивление всех элементов схемы (рисунок 8) в таблицу 12:

Таблица 12 – Удельное активное сопротивление элементов

$\Gamma_{к1},$ МОм	$\Gamma_{а1},$ МОм	$\Gamma_{к2},$ МОм	$\Gamma_{рз},$ МОм	$\Gamma_{а2},$ МОм	$\Gamma_{а3},$ МОм	$\Gamma_{а4},$ МОм	$\Gamma_{а5},$ МОм	$\Gamma_{к3},$ МОм	$\Gamma_{к4},$ МОм	$\Gamma_{к5},$ МОм	$\Gamma_{к6},$ МОм
0,39	0,6	0,92	1	1,3	1,3	1,3	1,3	4,65	4,65	4,65	1,84

Выписываем реактивное удельное сопротивление всех элементов схемы (рисунок 8) в таблицу 13:

Таблица 13- Удельное реактивное сопротивление элементов

$X_{к1},$ МОм	$X_{а1},$ МОм	$X_{к2},$ МОм	$X_{рз},$ МОм	$X_{а2},$ МОм	$X_{а3},$ МОм	$X_{а4},$ МОм	$X_{а5},$ МОм	$X_{к3},$ МОм	$X_{к4},$ МОм	$X_{к5},$ МОм	$X_{к6},$ МОм
0,0625	0,28	0,073	0,85	2,7	2,7	2,7	2,7	0,095	0,095	0,095	0,073

Рассчитаем суммарные активные и реактивные сопротивления для К32:

$$\sum r = \sum r_k \cdot l + \sum r_{оп.}, \quad (17)$$

$$\sum x = \sum x_k \cdot l + \sum x_{оп.}, \quad (18)$$

$$\sum r = 0,39 \cdot 50 + 0,6 + 0,92 \cdot 12 + 1 = 32,14 \text{ МОм},$$

$$\sum x = 0,0625 \cdot 50 + 0,28 + 0,073 \cdot 12 + 0,85 = 5,131 \text{ МОм}.$$

Определим полное сопротивление К32:

$$z = \sqrt{(\sum r)^2 + (\sum x)^2}, \quad (19)$$

$$z = \sqrt{32,14^2 + 5,131^2} = 32,58 \text{ МОм}.$$

Ток короткого замыкания найдем по формуле К32:

$$I_{к.з.} = \frac{U_{\phi}}{z + z_m}, \quad (20)$$

где  $z_m$  - полное сопротивление трансформатора при однофазном К32, МОм.

$$I_{к.з.} = \frac{220}{32,58 + 312} = 638 \text{ A}.$$

По паспорту плавкой вставки или автомата, он должен отключать при токе короткого замыкания превышающим в 3-5 раз номинальный, возьмем наихудшее 3 раза:

$$I_{к.з.} \geq 3 \cdot I_{нл.вст.}, \quad (21)$$

$$638 \text{ A} > 40 \cdot 3 \text{ A} = 120 \text{ A}.$$

Условие выполняется, значит защита выбрана верно.

Для КЗ2 все расчеты сведем в таблицу 14:

Таблица 14 – Расчеты токов короткого замыкания

Наименование ЭП	$\sum r, \text{ мОм}$	$\sum x, \text{ мОм}$	$\sum z, \text{ мОм}$	$I_{к.з.}, \text{ A}$	$I_{т.р.}, \text{ A}$	$3I_{т.р.}, \text{ A}$	Результат
OF2 ВА 47-29 16А	38,09	7,926	38,91	627	16	48	Срабатывает
OF3 ВА 47-29 16А	38,09	7,926	38,91	627	16	48	Срабатывает
OF4 ВА 47-29 16А	38,09	7,926	38,91	627	16	48	Срабатывает
OF5 АЕ5056М 40А	35,28	7,904	36,15	632	40	120	Срабатывает

## 2.8 Расчет и выбор защитного заземления

В сетях с заземленной нейтралью напряжением до 1000 В защитное заземление неэффективно, так как ток замыкания на землю оказывается здесь недостаточным для срабатывания максимальной токовой защиты и с уменьшением сопротивления заземлителя возрастает. В таких сетях защита от замыкания фазы на корпус достигается устройством зануления.

Таким образом, защитное заземление применяется в сетях напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью и в сетях напряжением выше 1000 В как с изолированной, так и заземленной нейтралью.

Согласно ГОСТ 12.1.030-81 защитному заземлению подлежат электроустановки:

– при номинальном напряжении 380 В и выше переменного тока и 440 В и выше постоянного тока — во всех случаях;

- при номинальном напряжении от 42 до 380 В переменного тока и от 110 до 440 В постоянного тока — при работах в условиях с повышенной опасностью и особо опасных;

- независимо от величины 'напряжения питания — во взрывоопасных помещениях.

Заземляющее устройство состоит из заземляющих проводников и заземлителей.

Заземляющие проводники электрически связывают металлические корпуса заземляемых частей электроустановка с заземлителем. В качестве заземляющих проводников могут быть использованы:

- специально предусмотренные для этой цели проводники;
- металлические конструкции зданий (фермы, колонны и т. п.);
- арматура железобетонных строительных конструкций и фундаментов.

В качестве штырей можно использовать металлический прут диаметром 16 мм и больше. Причем брать арматуру нельзя: поверхность у нее каленая, что меняет распределение тока. Также каленый слой в земле быстрее разрушается. Второй вариант — металлический уголок с полочками 50 мм. Эти материалы хороши тем, что в мягкий грунт их можно забить кувалдой. Чтобы это было легче делать, один конец заостряют, на второй приваривают площадку, по которой проще бить.

