

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Политехнический институт  
Механико-технологический факультет  
Кафедра машиностроения, автоматике и электроэнергетики

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой,  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ К. М. Виноградов  
\_\_\_\_\_ 2018г.

Качество электроэнергии в СЭС предприятия при использовании преобразователей частоты для двигателей с резко-переменной нагрузкой

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ–13.03.02.2018.058.00.00ПЗ ВКР

Консультанты  
Безопасность жизнедеятельности,  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ В.Г. Некрутов  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

Руководитель работы,  
преподаватель  
\_\_\_\_\_ В.И. Сафонов  
\_\_\_\_\_ 2018г.

Автор работы  
студент группы ИОДО-508  
\_\_\_\_\_ В.А. Липатов  
\_\_\_\_\_ 2018г.

Нормоконтролер, доцент  
\_\_\_\_\_ В.Д. Константинов  
\_\_\_\_\_ 2018г.

Челябинск  
2018

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

Факультет            «Механико-технологический»  
Кафедра            «Машиностроение, автоматика и электроэнергетика»  
Направление        «13.03.02 Электроэнергетика и электротехника»

**УТВЕРЖДАЮ**  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ К.М. Виноградов  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

**ЗАДАНИЕ**  
на выпускную квалификационную работу студента  
Липатова Владимира Андреевича

Группа ИОДО-508

1 Тема работы

Качество электроэнергии в СЭС предприятия при использовании преобразователей частоты для двигателей с резко-переменной нагрузкой

утверждена приказом от 04.04.18г. № 580

2 Срок сдачи студентом законченной работы 12 июня 2018 г.

3 Исходные данные к работе:

3.1. данные о точке подключения к СЭС, данные о нагрузке цеха и промышленного предприятия.

3.2 Справочно-техническая литература

4 Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

Аннотация

Оглавление

Введение

1. Сравнение отечественных и передовых зарубежных технологий и решений.

На примере преобразователей частоты. Выводы.

2. Формирование системы электроснабжения. Расчет электрических нагрузок цеха и предприятия. Выбор трансформаторов и кабельных линий. Выводы.

3. Токи короткого замыкания. Методика расчета. Расчет токов КЗ. Проверка кабелей на термическую прочность. Выводы.

4. Релейная защита сети 0.4 кВ. Расчет и построение время-токовых характеристик трех выключателей в системе релейной защиты низковольтного распределительного пункта. Выводы.

5. Качество электроэнергии в сети 10 кВ. Для вариантов с установкой преобразователей частоты и без установки. Выводы.

6. Моделирование преобразователя частоты Модель в пакете MatLab. Результаты моделирования. Выводы.

7. Техничко-экономическое сравнение вариантов. Для вариантов с установкой преобразователей частоты и без установки. Выводы

8. Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и безопасность на трансформаторной подстанции. Расчет освещения ТП и контроля изоляции. Выводы.

Заключение

Библиографический список

5 Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей, плакатов в листах формата А1)

<u>5.1 Схема электрическая принципиальная</u>	<u>1,0л</u>
<u>5.2 Плакат «Выбор элементов СЭС»</u>	<u>1,0л</u>
<u>5.3 Плакат «Релейная защита низковольтного распределительного пункта»</u>	<u>1,0л</u>
<u>5.4 Плакат «Технико-экономическое сравнение вариантов СЭС»</u>	<u>1,0л</u>
<u>5.5 Плакат «Моделирование преобразователя частоты»</u>	<u>1,0л</u>
<u>5.6 Плакат «Сравнение вариантов СЭС»</u>	<u>1,0л</u>
<u>5.7 Чертеж «Схема электрическая принципиальная ТП»</u>	<u>1,0л</u>
<u>5.8 Чертеж «План-разрез ТП»</u>	<u>1,0л</u>

Всего 8 листов

6 Консультанты по работе, с указанием относящихся к ним разделов работы

Раздел	Консультант	Подпись, дата	
		Задание выдал (консультант)	Задание принял (студент)
Безопасность жизнедеятельности	В.Г. Некрутов		

7 Дата выдачи задания 20.02.18 г.

Руководитель, к.ф.-м.н., доцент \_\_\_\_\_ В.И. Сафонов  
(подпись)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ В.А. Липатов  
(подпись студента)

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении руководителя
Сравнение отечественных и передовых зарубежных технологий и решений	23.03.18	
Выбор оборудования	27.03.18	
Расчет токов короткого замыкания	30.03.18	
Релейная защита сети 0.4 кВ	5.04.18	
Технико-экономическое сравнение вариантов	10.04.18	
Моделирование преобразователя частоты	25.04.18	
Безопасность жизнедеятельности на ТП	06.05.18	
Оформление пояснительной записки	20.05.18	
Выполнение графической части	25.05.18	

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ /К.М. Виноградов/

Руководитель работы \_\_\_\_\_ /В.И. Сафонов/

Студент \_\_\_\_\_ /В.А. Липатов/

## АННОТАЦИЯ

Липатов В.А. Качество электроэнергии в СЭС предприятия при использовании преобразователей частоты для двигателей с резко-переменной нагрузкой – Челябинск: ЮУрГУ, МТ; 2018, 52 с., 18 ил., библиогр. список – 30 наим., 8 листов чертежей формата А1.

Методом упорядоченных диаграмм рассчитаны электрические нагрузки цеха и промышленного предприятия. На основании расчета нагрузок выбрано основное оборудование системы электроснабжения – трансформаторы и кабельные линии.

Проведен расчет токов короткого замыкания. На основании этого расчета проверены выбранные кабели на термическую прочность и разработана релейная защита сети 0.4 кВ с низковольтным распределительным пунктом. Время-токовые характеристики выключателей согласованы между собой и разработанная релейная защита обладает селективностью.

Выполнено технико-экономическое сравнение вариантов системы электроснабжения: с установкой преобразователей частоты на асинхронные высоковольтные двигатели и с установкой общей пусковой шины и устройства плавного пуска двигателя. При сравнении вариантов учитывались капитальные затраты на основное оборудование и стоимость потерь электроэнергии. Методом минимизации приведенных затрат выбран вариант с преобразователями частоты.

Проведено моделирование работы преобразователей частоты в системе MatLab. Показана возможность регулирования частоты вращения и крутящего момента двигателя.

В разделе «Безопасность жизнедеятельности» рассмотрены вопросы безопасности на трансформаторной подстанции. Сформулированы нормативные требования к безопасной эксплуатации оборудования и рассмотрен вопрос об освещении ТП.

					<i>13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Качество электроэнергии в СЭС предприятия при использовании преобразователей частоты для двигателей с резко-переменной нагрузкой</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Липатов</i>				<i>Д</i>	<i>3</i>	<i>52</i>
<i>Провер.</i>		<i>Сафонов</i>				<i>ЮУрГУ Кафедра Машиностроение, автоматика и электроэнергетика</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Константинов</i>						
<i>Утв.</i>		<i>Виноградов</i>						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	
1.1 Преобразователи частоты зарубежных фирм.....	7
1.2. Преобразователи частоты отечественных фирм.....	8
Выводы по разделу один .....	10
2. ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	
2.1 Расчет электрических нагрузок цеха .....	11
2.2. Расчет электрических нагрузок предприятия .....	14
2.3. Выбор трансформатора ТП.....	15
2.4. Выбор трансформатора ГПП.....	16
2.5. Выбор кабельных линий.....	17
Выводы по разделу два .....	20
3. ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ	
3.1 Методика расчета.....	21
3.2. Расчет токов короткого замыкания.....	22
3.3 Проверка кабелей на термическую прочность.....	24
Выводы по разделу три .....	25
4. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА СЕТИ 0.4 кВ	
4.1 Расчет уставок защиты выключателя QF4.....	26
4.2. Расчет уставок защиты секционного выключателя QF3.....	28
4.3 Расчет уставок защиты вводного выключателя QF1.....	29
Выводы по разделу четыре .....	32
5. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ШИНАХ 10 кВ	
5.1 Расчет при установке ПЧ.....	33
5.2. Расчет без установки ПЧ.....	34
Выводы по разделу пять .....	37
6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ	
6.1. Описание модели.....	38
6.2. Результаты моделирования.....	39
Выводы по разделу шесть .....	41
7. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ.....	42
Выводы по разделу семь.. .....	44
8. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ТП	
8.1 Планировка и конструктивная часть ТП.....	45
8.2 Контроль изоляции.....	47
8.3 Освещение ТП.....	48
Выводы по разделу восемь .....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	50
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	51

## ВВЕДЕНИЕ

Системы электроснабжения (СЭС) современных промышленных предприятий представляют собой сложные системы, которые должны отвечать следующим технико-экономическим требованиям:

- обладать минимальными затратами при обеспечении всех технологических требований;
- обеспечивать высокую надёжность электроснабжения;
- быть удобными в эксплуатации и безопасными в обслуживании;
- обеспечивать надлежащее качество электроэнергии;
- обладать гибкостью, обеспечивающей оптимальный режим СЭС;
- позволять осуществление реконструкции без существенного удорожания первоначального варианта.

Чтобы система электроснабжения проектируемого предприятия удовлетворяла всем предъявляемым к ней требованиям, необходимо при проектировании учитывать большое число различных факторов, то есть использовать системный подход к решению задачи.

Электроэнергия, как и любой другой продукт, должна обладать качественными показателями. Качество электрической энергии заметно отражается на производственной и экономической деятельности предприятия.

Термин «Качество электрической энергии» не совсем правильно отображает проблему. Потребителями под качеством понимается качество поставляемой продукции, в то время как в большей степени на качество влияют сами потребители, точнее их электроприемники. С внедрением новых технологий в производство, все больше появляется электроприемники, генерирующие помехи в сеть. Поэтому более справедливо понятие «электромагнитная совместимость электроприемников», которое принято в международной практике.

Под электромагнитной совместимостью понимается способность электрооборудования нормально функционировать в его электромагнитной среде, не создавая при этом недопустимых помех для других электроприемников.

Наличие помех не является следствием нарушения режима работы электроприемников, а является объективным фактором, поэтому возникает задача в определении допустимых уровней помех, а не их исключения совсем.

Качество электрической энергии на большинстве предприятий находится не на должном уровне. Поэтому, очень важным является создание методов оценки показателей качества, формулировки условий подсоединения ЭП к сетям, а также определение меры ответственности за нарушение показателей качества как потребителями, так и самими энергоснабжающими организациями.

Нормы и перечень показателей качества электрической энергии устанавливается ГОСТами и другими нормативными документами. Стандарт устанавливает показатели и нормы качества в сетях СЭС общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока промышленной частоты в точках общего присоединения сетей предприятий и энергосистемы.

Нормы, установленные этим стандартом, являются обязательными во всех режимах работы СЭС, кроме режимов обусловленных:

- исключительными погодными условиями и стихийными бедствиями;

					13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5



- непредвиденными ситуациями, вызванными действиями стороны, не являющейся энергоснабжающей и потребляющей организациями;
- условиями, регламентированными государством на время ликвидации аварий.

К основным показателям качества электроэнергии относятся:

- установившееся отклонение напряжения:  $\delta U_y$ ;
- размах колебаний напряжения:  $\delta U_t$ ;
- доза фликера  $P_f (\psi)$ ;
- коэффициент искажения синусоидальности напряжения:  $K_U (K_{ncU})$ ;
- коэффициент «n»-ой гармонической составляющей напряжения:  $K_{U(n)}$ ;
- коэффициент несимметрии по напряжению обратной последовательности:  $K_{2U}$ ;
- коэффициент несимметрии по напряжению нулевой последовательности:  $K_{0U}$ ;
- отклонение частоты:  $\Delta f$ ;
- импульс напряжения:  $U_{имп}$ ;
- длительность провала напряжения:  $\Delta t_n$ ;
- коэффициент кратковременных перенапряжений:  $K_{перU}$ .

При несоответствии расчетных показателей качества электроэнергии в узлах системы электроснабжения требования ГОСТ, следует принимать меры по их улучшению. Основные пути улучшения качества электроэнергии:

- разделение питания электроприемников, генерирующих помехи в сеть и воспринимающие их;
- увеличение мощности к.з. в точке присоединения электроприемников, генерирующих помехи в сеть.

В выпускной квалификационной работе проведены расчеты качества электроэнергии в СЭС предприятия при использовании преобразователей частоты для двигателей с мощной резко-переменной нагрузкой.

Исходными данными для работы были:

1. Нагрузка на шину 0.4 кВ цеховой ТП с линией 1 км:
  - нагрузка для низковольтного распределительного пункта (на одну секцию шин) ПЧ по 40 кВт, комплексная нагрузка 40 кВт и 40 кВАр;
  - комплексная нагрузка активной мощностью 400 кВт, реактивной мощностью 500 кВАр;
  - ПЧ со звеном постоянного тока и с 6-и фазными выпрямителями с активной мощностью по 100 кВт (4 шт).
2. Нагрузка на шину 10 кВ ГПП:
  - цеховая ТП;
  - комплексная нагрузка активной мощностью 5000 кВт, реактивной мощностью 4200 кВАр;
  - ПЧ со звеном постоянного тока с 12-и фазными выпрямителями активной мощностью по 1000 кВАр (6 шт).
3. Характеристика точки подключения: 110 кВ, мощность КЗ 1000 МВА.

					13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

## 1. СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Большая доля электроэнергии, потребляемой электроприводом (до 65 %) и осуществление электроприводом практически всех технологических процессов делают особенно важной проблему энергосбережения в электроприводе и средствами электропривода. Наиболее актуальные направления перечислены ниже.

1. Использование энергоэффективных двигателей.
2. Правильный выбор электродвигателя для технологического процесса.
3. Выбор рациональных в конкретных условиях типов электропривода и способов управления.

Однако, основным путь энергосбережения средствами электропривода, это создание для конкретной технологической машины мощности, необходимой ей в данный момент. Это может быть достигнуто посредством управления координатами электропривода, т.е. за счет перехода от нерегулируемого электропривода к регулируемому. Этот процесс стал в последние годы основным в развитии электропривода в связи с появлением доступных технических средств для его осуществления – преобразователей частоты.

### 1.1 Преобразователи частоты зарубежных фирм

Фирма ABB Industry [1] выпускает преобразователи частоты серии FCS600 на базе автономных инверторов напряжения: ACS601 (мощностью 5-120 кВА) в корпусах для настенного крепления; ACS604 (100-320 кВА) в модульном исполнении во внешнем корпусе, ACS607 (100-610 кВА) в шкафах. Выходная частота ACS600 регулируется от 0 до 300 Гц с дискретностью 0.01 Гц.

Микропроцессорная система управления ACS600 ориентирована на применение в электроприводах без датчика скорости на валу электродвигателя. Система управления обеспечивает скалярное и векторное регулирование момента и скорости электродвигателя. Погрешность поддержания скорости не более 1% от номинального значения, время восстановления заданного момента 5 мс, пусковой момент двигателя до 200% от номинального. Показатели регулирования обеспечиваются работой системы с наблюдателем, автоматически уточняющим параметры электродвигателя в режиме его идентификации перед пуском двигателя.

При большей точности и регулировании низких скоростей. Предусмотрен режим работы с импульсным датчиком скорости. Программное обеспечение ACS600 кроме развитого набора программируемых пользователем параметров электропривода содержит несколько укрупненных программ, предназначенных для стандартных применений.

Массогабаритные размеры ACS601: для выходной мощности 5-9 кВА 420\*220\*292 мм и 14 кг, для мощности 100-120 кВА 860\*480\*428 мм и 88 кг. Массогабаритные размеры ACS603: для мощности 100-120 кВА - 2215\*658\*646 мм и 220 кг, для мощности 260-400 кВА – 2215\*868\*646 мм и 355 кг. Массогабаритные размеры ACS607: для мощности 610-760 кВА – 2215\*2130\*644 мм и 870 кг.

Фирма Alston выпускает преобразователи частоты серии ALSPA MD200 на базе автономного инвертора напряжения с диапазоном выходной мощности от 15

					13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

7880 кВт и выходным диапазоном напряжения от 380 до 1600 В. Выходная частота ALSPA MD200 регулируется от 0 до 300 Гц.

Преобразователи имеют общее ядро программного обеспечения. Система управления обеспечивает скалярное и векторное регулирование момента и скорости электродвигателя.

Массогабаритные размеры ALSPA MD200 для выходной мощности 15-45 кВт 591\*345\*384 мм и 35 кг, при мощности 100-132 кВт – 824\*495\*420 мм и 35 кг, при мощности 3900 кВт – 2720\*6600\*600 мм и 4600 кг.

Фирма Allen-Bradley выпускает преобразователи мощностью от 0.5 до 600 кВт с выходным напряжением 220-600 В. Система управления обеспечивает скалярное и векторное регулирование момента и скорости электродвигателя.

Фирма Danfoss [2] предлагает четыре серии преобразователей: VLT2000 (мощностью 2-7 кВА), VLT3000 (мощностью 2-209 кВА), VLT3500 (мощностью 2-243 кВА), VLT5000 (мощностью 2-218 кВА). Преобразователи имеют общее ядро программного обеспечения. Принцип управления VLT2000, VLT3000, VLT5000 – скалярный. Регулирование осуществляется цифровой системой управления вектором напряжения.

