

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.М.Виноградов
_____ 2018г.

Качество электроэнергии в СЭС предприятия с большой мощностью
преобразовательной нагрузки
(наименование темы)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–13.03.02.2018.062.0000ПЗ ВКР

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

Руководитель работы
к.ф-м.н., доцент
_____ В.А. Сафонов
_____ 2018 г.

Автор работы
студент группы УК-508
_____ А.А. Шведов
_____ 2018 г.

Нормоконтролер, доцент
_____ В.Д. Константинов
_____ 2018 г.

Челябинск
2018г.

Качество ЭЭ в СЭС предприятия с большой мощностью преобразовательной нагрузки

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ: ДИОДНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ	
1.1 Параметры для сравнения выпрямителей.....	7
1.2. Сравнение конструкций выпрямителей	9
Выводы по разделу один	11
2. ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	
2.1 Расчет электрических нагрузок.....	12
2.2 Выбор трансформаторов ТП и ГПП	15
2.3. Выбор кабельных линий.....	18
2.5 Проверка кабелей на термическую стойкость.....	19
Выводы по разделу два	22
3. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ШИНАХ 10 кВ	
3.1 Схема замещения для высших гармоник.....	23
3.2. Расчет качества ЭЭ на шинах 10 кВ.....	25
3.2. Методика выбора резонансных фильтров.....	26
3.2. Расчет качества ЭЭ на шинах 10 кВ после установки фильтра.....	28
Выводы по разделу три	29
4. КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ	
4.1. Выбор мощности батареи по критерию минимальных затрат.....	30
4.2. Выбор мощности батареи по критерию максимальной эффективности	31
Выводы по разделу четыре	33
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ШЕСТИФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ	
5.1. Формирование модели в MatLab.....	34
5.2. Моделирование сети с 6-и фазным выпрямителем и конденсатором	36
5.3. Моделирование сети с 6-и фазным выпрямителем и фильтром	39
Выводы по разделу пять	41
6 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ТП	
6.1 Общие правила электробезопасности.....	42
6.2 Планировка и конструктивная часть ТП.....	43
6.3 Обеспечение электробезопасности на ТП.....	44
6.4 Заземление ТП.....	46
6.5 Освещение ТП.....	47
Выводы по разделу шесть	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	49
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	50

ВВЕДЕНИЕ

Ускорение научно-технического прогресса диктует необходимость совершенствования промышленной электроэнергетики: создание экономичных, надёжных систем электроснабжения промышленных предприятий, освещения, автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Современные системы электроснабжения 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 электроснабжения;
- позволять осуществление реконструкции без существенного удорожания первоначального варианта.

Значительная часть вырабатываемой электроэнергии потребляется на промышленных предприятиях в установках постоянного тока. На заводах черной металлургии с мощным прокатным производством на постоянном токе потребляется 30-40% электроэнергии для питания мощных электроприводов. На алюминиевых заводах доля потребления энергии на постоянном токе достигает 90%. Энергоёмкими потребителями постоянного тока являются установки электролиза водных растворов в химической промышленности. Также значительно потребление энергии на постоянном токе в электрифицированном железнодорожном и городском транспорте [1].

При такой высокой доле выпрямителей в нагрузке промышленного предприятия неизбежно возникает проблема их электромагнитной совместимости как между собой, так и с другими промышленными установками. Во время своей работы выпрямители генерируют высшие гармоники тока, тем самым порождая высшие гармоники напряжения в точке подключения. Для оценки качества ЭЭ в точке подключения в ГОСТ [2] введены коэффициенты гармоник

$$v_{(k)} = \frac{I_{(k)}}{I}$$

и коэффициент несинусоидальности

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{I} \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{(k)}^2},$$

где $I_{(k)}$ – действующее значение k -ой гармоники напряжения, I – действующее значение напряжения, которое в энергетических сетях фактически равно действующему значению напряжения 1-ой гармоники.

Наличие высших гармоник приводит к дополнительным потерям активной мощности в сердечниках трансформаторов и электрических машин, а также в кабелях и обмотках трансформаторов из-за поверхностного эффекта. Но более су-

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

ущественная проблема это возможное возникновение резонанса токов в контурах, образованных конденсаторами и обмотками трансформаторов [3].

Снижение влияния высших гармоник можно добиться следующими способами:

1) установка пассивных или активных фильтров в точке подключения выпрямителя к системе электроснабжения [4];

2) переходом к схемам преобразования с большей фазностью [5,6].

Другой существенной проблемой являются генерация преобразовательными установками реактивной мощности. Обычно влияние реактивной мощности учитывают при помощи коэффициента мощности

$$\chi = \frac{P}{S}$$

где P – активная мощность, S – полная мощность.

Передача реактивной мощности в СЭС предприятия приводит к трем основным проблемам. При передаче реактивной мощности возникают дополнительные потери активной мощности. Передача реактивной мощности приводит к дополнительной загрузке элементов СЭС. Также передача реактивной мощности приводит к ухудшению качества ЭЭ в точке подключения [7].

Снижение влияния реактивной мощности на СЭС можно добиться следующими способами:

1) установкой компенсирующих устройств в точке подключения к системе электроснабжения, таких как конденсаторы, СТАТКОМы и т.д. [8];

2) переводом выпрямителей в компенсированный режим [9].

В выпускной квалификационной работе выполнены расчеты качества электроэнергии в СЭС предприятия с большой мощностью преобразовательной нагрузки. Исходные данные для выполнения работы.

1. Данные о точке подключения к сети: 110 кВ, мощность КЗ 500 МВА.

2. Данные о главной понизительной подстанции:

- комплексная нагрузка на шину 10 кВ ГПП: активная мощность 5000 кВт, реактивная мощность 5200 кВАр;

- выпрямительная нагрузка (12-и фазные выпрямители) шину 10 кВ ГПП: активная мощность 6000 кВАр (3 шт) (коэффициент использования 0.6)

3. Данные о цеховой трансформаторной подстанции:

- комплексная нагрузка на шинах 0.4 кВ цеховой ТП: активная мощность 400 кВт, реактивная мощность 500 кВАр (всего 10 ЭП);

- выпрямительная нагрузка (6-и фазные выпрямители) на шинах 0.4 кВ цеховой ТП: общая активная мощность 400 кВт (4 шт) (коэффициент использования 0.7);

- длина линии от ТП до ГПП 1 км.

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

1. СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ: ДИОДНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

1.1 Параметры для сравнения выпрямителей

Статический преобразователь (рис. 1.1) в общем случае состоит из специального силового трансформатора, блока вентилях, уравнивающих и сглаживающих реакторов, нагрузки, системы управления вентилями и (или) трансформатором и вспомогательных устройств для включения, отключения, охлаждения и защиты.

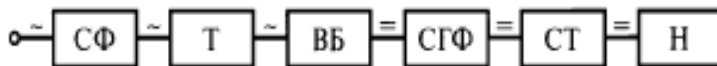


Рис.1.1 Структурная схема выпрямителя

Трансформатор и вентиляный блок являются обязательной частью выпрямителей. Функции трансформаторов сводятся к обеспечению потенциальной развязки и согласованию величины напряжения питающей сети и напряжения, требуемого на выходе вентиляного преобразователя. Также трансформаторы позволяют изменять фазность напряжения.

В настоящее время диапазон используемых преобразовательных трансформаторов очень широк. Мощности масляных трансформаторов достигли 160 МВА, сухих 6.3 МВА. Выпрямленные токи достигают 100 кА, выпрямленные напряжения 20 кВ, а сетевые напряжения 110-220 кВ [1].

По конструкции магнитопровода преобразовательные трансформаторы могут иметь магниторазделенную, магнитосвязанную и смешанные системы. Магниторазделенная система представляет собой совокупность трех однофазных трансформаторов. Магнитосвязанная система трехфазного трансформатора представляет собой трехстержневой магнитопровод.

В трехфазных трансформаторах применяют две основные схемы соединения обмоток: звезда и треугольник. Также часто применяются схемы двойная звезда, простой и двойной зигзаг и шестиугольник. [1].

Разнообразные схемы трансформаторов в основном отличаются друг от друга эффективностью использования возможностей элементов, из которых сделан выпрямитель [10] (трансформаторы, реакторы, конденсаторы).

Мощность двухобмоточного трансформатора равна среднему арифметическому от полных мощностей его обмоток. Эту мощность необходимо сравнивать с мощностью на выходе выпрямителя P_d . Тогда относительная мощность трансформатора

$$S_T^* = \frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{2P_d},$$

где U_1, I_1 – действующие значения напряжения и тока первичной обмотки, U_2, I_2 – действующие значения напряжения и тока вторичной обмотки.