Иногда используют металлические трубы, один край которых сплюснен (заварен) в конус. В нижней их части (около полуметра от края) сверлятся отверстия. При пересыхании грунтов распределение тока утечки значительно ухудшается, а в такие стержни можно заливать соляной раствор, восстанавливая работу заземления. Минус этого способа — приходится под каждый стержень копать/бурить скважины — забить их кувалдой на нужную глубину не получится.

Штыри-заземлители должны уходить в грунт ниже глубины промерзания как минимум на 60-100 см. В регионах с засушливым летом желательно чтобы штыри находились хотя бы частично во влажном грунте. Потому используются в основном уголки или прут длиной 2-3 м. Такие размеры обеспечивают достаточную площадь соприкосновения с грунтом, создающую нормальные условия для рассеивания токов утечки.

Пример использования металлических прутков показан на рисунке 9.

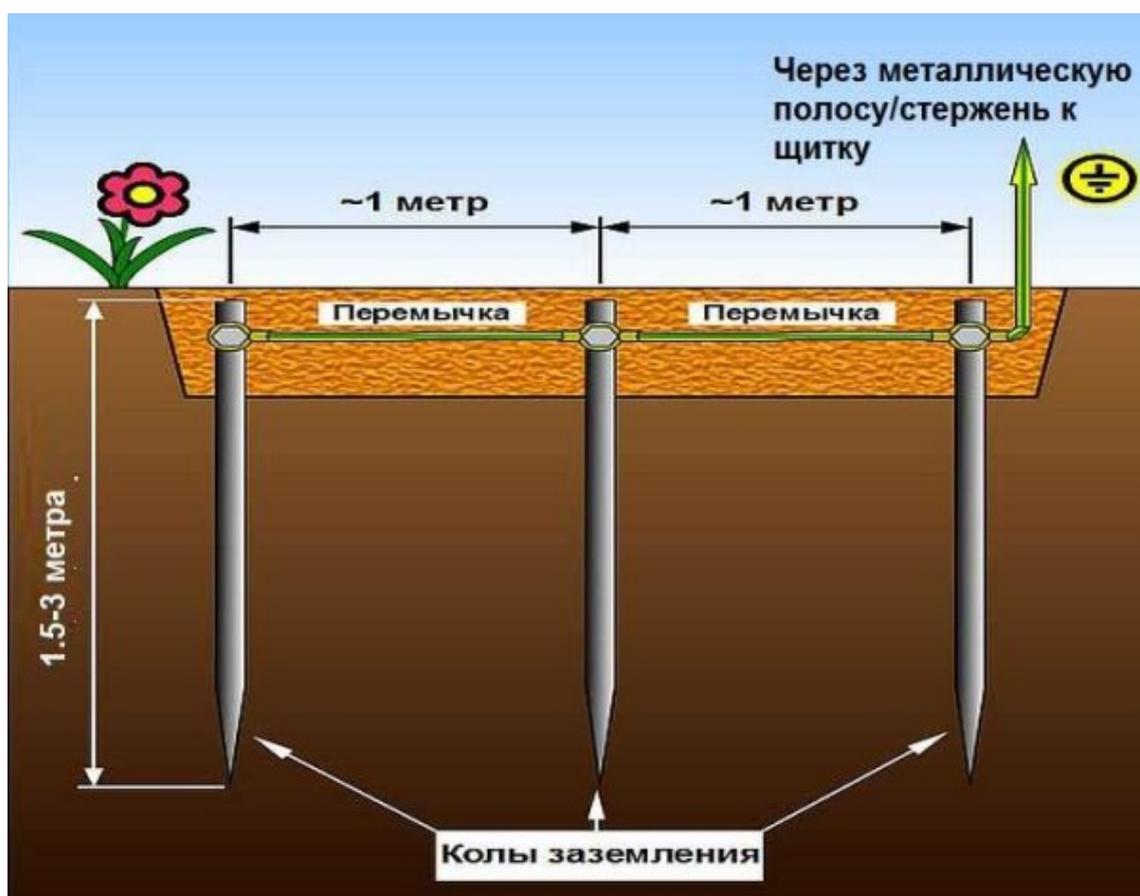


Рисунок 9 – Заземлением с использованием металлических прутков

Работа защитного заземления состоит в том, чтобы рассеивать по большой площади токи утечки. Происходит это за счет плотного контакта металлических заземлителей — штырей и полос — с грунтом. Поэтому элементы заземления никогда не красят. Это очень сильно снижает

токопроводимость между металлом и землей, защита становится неэффективной. Предотвратить коррозию в местах сварки можно антикоррозионными составами, но не краской.

Пример использования металлических труб показан на рисунке 10.