В преобразователях VLT5000 применена цифровая система, обеспечивающее векторное регулирование момента и скорости асинхронного двигателя. Выходная частота VLT5000 может регулироваться от 0 до 1000 Гц. Рабочий диапазон по скорости в системе регулирования без датчиков 1:100, с импульсным датчиком скорости в замкнутой системе 1:1000. Статическая точность поддержания скорости в разомкнутой системе – 0.5% от номинального значения, в замкнутой – 0.1%. Погрешность контура регулирования момента не более 20% при малых скоростях, не более 10% в диапазоне скоростей от 0.1 до 1 номинального значения в разомкнутой по скорости системе и не более 5% - в замкнутой системе. В системе без датчиков регулирование обеспечивает пусковой момент до 160% от номинального, момент при ускорении двигателя до 140% от номинального. Время восстановления выходной координаты при возмущающем воздействии 3 мс.

Массогабаритные размеры VLT5000 для выходной мощности 2-6 кВА составляют 395\*220\*160 мм и 8 кг, для мощности 44-53 кВА – 800\*308\*296 мм и 48 кг.

Фирма Hitachi [3] выпускает преобразователи серии J-300 мощностью от 5.5 до 132 кВА с выходным напряжением 380 В и серий Nivectrol-VSI-M, Nivectrol-VSI-L мощностью от 800 до 20000 кВА с выходным напряжением от 820 до 3600 В. В серии J-300 микропроцессорная система управления реализует функцию регулятора момента без внешнего контура обратной связи. Основные характеристики контура регулирования момента: статический момент при частоте 1 Гц может достигать 1.5 номинального значения, при частоте от 16 до 50 Гц равен номинальному значению. Статическая ошибка по скорости – 1 % от номинальной скорости. Время реакции на скачок задания по моменту от 0 до 100 % нагрузки составляет 0.1 с. Система управления реализует также стабилизацию частоты при колебаниях напряжения питающей сети и управление по минимуму тока при изменении нагрузки на валу электродвигателя. Диапазон выходных частот от 0 до 400 Гц при дискретности задания 0.04 Гц.

										Лист
										8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ					

Массогабаритные размеры преобразователей частоты серии J-300 – 340\*220\*195 мм и 7.5 кг при выходной мощности 9.6-11.8 кВА и 700\*480\*330 мм и 46 кг при выходной мощности 66-82 кВА.

Преобразователи серий Hivectrol-VSI-M, Hivectrol-VSI-L имеют векторную систему регулирования моментом двигателя и предназначены для питания двигателей больших мощностей.

## 1.2 Преобразователи частоты российских фирм

ОАО «Электровыпрямитель» [4] поставляет преобразователи частоты серии «Омега» и ПЧ-ТТПТ мощностью от 20 до 415 кВА с выходным напряжением 380 В. Выходная частота преобразователя изменяется от 0 до 60 Гц с возможностью расширения до 200 Гц. Преобразователи имеют разомкнутую и замкнутую системы управления и ток перегрузки до 125% в течении 300 с при времени усреднения 10 мин. Коэффициент полезного действия не менее 0.97 при номинальном токе.

Массогабаритные размеры преобразователей ПЧ-ТТПТ для мощности 10-32 кВт составляют 593\*375\*240 мм и 34 кг, при мощности 260-425 кВт – 2300\*600\*800 мм и 260 кг.

Корпорация Триол [5] выпускает преобразователи серии АТ мощностью от 7.5 до 5000 кВт с выходным напряжением от 380 до 6000 В. Выходная частота преобразователей меняется от 1 до 50 Гц с возможностью расширения до 100 Гц. Преобразователи имеют разомкнутую и замкнутую системы управления и ток перегрузки до 102% в течении 120 с при времени усреднения 10 мин. Коэффициент полезного действия не менее 0.95. В зависимости от выходной мощности имеют корпуса настенного крепления и шкаф-секции.

Преобразователи большой мощности и с высоким выходным напряжением имеют понижающий трансформатор на входе автономного инвертора и повышающий трансформатор на его выходе.

Габаритные размеры преобразователей АТ для мощности 160-215 кВт составляют 1100\*580\*420 мм.

Институт биологического приборостроения РАН (г. Мсква) поставляет преобразователи «Универсал» мощностью от 15 до 320 кВт. Выходная частота преобразователей от 0.5 до 512 Гц. Преобразователи имеют разомкнутую и замкнутую скалярные системы управления. Диапазон регулирования скорости в разомкнутой системе 1:50, в замкнутой 1:100. Допускается перегрузка по току при постоянном моменте нагрузки 150% номинального тока преобразователя в течении 1 мин. Коэффициент полезного действия при нагрузке 100% не менее 0.97. Коэффициент мощности 0.95.

Преобразователи имеют управление как аналоговое, так и цифровое через канал связи RS-232. Отличаются расширенными технологическими функциями: согласованием со станциями группового управления электроприводом, взаимодействием с системами промышленной автоматики, плавным переходом питания двигателя с сети на преобразователь и обратно. Имеется возможность объединения преобразователей в локальную промышленную сеть стандарта RS-485 с двухпроводной линией связи. Сервисные и защитные функции преобразователей частоты полностью отвечают современным требованиям к электроприводам.

										Лист
										9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ					

Габаритные размеры преобразователей АТ для мощности 15 кВт 520\*340\*320 мм, для мощности 320 кВт – 1000\*1200\*750 мм.

Производство опытного завода Московского энергетического института поставляет преобразователи частоты серии «КЭУ» мощностью от 11 до 45 кВт. Преобразователи поставляются совместно с сопрягающим модулем, обеспечивающим автоматическое переключение двигателя рабочего механизма на питающую сеть и отключение КЭУ при срабатывании любой защиты. Модуль сопряжения позволяет автоматически подключать к преобразователю два или три насоса отдельно, подключать датчики технологических параметров, осуществлять связь с системой телеметрии, осуществлять дистанционное управление резервным насосом с одновременным отключением КЭУ.

Выходная частота преобразователей меняется от 2 до 60 Гц с дискретным регулированием 0.05 Гц. Преобразователи имеют разомкнутую и замкнутую системы управления. Диапазон регулирования скорости в разомкнутой системе 1:10. Допустимая перегрузка по току при постоянном моменте нагрузки 120% номинального тока преобразователя в течении 1 мин.

Габаритные размеры преобразователя для мощности 11-22 кВт 370\*672\*347 мм.

Выводы по разделу один:

Выполнено сравнение преобразователей частоты отечественных и зарубежных фирм. Отечественные преобразователи немногочисленны и пока уступают по характеристикам.

					13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

### 2.1 Расчет электрических нагрузок цеха

Расчет электрических нагрузок выполнен методом упорядоченных диаграмм [6]. В системе электроснабжения промышленного предприятия существует несколько характерных точек, в которых необходимо определять расчетные электрические нагрузки. Расчет нагрузок проводим последовательно, от низших уровней к высшим в системе электроснабжения.

К системе электроснабжения цеха относятся три уровня электроприемников.

Первый уровень составляют отдельные электроприемники напряжением 380 В. Определение расчетной нагрузки необходимо для выбора сечения проводов или кабеля, питающего данный электроприемник, и аппарата присоединения данных элементов к низковольтному распределительному пункту (РПН) или питающей линии.

Второй уровень составляет группа электроприемников напряжением 380 В. Нахождение расчетной нагрузки необходимо для выбора сечения радиальной линии или распределительной магистрали, питающей данную группу приемников, и аппарата их присоединения к низковольтному распределительному пункту (РПН) напряжением 380 В.

Для каждой группы однотипных электроприемников находим среднюю нагрузку:

$$P_c = n \cdot K_{\text{иа}} \cdot P_{\text{ном}}, \quad Q_c = n \cdot K_{\text{иа}} \cdot P_{\text{ном}} \cdot \text{tg}\phi, \quad (2.1)$$

где  $K_{\text{иа}}$  – коэффициент использования по активной мощности.

Средние активные и реактивные нагрузки для электроприемников, включенных на линейное напряжение, определяются умножением установленных мощностей на соответствующие коэффициенты приведения.

$$P_{\text{са}} = k_{(\text{аб})\text{а}} \cdot K_{\text{иа}} \cdot P_{\text{ном}}, \quad Q_{\text{са}} = q_{(\text{аб})\text{а}} \cdot K_{\text{иа}} \cdot P_{\text{ном}}. \quad (2.2)$$

Приведенное число электроприемников:

$$n_{\text{э}} = \frac{(\sum_{i=1}^m n_{\text{э}i} P_{\text{н,э}i})^2}{\sum_{i=1}^m n_{\text{э}i} P_{\text{н,э}i}^2} \quad (2.3)$$

где  $P_{\text{н,э}i}$  – номинальная мощность приведённого электроприёмника;

$n_{\text{э}i}$  – приведённое число электроприёмников  $i$ -го узла.

Средневзвешенное значение коэффициента использования по шинопроводу:

$$K_{\text{иа}} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{\text{иа}i} \cdot p_{\text{ном}i}}{\sum_{i=1}^n p_{\text{ном}i}} \quad (2.4)$$

									Лист
									11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ				

где  $k_{\text{ИА}i}$  – коэффициент использования  $i$ -го электроприемника.

Средневзвешенное значение  $\text{tg } \varphi$  определяем аналогично:

$$\text{tg } \varphi = \frac{\sum_{i=1}^n k_{\text{ИА}i} \cdot P_{\text{НОМ}i} \cdot \text{tg } \varphi_i}{\sum_{i=1}^n k_{\text{ИА}i} \cdot P_{\text{НОМ}i}} \quad (2.5)$$

где  $\text{tg } \varphi_i$  – коэффициент реактивной мощности  $i$ -го электроприемника.

Согласно РТМ [12] расчетные мощности для системы второго уровня определяются по формулам:

$$P_p = K_{\text{РА}} \cdot \sum_{i=1}^n k_{\text{ИА}i} \cdot P_{\text{НОМ}i}, \quad (2.6)$$

$$Q_p = K_{\text{РР}} \cdot \sum_{i=1}^n k_{\text{ИА}i} \cdot P_{\text{НОМ}i} \cdot \text{tg } \varphi_i, \quad (2.6)$$

где  $K_{\text{РА}}$  – коэффициент расчетной нагрузки по активной мощности, приводится в РТМ [7] в зависимости от эффективного числа электроприемников и средневзвешенного коэффициента использования по активной мощности  $K_{\text{ИА}}=f(n_{\text{Э}}, K_{\text{ИА}})$ ;

$K_{\text{РР}}$  – коэффициент расчетной нагрузки по реактивной мощности

$$K_{\text{РР}} = 1 + \frac{1}{6 \cdot \sqrt{n_{\text{Э}}}}. \quad (2.8)$$

Полная расчетная нагрузка:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}. \quad (2.9)$$

Расчетный ток:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}}, \quad (2.10)$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение, кВ.

Расчет нагрузки 2-го уровня на одну секцию шин ТП с использованием (2.1)-(2.10) приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Расчет нагрузок 2-го уровня

Исходные данные					Расчетные величины						
электроприемник	$K_{\text{ИА}}$	$n_{\text{Э}}$	$P_{\text{НОМ}}$ , кВт	$\text{tg } \varphi_{\text{НОМ}}$	$n_{\text{Э}}$	$K_{\text{ИА}}$	$K_{\text{РА}}$	$K_{\text{РА}}$	$\text{tg } \varphi$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , кВАр
Комплексная нагрузка	0.3	5	10	1.25	-	-	-	-	-	-	-
Преобразователи частоты	0.7	2	40	0.15	-	-	-	-	-	-	-
Итого	-	-	-	-	4.6	0.55	1.12	1.08	0.38	72	29

Третий уровень - электроприемники, подключенные к секциям сборных шин напряжением 380 В цеховой трансформаторной подстанции (ТП). Нахождение данной нагрузки необходимо:

- для выбора числа и мощности цеховых трансформаторов и сечения линий 6-10 кВ, питающих цеховые ТП (с учетом потерь мощности в трансформаторах ТП);
- сечения и материала сборных шин 380 В цеховой ТП;
- магистральных или распределительных шинопроводов и отключающих аппаратов.

Расчетные активная и реактивная мощности на 3-м уровне определяются по формулам:

$$P_p = K_{pa} \cdot \sum_{i=1}^n k_{iai} \cdot P_{номi} , \quad (2.11)$$

$$Q_p = K_{pa} \cdot \sum_{i=1}^n k_{iai} \cdot P_{номi} \cdot tg\phi_i , \quad (2.12)$$

где  $K_{pa}$  – коэффициент расчетной нагрузки по активной мощности,

$P_{номi}$  – номинальная мощность для  $i$ -го электроприемника, кВт;

$K_{иа}$  – коэффициент использования по активной мощности для  $i$ -го электроприемника;

$tg\varphi_{ном}$  -- коэффициент мощности для  $i$ -го электроприемника.

Коэффициенты расчетной нагрузки по активной и реактивной мощности принимаются одинаковыми, так как на третьем уровне графики активной нагрузки становятся более ровными во времени, чем в узлах системы второго уровня. Коэффициенты  $K_{pa}$  определяются по таблицам [7] в зависимости от эквивалентного числа электроприемников и их коэффициента использования.

Расчет нагрузки 3-го уровня на одну секцию шин ТП с использованием (2.1)-(2.4) приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 Расчет нагрузок 3-го уровня

Исходные данные					Расчетные величины				
электроприемник	$K_{иа}$	$n_э$	$P_{ном},$ кВт	$tg\varphi_{ном}$	$n_э$	$K_{иа}$	$K_{pa}$ -	$P_p,$ кВт	$Q_p$ кВАр
Комплексная нагрузка	0.7	10	40	1	-	-	-	-	-
Преобразователи частоты	0.7	4	100	0.15	-	-	-	-	-
распределительный пункт	0.55	4.6	15.6	0.38					
Итого	-	-	-	-	13	0.69	0.9	539	303

По расчетной нагрузке 3-го уровня далее будут выбраны марки трансформатора ТП и кабельной линии.



## 2.2 Расчет электрических нагрузок предприятия

При расчете нагрузки методом упорядоченных диаграмм [6] на предприятии имеются нагрузки четвертого, пятого и шестого уровней.

Четвертый уровень - электроприемники, подключенные к распределительному пункту (РП) напряжением 6-10 кВ. Определение данной нагрузки необходимо:

- для выбора сечения и материала шин РП и сечения линий, питающих каждую из секций сборных шин РП;

- выключателей со стороны шин главной понизительной подстанции (ГПП).

Пятый уровень - секции сборных шин напряжением 6,10 кВ ГПП. Определение данной нагрузки необходимо для выбора числа и мощности трансформаторов, устанавливаемых на ГПП, выбора сечения и материала шин и вводных и секционных выключателей, устанавливаемых на стороне низшего напряжения ГПП.

Шестой уровень - сторона высшего напряжения 35-110-220 кВ ГПП. Определение данной нагрузки необходимо для выбора сечения линий, питающих трансформаторы ГПП, и аппаратов присоединения трансформаторов и питающих их линий к источникам питания.

Расчет активных и реактивных мощностей на пятом уровне выполняется по формулам

$$P_p^V = K_{\text{ом}} \left[ \sum_1^{m1} P_{pi}^{\text{III}} + \sum_1^{N1} k_{\text{наи}} P_{\text{ном}i} + \sum_1^M P_{pi}^{\text{IV}} + \sum_1^{L1} \Delta P_{\text{ти}} \right]; \quad (2.13)$$

$$Q_p^V = K_{\text{ом}} \left[ \sum_1^{m1} Q_{pi}^{\text{III}} + \sum_1^{N1} k_{\text{наи}} P_{\text{ном}i} \text{tg} \varphi_i + \sum_1^M Q_{pi}^{\text{IV}} + \sum_1^L \Delta Q_{\text{ти}} \right], \quad (2.14)$$

где  $m1$  – число узлов (ТП) СЭС третьего уровня, питающихся непосредственно от сборных шин 10 кВ ГПП;

$N1$  – число высоковольтных электроприёмников, питающихся непосредственно от сборных шин 10 кВ ГПП;

$M$  – число узлов СЭС четвертого уровня (РП), которые питаются от сборных шин 10 кВ ГПП;

$L1$  – число трансформаторов цеховых ТП, питающихся непосредственно от сборных шин 10 кВ ГПП;

$K_{\text{ом}}$  – коэффициент одновременности максимумов.

Электроприемники 4-го уровня в рассматриваемой системе электроснабжения отсутствуют. Потерями в трансформаторах и кабельных линиях на данном этапе расчета пренебрегаем. Таким образом, в рассматриваемой системе электроснабжения имеются высоковольтные выпрямители, комплексная нагрузка и нагрузка цеха, рассчитанная выше. По этим данным с применением (2.13)-(2.14) выполнен расчет нагрузок 5-го уровня на одну секцию шин ГПП, приведенный в таблице 2.3. Из-за отсутствия данных о графиках нагрузки коэффициент одновременности максимумов  $K_{\text{ом}}$  примем равным 1.