Токи, протекающие в первичной и вторичной обмотке несинусоидальны. Кроме того, трансформатор загружен реактивной мощностью, возникшей при работе вентиляных блоков. В результате мощность трансформатора будет больше [11]

(для некоторых схем намного больше) мощности выпрямителя. При сравнении конструкций выпрямителей преимущество следует отдавать тем схемам, у которых мощность трансформатора как можно ближе к мощности выпрямителя.

В некоторых схемах выпрямителей также присутствуют реакторы и конденсаторы. Реакторы в выпрямителях могут выполнять функцию ограничения тока аварийных режимов, быть элементами фильтров и уравнивать напряжение при параллельной работе нескольких групп на одну нагрузку. При наличии в схеме реакторов их установленную мощность оценивают аналогично мощности трансформаторов

$$S_L^* = \frac{U_L I_L}{2P_d},$$

где U_L, I_L – действующие значения напряжения и тока реактора.

Конденсаторы в выпрямителях применяют в фильтрах и для создания условий для искусственной коммутации вентилей. Установленную мощность конденсатора вычисляют в виде

$$Q_C^* = \frac{U_C I_C}{2P_d},$$

где U_C, I_C – действующие значения напряжения и тока конденсатора.

В целом для выпрямителя установленная мощность неполностью управляемых вентилей определяется по выражению

$$S_a = n I_a U_{\max},$$

где U_{\max} – максимальное обратное напряжение, I_a – действующее значение прямого тока, n – количество вентилей в схеме.

Также важной характеристикой схемы является ее энергетический коэффициент полезного действия

$$\eta_{\text{Э}} = \frac{P_d}{S_{\text{вх}}},$$

где $S_{\text{вх}}$ – полная мощность на входе выпрямителя.

Качество выпрямленного напряжения определяется, прежде всего, коэффициентом пульсаций

$$K_{\text{П}} = \frac{U_{\text{пер}}}{U_d},$$

где $U_{\text{пер}}$ – амплитуда переменной составляющей напряжения, U_d – величина постоянной составляющей напряжения.

Для производственного процесса также важной является жесткость внешней характеристики выпрямителя.

Таким образом, сравнивая между собой различные схемы выпрямителей, необходимо учитывать три группы факторов: качество выпрямленного напряжения, эффективность использования оборудования и воздействие выпрямителя на электрическую сеть.

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

1.2 Сравнение конструкций выпрямителей

При переходе от однофазных схем выпрямления к трехфазным схемам однозначно улучшаются [11] все описанные выше характеристики выпрямителей. Уменьшается коэффициент пульсаций и коэффициент несинусоидальности, а также увеличивается эффективность использования трансформаторного оборудования. Поэтому сравнение выполним только для многофазных схем выпрямления.

В трехфазной нулевой схеме [11] напряжения и токи имеют три пульсации за период. Особенностью схемы является наличие в магнитопроводе трансформатора потока вынужденного намагничивания из-за нескомпенсированных магнитодвижущих сил сетевой и вентильной обмоток. Для обеспечения магнитного равновесия вентильную обмотку соединяют в зигзаг. Трехфазная нулевая схема используется достаточно редко.

Трехфазная мостовая схема [11] или схема Ларионова, показанная на рис. 1.2 очень широко применяется. Схема состоит из трехфазного трансформатора и шести плеч вентилях. В этой схеме используются стандартные трансформаторы, с соединением обмоток в звезду или треугольник. Магнитная система уравновешена, так как магнитодвижущие силы обмоток скомпенсированы. Выпрямленное напряжение имеет шестикратную пульсность и фазность преобразования равна 6.

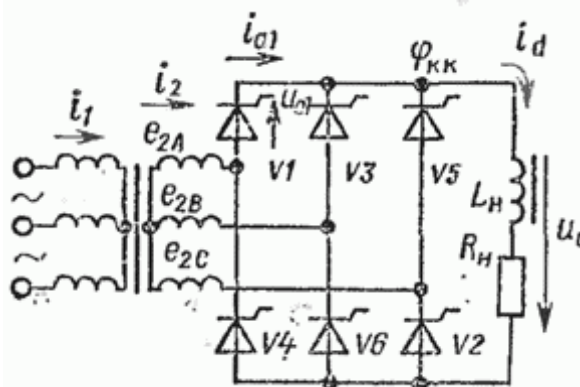


Рис. 1.2. Трехфазная мостовая схема.

Преобразователь имеет ряд преимуществ:

- 1) мощности сетевой и вентильной обмоток равны, благодаря чему обеспечивается хорошее использование трансформатора;
- 2) обратное напряжение мало, так как оно распределяется между двумя последовательно включенными вентилями;
- 3) в магнитопроводе трансформатора нет потоков вынужденного намагничивания.

В сетевом токе для схемы Ларионова присутствуют 5-я, 7-я, 11-я, 13-я и т.д. гармоники, причем наибольшими по величине являются 5-я и 7-я гармоники.

Многофазные схемы преобразования являются совокупностью нескольких, как правило, трехфазных мостовых схем [1]. Для многофазных схем наиболее широко применяются трансформаторы, в которых одна сетевая обмотка и несколько вентильных обмоток. В двенадцатифазной схеме сетевая обмотка соединена в звезду, а вентильные обмотки соединены в звезду и в треугольник (рис. 1.3)

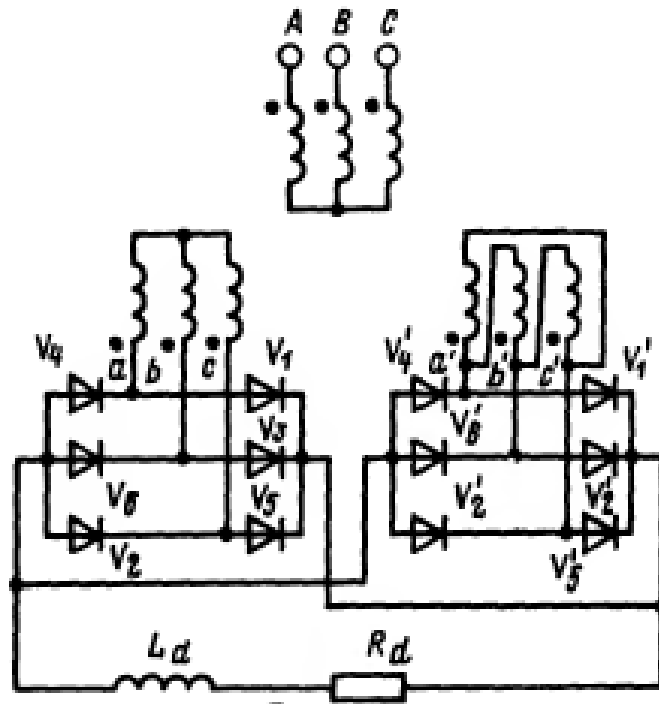


Рис. 1.3. Схема 12-и фазного выпрямителя с параллельным соединением вентильных групп

Такое соединение обмоток обеспечивает то, что процессы в вентильном блоке обмотки «звезда» сдвинуты относительно процессов в вентильном блоке обмотки «треугольник» на $1/12$ периода. Подбором числа витков обмоток добиваются равного напряжения на вентильных обмотках. При последовательном соединении мостов равенство токов обеспечивается автоматически, при параллельном соединении мостов для обеспечения равенства токов используется уравниватель реактор. В результате получают двенадцатикратную пульсность выпрямленного напряжения.