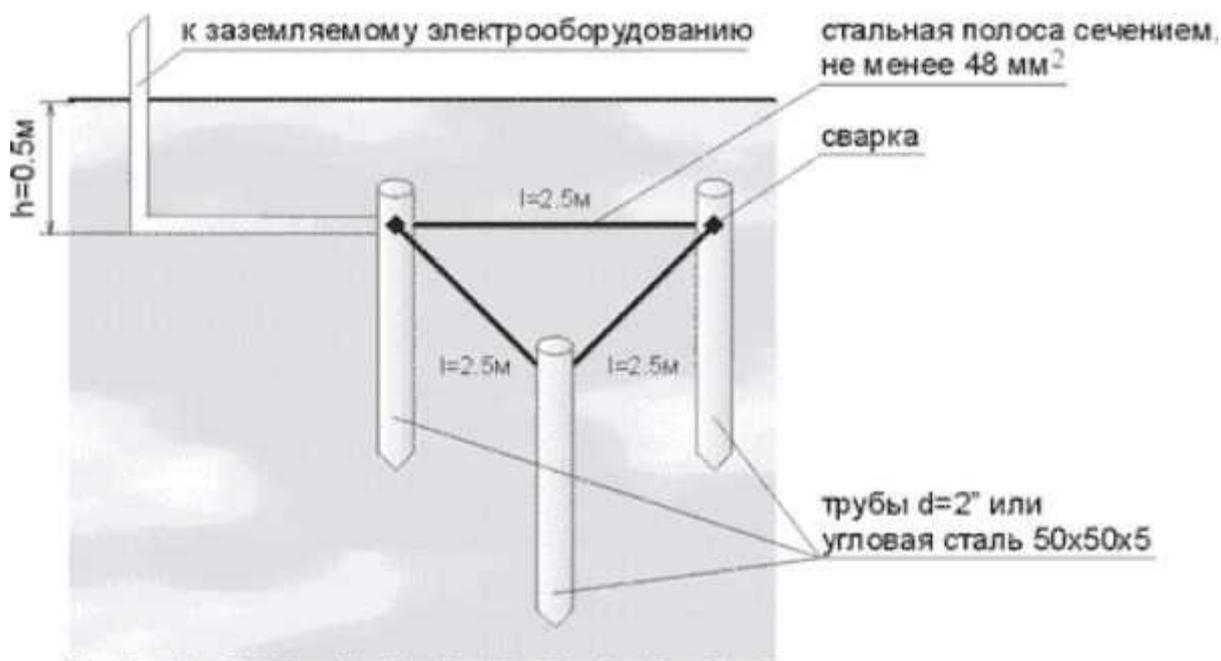


Рисунок 10 - Заземлением с использованием металлических труб

Второй важный момент: заземление должно иметь маленькое сопротивление, а для этого очень важен хороший контакт. Он обеспечивается сваркой. Все соединения провариваются, причем качество шва должно быть высоким, без трещин, каверн и других дефектов. Еще раз обращаем внимание: заземление в частном доме нельзя делать на резьбовых соединениях. Со временем металл окисляется, разрушается, сопротивление многократно возрастает, защита ухудшается или вообще не работает.

Все описываемые ранее устройства — из забиваемых уголков, труб и стрижней — называют традиционными. Их недостаток — большой объем земляных работ и большая площадь, которая требуется при устройстве заземлителя. Все потому, что необходима определенная площадь контакта

штырей с грунтом, достаточная для того чтобы обеспечить нормальное «растекание» тока. Сложность может вызвать и необходимость сварки — по-другому соединять элементы заземления нельзя. Зато плюс этой системы — относительно небольшие затраты. Если делать традиционное заземление в частном доме своими руками, оно по максимуму обойдется в 2000-3000 рублей. Это если покупать весь металл и платить за сварку, а остальные работы проводить самостоятельно

Несколько лет назад появились модульные штыревые системы, показанные на рисунке 11. Это комплект штырей, которые забиваются на глубину до 40 м. То есть получается очень длинный заземлитель, который уходит на глубину. Фрагменты штыря соединяются друг с другом при помощи специальных хомутов, которые не только фиксируют их, но и обеспечивают качественное электрическое соединение.



Рисунок 11 - Набор модульной системы заземления

Плюс модульного заземления — малая площадь и меньший объем работ, которые необходимы. Требуется небольшой приямок со сторонами

60x60 см и глубиной 70 см, траншея, соединяющая заземлитель с домом. Штыри длинные и тонкие, забивать их в подходящий грунт несложно. Вот тут и подошли к основному минусу: глубина большая, и если на пути встретиться, например, камень, придется начинать сначала. А вынуть стержни — это проблема. Они не сварены, а выдержит или нет хомут — вопрос.

Второй минус — высокая цена. Вместе с установкой обойдется вам такое заземление в 5000-6000 рублей. Самостоятельная установка проблематична, так как забивать эти стержни кувалдой не получится. Нужен специальный пневматический инструмент, который научились заменять перфоратором с ударным режимом. Еще необходима проверка сопротивления после каждого забитого стержня. Но если вы не хотите связываться со сваркой и земельными работами, модульное штыревое заземление — неплохой вариант.

Необходимо найти число вертикальных заземлителей для заземления учебной лаборатории напряжением 0,4кВ. Грунт в районе университета на глубине 0,5м суглинок. Выбираю в качестве вертикального электрода прутковую сталь с диаметром 20мм и длиной 3м. В качестве горизонтального электрода стальная полоса 40x4мм.

Определяем расчетное сопротивление грунта, Ом·м:

$$\rho_p = \rho_{из} \cdot \psi, \quad (22)$$

где  $\rho_{из}$  - измеренное сопротивление грунта, Ом·м;

$\psi$  – коэффициент повышения сопротивления.

$$\rho_p = 100 \cdot 2 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Определяем сопротивление одиночного заземлителя:

$$R_o = (0,366 \cdot \rho / l) \cdot \lg(4 \cdot l / d). \quad (23)$$

В качестве электрода выбран электрод из прутковой стали длиной 3м и диаметром 20мм.

$$R_o = (0,366 \cdot 200 / 3) \cdot \lg(4 \cdot 3 / 20) = 5,413 \text{ Ом} .$$

$$n = R_o / (\eta \cdot R_d), \quad (24)$$

где  $R_d$  - допустимое сопротивление заземляющего контура,  $R_{\text{доп}} \leq 4 \text{ Ом}$ ;

$\eta$  - коэффициент экранирования.

$$n = 5,413 / (0,58 \cdot 4) = 2,33 .$$

Округляем полученное значение  $n$  до ближайшего целого:

$$n_3 = 3,$$

$$R_{d3} = R_o / (\eta \cdot n_3), \quad (25)$$

$$R_{d3} = 5,413 / (0,58 \cdot 3) = 3,11 \text{ Ом} .$$

Выполняем проверку:

$$R_{d3} \geq R_d, \quad (26)$$

$$3,11 \text{ Ом} > 4 \text{ Ом} .$$

Условие выполняется из этого следует что нужно установить 3 вертикальных заземлителя.