									Лист
									14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ

Таблица 2.3 Расчет нагрузок 5-го уровня

Исходные данные				Расчетные величины	
электроприемник	$K_{на}$	$P_p, \text{кВт}$	$Q_p, \text{кВАр}$	$P_p, \text{кВт}$	$Q_p, \text{кВАр}$
Комплексная нагрузка	-	5000	3200	-	-
Цех	-	539	303	-	-
Выпрямители	0.6	6*1000	6*150	-	-
Итого	-	-	-	9100	4100

По расчетной нагрузке 5-го уровня далее будут выбраны марки трансформатора ГПП.

### 2.3 Выбор трансформатора ТП

Число и мощность трансформаторов зависят от распределения нагрузок по площади цеха, наличия места для расположения цеховых подстанций, характера и режима работы электроприемников [9].

На ТП устанавливаем два силовых трансформатора. Для обеспечения надежного электроснабжения потребителей 2-ой категории при аварийном (или плановом) отключении одного из них коэффициент загрузки трансформатора в нормальном режиме должен быть меньше  $k_3 = 0.7$ . Таким образом, при расчетной нагрузке  $P=540$  кВт (см. табл. 2.2) номинальная мощность трансформатора должна быть больше

$$S_T = \frac{P}{k_3} = 771 \text{ кВА.}$$

Принимаем трансформатор ТМГ-1000/10/0.4.

Паспортные данные выбранного трансформатора [8]:

- потери мощности в режиме холостого хода  $\Delta P_{xx} = 1.1$  кВт;
- потери мощности в режиме короткого замыкания  $\Delta P_{кз} = 10.5$  кВт;
- ток холостого хода  $i_{xx} = 1\%$ ;
- напряжение короткого замыкания  $u_{кз} = 6\%$ .

Наибольшая реактивная мощность, которую трансформаторы могут пропустить из сети 10 кВ в сеть 0,4 кВ:

$$Q_p = \sqrt{(Nk_3 S_{н.т.})^2 - P_p^2}, \quad (2.15)$$

где  $N=2$  – число трансформаторов цеховой трансформаторной подстанции,  $k_3=0.7$  – коэффициент загрузки подстанции в нормальном режиме.

Величина  $Q_p$ , является расчетной, поэтому в общем случае реактивная нагрузка трансформаторов  $Q_1$ , не равна ей:

$$Q_1 = Q_p, \text{ если } Q_p < Q_1,$$

где  $Q_p$  – расчетная реактивная нагрузка трансформаторной подстанции, кВАр.

При  $Q_{1p} < Q_p$  трансформаторы ТП не могут пропустить всю реактивную нагрузку и поэтому часть ее должна быть скомпенсирована с помощью батарей конденсаторов на стороне низшего напряжения данной трансформаторной подстанции. Мощность этих конденсаторов будет составлять:

$$Q_k = Q_p - Q_1.$$

В рассматриваемом случае трансформатор в послеаварийном режиме (вся нагрузка переключена на один трансформатор) может пропустить реактивную мощность (2.15)

$$Q_p = \sqrt{(1000 \cdot 1.4)^2 - (540 \cdot 2)^2} = 891 \text{ кВАр.}$$

Расчетная реактивная мощность нагрузки трансформатора составляет  $Q = 303 \cdot 2 = 606$  кВАр, следовательно, установки конденсаторной батареи на стороне 0.4 кВ не требуется.

Коэффициенты загрузки трансформаторов в нормальном и послеаварийном режиме будут соответственно равны:

$$k_{3.н} = \frac{\sqrt{P_p^2 + Q_1^2}}{S_{н.т.}} = 0.619,$$

$$k_{3.п} = \frac{2\sqrt{P_p^2 + Q_1^2}}{S_{н.т.}} = 1.24.$$

При коэффициенте загрузки в нормальном режиме 0.619 трансформатор работает с КПД, близком к оптимальному значению. По известным паспортным данным можно рассчитать потери активной мощности в выбранном трансформаторе

$$\Delta P = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \left( \frac{S}{S_H} \right)^2 = 5.2 \text{ кВт.}$$

#### 2.4 Выбор трансформатора ГПП

На ГПП устанавливаем два силовых трансформатора. Для обеспечения надежного электроснабжения потребителей 2-ой категории при аварийном (или плановом) отключении одного из них коэффициент загрузки трансформатора в нормальном режиме должен быть меньше  $k_3 = 0.7$ . Таким образом при расчетной мощности нагрузки  $P = 9.1$  МВА (см. таблицу 2.3), номинальная мощность трансформатора должна быть больше

$$S_T = \frac{P}{k_3} = 13 \text{ МВА.}$$

Принимаем трансформатор ТРДН-16000/110/10.

Паспортные данные выбранного трансформатора [8]:

- потери мощности в режиме холостого хода  $\Delta P_{xx} = 21$  кВт;
- потери мощности в режиме короткого замыкания  $\Delta P_{кз} = 90$  кВт;

					13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

- ток холостого хода  $i_{xx} = 0.85\%$ ;
- напряжение короткого замыкания  $u_{кз} = 10.5 \%$ .

Трансформатор ГПП в послеаварийном режиме (вся нагрузка переключена на один трансформатор) может пропустить реактивную мощность (2.15)

$$Q_p = \sqrt{(16000 \cdot 1.4)^2 - (9100 \cdot 2)^2} = 13 \text{ МВАр.}$$

Согласно таблице 2.3 реактивная мощность нагрузки трансформатора составляет  $Q=4.1 \cdot 2=8.2$  МВАр, что меньше максимально допустимого значения.

При передаче реактивной мощности через элементы СЭС возникают:

- дополнительные потери активной мощности;
- дополнительная загрузка элементов СЭС;
- ухудшение качества электрической энергии.

В связи с этим установлены предельные значения коэффициента мощности для сетей 110 кВ, равное 0.5 [8]. На шинах 10 кВ коэффициент мощности

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = 0.45,$$

что меньше предельно допустимого значения. Следовательно, не требуется установка конденсаторной батареи на стороне 10 кВ.

Коэффициенты загрузки трансформаторов ГПП в нормальном и послеаварийном режиме будут соответственно равны:

$$k_{з.н} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{S_{н.т.}} = 0.624 ,$$

$$k_{з.п} = \frac{2\sqrt{P_p^2 + (Q_1 - Q_c)^2}}{S_{н.т.}} = 1.248.$$

При коэффициенте загрузки в нормальном режиме 0.624 трансформатор работает с КПД, близком к оптимальному значению. По известным паспортным данным можно рассчитать потери активной мощности в выбранном трансформаторе

$$\Delta P = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \left( \frac{S}{S_H} \right)^2 = 55.6 \text{ кВт.}$$

## 2.5 Расчет кабельных линий

Сечение кабелей напряжением 10 кВ определяется по экономической плотности тока и проверяется по допустимому току кабеля в нормальном режиме работы с учетом условий его прокладки, по току перегрузки, потери напряжения в послеаварийном режиме и термической стойкости к токам короткого замыкания [8].

Расчетный ток в кабельной линии в нормальном режиме:

$$I_{п.к.} = \frac{S_{п.к.}}{\sqrt{3}U_H}, \quad (2.16)$$

												Лист
												17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ							

где  $S_{p.k.}$  – мощность, которая должна передаваться по кабельной линии в нормальном режиме, кВА.

Сечение кабельной линии определяем по экономической плотности тока

$$F_3 = \frac{I_{p.k.}}{j_3}, \quad (2.17)$$

где  $j_3 = 1.4 \frac{A}{mm^2}$  – экономическая плотность тока [10].

По известному сечению выбираем кабель с длительно допустимым током  $I_{доп}$  [11]. Допустимый ток кабеля пересчитываем с учетом условий прокладки

$$I'_{доп} = I_{доп} K_t K_n, \quad (2.18)$$

где  $K_n$  – поправочный коэффициент на число параллельно прокладываемых кабелей [11];

$K_t$  – поправочный коэффициент на температуру среды, в которой прокладывается кабель [11].

В нормальном режиме работы для выбранного кабеля должно выполняться условие по допустимому току

$$I'_{доп} \geq \frac{I_{p.k.}}{n_k},$$

где  $n_k$  – число кабелей в лотке.

В послеаварийном режиме, когда выходит из строя одна из двух кабельных линий, нагрузка на линию удваивается  $I_{ав} = 2I_{p.k.}$ . Допустимая перегрузка кабеля в послеаварийном режиме:

$$I'_{ав} = K_{ав} I'_{доп},$$

где  $K_{ав}$  – коэффициент перегрузки. Он определяется из [11] и зависит от коэффициента загрузки кабеля  $K_3 = I_{p.k.} / I'_{доп}$ .

В послеаварийном режиме работы для выбранного кабеля должно выполняться условие по току перегрузки:

$$I'_{ав} \geq \frac{I_{ав.}}{n_k}.$$

									Лист
									18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ				

Согласно таблице 2.1 расчетная нагрузка кабельной линии от трансформаторной подстанции до низковольтного распределительного пункта составляет 72 кВт и 29 кВАр. Тогда расчетный ток линии в нормальном режиме 112 А, а экономически целесообразное сечение 80 мм<sup>2</sup>. Принимаем кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 0.4 кВ минимального сечения 95 мм<sup>2</sup>. Ток в послеаварийном режиме 224 А, предельно допустимый ток кабеля 253 А.

Согласно таблице 2.2 расчетная нагрузка кабельной линии от шин 10 кВ главной понизительной подстанции до трансформаторной подстанции цеха составляет 539 кВт и 303 кВАр. Тогда расчетный ток линии в нормальном режиме 36 А, а экономически целесообразное сечение 26 мм<sup>2</sup>. Принимаем кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 10 кВ минимального сечения 35 мм<sup>2</sup>. Ток в послеаварийном режиме 72 А, предельно допустимый ток кабеля 147 А.

Для высоковольтной нагрузки мощности 1000 кВт и 150 кВАр. Ток составляет 58 А, целесообразное сечение кабеля 42 мм<sup>2</sup>. Принимаем сечение 50 мм<sup>2</sup>.

Далее необходимо проверить выбранные кабели на термическую стойкость, но это возможно сделать только после расчета токов короткого замыкания (см. раздел 3).

Кабельные линии 0.4 кВ необходимо также проверить по допустимой потере напряжения. Как правило, этот критерий является определяющим для линий 0.4 кВ.

Отклонение напряжения в нормальном режиме в кабельной линии зависит от активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощностей, пропускаемых по линии

$$\Delta U = \frac{Pr_0l + Qx_0l}{U_H^2}, \quad (2.19)$$

где  $r_0$  и  $x_0$  – удельные активное и реактивное сопротивление кабеля, Ом/км;

$l$  – длина кабельной линии, км.

Для линий 0.4 кВ сечением 95 мм<sup>2</sup>:  $P=72$  кВт,  $Q=29$  кВАр,  $r_0 l = 0.36 \cdot 0.05 = 0.018$  Ом,  $x_0 l = 0.487 \cdot 0.05 = 0.025$  Ом. Отклонение напряжения согласно (2.19) составляет 1.3 %.

Для линии 10 кВ сечением 35 мм<sup>2</sup>:  $P=540$  кВт,  $Q=303$  кВАр,  $r_0 l = 0.424 \cdot 1 = 0.424$  Ом,  $x_0 l = 0.559 \cdot 1 = 0.559$  Ом. Отклонение напряжения согласно (2.19) составляет 0.4 %.

Отклонение напряжения в нормальном режиме в трансформаторе зависит от активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощностей, пропускаемых через трансформатор

$$\Delta U = \frac{Pr + Qx}{U_H^2}, \quad (2.20)$$

где  $r$  и  $x$  – активное и реактивное сопротивление трансформатора, Ом.

										Лист
										19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ					

Сопротивление трансформатора можно получить по его паспортным данным  $S_H=1000$  кВАр,  $\Delta P_{кз} = 10.5$  кВт и  $u_{кз} = 6$  %. Активное, полное и реактивное сопротивления трансформатора соответственно равны

$$r_{m2} = \frac{P_{кз} U_H^2}{S_H^2} = 1.05 \text{ Ом},$$

$$z_{m1} = \frac{u_{кз} U_H^2}{S_H} = 6 \text{ Ом},$$

$$x_{m1} = \sqrt{z_{m1}^2 - r_{m1}^2} = 5.9 \text{ Ом}.$$

Отклонение напряжения согласно (2.20) составляет 2.4 %. Общее отклонение напряжения от центра питания (шины 10 кВ ГПП) до шин 0.4 кВ низковольтного распределительного пункта составляет 4.1%, что меньше предельно допустимого уровня 5% [12].

Выводы по разделу два:

Сформирована система электроснабжения и выбраны трансформаторы ТП, ГПП, а также сечение кабельных линий.

					<i>13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

### 3. ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

#### 3.1 Методика расчета

Расчет токов короткого замыкания в электрических сетях может производиться разными методами, с разными допущениями, в частности с использованием именованных или относительных единиц. В ВКР используется метод расчета, основанный на использовании относительных единиц, приведенных к базисным условиям [13,14].

Для проверки принятого к установке электрооборудования по термическому, электродинамическому действию токов короткого замыкания достаточно рассчитать ток трёхфазного КЗ в характерных токах СЭС предприятия и определить периодическую составляющую этого тока для наиболее тяжёлого режима работы сети. Таким характерным режимом является состояние СЭС, когда один из трансформаторов ГПП отключен и включены секционные выключатели в РУ 10 кВ ГПП, то есть все электроприёмники питаются от одного трансформатора.

На рисунке 3.1 представим схему для расчёта токов КЗ и карту селективности с указанием времени срабатывания максимальной токовой защиты, исходя из принятых к установке автоматических выключателей и реле, а именно: для автоматических выключателей ступень селективности равна 0,1 с, а для микропроцессорных реле – 0,3 с [6].

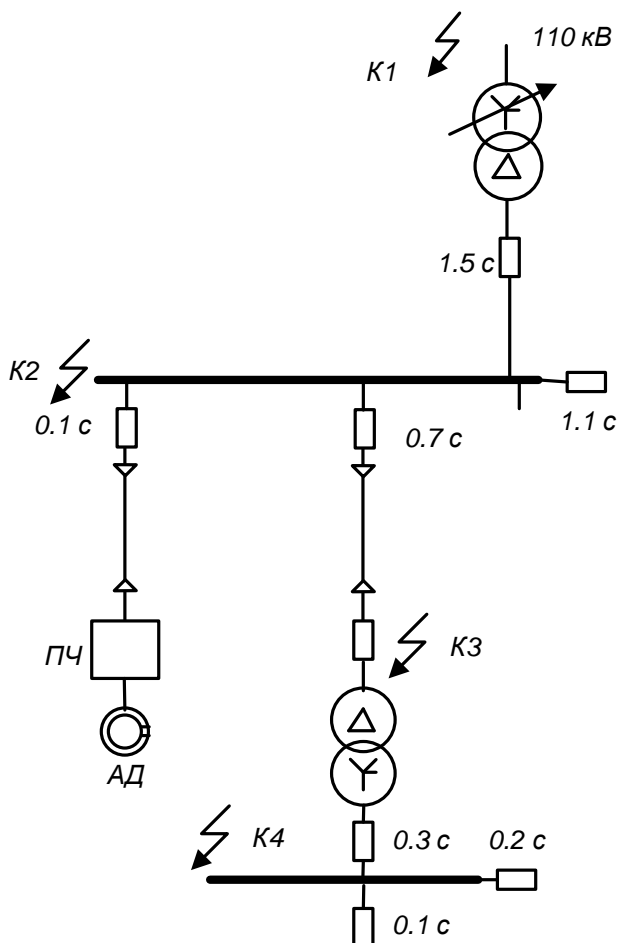


Рисунок 3.1 Схема СЭС и ее карта селективности



Расчет токов КЗ производим в следующих точках:

- К<sub>1</sub> – в схеме внешнего электроснабжения;
- К<sub>2</sub> – на секции шин 10 кВ, к которой подключены преобразователи частоты;
- К<sub>3</sub> – на секции шин 10 кВ трансформаторной ТП;
- К<sub>4</sub> – на секции шин 0.4 кВ трансформаторной ТП;
- К<sub>5</sub> – на секции шин 0.4 кВ НРП.

Для расчета токов КЗ по схеме электроснабжения предприятия (рис. 3.1) составляется схема замещения (рисунок 3.2).