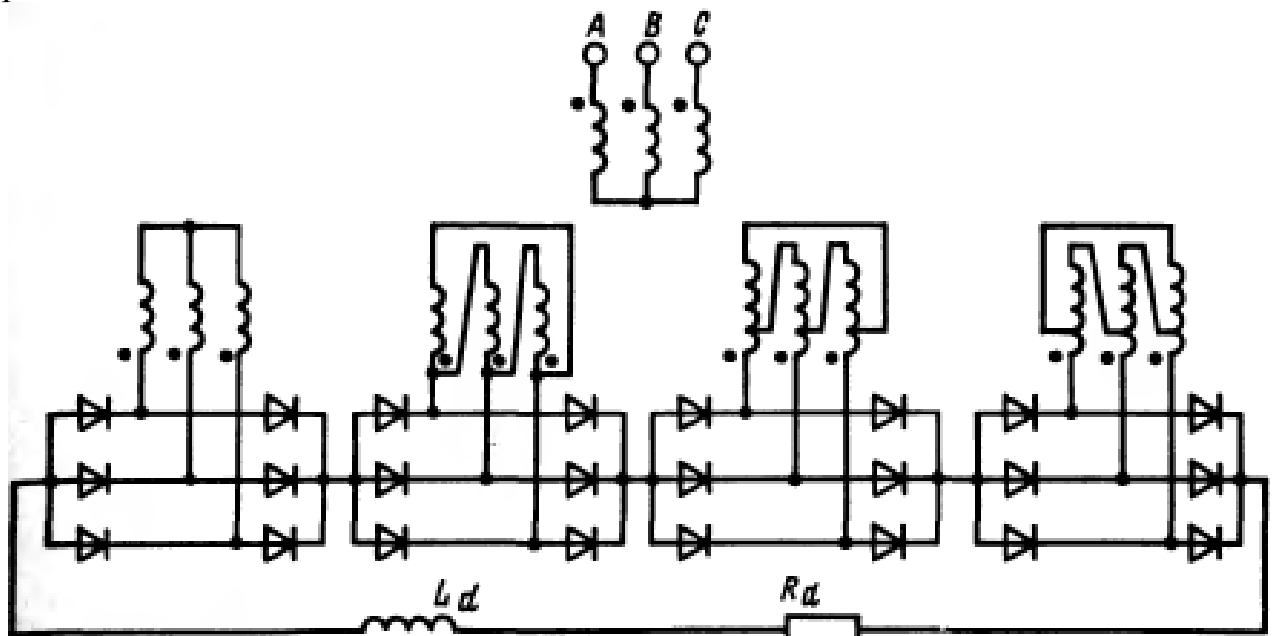


Рис. 1.4. Схема 24-х фазного выпрямителя с последовательным соединением вентильных групп

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Вклад в сетевой ток от различных вентильных блоков для 1-ой, 11-ой, 13-ой и т.д. гармоник в фазе, для 5-ой, 7-ой, 17-ой, 19-ой в противофазе. Таким образом, несинусоидальность тока сети обеспечивается меньшим по сравнению со схемой Ларионова числом гармоник. Основными гармониками сетевого тока являются 11-я и 13-я гармоники.

Все преимущества, характерные для схемы Ларионова, здесь также сохраняются, что обеспечивает широкое применение рассмотренного варианта двенадцатифазного выпрямителя.

Чтобы получить двадцатичетырехфазный выпрямитель (рис. 1.4), необходимо обеспечить задержку процессов в вентильных группах трех трансформаторов на $1/24$ периода, на $2/24=1/12$ периода и на $3/24$ периода напряжения сети. Различные варианты таких преобразователей показаны на рисунках 4, 5 и 6 [1]. В схемах используются трансформаторы, обмотки которых соединены в треугольник с продолженными сторонами.

В сетевом токе остаются только 1-я, 23-я, 25-я, 47-я и 49-я гармоники, что значительно улучшает гармонический состав напряжения в точке подключения к сети. В 12-и и 24-х пульсных схемах можно обойтись без фильтров высших гармоник, которые часто приходится применять при использовании 6-и пульсных схем.

Выводы по разделу один:

При сравнении схем выпрямления необходимо учитывать влияние выпрямителей на сеть, степень использования оборудования выпрямителя и качество выпрямленного напряжения. Работа выпрямителей в системе электроснабжения промышленного предприятия ухудшает гармонический состав тока сети и приводит к генерации выпрямителями реактивной мощности. Хорошее качество выпрямленного напряжения и уменьшение влияния выпрямителей на сеть обеспечиваются переходом к многофазным схемам выпрямления. Оптимальными являются 12-и и 24-х фазные схемы.

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

2. ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

2.1 Расчет электрических нагрузок

Расчет электрических нагрузок выполнен методом упорядоченных диаграмм [12]. 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 (рис. 2.1).

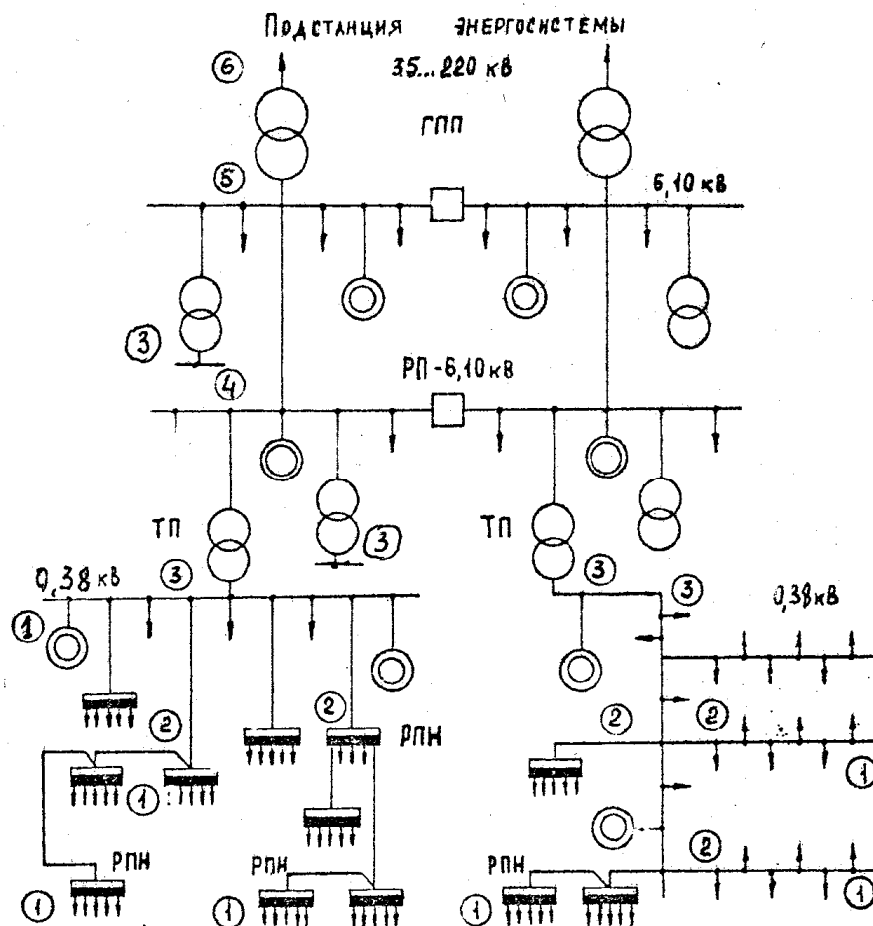


Рис. 2.1 Уровни СЭС промышленного предприятия

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.

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

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

140400.2018.092.00.00 ПЗ

Лист

12

- 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.

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.

Исходя из предложенной классификации, в задании на выпускную квалификационную работу имеется информация только по нагрузкам 2-го (потребители, подключенные к шинам 0.4 кВ) и 4-го уровня (потребители, подключенные к шинам 10 кВ). По этим данным можно рассчитать нагрузки 3-го и 5-го уровней.

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

$$P_p = K_{pa} \cdot \sum_{i=1}^n k_{iai} \cdot P_{номi} \quad (2.1)$$

$$Q_p = K_{pa} \cdot \sum_{i=1}^n k_{iai} \cdot P_{номi} \cdot tg\phi_i \quad (2.2)$$

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.

Приведенное число электроприемников:

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

где $P_{н,эi}$ – номинальная мощность приведённого электроприёмника;

$n_{эi}$ – приведённое число электроприёмников i -го узла.

Средневзвешенное значение коэффициента использования

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

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 $K_{РА}$ определяются по таблицам [13] 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 2.1.

Таблица 2.1 Расчет нагрузок 3-го уровня

Исходные данные					Расчетные величины				
электроприемник	$K_{иа}$	$n_э$	$P_{ном},$ кВт	$tg\varphi_{ном}$	$n_э$	$K_{иа}$	$K_{РА} -$	$P_p,$ кВт	Q_p кВАр
Комплексная нагрузка	0.7	10	40	1.25	-	-	-	-	-
Выпрямители	0.7	4	100	0.15	-	-	-	-	-
Итого	-	-	-	-	11	0.7	0.9	504	353

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

Расчет активных и реактивных мощностей на пятом уровне выполняется по формулам

$$P_p^V = K_{ом} \left[\sum_1^{m1} P_{pi}^{III} + \sum_1^{N1} k_{иаi} p_{номi} + \sum_1^M P_{pi}^{IV} + \sum_1^{L1} \Delta P_{Ti} \right]; \quad (2.5)$$

$$Q_p^V = K_{ом} \left[\sum_1^{m1} Q_{pi}^{III} + \sum_1^{N1} k_{иаi} p_{номi} tg\varphi_i + \sum_1^M Q_{pi}^{IV} + \sum_1^L \Delta Q_{Ti} \right]; \quad (2.6)$$

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;

$K_{ом}$ – 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 (2.5)-(2.6) выполнен расчет нагрузок 5-го уровня на одну секцию шин ГПП, приведенный в таблице

2.2. Из-за отсутствия данных о графиках нагрузки коэффициент одновременности максимумов $K_{ом}$ примем равным 1.