### 3 РАЗРАБОТКА ИНСТРУКЦИИ ПО ЦЕНТРОВКЕ ВАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

#### *Общее положение*

Центровка валов электродвигателей и соединенных с ним рабочих машин непосредственно влияет на техническое состояние как электродвигателей, так и самих машин. Параллельное смещение осей валов электродвигателей и рабочих машин вызывает деформацию упругих элементов соединительных муфт, пульсацию передаваемых моментов, а также радиальные усилия, передаваемые на подшипники. Угловое смещение осей валов вызывает значительно меньшие пульсации скорости валов, чем их параллельное смещение. Как и параллельное, угловое смещение наиболее опасно при жестком соединении валов. Неправильная центровка валов электродвигателей и рабочих машин в некоторых случаях приводит к возникновению пульсаций токов и моментов.

Центровка электродвигателя относительно вала вращаемой им машины является одной из наиболее ответственных и трудоемких операций при монтаже.

Чтобы обеспечить нормальную работу центрируемых валов и правильное распределение нагрузок между подшипниками при непосредственном соединении электродвигателя с рабочей машиной (при помощи муфты), валы соединяемых машин должны быть установлены в такое положение, при котором торцевые поверхности полумуфт в горизонтальной и вертикальной плоскостях будут параллельны, а оси валов будут располагаться на одной линии. Практически бывает трудно добиться строгой параллельности плоскостей полумуфт, поэтому валы приходится соединять при некоторой несоосности. Величина несоосности зависит от

типа применяемых полумуфт. При правильном (соосном) соединении электродвигателя и механизма они работают спокойно, без вибрации.

Путем перемещения двигателя на небольшие расстояния в горизонтальной и вертикальной плоскостях добиваются такого взаимного положения валов двигателя и рабочей машины, при которой величине зазоров между полумуфтами будут равны. Центровка производится в два приема: предварительная и окончательная.

#### *Предварительная центровка двигателя*

При предварительной центровке стальную линейку или стальной угольник прикладывают к образующим обеих полумуфт и проверяют, есть ли зазор между ребром линейки и полумуфтами. Такую проверку выполняют в четырех местах: сверху, внизу и в двух боковых направлениях. Если зазор есть, то под лапы электродвигателя подкладывают прокладки толщиной 0,5—0,8 мм. При этом число тонких прокладок не должно превышать 3—4 штук, так как при большем числе прокладок может нарушиться центровка. Если по условиям центровки прокладок оказывается больше, то их необходимо заменить общей прокладкой большей толщины.

#### *Окончательная центровка двигателя*

Окончательную центровку проводят при помощи одной пары центровочных скоб, изображенных на рисунке 12.

Наружная скоба закрепляется на полумуфте рабочей машины, а внутренняя скоба — на полумуфте электродвигателя. Скобы крепятся на полумуфтах при помощи хомутов и болтов. В процессе центровки измеряют радиальные  $a$  и осевые  $b$  зазоры при помощи щупов, индикаторов или микрометров. При этом индикатор или микрометрическую головку устанавливают на место болтов.

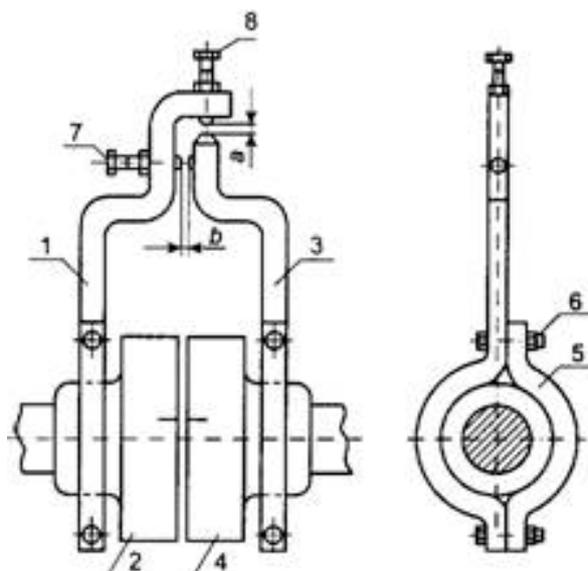


Рисунок 12 – Пара центровочных скоб:

1 - наружная скоба; 2 - полумуфта; 3 - внутренняя скоба; 4 - электродвигатель;  
5 - хомут; 6, 7, 8 — болты

Существуют и другие типы скоб для центровки электродвигателя с механизмом; некоторые из них представлены на рисунке 13.

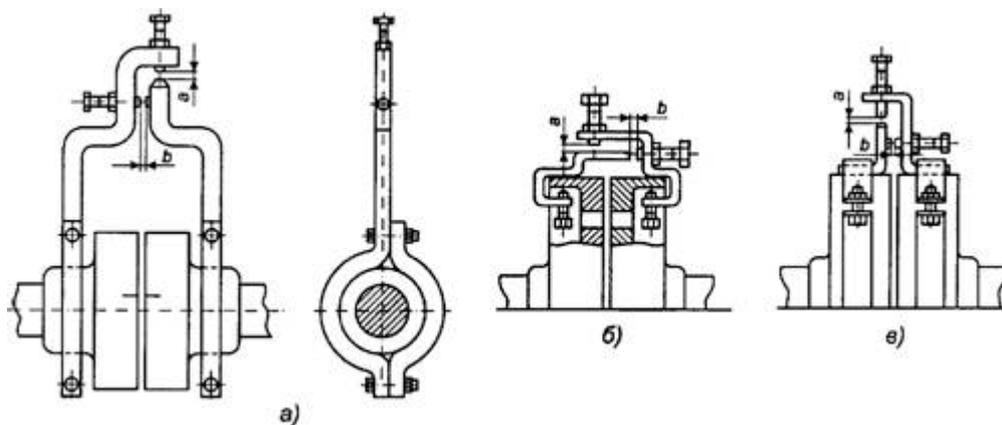


Рисунок 13 - Скобы для центровки полумуфт:

а - центровочные скобы; б - центровочные приспособления; в - центровочные приспособления с хомутами

Центровочные скобы устанавливают друг против друга при совпадении маркировочных пометок на полумуфтах, поставленных во время спаренной обработки полумуфт на станке или нанесенных перед рассоединением их в начале ремонта. Пометки лучше всего ставить зубилом. Посредством винтов

устанавливают зазоры по окружности и торцу в пределах 1-2 мм, проверяя отсутствие задевания скоб друг за друга при одновременном проворачивании обоих валов на  $360^\circ$  в направлении вращения электродвигателя.

Для измерения зазоров по окружности и торцу оба вала одновременно поворачивают от исходного верхнего положения на  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$ . При каждом из этих положений пластинки щупа должны входить с легким усилием, одинаковым во всех замерах. При помощи щупа измеряют радиальный зазор между болтом скобы и полумуфтой, а также аксиальный зазор  $b$  между торцами полумуфт. Затем поворачивают оба ротора относительно первоначального положения на  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  и в каждом из этих положений замеряют зазоры,  $a$  и  $b$ . Значения радиальных зазоров записывают вне окружности, аксиальных — внутри окружности, как показано на рисунке 14. Если при проворачивании валов радиальные зазоры,  $a$  остаются неизменными, а аксиальные зазоры  $b$  меняются, то значит, что центры валов совпадают, но оси валов расположены одна к другой под некоторым углом.

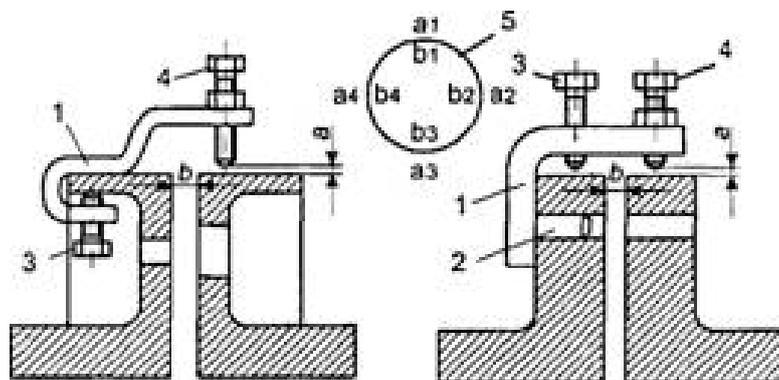


Рисунок 14 - Скобы для центровки электродвигателя с механизмом:  
1 - скоба; 2 - палец; 3 - прижимной или стопорный болт; 4 - болт для замера зазора;  
5 - рекомендуемая форма записи значений зазоров

При параллельности валов двигателя и рабочей машины и наличии между ними сдвига, показанного на рисунке 15, аксиальные зазоры  $b$  при проворачивании валов остаются неизменными, а радиальные зазоры,  $a$

изменяются. Наконец, при сдвиге центров валов и расположении осей валов под углом будут меняться величины как аксиальных зазоров  $b$ , так и радиальных зазоров  $a$ . В заключение валы устанавливают в первоначальное положение (скоба сверху) и вновь измеряют зазор,  $a$ , который должен совпасть с тем же зазором, измеренным в начале проверки. Отличие в результатах замера зазоров в начале и в конце проверки более чем на 0,02 мм недопустимо и свидетельствует о недостаточно жестком креплении скобы или о смещении валов в осевом направлении. В этом случае скобу следует укрепить более надежно и замер зазоров повторить. Для исключения ошибок от осевого смещения валов при первом замере и после каждого проворачивания необходимо при помощи лома или другим способом подвигать валы друг к другу до упора.

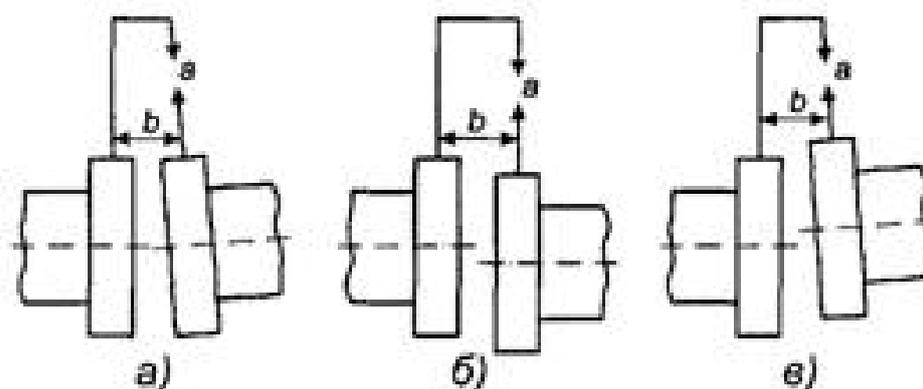


Рисунок 15 - Центровка валов при помощи одной пары скоб:

$a$  - центры валов совпадают, но оси расположены под углом;  $b$  - валы параллельны, но между ними имеется сдвиг;  $v$  - центры валов сдвинуты, а их оси расположены под углом

Точность центровки определяется сравнением зазоров измеренных в противоположных точках полумуфт. Разность значений этих зазоров ( $a_1 - a_3$ ,  $a_2 - a_4$ ,  $b_1 - b_3$ ,  $b_2 - b_4$ ) должна быть не более указанной в таблице 15.