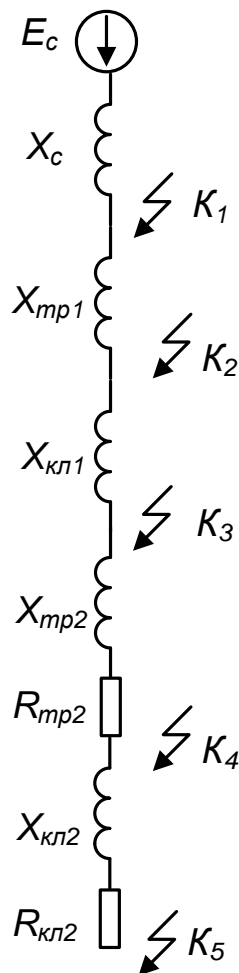


Рисунок 3.2 – Схема замещения для токов КЗ

### 3.2 Расчет токов короткого замыкания

При заданной мощности КЗ в точке подключения  $S_k=1000$  МВА сопротивление одной фазы сети

$$x_c = \frac{E_c^2}{S_k} = \frac{(10^4)^2}{1 \cdot 10^9} = 0.1 \text{ Ом.}$$

Сопротивление трансформатора определяется напряжением короткого замыкания  $u_k=10.5\%$  и  $S_H=16$  МВА и рассчитывается по формуле

$$x_m = \frac{u_k U_H^2}{S_H} = 0.66 \text{ Ом.}$$

При регулировании напряжения трансформатора ГПП при помощи РПН сопротивление трансформатора изменяется

$$\text{от } x_{m.\text{мин}} = x_m (1 - 0.16)^2 = 0.466 \text{ Ом до } x_{m.\text{макс}} = x_m (1 + 0.16)^2 = 0.888$$

Для схемы на рис. 3.2 ток короткого замыкания в начале линии 10 кВ (в точке К2) составляет

$$I_{\text{мин(к2)}} = \frac{E_c}{(x_c + x_{m.\text{макс}})\sqrt{3}} = 5.9 \text{ кА}$$

в минимальном режиме и

$$I_{\text{макс(к2)}} = \frac{E_c}{(x_c + x_{m.\text{мин}})\sqrt{3}} = 10.4 \text{ кА}$$

в максимальном режиме.

Сопротивление кабельной линии 10 кВ

$$r_{\text{кл1}} = r_0 l = 0.424 * 1 = 0.424 \text{ Ом, } x_{\text{кл1}} = x_0 l = 0.559 * 1 = 0.559 \text{ Ом.}$$

Для сети 0.4 кВ обязательно учитывать активные сопротивления элементов.

Сопротивление трансформатора можно получить по его паспортным данным  $S_H = 1000 \text{ кВАр}$ ,  $\Delta P_{\text{кз}} = 10.5 \text{ кВт}$  и  $u_{\text{кз}} = 6 \%$ . Активное, полное и реактивное сопротивления трансформатора соответственно равны

$$r_{m2} = \frac{P_{\text{кз}} U_H^2}{S_H^2} = 1.05 \text{ Ом,}$$

$$z_{m1} = \frac{u_{\text{кз}} U_H^2}{S_H} = 6 \text{ Ом,}$$

$$x_{m1} = \sqrt{z_{m1}^2 - r_{m1}^2} = 5.9 \text{ Ом.}$$

Сопротивление кабельной линии 0.4 кВ

$$r_{\text{кл2}} = r_0 l (K_T)^2 = 0.34 * 0.025 * 625 = 5.3 \text{ Ом, } x_{\text{кл1}} = x_0 l (K_T)^2 = 0.47 * 0.025 * 625 = 7.3 \text{ Ом.}$$

Для схемы на рис. 3.2 ток короткого замыкания в начале линии 0.4 кВ (в точке К4) необходимо умножить на коэффициент трансформации  $K_T = 25$ . В результате получаем в максимальном режиме

$$I_{\text{макс(к4)}} = \frac{E_c K_T}{(r_{m2} + r_{\text{кл1}} + j(x_c + x_{m.\text{мин}} + x_{\text{кл1}} + x_{m2}))\sqrt{3}} = 20.5 \text{ кА}$$

в минимальном режиме

$$I_{\text{мин(к4)}} = \frac{E_c K_T}{(r_{m2} + r_{\text{кл1}} + j(x_c + x_{m.\text{макс}} + x_{\text{кл1}} + x_{m2}))\sqrt{3}} = 19.4 \text{ кА.}$$

Проведя аналогичные вычисления для точки К5, получаем в максимальном режиме

									Лист
									23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ				

$$I_{\text{макс(к4)}} = \frac{E_c K_T}{(r_{m2} + r_{кл1} + r_{кл2} + j(x_c + x_{т.мин} + x_{кл1} + x_{m2} + x_{кл2}))\sqrt{3}} = 9.1 \text{ кА}$$

в минимальном режиме

$$I_{\text{мин(к4)}} = \frac{E_c K_T}{(r_{m2} + r_{кл1} + r_{кл2} + j(x_c + x_{т.макс} + x_{кл1} + x_{m2} + x_{кл2}))\sqrt{3}} = 9.0 \text{ кА.}$$

Выше были рассчитаны токи, относящиеся к трехфазному короткому замыканию. В случае двухфазного короткого замыкания ток в минимальном режиме можно получить, умножив ранее полученные токи на 0.85.

Таким образом, в точке К4 ток короткого замыкания может изменяться от 16.5 кА до 20.5 кА; в точке К5 – от 7.7 кА до 9.1 кА.

### 3.3 Проверка кабелей на термическую стойкость

Термически стойкое сечение определим по выражению

$$F_{\text{т.с.}} = \frac{\sqrt{B_k}}{C}, \quad (3.1)$$

где  $C$  – коэффициент, зависящий от вида металла жил кабеля,  $C = 90 \text{ А} \cdot \text{с}^{0.5} / \text{мм}^2$  [11] (для медных жил);  $B_k$  – тепловой импульс тока короткого замыкания,  $\text{кА} \cdot \text{с}^2$ .

Тепловой импульс тока короткого замыкания определяется по формуле:

$$B_k = I_{K3}^2 (t_{p3} + t_{ov} + T_a), \quad (3.2)$$

где  $t_{p3}$  – время действия релейной защиты линии;

$t_{ov}$  – полное время отключение выключателя;

$T_a$  – время протекания апериодической составляющей тока КЗ;

$I_{K3}$  – ток короткого замыкания.

Для кабельных линий, питающих преобразователи частоты, тепловой импульс (3.2) рассчитывается при данных  $I_{K3} = 10.4 \text{ кА}$ ,  $t_{ov} = 0.06 \text{ с}$ ,  $T_a = 0.12 \text{ с}$ ,  $t_{p3} = 0.1 \text{ с}$  (см. рис. 4.1). Тепловой импульс  $B_k = 30.3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ .

Для кабельной линии, питающей трансформаторную подстанцию цеха, тепловой импульс (3.2) рассчитывается при данных  $I_{K3} = 10.4 \text{ кА}$ ,  $t_{ov} = 0.06 \text{ с}$ ,  $T_a = 0.12 \text{ с}$ ,  $t_{p3} = 0.7 \text{ с}$  (см. рис. 3.1). Тепловой импульс  $B_k = 95.4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ .

Для кабельных линий, питающих низковольтные распределительные пункты, тепловой импульс (3.2) рассчитывается при данных  $I_{K3} = 20.5 \text{ кА}$ ,  $t_{ov} = 0.06 \text{ с}$ ,  $T_a = 0.12 \text{ с}$ ,  $t_{p3} = 0.1 \text{ с}$  (см. рис. 3.1). Тепловой импульс  $B_k = 116.1 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ .

									Лист
									24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ				

Для выбранного кабеля должно выполняться условие

$$F > F_{т.с.}$$

Если не выполняется одно из условий, то сечение кабеля необходимо увеличить.

Согласно (3.1) термически стойкие сечения кабелей составляют: для кабельных линий, питающих преобразователи частоты – 61 мм<sup>2</sup>, для кабеля, питающего ТП -108 мм<sup>2</sup>, для кабеля до НРП – 120 мм<sup>2</sup>.

Исходя из результатов расчета необходимо увеличить сечение кабельных линий:

- питающих ПЧ с 50 мм<sup>2</sup> до 70 мм<sup>2</sup>;
- питающих ТП с 35 мм<sup>2</sup> до 120 мм<sup>2</sup>;
- питающих НРП с 95 мм<sup>2</sup> до 120 мм<sup>2</sup>.

Выводы по разделу три:

Выполнен расчет токов короткого замыкания. Результаты расчетов в точках К4 и К5 необходимы для расчета релейной защиты. По результатам расчетов в точке К2 было уточнено сечение кабельных линий.

					13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

#### 4. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА СЕТИ 0.4 кВ

Исходные данные для построения релейной защиты: для выключателя QF4 ток короткого замыкания изменяется от 7.7 кА до 20.5 кА., максимальный рабочий ток 224 А; для выключателя QF1 ток короткого замыкания изменяться от 16.5 кА до 20.5 кА, максимальный рабочий ток 1800 А.

Схема рассматриваемого участка СЭС показана на рис. 4.1.

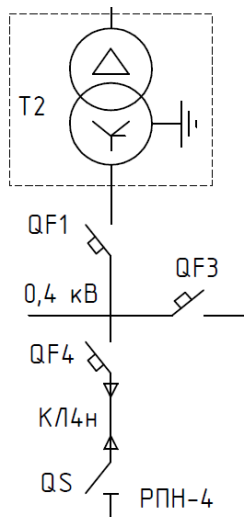


Рисунок 4.1 Схема участка СЭС

##### 4.1 Расчет уставок защиты выключателя QF4

Номинальный ток выключателя выбирается равным или больше максимального рабочего тока нагрузки  $I_n > I_{\text{раб}\cdot\text{макс}}$ , где  $I_{\text{раб}\cdot\text{макс}}$  – максимальный рабочий ток нагрузки, А. Для выключателя QF4:  $I_n > 242$  А

По каталогу выбираем автоматический выключатель Compact NSX250F с номинальным током  $I_n = 250$  А, номинальной предельной отключающей способностью при напряжении сети 380 В – полный ток отключения  $I_{\text{cu}} = 36$  кА [15], что значительно больше предельного тока трёхфазного КЗ в месте установки выключателя  $I_{\text{макс}} = 23,5$  кА.

Для управления выключателем выберем блок контроля и управления Micrologic 5.0 [15]. Данный блок осуществляет три вида токовых защит:

- защиту от перегрузки с регулируемыми уставками тока  $I_r$  и времени  $t_r$ ;
- селективную токовую отсечку с регулируемыми уставками тока  $I_{\text{sd}}$  и времени  $t_{\text{sd}}$ ;
- мгновенную токовую отсечку с регулируемой уставкой тока  $I_i$ ;

Уставка тока защиты от перегрузки  $I_r$  должна быть равной или больше рабочего максимального тока, протекающего через выключатель QF4. Поэтому принимаем для выключателя QF4  $I_{n\text{QF4}} = I_n = 250$  А. Полученное значение уставки по току  $I_r$  меньше номинального тока выключателя. Блок управления позволяет делать меньшие уставки по току защиты от перегрузки. Для определения положения переключателя  $I_r$  рассматривается соотношение [16]

$$\frac{I_r}{I_n} < I_{r\text{QF4}}.$$

Условные токи несрабатывания и срабатывания защиты от перегрузки

									Лист
									26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ				

$$I_{nd} = 1,05 I_{r,QF4}, I_d = 1,20 I_{r,QF4}.$$

Выбранный блок Micrologic 5.0 при  $I_{r,QF4} = 4$  с имеет времена срабатывания защиты от перегрузки: 80-100 с при токе  $1,5I_{r,QF4}$ , 3,2-4,0 с при токе  $6I_{r,QF4}$ , 2,24-2,8 с при токе  $7,2I_{r,QF4}$ . Эти точки будут использованы при построении ВТХ защиты от перегруза выключателя QF4.

Уставка тока для селективной отсечки  $I_{sd}$  связана с уставкой по току  $I_r$  защиты от перегрузки. Для предварительного определения уставки тока определим отношение пикового тока  $I_{пик,QF4}$  к уставке тока  $I_{r,QF4}$

$$\frac{I_{\max QF4}}{I_{r,QF4}} < \frac{I_{sdQF4}}{I_{r,QF4}}.$$

Точность срабатывания селективной токовой отсечки блока Micrologic 5.0 составляет  $\pm 10\%$  и находится в пределах  $(0,9-1,1)\Delta I_{sd}$ .

Коэффициент чувствительности селективной токовой отсечки к минимальному току КЗ в точке К6 [17]

$$K_{ч.ко} = \frac{I_{кб.мин}}{I_{sdQF4}}.$$

Уставку по времени  $t_{sd}$  селективной токовой отсечки выключателя QF4 принимаем равной  $t_{sd,QF4} = 0,1$  с. Диапазон изменения времени срабатывания селективной токовой отсечки составит  $\Delta t_{sd,QF4} = 0,08 - 0,14$  с.

Уставка тока мгновенной токовой отсечки  $I_i$  имеет постоянное для расцепителя значение и связана с номинальным током выключателя  $I_i = 12 I_n$ . Точность срабатывания мгновенной токовой отсечки составляет  $\pm 15\%$ .

Чувствительность мгновенной токовой отсечки выключателя QF4 к минимальному току КЗ в месте его установки

$$K_{ч.мо} = \frac{I_{к5.мин}}{I_{iQF4}} > 2.$$

Проверим выбранный автоматический выключатель по предельной коммутационной стойкости при отключении КЗ. Предельно отключаемый ток автоматическим выключателем должен быть больше максимального тока КЗ в месте его установки  $I_{cu} > I_{к5.макс}$ .

Результаты расчетов защитных времятоковых характеристик электронных расцепителей выключателей QF4 сведем в таблицы 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 Выключатель QF4

Выключатель, тип, расцепитель	$I_{р.макс}$ А	$I_n$ А	Защита от перегруза				Время срабатывания, с при значениях тока, А отнесенного к току $I_r$		
			$I_r$ , А	$t$ , с $I_{sd}$ , А/о.е.	$t$ , с $I_d$ , А/о.е.	$t_r$ , с $I_r$ , А			
QF4 Compact NSX250F Micrologic 5.0A	242,4	250	250	$\frac{10000}{263}$ 1,05	$\frac{10000}{325}$ 1,20	$\frac{6}{1500}$	$\frac{80-100}{375}$ $1,5 \cdot I_r$	$\frac{3,2-4,0}{1500}$ $6 \cdot I_r$	$\frac{2,24-2,8}{1800}$ $7,2 \cdot I_r$

Таблица 4.2 Выключатель QF4

Выключатель	Селективная токовая отсечка						Мгновенная токовая отсечка					
	$I_{\text{max}},$ А	$I_{\text{sd}},$ А	$\Delta I_{\text{sd}},$ А	$K_{\text{т.со}}$	$t_{\text{sd}},$ с	$\Delta t_{\text{sd}},$ с	$I_i,$ кА	$\Delta I_i,$ кА	$I_{\text{к5.мгн}}^{(2)},$ кА	$K_{\text{т.мо}}$	$I_{\text{к5.макс}}^{(3)},$ кА	$I_{\text{cu}},$ кА
QF4	692	750	$\frac{675}{825}$	11,3	0,1	$\frac{0,08}{0,14}$	2,75	$\frac{2338}{3163}$	19,6	7,01	23,5	36

#### 4.2 Расчет уставок защиты секционного автоматического выключателя QF3

Релейная защита сборных шин 0,4 кВ трансформатора выполнена с помощью секционного выключателя QF3. Рабочий максимальный ток секционного автоматического выключателя QF3 выбирается из условия

$$I_{\text{раб.максQF3}} = 0.7 I_{\text{раб.макс.т.}} = 0.7 K_{\text{зн}} I_{\text{тн}}^{\text{НН}}$$

где  $I_{\text{т.н}}$  – номинальный ток трансформатора на стороне низшего напряжения, А.

$K_{\text{з.п.}}$  – коэффициент загрузки трансформатора в послеаварийном режиме.

Номинальный ток трансформатора на стороне НН

$$I_{\text{тн}}^{\text{НН}} = \frac{S_{\text{тн}}}{\sqrt{3} U_c}$$

Номинальный ток секционного выключателя QF3 должен быть больше тока, протекающего по нему рабочего максимального тока  $I_{\text{QF3.н}} > I_{\text{раб.макс.QF3}}$ .

По каталогу выбираем автоматический выключатель Masterpact NW20H1 с номинальным током  $I_n=2000$  А, номинальной предельной отключающей способностью при напряжении сети 380 В – полный ток отключения  $I_{\text{cu}} = 65$  кА, что значительно больше предельного тока трёхфазного КЗ в месте установки выключателя  $I_{\text{к5.макс}} = 23,5$  кА.

Для управления секционным выключателем и защиты электрической сети выберем блок контроля и управления Micrologic 5.0.

Уставка тока защиты от перегрузки  $I_r$  должна быть больше рабочего максимального тока, протекающего через выключатель QF3  $I_{r.QF3} > I_{\text{раб.макс.QF3}}$ . Полученное значение уставки по току  $I_r$  меньше номинального тока выключателя  $I_{\text{QF3.н}} = I_n = 2000$  А. Блок управления позволяет делать меньшие уставки по току защиты от перегрузки. Для определения положения переключателя  $I_r$  рассматривается соотношение

$$\frac{I_r}{I_n} < I_{r.QF3}$$

Условием токовой селективности двух последовательных защит является выполнение соотношения

$$\frac{I_{r.QF3}}{I_{r.QF4}} > K_{\text{н.согл.}}$$

где  $K_{\text{н.согл.}}$  – коэффициент надежности согласования релейной защиты разных ступеней СЭС. Условные токи несрабатывания и срабатывания защиты от перегрузки  $I_{\text{нд}} = 1,05 I_{r.QF3}$ ,  $I_{\text{д}} = 1,20 I_{r.QF3}$ .

Выбранный блок Micrologic 5.0 при  $I_{r,QF3} = 4$  с имеет времена срабатывания защиты от перегрузки: 70-100 с при токе  $1,5 I_{r,QF3}$ ; 3,4-4,0 с при токе  $6 I_{r,QF3}$ ; 2,16-2,7 с при токе  $7,2 I_{r,QF3}$ . Эти точки будут использованы при построении ВТХ защиты от перегруза выключателя QF3.