Таблица 2.2 Расчет нагрузок 5-го уровня

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	5200	-	-
Цех	-	504	353	-	-
Выпрямители	0.6	3*2000	3*300	-	-
Итого	-	-	-	9100	5300

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

2.2 Выбор трансформаторов

Число и мощность трансформаторов зависят от распределения нагрузок по площади цеха, наличия места для расположения цеховых подстанций, характера и режима работы электроприемников [14].

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, номинальная мощность трансформатора должна быть больше

$$S_T = \frac{P}{k_3} = 719 \text{ кВА.}$$

Принимаем трансформатор ТДГ-1000/10/0.4.

Паспортные данные выбранного трансформатора [15]:

- потери мощности в режиме холостого хода $\Delta P_{xx} = 1.1 \text{ кВт}$;
- потери мощности в режиме короткого замыкания $\Delta P_{кз} = 10.5 \text{ кВт}$;
- 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:

$$Q_p = \sqrt{(Nk_3 S_{н.т.})^2 - P_p^2}, \quad (2.7)$$

где $N=1$ – число трансформаторов цеховой трансформаторной подстанции, $k_3=1$ – 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.

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

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 (2.7)

$$Q_p = \sqrt{(1000 \cdot 1.4)^2 - (503 \cdot 2)^2} = 973 \text{ кВАр.}$$

Реактивная мощность нагрузки трансформатора составляет $Q = 373 \cdot 2 = 746$ кВАр, следовательно, установки конденсаторной батареи на стороне 0.4 кВ не требуется.

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

$$k_{з.н} = \frac{\sqrt{P_p^2 + Q_1^2}}{S_{н.т.}} = 0.626,$$

$$k_{з.п} = \frac{2\sqrt{P_p^2 + Q_1^2}}{S_{н.т.}} = 1.254.$$

При коэффициенте загрузки в нормальном режиме 0.626 трансформатор работает с КПД, близком к оптимальному значению [15].

По известным паспортным данным можно рассчитать потери активной и реактивной мощности в выбранном трансформаторе

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

$$\Delta Q = \frac{i_{xx}}{100} S_H + \frac{u_{кз}}{100} \left(\frac{S^2}{S_H} \right) = 10 \text{ кВАр.}$$

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 $k_3 = 0.7$ [14]. Таким образом, 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 [15]:

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

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

- потери мощности в режиме короткого замыкания $\Delta P_{кз} = 90$ кВт;
- 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 (2.7)

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

Реактивная мощность нагрузки трансформатора составляет $Q=5300 \cdot 2=10600$ кВАр. Следовательно, не требуется установка конденсаторной батареи на стороне 10 кВ.

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. На шинах 10 кВ коэффициент мощности

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = 0.582,$$

что больше предельно допустимого значения.

Для выполнения требования энергосистемы, установленное в точке подключения, необходима установка на каждой секции шин 10 кВ конденсаторной батареи мощностью

$$Q_c = Q_p - P \operatorname{tg} \varphi_{\text{нр}} = 5300 - 9100 \cdot 0.5 = 750 \text{ кВАр.}$$

Таким образом, компенсация реактивной мощности необходима, но выбор марки конденсаторной батареи на данном этапе преждевременен. Во-первых, частично компенсация реактивной мощности может быть выполнена на шинах 0.4 кВ исходя из условия минимизации потерь в системе электроснабжения предприятия. Во-вторых, наличие высоковольтных выпрямителей большой мощности приведет к возникновению высших гармоник напряжения на шинах 10 кВ. В этом случае для компенсации реактивной мощности используются резонансные фильтры.

С учетом компенсации реактивной мощности по требованиям энергосистемы, коэффициенты загрузки трансформаторов в нормальном и послеаварийном режиме будут соответственно равны:

$$k_{з.н} = \frac{\sqrt{P_p^2 + (Q_1 - Q_c)^2}}{S_{н.т.}} = 0.636,$$

$$k_{з.п} = \frac{2\sqrt{P_p^2 + (Q_1 - Q_c)^2}}{S_{н.т.}} = 1.272.$$

При коэффициенте загрузки в нормальном режиме 0.636 трансформатор работает с КПД, близком к оптимальному значению [15].

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

По известным паспортным данным можно рассчитать потери активной и реактивной мощности в выбранном трансформаторе

$$\Delta P = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \left(\frac{S}{S_H} \right)^2 = 57.4 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q = \frac{i_{xx}}{100} S_H + \frac{u_{кз}}{100} \left(\frac{S^2}{S_H} \right) = 136 \text{ кВАр}.$$

2.3 Расчет кабельных линий 10 кВ

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 [15].

Расчетный ток в кабельной линии в нормальном режиме:

$$I_{p.k.} = \frac{S_{p.k.}}{\sqrt{3}U_H}, \quad (2.8)$$

где $S_{p.k.}$ – мощность, которая должна передаваться по кабельной линии в нормальном режиме, кВА. При питании однострансформаторной цеховой подстанции $S_{p.k.}$ – это расчетная нагрузка трансформатора подстанции с учетом потерь, при питании двухтрансформаторной подстанции – расчетная нагрузка, приходящаяся на один трансформатор, с учетом потерь.

Сечение кабельной линии определяем по экономической плотности тока

$$F_э = \frac{I_{p.k.}}{j_э}, \quad (2.9)$$

где $j_э = 1.4 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$ – экономическая плотность тока, [16].

Согласно (2.8)-(2.9) в рассматриваемом случае при полной мощности нагрузки цеха 626 кВА, передаваемой по кабельной линии, расчетный ток 36.8 А, а экономически целесообразное сечение 26.3 мм². Принимаем кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 10 кВ минимального сечения 50 мм².

По известному сечению выбираем кабель с длительно допустимым током $I_{доп}$ [17]. Допустимый ток кабеля пересчитываем с учетом условий прокладки

$$I'_{доп} = I_{доп} K_t K_{п}, \quad (2.10)$$

где $K_{п}$ – поправочный коэффициент на число параллельно прокладываемых кабелей [16];

K_t – поправочный коэффициент на температуру среды, в которой прокладывается кабель [16].

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

$$I'_{\text{доп}} \geq \frac{I_{\text{р.к.}}}{n_k},$$

где n_k – число кабелей в лотке.

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

$$I'_{\text{ав}} = K_{\text{ав}} I'_{\text{доп}},$$

где $K_{\text{ав}}$ – коэффициент перегрузки. Он определяется из [16] и зависит от коэффициента загрузки кабеля $K_z = I_{\text{р.к.}} / I'_{\text{доп}}$.

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

$$I'_{\text{ав}} \geq \frac{I_{\text{ав.}}}{n_k}.$$

Для кабеля, проложенного от ГПП до трансформаторной подстанции ремонтно-механического цеха, с учетом поправочных коэффициентов допустимый ток (2.10) составляет 151 А, что намного больше тока кабеля в послеаварийном режиме $36.8 \cdot 2 = 73.6$ А. Следовательно, условие по длительно допустимому току для выбранного кабеля выполняется. Кроме указанного условия выбранный кабель необходимо проверить на термическую стойкость. Для этого необходим расчет токов короткого замыкания.

2.4 Проверка кабеля на термическую стойкость

Расчет токов короткого замыкания производится для выбора высоковольтных и низковольтных аппаратов, шин, кабелей и другого электрооборудования СЭС предприятия. При этом достаточно рассмотреть ток трехфазного КЗ в характерных точках СЭС предприятия и определить периодическую составляющую этого тока для наиболее тяжелого режима работы сети [18, 19]. Таким характерным режимом является состояние СЭС, когда один из трансформаторов ГПП отключен и включены секционные выключатели в РУ 10 кВ ГПП, т.е. все электроприемники питаются от одного трансформатора.

Для нормального функционирования релейной защиты на предприятии, время срабатывания ступеней релейной защиты должно различаться [12]. Карта селективности релейной защиты показана на рисунке 2.2.