Таблица 15 - Допустимая разность зазоров

Вид муфты	Допустимая разница в значениях зазоров, мм, при частоте вращения, об/мин		
	3000	1500	750
Жесткая	0,02-0,04	0,03-0, 07	-
Полужесткая или с полужесткими пальцами	0,03-0,06	0, 06-0, 10	0,10-0,15
Пружинная	0,05-0,08	0,08-0,12	-
Зубчатая	0,06-0,10	0,10-0,14	-

Примечание. Меньшая разница в значениях зазоров относится к аксиальным зазорам, а большая — к радиальным.

Расцентровка в горизонтальной плоскости (большая разница в зазорах  $a_2$  и  $a_4$ ;  $b_2$  и  $b_4$ ) устраняется перемещением по горизонтали корпуса электродвигателя. Расцентровка в вертикальной плоскости (большая разница в зазорах  $a_1 - a_3$ ;  $b_1 - b_3$ ) устраняется путем изменения толщины подкладок под лапами электродвигателя. Для точной центровки применяется стальная фольга. Количество прокладок должно быть минимальным, так как при большом числе прокладок центровка со временем может нарушиться. Несколько тонких подкладок заменяйте на одну более толстую. Несколько более толстых — на одну еще более толстую. Обязательное условие центровки — после каждого изменения толщины подкладок производите полную затяжку крепежных болтов электродвигателя. Неполная или некачественная затяжка болтов, крепящих двигатель к фундаменту или к монтажной раме, дает неправильную картину изменения зазоров в процессе регулировки.

Хаотичная регулировка зазоров требует очень много времени и сил. Для более быстрого процесса регулировки необходима определенная последовательность в операциях по устранению зазоров. Первое, что нужно сделать — установить валы параллельно в вертикальной плоскости

(соблюдается равенство зазоров  $b_1 = b_3$ ), подкладывая подкладки под передние лапы электродвигателя или удаляя их из-под задних лап. Когда равенство зазоров  $b_1$  и  $b_3$  установлено, проверяете вертикальное смещение валов электродвигателя и приводного механизма (разность зазоров  $a_1 - a_3$ ). Если  $a_1$  больше  $a_3$ , вал электродвигателя расположен ниже вала приводного механизма, если же  $a_1$  меньше  $a_3$  — электродвигатель поднят выше нормы. Разность зазоров  $a_1 - a_3$  дает толщину подкладки, которую необходимо подложить под передние и задние лапы электродвигателя или, наоборот, удалить (толщину подкладок измеряйте микрометром). Затем снова проверьте допустимую разницу зазоров  $a_1 - a_3$  и  $b_1 - b_3$ . Если она находится в пределах нормы, приступайте к регулировке в горизонтальной плоскости. Регулировка производится смещением корпуса двигателя вправо или влево. В заключение еще раз проверьте точность центровки, сравнивая разность значений зазоров ( $a_1 - a_3$ ;  $a_2 - a_4$ ;  $b_1 - b_3$ ;  $b_2 - b_4$ ).

После точной центровки двигателя и муфты стоит поставить отметки на подложке чтобы ускорить следующую настройку после снятия двигателя.

#### *Центровка с помощью лазерного оборудования*

Для более быстрой и точной центровки также используется специализированное немецкое оборудование SKF TKSA 31/41, изображенное на рисунке 16.



Рисунок 96 – Прибор для центровки электродвигателя марки SKF  
TKSA 31/41

Оба измерительных блока в системах ТКСА 31/41 оснащаются диодными лазерами и ПЗС-датчиком, а также удлинителями, фирменной рулеткой, блоком питания и другими комплектующими, лежащие в специальном чемоданчике, который показан на рисунке 17.



1. 1 × Дисплейный блок ТКСА 31/41	8. 1 × Блок питания 12 В пост. тока, 3 А
2. 1 × Измерительный блок ТКСА 31/41 S	9. Переходники (США, Великобритания, ЕС, Австралия)
3. 1 × Измерительный блок ТКСА 31/41 М	10. 2 × Кабели Micro USB – USB*
4. 2 × V-образные кронштейны вала с цепями	11. Краткое руководство, бумажная копия (англ.)*
5. Удлинители 90 мм (только для ТКСА 41)	12. Сертификат калибровки и соответствия, бумажная копия*
6. 1 × Фиксатор цепи	13. 1 × Лист наклеек с QR-кодами (только для ТКСА 41)*
7. Рулетка с метрическими и британскими единицами, 5 м	* не показано

Рисунок 107 – Прибор по центровке электродвигателя марки SKF ТКСА 31/41 и его комплектующие

При повороте валов на 180°, любой параллельный или угловой перекося вызывает отклонение двух лазерных лучей от их начального относительного положения.

Данные двух датчиков используются для автоматического вычисления величины перекося и служат руководством для регулировки в вертикальной (с помощью пластин) и горизонтальной плоскостях.

Измерения с помощью TKSA 41 могут выполняться в трёх положениях (9-12-3) или методом свободного измерения. В автоматическом режиме измерений от пользователя не требуется действий на дисплейном блоке.

Во время работы дисплей TKSA 41 может находиться горизонтально на полу или вертикально.

Ориентация экрана соответствует расположению дисплейного блока.

С помощью V-образных кронштейнов установите измерительные блоки на валы. Убедитесь, что блок с маркировкой «M» установлен на подвижное оборудование а блок с маркировкой «S» — на стационарное оборудование.