Уставка тока  $I_{sd}$  селективной токовой отсечки должна быть отстроена от пикового тока, который протекает по секционному выключателю QF3. Пиковый ток секционного автоматического выключателя QF3  $I_{пик,QF3} = K_{н.о.} I_{раб.макс,QF3}$ ; где  $K_{н.о.}$  – коэффициент надежности отстройки.

Проверка селективности двух последовательных защит производится по условию

$$\frac{I_{sd,QF3}}{I_{sd,QF4}} > K_{н.согл.}$$

Точность срабатывания селективной токовой отсечки блока Micrologic 5.0 составляет  $\pm 10\%$  и находится в пределах  $(0,9-1,1)\Delta I_{sd}$ . Коэффициент чувствительности селективной токовой отсечки к минимальному току КЗ в точке К5

$$K_{ч.со} = \frac{I_{к5.мин}}{I_{sd,QF3}}$$

Значение уставки времени на блоке Micrologic 5.0 принимаем равным  $t_{sd,QF3} = 0,2$  с. Диапазон изменения времени срабатывания селективной токовой отсечки составит  $\Delta t_{sd,QF3} = 0,14-0,2$  с.

Секционный выключатель QF3 защищает одну из секций сборных шин (в зависимости от того, какой выведен из работы трансформатор). С этой целью мгновенная токовая отсечка отстраивается от максимального тока внешнего КЗ  $I_{i,QF3} = K_{н.о} I_{кб.макс}$ . Точность срабатывания мгновенной токовой отсечки блока Micrologic 5.0 составляет  $\pm 10\%$ .

Диапазон срабатывания по времени  $\Delta t_i$  мгновенной токовой отсечки составляет: время несрабатывания 20 мс; максимальное время отключения 50 мс. Коэффициент чувствительности мгновенной токовой отсечки к минимальному току КЗ в месте установки выключателя QF3

$$K_{ч.мо} = \frac{I_{к5.мин}}{I_{i,QF3}}$$

Если полученная величина коэффициента чувствительности будет менее 2, то мгновенную токовую отсечку необходимо вывести из работы.

Предельно отключаемый ток автоматическим выключателем должен быть больше максимального тока КЗ в месте его установки  $I_{cu} > I_{к5.макс}$ .

#### 4.3 Расчет уставок защиты вводного выключателя QF1

Релейная защита трансформатора со стороны 0,4 кВ выполнена с помощью автоматического выключателя QF1. Номинальный ток вводного автоматического выключателя QF1 должен быть равным или больше тока, протекающего по нему рабочего максимального тока  $I_{QF1н} > I_{раб.макс,QF1}$ .

						Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	



Рабочий максимальный ток секционного автоматического выключателя QF2 выбирается из условия  $I_{\text{раб.макс.QF1}} = K_{\text{з.п.}} \cdot I_{\text{т.н.}}$ . По каталогу выбираем автоматический выключатель Masterpact NW25H1 с номинальным током  $I_n = 2500$  А, номинальной предельной отключающей способностью при напряжении сети 380 В – полный ток отключения  $I_{\text{cu}} = 65$  кА, что значительно больше предельного тока трёхфазного КЗ в месте установки выключателя  $I_{\text{к5.макс}} = 23,5$  кА. Для управления секционным выключателем и защиты электрической сети выберем блок контроля и управления Micrologic 5.0.

Уставка тока защиты от перегрузки  $I_r$  должна быть больше рабочего максимального тока, протекающего через выключатель QF1  $I_{r.QF1} > I_{\text{раб.макс.QF1}}$ . Полученное значение уставки по току  $I_r$  значительно номинального тока выключателя  $I_{QF1.n} = I_n = 2500$  А. Расцепитель позволяет делать меньшие уставки по току защиты от перегрузки. Для определения положения переключателя  $I_r$  рассматривается соотношение

$$\frac{I_r}{I_n} < I_{r.QF1}.$$

Произведем проверку селективности двух последовательных защит

$$\frac{I_{sd.QF1}}{I_{sd.QF3}} > K_{\text{н.согл.}}$$

Условные токи несрабатывания и срабатывания защиты от перегрузки  $I_{nd} = 1,05 I_{r.QF1}$ ,  $I_d = 1,20 I_{r.QF1}$ . Время срабатывания  $t_r$  защиты от перегрузки выключателя QF1 выбирается с учетом согласования с защитными ВТХ нижестоящего секционного автоматического выключателя QF3.

Выбранный блок Micrologic 5.0 при  $t_{r.QF1} = 4$  с имеет времена срабатывания защиты от перегрузки 70-100 с при токе  $1,5 I_{r.QF1}$ ; 3,4-4,0 с при токе  $6 I_{r.QF1}$ ; 2,16-2,7 с при токе  $7,2 I_{r.QF1}$ .

Уставка тока  $I_{sd}$  селективной токовой отсечки должна быть отстроена от пикового тока, который протекает по вводному выключателю QF1. Пиковый ток вводного автоматического выключателя QF1  $I_{\text{пик.QF1}} = K_{\text{н.о.}} \cdot I_{\text{раб.макс.QF1}}$ . где  $K_{\text{н.о.}}$  – коэффициент надежности отстройки.

Уставка тока  $I_{sd}$  связана с уставкой по току  $I_r$  защиты от перегрузки. Для предварительного определения уставки тока определим отношение пикового тока  $I_{\text{пик.QF1}}$  к уставке тока  $I_{r.QF1}$

$$\frac{I_{\text{пик.QF1}}}{I_{r.QF1}} < \frac{I_{sd.QF1}}{I_{r.QF1}}$$

Проверка селективности двух последовательных защит производится по формуле

$$\frac{I_{sd.QF1}}{I_{sd.QF3}} > K_{\text{н.согл.}}$$

Точность срабатывания селективной токовой отсечки блока Micrologic 5.0 составляет  $\pm 10\%$  и находится в пределах  $(0,9 - 1,1) \Delta I_{sd}$ . Коэффициент чувствительности селективной токовой отсечки к минимальному току КЗ в точке К5

										Лист
										30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ					

$$K_{ч.со} = \frac{I_{к5.мин}}{I_{iQF1}}$$

Выбор уставки по времени  $t_{sd}$  селективной токовой отсечки выключателя QF1 необходимо производить с учетом защитных ВТХ нижестоящего выключателя QF3  $t_{sd,QF1} = t_{sd,QF3} + \Delta t$ . Диапазон изменения времени срабатывания селективной токовой отсечки составит  $\Delta t_{sd,QF1} = 0,23-0,32$  с.

Мгновенная токовая отсечка отстраивается от максимального тока внешнего короткого замыкания  $I_{i,QF1} = K_{н.о} I_{кб.макс}$ . Точность срабатывания мгновенной токовой отсечки блока Micrologic 5.0 составляет  $\pm 10\%$ . Диапазон срабатывания по времени  $\Delta t_i$  мгновенной токовой отсечки составляет: время несрабатывания 20 мс; максимальное время отключения 50 мс.

Коэффициент чувствительности мгновенной токовой отсечки к минимальному току КЗ в месте установки выключателя QF1

$$K_{ч.мо} = \frac{I_{к5.мин}}{I_{iQF1}}$$

Если полученная величина коэффициента чувствительности будет менее 2, то мгновенную токовую отсечку необходимо вывести из работы.

Проверим выбранный выключатель по предельной коммутационной стойкости при отключении КЗ. Предельно отключаемый ток автоматическим выключателем должен быть больше максимального тока КЗ в месте его установки  $I_{cu} > I_{к5.макс}$ .

Результаты расчетов защитных времятоковых характеристик электронных расцепителей выключателей QF1 и QF3 сведем в таблицы 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3 Выключатели QF1 и QF3 (защита от перегруза)

Выключатель, тип, расцепитель	$I_{рзб.макс}$ А	$I_n$ А	Защита от перегруза						
			$I_r$ А	$t_r$ , с $I_{sd}$ А/о.е.	$t_d$ , с $I_d$ А/о.е.	$t_{r,d}$ , с $I_r$ , А	Время срабатывания, с при значениях тока, А, отнесенного к току $I_r$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
QF3 Masterpact NW20H1 Micrologic 5.0A	1617	2000	1800	$\frac{10000}{1890}$ 1,05	$\frac{10000}{2160}$ 1,20	$\frac{4}{10800}$	$\frac{70-100}{2700}$ $1,5 \cdot I_r$	$\frac{3,2-4}{10800}$ $6 \cdot I_r$	$\frac{2,16-2,7}{12960}$ $7,2 \cdot I_r$
QF1 Masterpact NW25H1 Micrologic 5.0A	2309	2500	2375	$\frac{10000}{2494}$ 1,05	$\frac{10000}{2850}$ 1,20	$\frac{4}{14250}$	$\frac{70-100}{3563}$ $1,5 \cdot I_r$	$\frac{3,2-4}{14250}$ $6 \cdot I_r$	$\frac{2,16-2,7}{17100}$ $7,2 \cdot I_r$

Таблица 4.4 Выключатели QF1 и QF3 (токовые отсечки)

Выключатель	Селективная токовая отсечка							Мгновенная токовая отсечка					
	$K_{ч.со}$	$I_{мин}$ А	$I_{sd}$ А	$\Delta I_{sd}$ А	$K_{ч.со}$	$t_{sd}$ с	$\Delta t_{sd}$ с	$I_r$ А	$\Delta I_r$ А	$I_{к5.мин}^{(2)}$ кА	$K_{ч.мо}$	$I_{к5.макс}^{(3)}$ кА	$I_{cu}$ кА
QF3	1,35	2182	2700	$\frac{2430}{2970}$	7,27	0,2	$\frac{0,14}{0,20}$	16000	$\frac{14400}{17600}$	19,6	1,23	23,5	65
QF1	1,35	3118	3563	$\frac{3206}{3919}$	5,51	0,3	$\frac{0,23}{0,32}$	20000	$\frac{18000}{22000}$	19,6	0,98	23,5	65

На рисунке 4.2 представим карту селективности защит, установленных на автоматических выключателях.

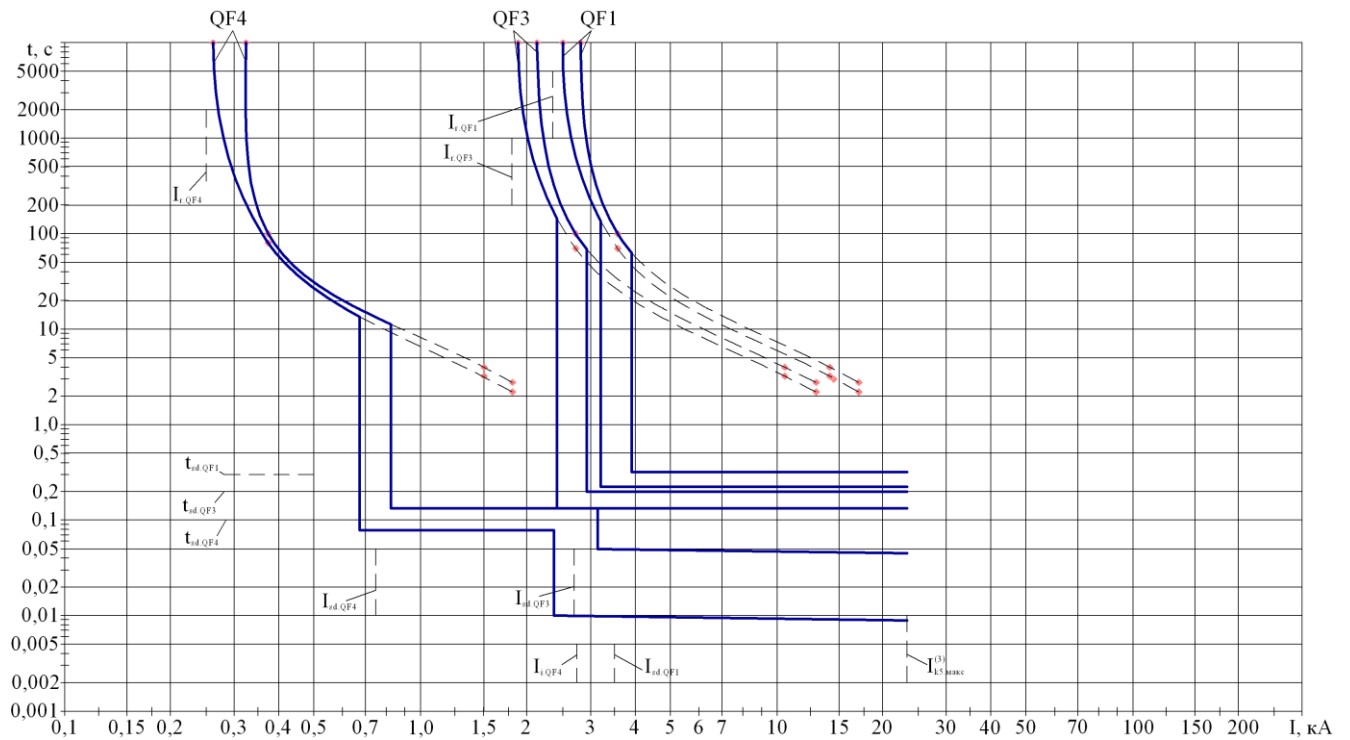


Рисунок 4.2. Время-токовые характеристики

Выводы по разделу четыре:

Построенная система релейной защиты согласована с сетью по максимальному рабочему току, по максимальному пиковому току, по току короткого замыкания. Система релейной защиты обладает селективностью.

## 5. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

### 5.1 Расчет при установке ПЧ

При высокой доле преобразователей частоты в нагрузке промышленного предприятия неизбежно возникает проблема их электромагнитной совместимости, как между собой, так и с другими промышленными установками. Для расчета качества электроэнергии на шинах 10 кВ необходимо сформировать схему замещения.

Порядок построения схемы замещения изложен в [6].

Для  $k$ -ой гармоники сопротивление трансформатора ГПП:

$$x_{m(k)} = \frac{u_k U_H^2}{S_H} (1 \pm \Delta U)^2 k, \quad (5.1)$$

где  $S_H$  – номинальная мощность трансформатора,  $S_H = 16$  МВА;

$U_H$  - номинальное напряжение  $U_H = 10$  кВ;

$u_k$ - напряжение короткого замыкания,  $u_k = 0.105$ ;

$\Delta U_T$  -- относительное изменение напряжения трансформатора  $\Delta U_T = 0.16$ .

Для  $k$ -ой гармоники сопротивление электрической сети

$$X_{\text{сети}(k)} = \frac{U_H^2}{S_{kz}} k, \quad (5.2)$$

где  $S_{kz}$  - мощность короткого замыкания в точке подключения,  $S_{kz} = 1000$  МВА.

Для точки подключения к сети преобразователь частоты функционирует как выпрямитель. Выпрямитель для  $k$ -ой гармоники заменяем источником тока

$$I_{(k)} = \frac{S}{k U_H \sqrt{3}}. \quad (5.3)$$

где  $S$  – номинальная мощность выпрямителей  $S = 3.6$  МВА.

Для двенадцатифазного выпрямителя могут генерироваться 11-я, 13-я, 23-я, 25-я и т.д. гармоники. Схема замещения шин 10 кВ для  $k$ -ой гармоники представлена на рис. 5.1.

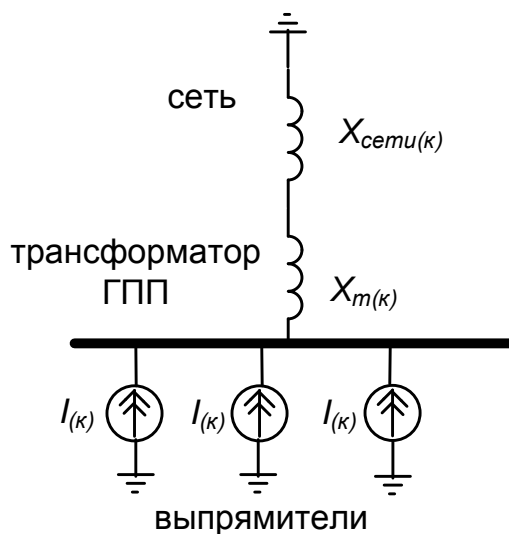


Рисунок 3.1 Схема замещения для  $k$ -ой гармоники

По схеме, изображенной на рис. 5.1, выполним расчет напряжения на шинах 10 кВ

$$U_{(k)} = I_{(k)} (x_{сету(k)} + x_{m(k)}). \quad (5.4)$$

Для оценки соответствия коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения нормам стандарта измеряют действующие значения гармонических составляющих напряжения от 2-ой до 40-ой. После расчета напряжения для 11-ой, 13-ой, 23-ей, 25-ой, 35-ой и 37-ой гармоник вычисляем коэффициент несинусоидальности напряжения

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100. \quad (5.5)$$

Результаты расчета качества электроэнергии, выполненного по формулам (5.1)-(5.5), представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Расчет коэффициента несинусоидальности

гармоника	$x_{сету(k)}$ , Ом	$x_{m(k)норм}$ , Ом	$I_{(k)}$ , А	$U_{(k)}$ , В
11-я	1.1	7.2	19.2	159
13-я	1.3	8.5	16.3	159
23-я	2.3	15.1	9.2	159
25-я	2.5	16.4	8.5	159
35-я	3.5	23	6.1	159
37-я	3.7	24.3	5.7	159

Коэффициент несинусоидальности составляет 3.9%, что меньше предельно допустимого значения в 5% для шин 10 кВ [12].