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

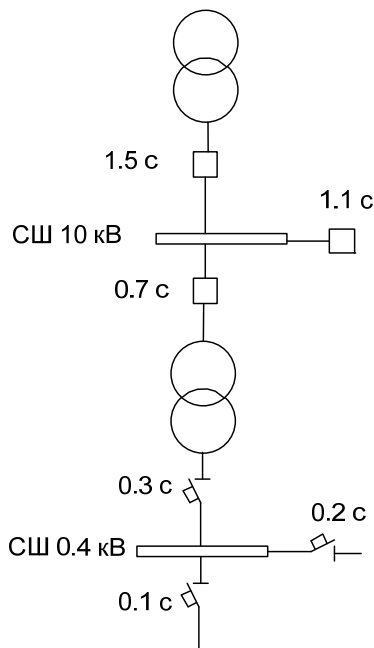


Рисунок 2.2 – Карта селективности

Расчет токов короткого замыкания выполнен в соответствии с рекомендациями, изложенными в [22]. Схема для расчетов токов КЗ представлена на рисунке 2.3.

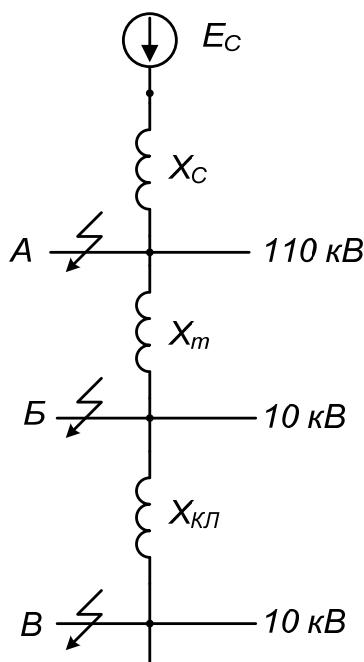


Рис. 2.3 Схема замещения

Каждый из элементов системы электроснабжения представлен на схеме замещения сопротивлением. Для сети 10 кВ при расчете токов короткого замыкания допустимо считать только индуктивные сопротивления элементов. Для проверки кабельной линии на термическую стойкость необходимо знание тока КЗ в начале линии, поэтому на схеме замещения достаточно представить только сопротивление сети и трансформатора. Все сопротивления приведем к ступени напряжения $E_c=10$ кВ.

При заданной мощности КЗ в точке подключения $S_k=500$ МВА сопротивление одной фазы сети

$$x_c = \frac{E_c^2}{S_k} = \frac{(10^4)^2}{0.5 \cdot 10^9} = 0.2 \text{ Ом.}$$

Далее выполним проверку выбранных кабелей по термической стойкости к токам короткого замыкания.

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

$$x_m = \frac{u_k U_n^2}{S_n} = 0.656 \text{ Ом.}$$

Ток короткого замыкания в начале линии составляет

$$I = \frac{E_c}{(x_c + x_m)\sqrt{3}} = 6.8 \text{ кА.}$$

Теперь выполним проверку выбранных кабелей по термической стойкости к токам короткого замыкания.

Термически стойкое сечение определим по выражению

$$F_{т.с.} = \frac{\sqrt{B_k}}{C}, \quad (2.11)$$

где C – коэффициент, зависящий от вида металла жил кабеля, $C=90 \text{ А} \cdot \text{с}^{0.5} / \text{мм}^2$ [17] (для медных жил); B_k – тепловой импульс тока короткого замыкания, $\text{кА} \cdot \text{с}^2$.

Тепловой импульс тока короткого замыкания определяется по формуле:

$$B_k = I_{кз}^2 (t_{пз} + t_{ов} + T_a) = 40.7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

где $t_{пз}=0.7$ с – время действия максимальной токовой защиты линии (см. рис. 2.2);

$t_{о.в.}=0.06$ с – полное время отключения выключателя;

$T_a=0.12$ с – время протекания апериодической составляющей тока КЗ.

$I_{кз}=6.8$ кА – ток короткого замыкания в начале линии.

Для выбранного кабеля должно выполняться условие

$$F > F_{т.с.}$$

Если не выполняется это условие, то сечение кабеля необходимо увеличить.

Используя (2.11) для кабеля от ГПП до трансформатора ТП, термически стойкое сечение кабеля получаем равным 71 мм^2 . Следовательно, необходимо принять сечение кабеля равным 95 мм^2 . Следует отметить, что основным критерием при выборе сечения кабельной линии являлась именно термическая стойкость.

Погонные параметры для выбранного кабеля: активное сопротивление $r_0=0.153$ Ом/км, реактивное сопротивление $x_0=0.148$ Ом/км [17].

Принципиальная схема внутреннего электроснабжения предприятия представлена на плакате 1.

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

Выводы по разделу два:

В результате проведенных расчетов были выбраны трансформаторы и кабельные линии 10 кВ и сформирована система электроснабжения промышленного предприятия.

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

3. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ШИНАХ 10 кВ

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

3.1 Схема замещения для высших гармоник

Порядок построения схемы замещения изложен в [12].

Для 1-ой гармоники сопротивление трансформатора ГПП [17] ($S_H=16$ МВА, $P_{кз}=90$ кВт, $u_k=0.105$):

активное

$$r_{m(1)} = \frac{P_{кз} U_H^2}{S_H^2} = 0.035 \text{ Ом},$$

реактивное

$$x_{m(1)} = \frac{u_k U_H^2}{S_H} = 0.656 \text{ Ом}.$$

На трансформаторах ГПП, как правило, устанавливаются устройства для регулирования напряжения. Это приводит к изменению сопротивления трансформатора от минимального значения

$$X_{T_{\max}} = X_T (1 - \Delta U_T)^2 = 0.463 \text{ Ом}$$

до максимального значения

$$X_{T_{\max}} = X_T (1 + \Delta U_T)^2 = 0.883 \text{ Ом},$$

где ΔU_T -- относительное изменение напряжения трансформатора. В серийных трансформаторах ГПП $\Delta U_T = 0.16$.

Электрическую сеть с мощностью короткого замыкания в точке подключения $S_{кз}=500$ МВА можно представить при 10 кВ в виде индуктивного сопротивления

$$X_{\text{сети}(1)} = \frac{E_{\text{сети}}^2}{S_{кз}} = 0.2 \text{ Ом}.$$

Схема замещения конденсаторной батареи мощностью $Q_C=750$ кВАр состоит из конденсатора, емкостное сопротивление которого

$$X_{c(1)} = \frac{U^2}{Q_c} = 133.3 \text{ Ом}.$$

Комплексную нагрузку с активной мощностью $P=5.5$ МВт и реактивной мощностью $Q=7.5$ МВАр можно представить в виде схемы замещения для k -ой гармоники с параллельно соединенными сопротивлениями

$$R_{(1)} = \frac{U^2}{P} = 18.2 \text{ Ом},$$

$$X_{(1)} = \frac{U^2}{Q} = 19.2 \text{ Ом}.$$

Для выпрямителя мощностью $S=P=2$ МВт 1-я гармоника фазного тока

$$I_{(1)} = \frac{S}{U\sqrt{3}} = 117.7 \text{ А}.$$

Схема замещения трансформатора для высших гармоник аналогичны схемам замещения трансформатора для 1-ой гармоники [3]. При формировании схемы замещения для k -ой гармоники необходимо учесть поверхностный эффект и зависимость индуктивного сопротивления от частоты. Сопротивления элементов для k -ой пересчитывается по формулам

$$R_{T(k)} = R_{T(1)}\sqrt{k}, \quad X_{T(k)} = X_{T(1)}k. \quad (3.1)$$

Электрическую сеть с мощностью короткого замыкания в точке подключения S_{kz} можно представить в виде схемы замещения с индуктивным сопротивлением, зависящим от номера гармоники [3]

$$X_{\text{сети}(k)} = X_{\text{сети}(1)}k. \quad (3.2)$$

Комплексную нагрузку с активной мощностью P и реактивной мощностью Q можно представить в виде схемы замещения для k -ой гармоники с параллельно соединенными сопротивлениями [3]

$$R_{(k)} = R_{(1)}, \quad X_{(k)} = X_{(1)}k. \quad (3.3)$$

Схема замещения конденсаторной батареи мощностью Q_C на k -ой гармонике состоит из конденсатора, емкостное сопротивление которого