Если невозможно установить V-образные кронштейны непосредственно на валах (например, в случае ограниченного пространства), крепления могут быть установлены на соединительной муфте.

Для валов с диаметром  $< 40$  мм ( $< 1.5$  дюйма) закрепите цепь на анкере изнутри V-образного кронштейна. Затяжная ручка должна использоваться ближе к стержню.

Для диаметров большего размера закрепите цепь снаружи. Устраните провисание цепи и надёжно затяните её с помощью затяжных ручек и натяжителя стержня.

Проверьте прочность затяжки фиксаторов на кронштейнах перед монтажом измерительных блоков. Убедитесь, что измерительные блоки надёжно затянуты на стержнях и НЕ лежат на кронштейне. Кронштейны симметричны и могут устанавливаться с разных сторон.

Далее вводим все необходимые размеры, необходимые для измерения соосности двигателя и муфты, пример ввода всех параметров приведен на рисунке 18.



Рисунок 18 - Меню ввода необходимых размеров двигателя и муфты

Теперь можно производить измерение по методу 9-12-3. Чтобы представить различные положения измерения, используется аналогия с циферблатом часов.

Первое положение измерения — положение на 9 часов, если смотреть со стороны подвижного оборудования. Измерения выполняются последовательно в трёх разных положениях (9 (-90°) - 12 (0°) - 3 (+90°)).

Измерительные блоки отображаются на дисплее со стороны подвижного оборудования.

Треугольный клин показывает требуемое положение измерительных блоков на каждом этапе. Рассмотрим все этапы измерения:

1. Проверните вал до синего клина в положение «9 часов» (-90°).
2. При положении вала в границах синего клина, клин становится зелёным.
3. Чтобы выполнить измерение, нажмите стрелку «Next» (Далее).
4. Проверните вал до синего клина в положение «12 часов» (0°).
5. Чтобы выполнить измерение, нажмите стрелку «Next» (Далее).
6. Проверните вал до синего клина в положение «3 часов» (+90°).

7. Чтобы выполнить измерение, нажмите стрелку «Next» (Далее).
8. На экран выводятся результаты измерения.

Результаты, показанные на рисунке 19, могут быть сохранены в отчёте формата PDF и перенесены на USB-карту памяти.

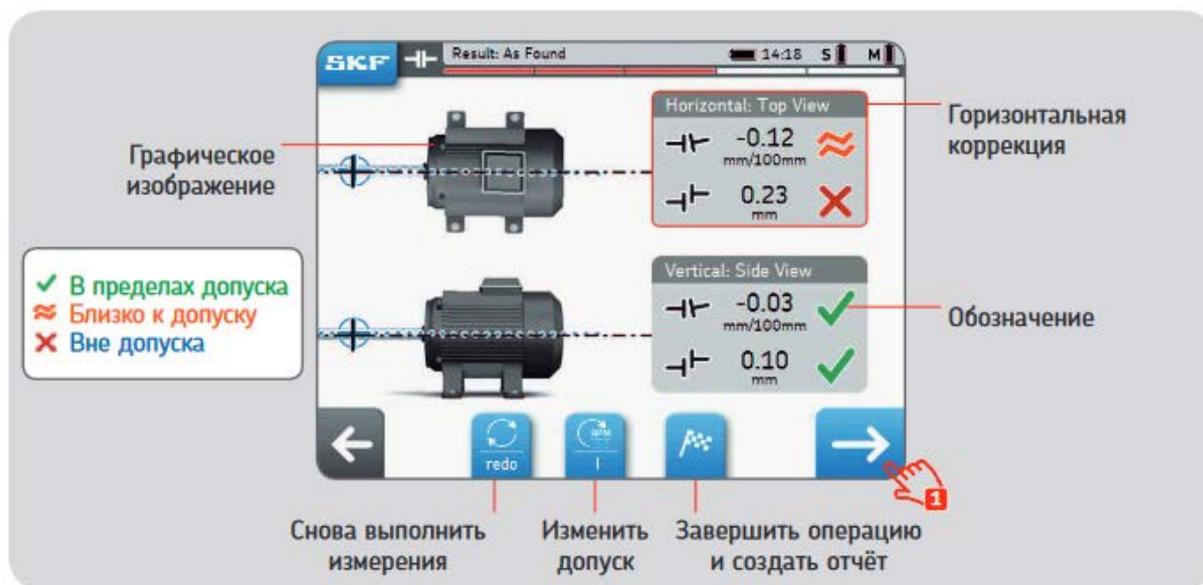


Рисунок 19 – Скриншот результатов измерения соосности двигателя и муфты

Таким образом с помощью прибора для центровки электродвигателя марки TSKA 31/41 можно произвести быструю и точную проверку центровки двигателя, не задерживая производственный процесс на длительное время.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе были решены следующие задачи:

- рассчитаны электрические нагрузки;
- выбрана схема электроснабжения;
- выбраны кабели и провода;
- выбрано защитное оборудование;
- разработана инструкция по центровке валов электрических двигателей.

При разработке электроснабжения лаборатории электромеханики были получены следующие результаты:

Предложен проект создания электротехнической лаборатории в образовательном учреждении среднего профессионального образования. В работе осуществлён расчёт освещения, заземления, общей мощности стендов и лабораторных столов, находящихся в лаборатории. Это позволило выбрать главный распределительный щит, наиболее подходящий по всем параметрам, в том числе и экономическим. В проекте представлены сметы на материалы, требующиеся для оборудования лаборатории, и сметы на стоимость электромонтажных работ.