## 5.2 Расчет без установки ПЧ

При отсутствии преобразователей частоты происходит запуск двигателей в тяжелом режиме, при котором пусковой ток (пусковая мощность) увеличивается в 5 раз. Рассмотрим запуск двигателя в этих условиях.

Расчёт напряжения на зажимах синхронных двигателей, подключенных к сборным шинам ГПП, выполняется по схеме замещения, представленной на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Схема замещения для расчета напряжения на зажимах ЭД

Активными сопротивлениями можно пренебречь и элементы СЭС представляют своими индуктивными сопротивлениями, приведенными к базисным значениям.

Остаточное напряжение на сборных шинах, к которым подключены электродвигатели

$$U_{д} = U_{с} \frac{x_{пэ.}}{x_{с} + x_{пэ.}}, \quad (5.6)$$

где  $U_{с}$  – напряжение питающей сети, кВ;  
 $x_{пэ.}$  – эквивалентное сопротивление узла;  
 $x_{с}$  – суммарное сопротивление питающей сети до СШ, к которым подключен электродвигатель.

Эквивалентное сопротивление узла

$$x_{пэ.} = \frac{S_{б} U_{ном}^2}{S_{пэ} U_{б}^2}, \quad (5.7)$$

где  $S_{б}$  – базисная мощность, МВА;  
 $U_{б}$  – базисное напряжение, кВ;  
 $S_{пэ.}$  – суммарная эквивалентная пусковая нагрузка узла, МВА.  
 Суммарная эквивалентная пусковая нагрузка узла

$$S_{д} = \sqrt{P_{н}^2 + (S_{н} + Q_{н})^2}, \quad (5.8)$$

где  $P_{н}$  – активная мощность нагрузки, подключенной к узлу и не участвующей в пуске, кВт;

$S_{н}$  – расчетная пусковая мощность электродвигателей, кВА;

$Q_{н}$  – реактивная мощность пусковой нагрузки, подключенной к узлу и не участвующей в пуске, кВт.

Расчетная пусковая мощность электродвигателя

$$S_{пэ} = \frac{P_{д} K_{п}}{\eta \cos \varphi}, \quad (5.9)$$

где  $P_{д}$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$K_{п} = 5$  – кратность пускового тока электродвигателя;

$\eta = 0.9$  – коэффициент полезного действия электродвигателя;

$\cos \varphi = 0.85$  – коэффициент мощности электродвигателя.

Расчетная пусковая мощность электродвигателя  $P_{д} = 1000$  кВт согласно (5.9) составляет  $S_{пэ} = 6.5$  МВАр.

Расчет нагрузка для шин 10 кВ главной понизительной подстанции без 1-го двигателя, выполненный по изложенной в разделе 2 методике, представлен в таблицах 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 Расчет нагрузок на шину 10 кВ при пуске двигателя в нормальном режиме

Исходные данные				Расчетные величины	
электроприемник	$K_{иа}$	$P_p, \text{кВт}$	$Q_p, \text{кВАр}$	$P_p, \text{кВт}$	$Q_p, \text{кВАр}$
Комплексная нагрузка	-	5000	3200	-	-
Цех	-	539	303	-	-
Двигатели	0.6	5*1000	5*620	-	-
Запускаемый двигатель	-	-	6500		
Итого	-	-	-	8400	11900

Таблица 5.2 Расчет нагрузок на шину 10 кВ при пуске двигателя в нормальном режиме

Исходные данные				Расчетные величины	
электроприемник	$K_{иа}$	$P_p, \text{кВт}$	$Q_p, \text{кВАр}$	$P_p, \text{кВт}$	$Q_p, \text{кВАр}$
Комплексная нагрузка	-	10000	6400	-	-
Цех	-	1080	600	-	-
Двигатели	0.6	11*1000	11*620	-	-
Запускаемый двигатель	-	-	6500		
Итого	-	-	-	17600	17600

Суммарная эквивалентная пусковая нагрузка узла в нормальном режиме согласно (5.8) составляет  $S_{пз}=14.6$  МВА (таблица 5.1), в послеаварийном режиме  $S_{пз}=24.9$  МВА (таблица 5.2).

Эквивалентное сопротивление узла в наиболее тяжелом режиме при  $S_{\sigma} = 1000$  МВА,  $U_{\sigma} = U_{пз} = 10$  кВ согласно (5.7) составляет 42.2.

Максимальное сопротивление трансформатора ГПП мощностью  $S_T=16$  МВА,  $u_k=0.106$

$$x_m = \frac{u_k (1 + 0.16)^2 S_{\sigma}}{S_m} = 8.8.$$

Остаточное напряжение на сборных шинах, к которым подключены электродвигатели согласно (6.1) составляет  $U_d = 8.3$  кВ. При запуске синхронных двигателей допускается провал напряжения на шинах ГПП не более 10% относительно номинального напряжения сети при питании осветительной и смешанной нагрузок от указанных выше сборных шин [18]:

$$\Delta U = \frac{U_c - U_d}{U_c} = 0.16.$$

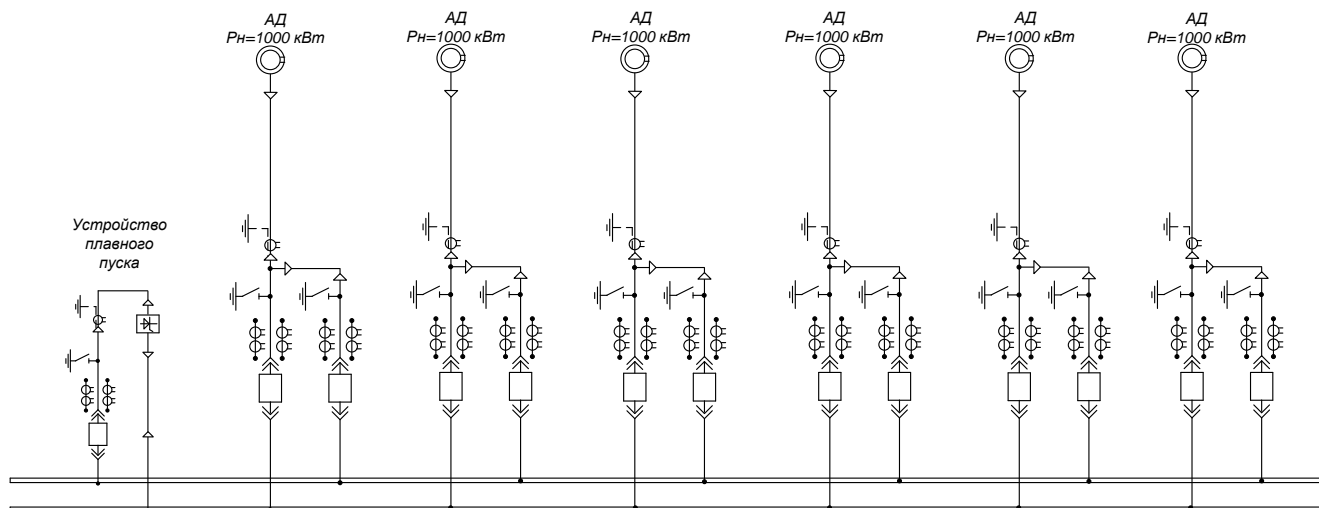


Рисунок 5.3 Схема установки устройства плавного пуска

Условие не выполнено, поэтому использование устройств для плавного пуска двигателей необходимо. Схема установки общего для всех двигателей устройства плавного пуска показана на рис. 5.3.

Выводы по разделу пять:

Выполнен расчет качества электрической энергии на шинах 10 кВ при наличии и при отсутствии преобразователей частоты. Сделан вывод о невозможности пуска двигателя без применения условий плавного пуска.



## 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

### 6.1 Описание модели

Библиотека блоков SimPowerSystems [23] является одной из множества дополнительных библиотек Simulink, ориентированных на моделирование конкретных устройств. SimPowerSystems содержит набор блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. В состав библиотеки входят модели пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов и другого оборудования. Имеется также раздел, содержащий блоки для моделирования устройств силовой электроники, включая системы управления для них.

Несомненным достоинством SimPowerSystems является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, силовую часть полупроводникового преобразователя электрической энергии можно выполнить с использованием имитационных блоков SimPowerSystems, а систему управления – с помощью обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее электрическую схему.

В модели преобразователя частоты использованы следующие основные блоки:

#### 1. Трехфазный двухобмоточный трансформатор

Моделирует двухобмоточный трехфазный трансформатор. Модель Three phase Transformer (Two Windings) построена на основе трех однофазных трансформаторов. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника.

#### 2. Универсальный мост.

Модель Universal Bridge позволяет выбирать количество плеч моста (от 1 до 3), вид полупроводниковых приборов (диоды, тиристоры, идеальные ключи, а также полностью управляемые тиристоры, IGBT и MOSFET транзисторы, шунтированные обратными диодами).

#### 3. Асинхронная машина

Блок Asynchronous Machine моделирует асинхронную электрическую машину в двигательном или генераторном режимах. Режим работы определяется знаком электромагнитного момента машины. Порты модели A, B и C являются выводами статорной обмотки машины, а порты a, b и c – обмотки ротора машины. Порт Tm предназначен для подачи момента сопротивления движению. На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из 21 элемента: токов, потоков и напряжений ротора и статора в неподвижной и вращающейся системах координат, электромагнитного момента, угловой частоты вращения вала, а также его углового положения. Модель асинхронной машины включает в себя модель электрической части, представленной моделью пространства состояний четвертого порядка, и модель механической части в виде системы второго порядка. Все электрические переменные и параметры машины приведены к статору. Исходные уравнения электрической части машины записаны для двухфазной ( $dq$ -оси) системы координат.

						13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			38

Модель преобразователя частоты мощностью 64 кВт, подключенной к сети 0.4 кВ, показана на рис. 6.1.

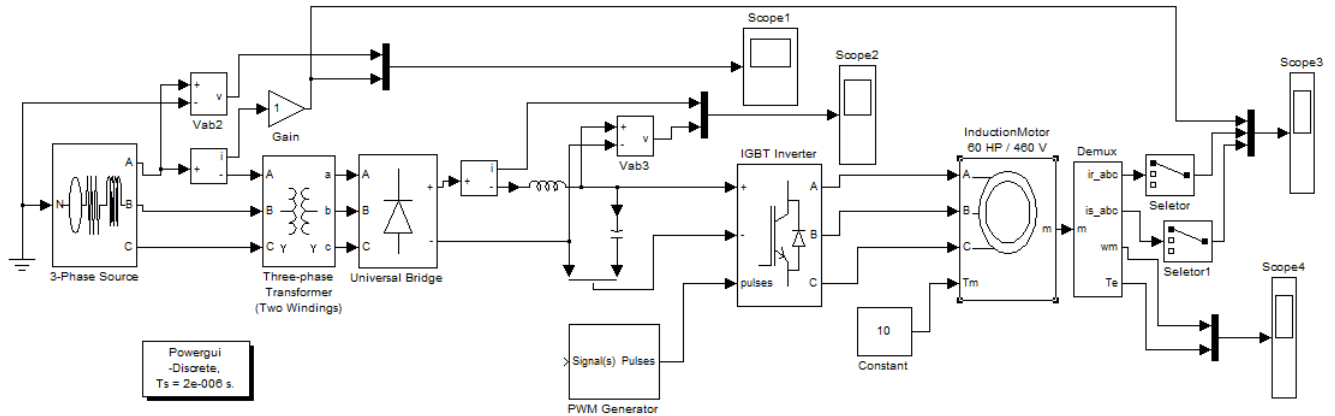


Рисунок 6.1 Модель преобразователя частоты

## 6.2. Результаты моделирования

На рис. 6.2 показаны ток и напряжение в точке подключения к электрической сети. Из рис. 6.2 видно, что в точке подключения к сети преобразователь ведет себя как шестифазный выпрямитель, ухудшая несинусоидальность напряжения в точке подключения.

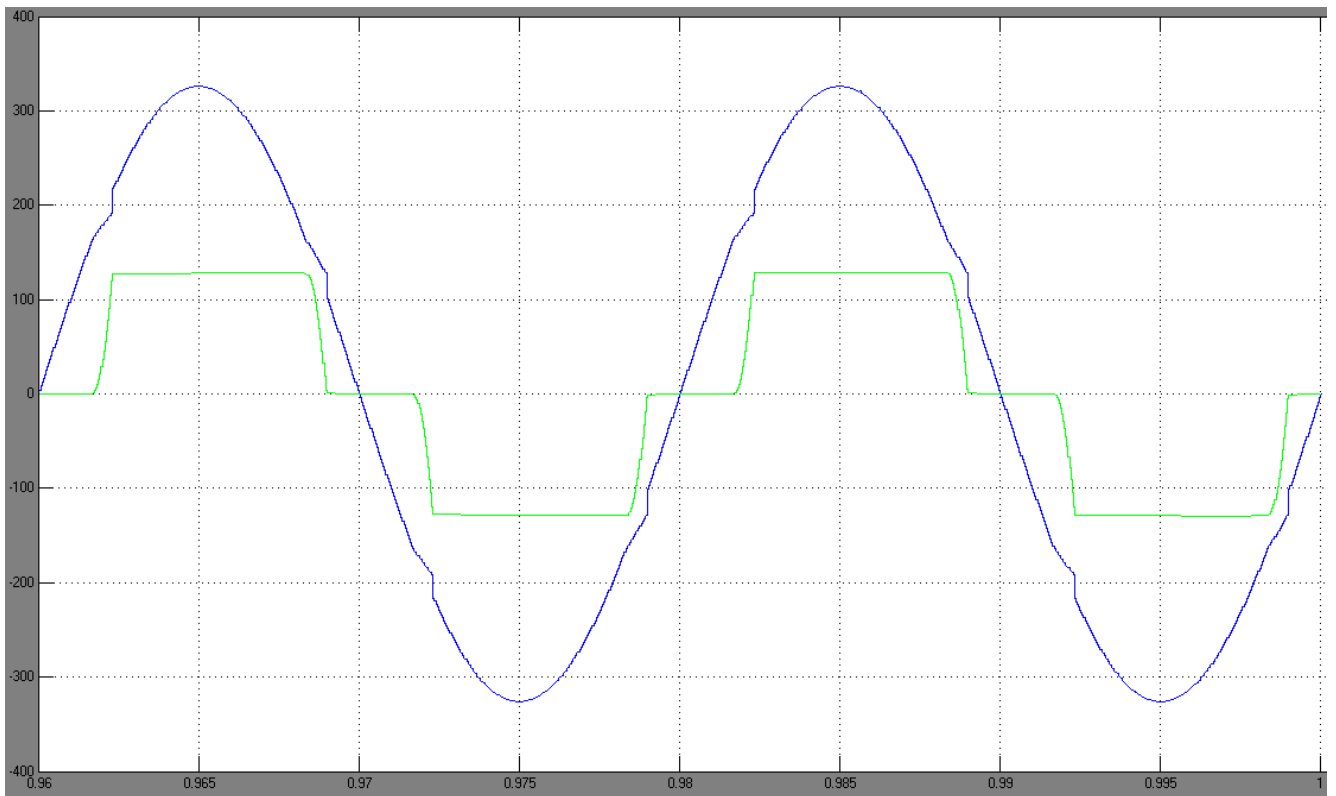


Рисунок 6.2 Ток и напряжение сети

На рис. 6.3, 6.4 и 6.5 показаны ток сети, токи статора и ротора. Графики на рис. 6.3 получены при частоте инвертора 100 Гц и коэффициенте его модуляции 0.6. Графики на рис. 6.4 получены при частоте инвертора 100 Гц и коэффициенте его модуляции 0.8. Графики на рис. 6.5 получены при частоте инвертора 85 Гц и коэффициенте его модуляции 0.6.