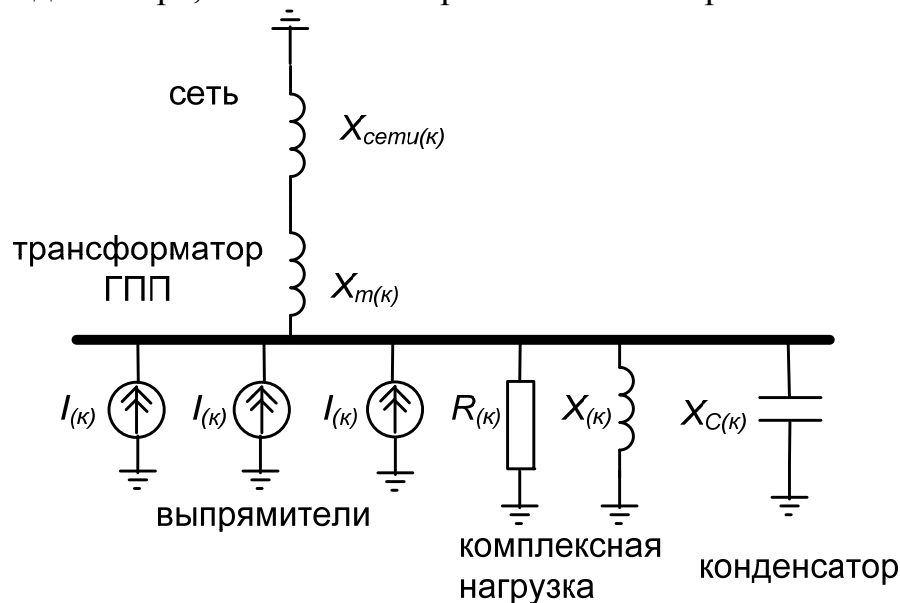


Рис. 3.1 Схема замещения для k -ой гармоники

$$X_{c(k)} = \frac{X_{c(1)}}{k}. \quad (3.4)$$

Источники высших гармоник на схеме замещения представляют источниками тока [3]. Величину тока различных гармоник выпрямителя можно оценить по следующей формуле

$$I_{(k)} = \frac{I_{(1)}}{k}. \quad (3.5)$$

где $I_{(1)}$ – ток 1-ой гармоники. Для двенадцатифазного выпрямителя могут генерироваться 11-я, 13-я, 23-я, 25-я и т.д. гармоники.

Схема замещения для k -ой гармоники представлена на рис. 3.1.

3.2 Расчет качества ЭЭ на шинах 10 кВ

Оценим возможность резонанса между конденсаторной батареей и электрической сетью. Резонанс будет происходить на частоте в

$$k = \sqrt{\frac{X_{C(1)}}{X_{cemu(1)} + X_{T(1)}}} \quad (3.6)$$

раз превышающую частоту 50 Гц.

Из-за регулирования ступеней РПН индуктивное сопротивление трансформатора будет изменяться от 0.463 Ом до 1.083 Ом. При максимальном сопротивлении трансформатора резонансная частота согласно (3.6)

$$k = \sqrt{\frac{X_{C(1)}}{X_{cemu(1)} + X_{T(1)\max}}} = 11.09,$$

при минимальном сопротивлении

$$k = \sqrt{\frac{X_{C(1)}}{X_{cemu(1)} + X_{T(1)\min}}} = 14.2.$$

В этом диапазоне будут 12-и фазные выпрямители будут генерировать гармоники тока – 11-ю и 13-ю. Следовательно, качество электрической энергии и условия работы конденсаторов могут не удовлетворять установленным требованиям.

По схеме, изображенной на рис. 3.1, выполним расчет напряжения на шинах 10 кВ для 11-ой и 13-ой гармоник. Эквивалентное сопротивление относительно источника возмущения

$$\underline{Z}_{(k)} = \left(\frac{k}{-jX_{C(1)}} + \frac{1}{jX_{(1)}k} + \frac{1}{R_{(1)}} + \frac{1}{j(X_{cemu(1)} + X_{T(1)\max})k} \right)^{-1}$$

для 11-ой гармоники равно $18+2j$ Ом и для 13-ой гармоники равно $15.5-6.5j$ Ом.

Напряжение на шинах

$$U_{(k)} = |3I_{(k)}\underline{Z}_{(k)}| \quad (3.7)$$

для 11-ой гармоники равно 577 В и для 13-ой гармоники равно 454 В или 5.8 % и 4.5 %, что выше допустимых значений [20] в 2% и 1.5% соответственно.

Значительно более худший режим работы может возникнуть, если на предприятии выключить всю нагрузку, кроме высоковольтных выпрямителей и конденсаторных батарей. По схеме, изображенной на рис. 3.1, в этом режиме эквивалентное сопротивление

$$\underline{Z}_{(k)} = \left(\frac{k}{-jX_{C(1)}} + \frac{1}{j(X_{cemu(1)} + X_{T(1)max})k + R_{m(1)}\sqrt{k}} \right)^{-1}$$

Используя (3.7) получим напряжение на шинах для 11-ой гармоники 18 кВ, что в 90 раз выше допустимых значений.

Для предотвращения подобных режимов для компенсации реактивной мощности используются резонансные фильтры вместо конденсаторных батарей.

3.3 Методика выбора резонансных фильтров

Резонансный фильтр к-ой гармоники представляет собой последовательно соединенные конденсатор и катушку индуктивности (рис. 3.2). Резонансные фильтры в системе электроснабжения выполняют две основные функции [7]:

- обеспечивают фильтрацию к-ой гармоники;
- участвуют в компенсации реактивной мощности.

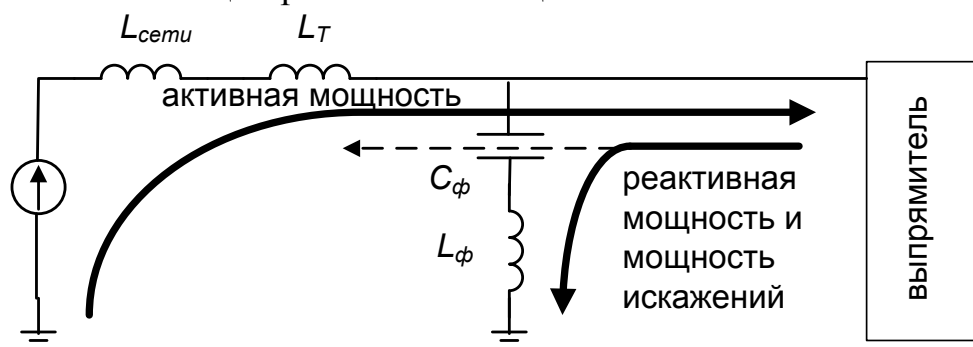


Рис. 3.2 Схема включения резонансного фильтра

Чтобы минимизировать капитальные затраты на фильтры, необходимо рационально распределить эти функции фильтра.

Параметры резонансного фильтра к-ой гармоник удовлетворяют уравнению

$$k\omega L = \frac{1}{k\omega C} \quad (3.8)$$

Кроме фильтрации тока к-ой гармоники фильтр также может частично компенсировать реактивную мощность на 1-ой гармонике. Ток первой гармоники

$$I_{(1)} = \frac{U_{(1)}}{\frac{1}{\omega C} - \omega L} = \frac{U_{(1)}}{\frac{1}{k\omega C} \left(k - \frac{1}{k} \right)} = \frac{k^2}{k^2 - 1} \omega C U_{(1)}$$

Реактивная мощность, генерируемая фильтром, равна

$$Q_{(1)} = U_{(1)} I_{(1)} = \frac{k^2}{k^2 - 1} \omega C U_{(1)}^2.$$

Установленная мощность конденсаторной батареи

$$Q_K = Q_{K(1)} + Q_{K(k)} = \frac{I_{(1)}^2}{\omega C} + \frac{I_{(k)}^2}{k\omega C} = \omega C \left(\frac{k^2}{k^2 - 1} U_{(1)} \right)^2 + \frac{I_{(k)}^2}{k\omega C}.$$

Первая гармонике напряжения на конденсаторной батарее

$$U_{c(1)} = \frac{k^2}{k^2 - 1} U_{(1)}.$$

Таким образом, зависимость установленной мощности конденсаторной батареи от генерируемой им реактивной мощности имеет вид

$$Q_K(Q_{(1)}) = \frac{k^2}{k^2 - 1} \left(Q_{(1)} + \frac{U_{(1)}^2 I_{(k)}^2}{k Q_{(1)}} \right) \quad (3.9)$$

Продифференцировав функцию (3.9) получим минимальную реактивную мощность, которую генерирует фильтр, в виде

$$Q_{(1)\min} = \frac{U_{(1)} I_{\sigma(1)}}{k\sqrt{k}}. \quad (3.10)$$

В случае 12-и фазного выпрямителя минимальная реактивная мощность, генерируемая фильтром, составляет 2.7% от мощности выпрямителя для 11-ой гармоники и 2.1% от мощности выпрямителя для 13-ой гармоники.