Лаборатория предназначена для работы студентов и позволит в будущем обеспечить более продуктивную работу на занятиях, так как стенды, установленные в лаборатории, позволяют наглядно понять и увидеть в реальности устройство приборов и проводить эксперименты с ними.

Так как электротехническая лаборатория является помещением с повышенной опасностью получения травмы была предусмотрена организация уголка электробезопасности, где будут расположены правила

техники безопасности при работе с электрооборудованием и памятка об оказании первой помощи человеку, получившему удар электрическим током.

Цель выпускной квалификационной работы можно считать выполненной, так как разработана главная схема электроснабжения лаборатории электромеханики, с указанием всех необходимых параметров, а именно на плане указаны места расположения всех щитов, двигателей, лабораторных стендов; показано как необходимо прокладывать все кабели. На принципиальных схемах, в свою очередь, указаны марки и номиналы использованных автоматов, диодных мостов, кабелей; показано как необходимо подключать кабели ко всем элементам схемы. Таким образом, у квалифицированного персонала не возникнет никаких проблем при монтаже данной лаборатории.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений / Т.В. Анчарова, Е.Д. Стебунова, М.А. Рашевская. - Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. - 416 с.
2. Арутюнян А. А. Основы энергосбережения / А.А. Арутюнян. - Москва: Энергосервис, 2016. - 600 с.
3. Большама Я.М. Справочник по проектированию электроснабжения, линий электропередачи и сетей / Я.М. Большама, В.И. Круповича, М.Л. Самовера - 4-е изд., переработано и дополнено. – Москва: Энергия, 2013.–245 с.
4. Герасимов В. Г. Электротехнический справочник: Производство и распределение электрической энергии / В.Г. Герасимов. - Москва: Энергоатомиздат, 2013. - 223 с.
5. ГОСТ Р 54350-2015 Электробезопасность. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний - Москва: Энергия, 2016. - 7 с.
6. Гуревич Ю.Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю.Е. Гуревич, К.В. Кабиков. - Москва: Торус Пресс, 2015. - 408 с.
7. Дубинский Г. Н. Наладка устройств электроснабжения напряжением до 1000 В / Г.Н. Дубинский, Л.Г. Левин. - Москва: Солон-Пресс, 2011. - 400 с.
8. Князевский Б. А. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. А. Князевский, Б. Ю. Липкин. - Москва: Высшая. школа, 1979. -115 с.
9. Козлов В.А. Справочник по проектированию систем электроснабжения городов / В.А. Козлов, Н.И. Билик, Д.Л. Файбисович. - Санкт-Петербург: Энергия, 2013. - 271 с.

10. Коробов Г.В. Электроснабжение. Курсовое проектирование / Г.В. Коробов. - Санкт-Петербург: Лань, 2014. - 192 с.
11. Кудрин Б.И. Электроснабжение потребителей и режимы: Учебное пособие / Б.И. Кудрин, Б.В. Жилин, Ю.В. Матюнина. - Москва: МЭИ, 2013. - 412 с.
12. Куско А.А. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии / А.А. Куско, М.С. Томпсон. - Москва: Додэка XXI, 2011. - 336 с.
13. Межотраслевые правила по охране труда (технике безопасности) при эксплуатации электроустановок ПОТ РМ-016-2001. – Санкт-Петербург: ДЕАН, 2003.- 117с.
14. Миллер Г. Р. Автоматизация в системах электроснабжения промышленных предприятий / Г.Р. Миллер. - Москва: Государственное энергетическое издательство, 2012. - 176 с.
15. Неклепаева Б.Н. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Б.Н. Неклепаева. - Москва: НЦ НАС, 2002. – 152 с.
16. Полуянович Н. К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.К. Полуянович. - Москва: Лань, 2012. - 400 с.
17. Правила. Методики. Инструкции. Выпуск 18. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - Москва: Энергосервис, 2016. - 308 с.
18. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд., переработано и дополнено. – Москва: Энергоатомиздат, 2015. - 265 с.
19. Правила учета электрической энергии. - Москва: АОЗТ «Энергосервис», 2012. - 367 с.

20. Рождествина А.А. Электроснабжение и электрооборудование цехов промышленных предприятий (для бакалавров) / А.А. Рождествина. - Москва: КноРус, 2013. - 368 с.
21. Свириденко Э. А. Основы электротехники и электроснабжения / Э.А. Свириденко, Ф.Г. Китунович. - Москва: Техноперспектива, 2016. - 436 с.
22. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение: Учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. - Москва: РадиоСофт, 2013. - 328 с.
23. Строительные нормы и правила СНиП 3.05.06-85. Инструкция по монтажу кабельных сетей 0,4 кВ. - 72 с.
24. Федорова А.А. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Т. 1, 2 / А.А. Федорова. - Москва: Энергоатомиздат, 1987. - 176 с.
25. Фролов Ю. М. Основы электроснабжения / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. - Москва: Лань, 2012. - 480 с.
26. Хорольский В. Я. Эксплуатация систем электроснабжения / В.Я. Хорольский, М.А. Таранов. - Москва: Дрофа, 2013. - 288 с.
27. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабад. - Санкт-Петербург: Энергия, 2013. - 289 с.
28. Шеховцев В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению / В.П. Шеховцев. Москва: - Форум, 2011. – 136 с.
29. Щербаков Е.Ф. Электроснабжение. Курсовое проектирование: Учебное пособие / Е.Ф. Щербаков, Д.С. Александров, А.Л. Дубов. - Санкт-Петербург: Лань, 2014. - 192 с.
30. Яхонтова О. Электроснабжение и электропотребление в строительстве: Учебное пособие / О. Яхонтова, Л. Валенкевич, Я. Рутгайзер. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 512 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

## **ПРИЛОЖЕНИЕ В**

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Г**