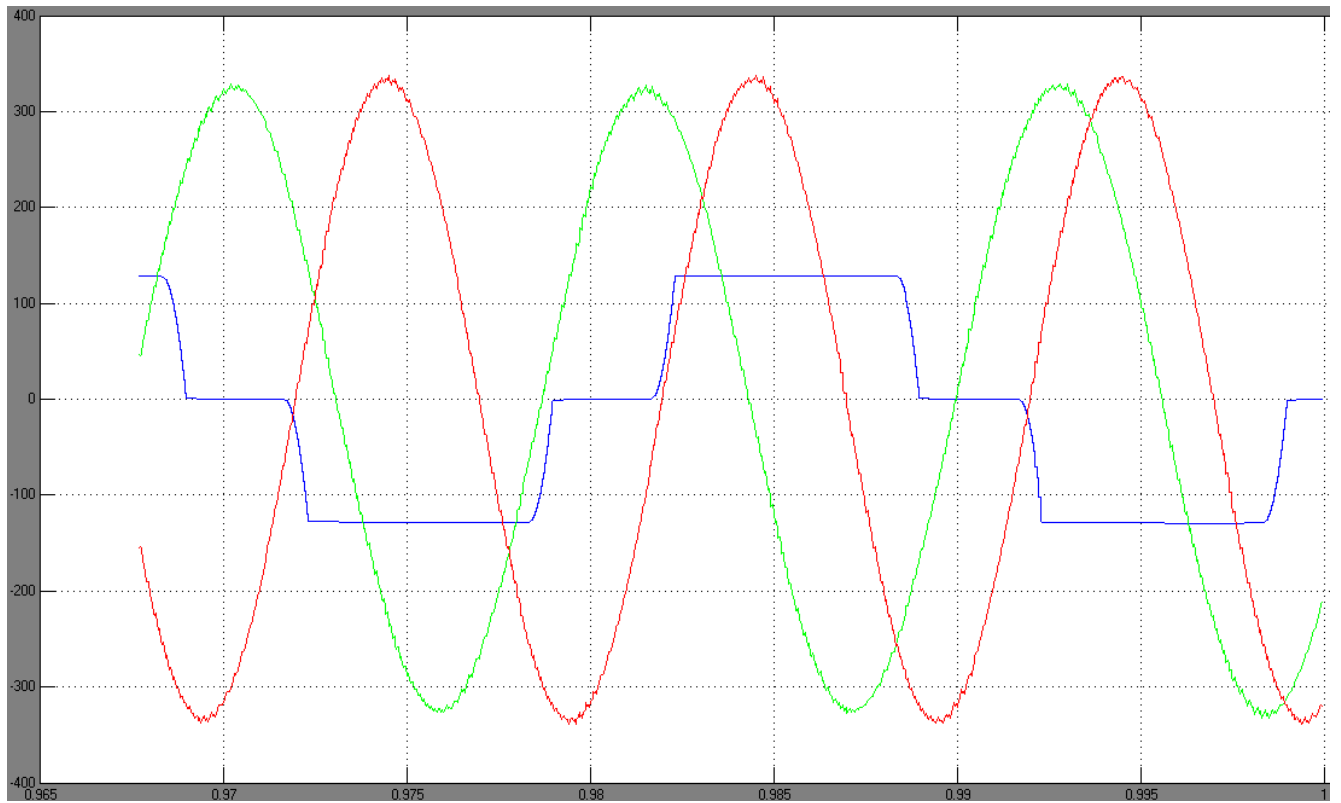


Рисунок 6.3 Токи сети, статора и ротора при  $f=100$  Гц,  $k=0.6$

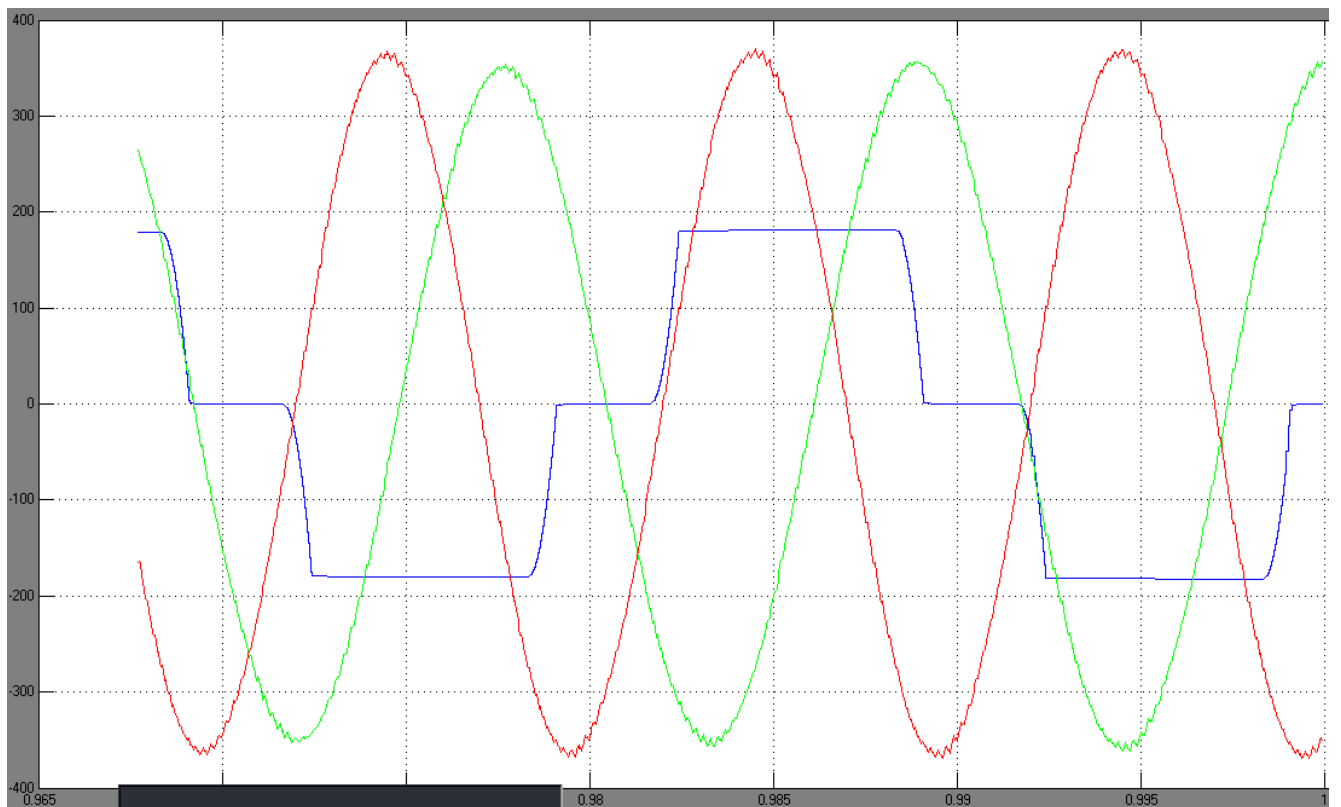


Рисунок 6.4 Токи сети, статора и ротора при  $f=100$  Гц,  $k=0.8$

Сравнивая рис. 6.3 и 6.4 можно сделать вывод, что изменяя коэффициент модуляции для инвертора, можно увеличить токи статора и ротора и тем самым изменять увеличивать его вращающий момент.

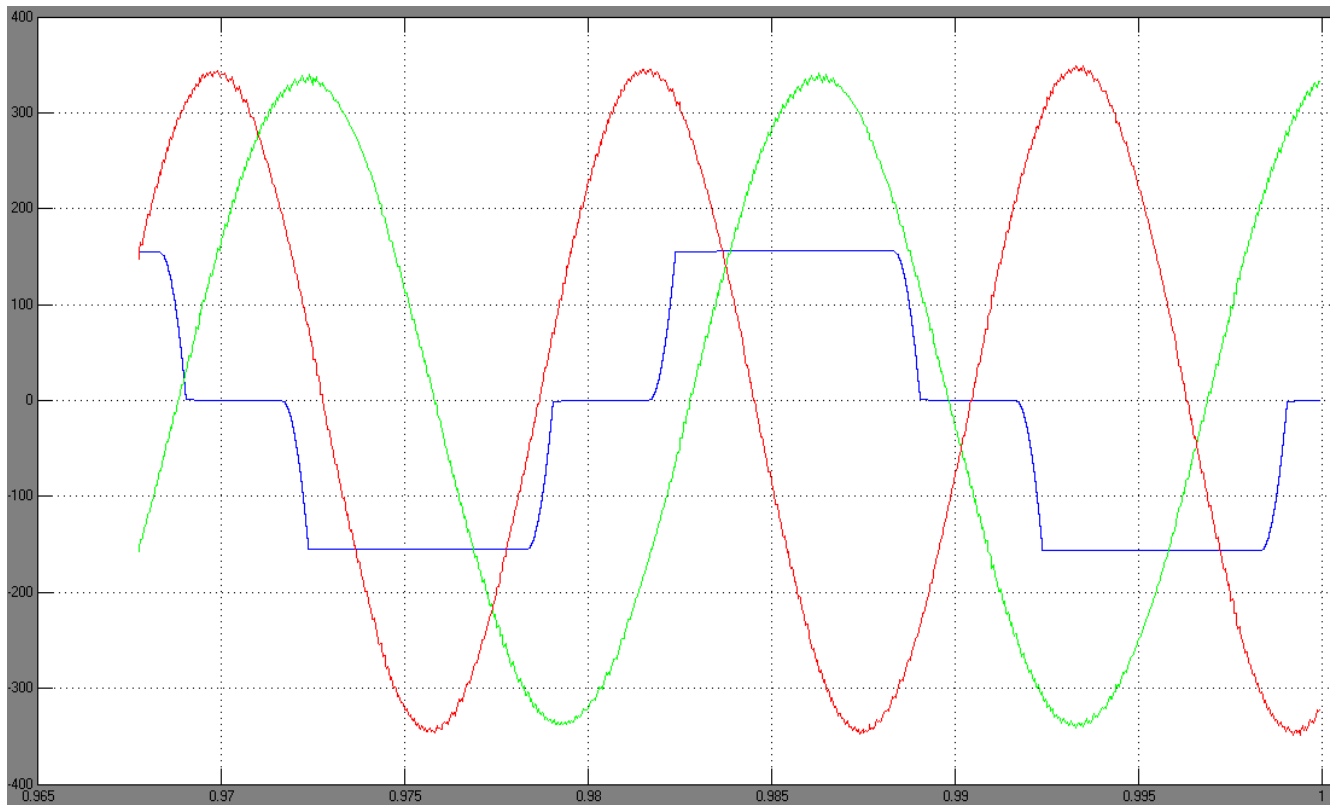


Рисунок 6.5 Токи сети, статора и ротора при  $f=85$  Гц,  $k=0.6$

Сравнивая рис. 6.3 и 6.4 можно сделать вывод, что изменяя коэффициент модуляции для инвертора, можно изменять частоты токов статора и ротора и тем самым изменять частоту вращения двигателя.

Выводы по разделу шесть:

Выполнено имитационное моделирование преобразователя частоты. Продемонстрирована возможность изменения частоты вращения и вращающего момента электрического двигателя.

## 7. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ

Использование преобразователей частоты позволяет экономить электроэнергию:

- при пуске двигателя;
- в установившемся режиме работы двигателя.

Основная экономия наблюдается в установившемся режиме за счет создания для конкретной технологической машины мощности, необходимой ей в данный момент (рис. 7.1). Характерный график нагрузки для двигателей с ПЧ и без него показан на рис. 7.2 [19].

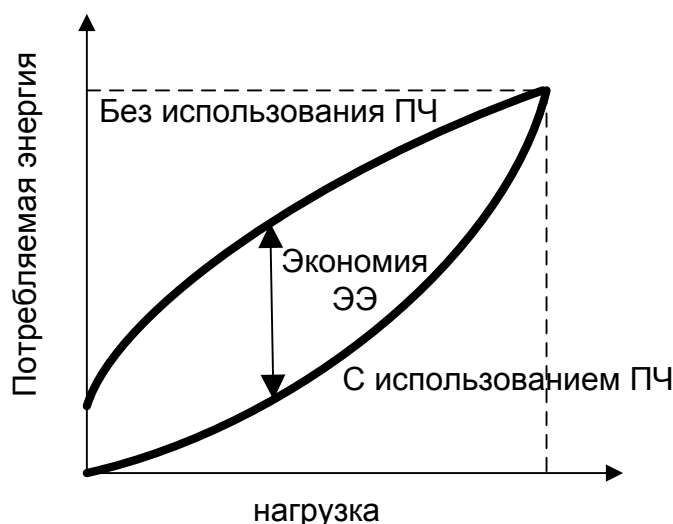


Рисунок 7.1 Потребление электроэнергии двигателем

Ток электродвигателя в различных режимах, А

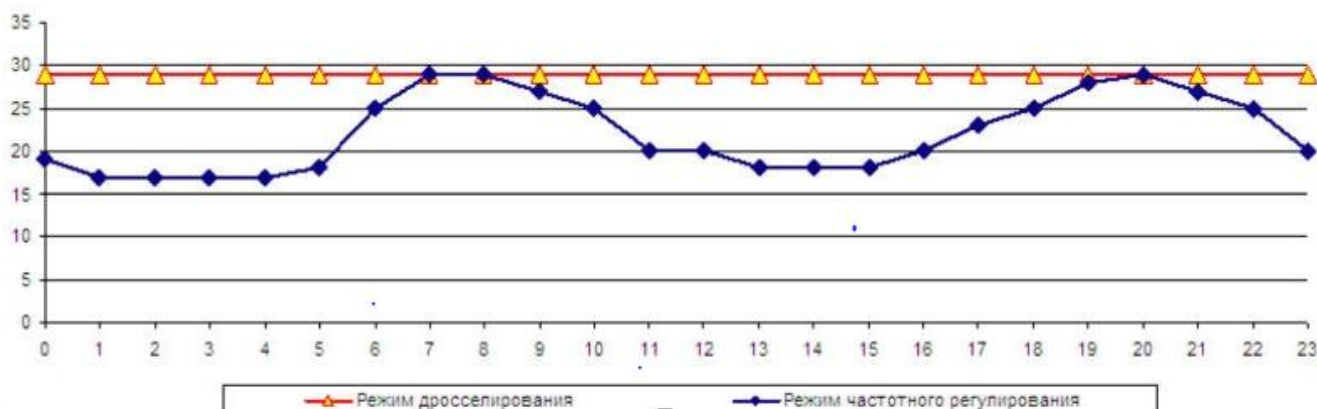


Рисунок 7.2 Графики нагрузки для двигателей

Согласно [21] для некоторых видов технологий, в которых нагрузка двигателей существенно меняется во времени, экономия электроэнергии при использовании частотного регулирования могут составлять до 25-30 %. Для дальнейшего технико-экономического сравнения вариантов для двигателей с резкопеременной нагрузкой примем экономию электроэнергии в 20% при использовании преобразователя частоты, поскольку подробные данные о технологическом процессе и графике нагрузки отсутствуют.

Удельная стоимость потерь активной мощности может быть вычислена по формуле

$$C_0 = \delta(\alpha K_m + \beta\tau), \quad (7.1)$$

где  $\alpha = 11150$  руб/кВт – ставка двухставочного тарифа, учитывающая максимальную потребляемую мощность [22];

$\beta = 2.35$  руб/кВт\*ч – ставка двухставочного тарифа, учитывающая потребленную электроэнергию [22];

$K_m = 1$  – коэффициент максимума;

$\tau = 5100$  ч – количество часов максимальных потерь;

$\delta = 1.05$  – коэффициент, учитывающий увеличение мощности источников.

Согласно (7.1) удельная стоимость потерь активной мощности 12.9 т.р. на 1 кВт ч.

Согласно расчету нагрузки (см. таблицу 2.3) потребляемая мощность высоковольтных двигателей, подключенных к двум секциям шин, составляет  $3600 * 2 = 7200$  кВт. Следовательно, экономия ЭЭ будет  $P_1 = 1440$  кВт. Умножая эту величину на удельную стоимость потерь получаем 18.58 млн. руб.

Стоимость преобразователя частоты мощностью 1 МВт составляет 2.8 млн. руб [20]. Учитывая дополнительные расходы на перевозку, установку в размере 50 % от стоимости оборудования (12-и преобразователей частоты) получаем капитальные затраты 50.4 млн. руб.

В разделе 7 был сделан вывод о необходимости установки устройств плавного пуска (рис. 5.3), иначе не выполняются требования по качеству электроэнергии при пуске двигателей в послеаварийном режиме. Стоимость одной ячейки КСО – 220 т.р. Дополнительно необходима установка 1-го устройства плавного пуска, стоимостью 1.4 млн. руб [20]. Учитывая дополнительные расходы на перевозку, установку в размере 100 % от стоимости оборудования (13-и ячеек КСО и 1-го устройства плавного пуска) получаем капитальные затраты 8.5 млн. руб.

Поскольку сравниваемые варианты СЭС характеризуются одинаковыми денежными потокам, то сравнение вариантов проводим на основе минимума годовых приведенных затрат [6]:

$$Z = \sum_i^n E_i k_i + C_3 \quad (7.2)$$

где  $E_i = E_n + E_{ai} + E_{oi}$  – общие ежегодные отчисления от капитальных вложений;

$k_i$  – сумма капитальных затрат  $i$ -ой группы одинаковых электроприемников;

$C_3$  – стоимость годовых потерь электроэнергии.

$E_n = 0.12$  – нормативный коэффициент эффективности;

$E_{ai} + E_{oi} = 0.1$  – отчисления на амортизацию и на обслуживание.

Приведенные капитальные затраты для варианта с преобразователями частоты будут  $50.4 * 0.22 = 11.1$  млн. руб. Приведенные капитальные затраты для варианта с общей пусковой шиной и устройством плавного пуска  $8.5 * 0.22 = 1.9$  млн. руб. Возможная экономия электроэнергии 18.8 млн. руб. Общие приведенные затраты на вариант с пусковой шиной 20.7 млн. руб., на вариант с преобразователями частоты – 11.1 млн. руб. Следовательно, применение преобразователей частоты экономически целесообразно.