Система уравнений, из которой вычисляются параметры элементов фильтра, имеет вид

$$k\omega L = \frac{1}{k\omega C}, \quad \frac{U_{(1)} I_{\sigma(1)}}{k\sqrt{k}} = \frac{k^2}{k^2 - 1} \omega C U_{(1)}^2. \quad (3.11)$$

Решение системы уравнений (3.11) позволяет рассчитать емкость фильтра

$$C = \frac{k^2 - 1}{\omega k^3 \sqrt{k}} \frac{I_{\sigma(1)}}{U_{(1)}} \quad (3.12)$$

и индуктивность фильтра

$$L = \frac{1}{k^2 \omega^2 C} \quad (3.13)$$

исходя из условия минимальной установленной мощности конденсаторной батареи.

На основании проведенных расчетов можно сформулировать последовательность выбора мощности конденсаторной батареи и параметров резонансных фильтров [7]. Исходными величина являются фазные напряжение $U_{(1)}$ и ток пер-

вой гармоники $I_{в(1)}$ выпрямителя, а также реактивная мощность, подлежащая компенсации Q_C .

Сначала необходимо определить минимальную реактивную мощность, которую компенсируют резонансные фильтры

$$Q_{\min} = U_{(1)} I_{в(1)} \sum_k \frac{1}{k\sqrt{k}}, \quad (3.14)$$

причем суммирование производится для всех гармоник, которые необходимо отфильтровать.

Если $Q_C < Q_{\min}$, то конденсаторы в фильтрах выбираются по минимальной установленной мощности. В этом случае необходимо провести оценку несинусоидальности напряжения в точке подключения и по ее результатам возможно уменьшить количество гармоник, подлежащих фильтрации.

Если $Q_{\min} < Q_C < 2Q_{\min}$, то всю реактивную мощность можно генерировать за счет резонансных фильтров. Конкретное распределение генерации реактивной мощности за счет фильтров получают, проводя технико-экономическое сравнение вариантов.

Если $2Q_{\min} < Q_C$, то параметры фильтров получают из условия генерации минимальной реактивной мощности, а остальную часть реактивной мощности получают при помощи конденсаторной батареи.

3.4 Качество ЭЭ на шинах 10 кВ после установки фильтров

Реактивная мощность, которую необходимо компенсировать исходя из требований в точке подключения к энергосистеме (см. раздел 2), составляет 750 кВАр.

При суммарной мощности выпрямителей 6 МВА согласно (3.10) минимальная установленная мощность конденсатора для 11-ой гармоники

$$Q_{(11)\min} = \frac{U_{(1)} I_{в(1)}}{k\sqrt{k}} = 164 \text{ кВАр},$$

для 13-ой гармоники

$$Q_{(13)\min} = \frac{U_{(1)} I_{в(1)}}{k\sqrt{k}} = 128 \text{ кВАр}.$$

Остальную реактивную мощность, которую необходимо компенсировать

$$Q_C = 750 - 164 - 128 = 458 \text{ кВАр}$$

должна компенсироваться конденсаторной батареей.

Используя (3.12) и (3.13) получаем емкость и индуктивность элементов фильтра для фильтра 11-ой гармоники

$$C_{(11)} = \frac{11^2 - 1}{\omega \cdot 11^3 \sqrt{11}} \frac{I_{в(1)}}{U_{(1)}} = 5.2 \text{ мкФ}, \quad L_{(11)} = \frac{1}{11^2 \omega^2 C_{(11)}} = 16 \text{ мГн}.$$

емкость и индуктивность элементов фильтра для фильтра 13-ой гармоники

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

$$C_{(13)} = \frac{13^2 - 1}{\omega \cdot 13^3 \sqrt{13}} \frac{I_{\epsilon(1)}}{U_{(1)}} = 4 \text{ мкФ}, \quad L_{(13)} = \frac{1}{13^2 \omega^2 C_{(13)}} = 15 \text{ мГн}.$$

Схема замещения СЭС после установки фильтра показана на рис. 3.3.

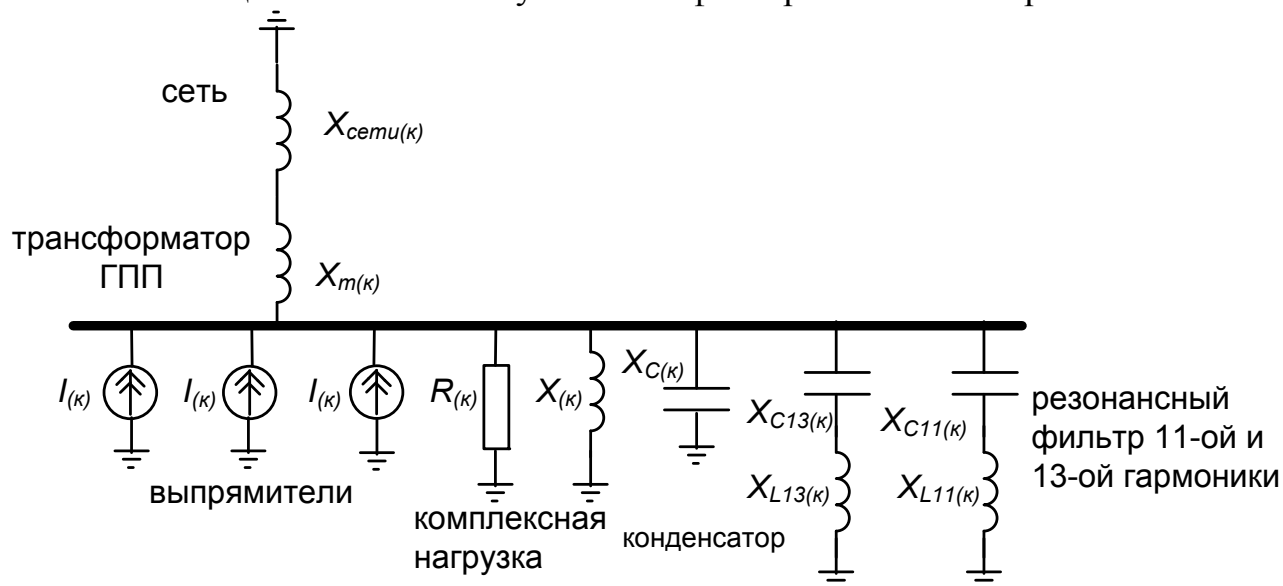


Рис. 3.3 Схема замещения для k-ой гармоники после установки фильтра

Эквивалентное сопротивление фильтрокомпенсирующей установки составляет

$$Z_{(k)экв} = \left(\frac{1}{j(X_{L(11)} - X_{C(11)})} + \frac{1}{j(X_{L(13)} - X_{C(13)})} \right)^{-1}$$

Эквивалентное сопротивление относительно источника возмущения

$$\underline{Z}_{(k)} = \left(\frac{k}{-jX_{C(1)}} + \frac{1}{jX_{(1)}k} + \frac{1}{R_{(1)}} + \frac{1}{j(X_{сети(1)} + X_{T(1)max})k} + \frac{1}{Z_{(k)экв}} \right)^{-1}.$$

Напряжение на шинах

$$U_{(k)} = |3I_{(k)} \underline{Z}_{(k)}|.$$

В результате напряжение на шинах 10 кВ для 11-ой гармоники равно 56 В и для 13-ой гармоники равно 44 В или 0.6 % и 0.5 % от напряжения 1-ой гармоники. После установки фильтрокомпенсирующего устройства коэффициенты гармоник ниже допустимых значений [20] в 2% и 1.5% соответственно.

Выводы по разделу три:

Выполнен расчет несинусоидальности напряжения на шинах 10 кВ при установке конденсаторной батареи и резонансного фильтра. Расчеты показали, что требуемое качество электрической энергии можно получить только при установке резонансного фильтра.

4. КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

4.1. Выбор мощности батареи по критерию минимальных затрат

При передаче реактивной мощности через элементы СЭС возникают [12]:

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

Из этих факторов при решении оптимизационных задач ограничимся только стоимостью потерь активной мощности. Поскольку цеховые трансформаторные подстанции и кабельные линии 10 кВ принадлежат предприятию, то может оказаться экономически целесообразным компенсировать реактивную мощность на шинах 0.4 кВ.

Для расчета стоимости потерь активной мощности необходимо рассчитать сопротивление трансформатора ГПП и кабельной линии 10 кВ от ГПП до ТП.