					13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

Результат получен в предположении, что преобразователи частоты позволят сэкономить 20% потребляемой двигателями электрической энергии. При снижении экономии до 10 % стоимость сэкономленной за год электроэнергии сравнивается с приведенными капитальными затратами и использование преобразователей частоты становится неэффективным.

Выводы по разделу семь:

Применение преобразователей частоты становится экономически целесообразной при экономии электроэнергии при технологическом процессе не менее 10 %.

					13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

## 8. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ТП

Функционирование электроустановок сопровождается появлением отрицательных воздействий на работающий персонал и окружающую среду, необходимый уровень электробезопасности обеспечивается как конструкцией электроустановок, так и системой организационных и технических мероприятий, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества, а также с помощью применения специальных средств защиты.

К организационным мероприятиям относятся [24]:

- правильная организация и ведение безопасных методов работы;
- обучение, инструктаж персонала правилам технической эксплуатации и технике безопасности;
- контроль и надзор за выполнением правил технической эксплуатации и техники безопасности.

К техническим мероприятиям относятся:

- обеспечение нормального освещения в зоне работ;
- соблюдение соответствующих расстояний до токоведущих частей или путём закрытия, ограждения токоведущих частей;
- применение блокировки аппаратов и ограждающих устройств для предотвращения ошибочных операций и доступа к токоведущим частям;
- применение надлежащей изоляции, в отдельных случаях – повышенной;
- применение двойной изоляции;
- компенсация емкостных токов замыкания на землю;
- надежное и быстродействующее автоматическое отключение частей электрооборудования, случайно оказавшихся под напряжением и повреждённых участков сети, в том числе защитного отключения;
- заземление или зануление корпусов электрооборудования и элементов электроустановок, которые могут оказаться под напряжением вследствие повреждения изоляции;
- выравнивание потенциалов;
- использование предупреждающей сигнализации, надписей и плакатов;
- использование защитных средств и приспособлений (безопасный ручной инструмент, спецодежда).

Одним из важнейших объектов системы электроснабжения городских сетей являются трансформаторные подстанции, в то же время трансформаторная подстанция – объект повышенной опасности с точки зрения поражения обслуживающего персонала электрическим током, электрической дугой, электромагнитным полем и статическим электричеством. В связи с этим на трансформаторных подстанциях необходимо уделять должное внимание вопросам технической эксплуатации, техники безопасности и охраны труда.

### 8.1 Компоновка и конструктивная часть ТП

По проекту ТП располагается в помещении цеха. Внутри ТП располагаются в отдельных помещениях два силовых трансформатора 1000 кВ·А, устройство высокого напряжения 10 кВ (РУ-10 кВ) и щит низкого напряжения 0,4 кВ (РУ-0,4

										Лист
										45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ



кВ). Помещения РУ-10 кВ и РУ-0,4 кВ имеют два выхода, расположенных с противоположных торцов здания, камеры силовых трансформаторов имеют двери, открывающиеся наружу.

На высоком напряжении установлена одинарная секционированная выключателем нагрузки типа ВНП-10 система сборных шин [24]. Шины АДЗ1Т 50x5 мм<sup>2</sup>. Устройство высокого напряжения 10 кВ укомплектовано камерами КСО386 – 03 УЗ. Расположение камер двухрядное. Соединение сборных шин рядов камер предусмотрено шинными мостами заводского изготовления. Проходная мощность сборных шин 11000 кВА, динамическая устойчивость 120 кА.

На низком (0,4 кВ) напряжении установлена одинарная секционированная автоматическим выключателем на 2 секции система сборных шин. РУ-0,4 кВ укомплектовано панелями ЩО-01 с автоматическими выключателями серии ВА.

Питание щита 0,4 кВ осуществляется от силовых трансформаторов 630 кВА, подключенных к щиту 0,4 кВ через автоматический выключатель ВА 55-43, вводная панель низкого напряжения ЩО-70 укомплектована автоматическими выключателями ВА 53-41. Сечение сборных шин щита 0,4 кВ принято с учетом загрузки трансформатора на 1,4 от номинальной величины с проверкой на динамическую и термическую устойчивость при 3-х фазном коротком замыкании. В качестве шин приняты АДЗ1Т 100x10 мм<sup>2</sup> [24].

В ТП предусматривается установка следующих измерительных приборов:

1. Амперметры на отходящих линиях 0,4 кВ;
2. Вольтметры стороне 0,4 кВ силовых трансформаторов;
3. Амперметры на стороне 0,4 кВ силовых трансформаторов.

Вводы линий 10 кВ и 0,4 кВ имеют кабельное исполнение. Для удобства прокладки кабелей в РУ-10 кВ предусматривается устройство двойного пола.

Крепление оборудования и конструкций осуществляется с помощью дюбелей, болтов и электросварки к закладным деталям в стенах и полу, предусмотренным в строительной части проекта.

Крепление светильников и труб электропроводки освещения в РУ – 10 кВ предусматривается металлоконструкциями шинных мостов. Для безопасности обслуживания светильников шинные мосты снизу закрыты кожухом.

Таблица 8.1 – Наименьшие расстояния от токоведущих частей

Наименование расстояния	Изоляционное расстояние, мм
От токоведущих частей до заземленных конструкций и частей зданий.	120
Между проводами разных фаз	130
От токоведущих частей до сплошных ограждений	150
От токоведущих частей до сетчатых ограждений	220
Между неогражденными токоведущими частями разных цепей	2000
От неогражденных токоведущих частей до пола	2500
От контакта и ножа разъединителя в отключенном положении до ошиновки, присоединенной ко второму контакту	150

На ТП оборудование располагается таким образом, чтобы обеспечивалась возможность выполнения монтажа оборудования с применением механизмов.

Наименьшие расстояния в свету от токоведущих частей до различных элементов ЗРУ-10 кВ принимаются согласно ПУЭ (таблица 8.1).

ТП снабжается защитными средствами согласно нормам, все средства принятые в эксплуатацию проходят систематическую проверку и испытания согласно "Правил использования и испытания защитных средств". Комплект основных защитных средств по технике безопасности и противопожарной технике включает:

- Штанга изолирующая оперативная на напряжение 10кВ;
- Штанга изолирующая оперативная на напряжение 0,4 кВ;
- Указатель напряжения 10 кВ;
- Указатель напряжения 0,4 кВ;
- Очки защитные;
- Клещи изолирующие;
- Перчатки резиновые диэлектрические;
- Ковер резиновый диэлектрический.

Двери РУ – 10 и 0,4 кВ, ворота камер трансформаторов выполнены металлическими, закрывающимися на замки. Ключи от электроустановок выше 1000 В, а также от распределительных щитов и сборок до 1000 В, расположенных вне электроустановок выше 1000 В, находятся на учете у дежурного персонала либо у административно-технического персонала. Ключи пронумерованы, один комплект запасной [23].

## 8.2 Контроль изоляции

Контроль изоляции производится по показаниям приборов, подключенных к трансформатору напряжения типа НТМИ-10-66УЗ, установленных на каждую секцию шин РП-10 кВ. Простейшей является общая неселективная сигнализация однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), представленная на рисунке 8.1, которая состоит из реле максимального напряжения, подключённого к вторичной обмотке трёхфазного трансформатора напряжения, соединённой по схеме «разомкнутого треугольника».

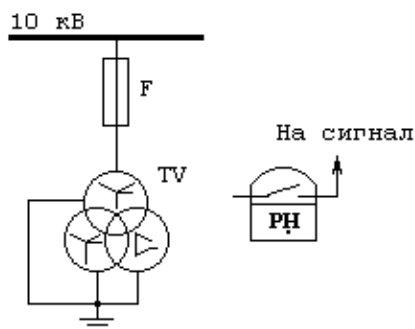


Рисунок 8.1 – Схема контроля изоляции на сборных шинах 10 кВ

Реле имеет уставку по напряжению, равную  $0,3 \cdot U_{\phi}$ . В нормальном режиме работы напряжение нейтрали не превышает  $15\% \cdot U_{\phi}$ , что составляет не более 30 В на зажимах указанной вторичной обмотки. При возникновении ОЗЗ напряжение в нейтрали возрастает до фазного значения, а на зажимах вторичной обмотки

										Лист
										47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ					

– до 100 В. При этом реле срабатывает и включает сигнализацию (световую или звуковую) о появлении ОЗЗ в электрической цепи. Такой комплект является общим для одной секции сборных шин.

Для контроля изоляции на кабельных линиях устанавливаются трансформаторы тока нулевой последовательности типа ТЗЛМ, установленные в ячейках КСО. Во вторичную обмотку трансформатора тока включается реле тока типа РТЗ 51. Первичной обмоткой трансформатора тока служат жилы кабеля, на котором он ставится. При отсутствии замыкания на землю и допустимой изоляции, токи утечки в сумме дают “ноль”. При замыкании на землю это равенство нарушается и по вторичной обмотке течет ток, который замыкается через катушку реле РТЗ 51. Реле срабатывает и подает сигнал в схему защиты. Подобная схема контроля изоляции на кабельных линиях представлена на рисунке 8.2.

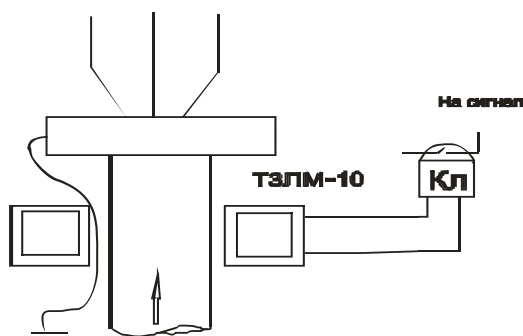


Рисунок 8.2 - Схема контроля изоляции на кабельных линиях

### 8.3 Освещение ТП

В ТП предусматривается рабочее освещение на напряжение 220 В и ремонтное освещение на напряжение 36 В. Питание сети электроосвещения принято от группового щитка, который через переключатель ПКП может быть подключен к I или II секции шин щита 0,4 кВ.

Переключатель и групповой щиток устанавливаются на стене РУ – 0,4 кВ. Питание ремонтного освещения предусматривается через понижающий трансформатор 220/36 В.

Общая площадь подстанции:  $S = b \cdot l = 45,8 \text{ м}^2$ , где  $b$  – ширина ТП (7,05 м),  $l$  – длина ТП (6,5 м).

Высота помещения  $H_p = 2,8 \text{ м}$ . По нормам освещенности ТП принимаем  $E_H = 10 \text{ лк}$ . Определяем световой поток [26]:

$$\Phi_D = \frac{A_i \cdot S \cdot E_c \cdot E_i}{\eta \cdot N} = 925 \text{ лм},$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий потерю света от загрязнения, отражения, защитного стекла лампы ( $K_3 = 1,4$ );

$K_{II}$  – коэффициент, учитывающий потери света в зависимости от конфигурации освещаемой площади ( $K_{II} = 1,5$ );

$\eta$  – КПД светильника ( $\eta = 0,52$ );

$N = 2$  – число ламп.

Для внутреннего освещения КТП применяются потолочные светильники ТСВ 095 2x18W PHILIPS в количестве 4-х штук с люминесцентными лампами.

					13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

Световой поток ламп данного светильника  $\Phi_{\text{л}} = 870$  лм. Пригодность данных светильников подтверждается выполнением условия по световому потоку:

$$-0,1 \leq \frac{\Phi_{\text{ЕІ}} - \Phi_{\text{Д}}}{\Phi_{\text{Д}}} \leq +0,2.$$

Данный тип светильников проходит по проверке, следовательно, в помещении устанавливаем светильники типа PHILIPS TCW 095 2x18W.

Удельная мощность светильников:

$$\Delta P = \frac{N \cdot P}{S} 3,7 \text{ Вт/м}^2.$$

Выводы по разделу восемь:

В данном разделе рассмотрены вопросы организации технической эксплуатации, техники безопасности и охраны труда на трансформаторной подстанции. Выполнен расчет молниезащиты и освещения ТП.

					<i>13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		49

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время для эффективной работы двигателей все чаще применяются преобразователи частоты. В ВКР рассмотрены некоторые проблемы, возникающие в СЭС при большом количестве преобразователей частоты. Сначала проведено сравнение преобразователей частоты различных марок.

Далее выполнен расчет электрических нагрузок цеха и промышленного предприятия методом упорядоченных диаграмм. По результатам нагрузок выбраны трансформаторы цеховой и главной понизительной подстанций и кабельные линии. Кабельные линии были выбраны по экономической плотности тока, а затем проверен их тепловой режим в нормальном, послеаварийном режимах и режиме короткого замыкания.

Построение релейной защиты сети 0.4 кВ выполнено на основании расчета СЭС тока в рабочем режиме и тока короткого замыкания. Время токовые характеристики автоматических выключателей согласованы между собой и в целом релейная защита обладает селективностью.

Проведено моделирование работы преобразователя частоты в пакете MatLab. Выполнен расчет качества электрической энергии на шинах 10 кВ с установкой преобразователей частоты и без установки преобразователей. Также проведено технико-экономическое сравнение этих вариантов.

В разделе «Безопасность жизнедеятельности» рассмотрена электробезопасность на цеховой трансформаторной подстанции, в частности контроль изоляции и освещение ТП.

Система электроснабжения экономична и удовлетворяет всем нормативным требованиям.

										Лист
										50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ					

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Преобразователи частоты фирмы ABB Industry <http://chastotnik.com/abb/abbacs800abb/preobrazovateli-chastoty-abb-acs800/>.
2. Преобразователи частоты фирмы Danfoss <http://www.acc-danfoss.ru/glavnaya/17>.
3. Преобразователи частоты фирмы Hitachi <http://www.privod.su/Hitachi>.
4. Преобразователи частоты ОАО «Электровыпрямитель» <http://www.elvpr.ru/preobraztechnic/electroprivod/omega2.php>.
5. Преобразователи частоты корпорации ТРИОЛ [http://triolcorp.ru/product/low-voltage\\_equipment/triol-at24](http://triolcorp.ru/product/low-voltage_equipment/triol-at24).
6. Кудрин, Б.И. Электроснабжение: учебник / Б.И. Кудрин. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 352 с.
7. РТМ 36.18.32.4-92. Указания по расчету электрических нагрузок. – М.: Тяжпромэлектропроект, 1992. – 12 с.
8. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю.Г. Барыбина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
9. НТП ЭПП-94. Нормы технологического проектирования. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 48 с.
10. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд., перераб. и доп. – Челябинск: ООО «Центр безопасности труда», 2006. – 848 с.
11. Электротехнический справочник В 4 т. Т.2 Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессора МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. И.Н. Орлов) – 9-е изд. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 518 с.
12. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 52 с.
13. ГОСТ Р 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. – М.: Стандартинформ, 2007. – 44 с.
14. Ершов, А.М. Релейная защита и автоматика в системах электроснабжения. Часть 1: Токи короткого замыкания: учебное пособие / А.М. Ершов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 168 с.
15. Руководство по эксплуатации. Распределительные сети низкого напряжения. Compact NSX Micrologic 5/6. – [http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER\\_ELECTRIC/content/live/FAQS/235000/FA235308/ru\\_RU/Compact\\_NSX\\_Micrologic\\_RUS.pdf](http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/235000/FA235308/ru_RU/Compact_NSX_Micrologic_RUS.pdf).
16. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск №3. Методика расчета уставок защит Sepam. – [http://www.proschneider.ru/technical\\_support/technical\\_collection/3/](http://www.proschneider.ru/technical_support/technical_collection/3/).
17. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика СЭС: учебник для ВУЗов / В.А. Андреев. – 3-е изд. – М.: ВШ, 2006. – 412 с.
18. Овчаренко, А.С. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий: учебник / А.С. Овчаренко. – Киев.: Техника, 1989. – 287 с.

						13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			51

19. Преобразователи частоты. <http://chistotnik.ru/preobrazovatel-chastoty-ekonomiya-elektroenergii.html>.
20. Прайс-лист преобразователей частоты и устройства плавного пуска [http://izhevsk.pulscen.ru/price/070103-chastotnyj-preobrazovatel/f:43\\_1000-kvt](http://izhevsk.pulscen.ru/price/070103-chastotnyj-preobrazovatel/f:43_1000-kvt)
21. Электротехника. Учебное пособие в трех книгах. . Т.3 Электроприводы. Электроснабжение / Под общ. ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.Л. Шестакова – 9-е изд. – М.: Издательство ЮУрГУ, 2005. – 639 с.
22. Информация на сайте ТОО «Астанаэнергосбыт», для юридических лиц, в разделе «Тарифы. – [http://www.astanaenergobyt.kz/tarif\\_ur](http://www.astanaenergobyt.kz/tarif_ur).
23. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с., ил. (Серия «Проектирование»).
23. СО 153-34.03.603-2003. Инструкции по применению и испытанию средств защиты, используемых в электроустановках. – М.: Изд-во стандартов 2003. – 36 с.
- 24 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Челябинск: ООО «Центр безопасности труда», 2003. – 273 с.
- 25 СО 153-34.03.603-2003. Инструкции по применению и испытанию средств защиты, используемых в электроустановках. – М.: Изд-во стандартов 2003. – 36 с.
26. Справочная книга для проектирования электрического освещения / под ред. Г.М. Кнорринга. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 448 с.

					13.03.02.2018.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52