Активное сопротивление кабельной линии 10 кВ длиной $L=1000$ м [17] ($r_0=0.153$ Ом/км)

$$r_{кл} = r_0 L = 0.153 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление трансформатора ТП [21] ($S_H=1000$ кВА, $P_{кз}=10.5$ кВт)

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

Удельная стоимость потерь активной мощности может быть вычислена по формуле [12]

$$C_0 = \delta(\alpha K_m + \beta \tau), \quad (4.1)$$

где $\alpha=11150$ руб/кВт – ставка двухставочного тарифа, учитывающая максимальную потребляемую мощность [21];

$\beta=2.35$ руб/кВт*ч – ставка двухставочного тарифа, учитывающая потребленную электроэнергию [21];

$K_m = 1$ – коэффициент максимума;

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

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

Затраты на потери активной мощности в элементах СЭС составляют для трансформатора ТП и кабельной линии

$$z_1(Q_{сн}) = \frac{C_0(r_T + r_{кл})}{U^2} (Q - Q_{сн})^2 = A(Q - Q_{сн})^2, \quad (4.2)$$

где $Q=353$ кВАр – реактивная мощность нагрузки. Согласно (4.1) и (4.2) коэффициент $A=29.15$ руб/кВАр².

Среднегодовые затраты на конденсаторные батареи складываются из усредненных капитальных затрат и затрат на потери электроэнергии при генерации реактивной мощности.

Для низковольтных конденсаторных батарей

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

$$Z_2(Q_{сн}) = (EK_B + C_0\Delta P)Q_{сн} = K_n Q_{сн}, \quad (4.3)$$

где $K_B = 0.3$ т.руб/кВАр – удельная стоимость батареи конденсаторов;
 $E = 0.223$ – коэффициент, учитывающий усреднение капитальных затрат;
 $\Delta P = 0.004$ кВт/кВАр – удельная потери активной мощности на выработку реактивной мощности.

В (4.3) коэффициент $K_n = 6.8$ т.руб/кВАр.

Целевую функцию формируем [22] как минимум приведенных капитальных затрат на потери электрической энергии в виде

$$Z(Q_{сн}) = A(Q - Q_{сн})^2 + K_n Q_{сн} \rightarrow \min. \quad (4.4)$$

Вычислим производную для данной функции

$$\frac{\partial Z(Q_{сн})}{\partial Q_{сн}} = -2A(Q - Q_{сн}) + K_n$$

Уравнение позволяет рассчитать оптимальную мощность конденсаторной батареи

$$-2A(Q - Q_{сн}) + K_n = 0$$

Оптимальная мощность

$$Q_{сн} = \frac{2AQ - K_n}{2A} = 236 \text{ кВАр.}$$

График целевой функции (4.3) показан на рис. 4.1.

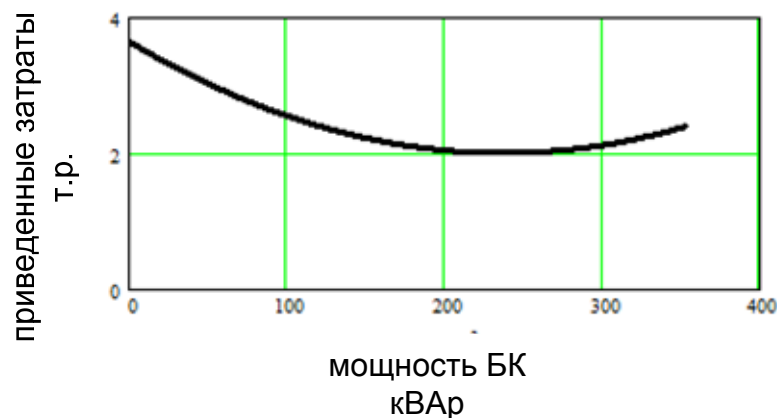


Рис. 4.1 Зависимость приведенных затрат от мощности БК

Анализ графика показывает, что вблизи минимума функции изменение приведенных затрат незначительно. Поэтому предпочтительнее проводить оптимизацию по критерию эффективности вложений.

4.2. Выбор мощности батареи по критерию максимальной эффективности

В настоящее время [23] выпускаются комплекты конденсаторные установки (ККУ) на напряжения 0,38 и 0,66 кВ мощностью от 100 до 900 квар. С 1987 г. ККУ комплектуется конденсаторами типа КЭК, пропитанными экологически безопасной жидкостью (миксофлекс или фенил силлэтан), которые химически не стойки и разлагаются на воздухе, но горючи и токсичны.

Отличием ККУ напряжением до 1000 В является то, что они комплектуются конденсаторами в трехфазном исполнении со встроенными разрядными резисторами и предохранителями. Ранее выпускавшиеся ККУ типа УКЛ(П)Н-0,38 имели автоматическое регулирование, осуществляемое регулятором АРКОН в функции напряжения сети (в обозначении типа ККУ добавлена буква Н). В настоящее время ККУ комплектуются автоматическими регуляторами, осуществляющими регулирование БК в функции РМ сети (в обозначении типа ККУ добавлена буква М). Коммутация конденсаторов осуществляется с помощью магнитных пускателей серии ПМА (рис.4.2).

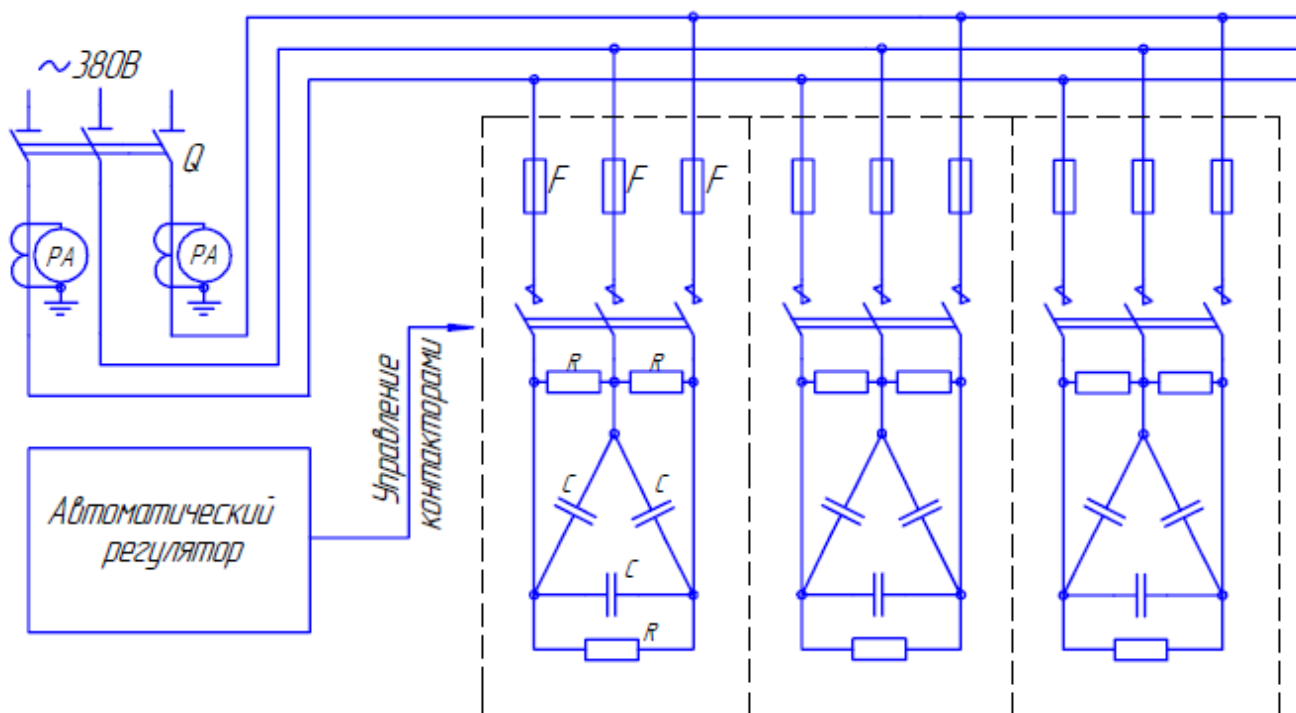


Рис. 4.2 Комплектная конденсаторная установка

Анализ стоимости ККУ (а не конденсаторных батарей) показывает, что стоимость дополнительного оборудования не сильно зависит от мощности конденсаторной батареи и в приведенных затратах $B=55$ т.р [30]. Таким образом, более корректно использовать затраты на компенсацию в виде

$$Z_2(Q_{сн}) = B + K_n Q_{сн}, \quad (4.5)$$

Целевую функцию формируем как максимум эффективности вложений, т.е. делим приведенный экономический эффект от установки конденсаторной батареи на приведенные затраты на их установку

$$\mathcal{E}(Q_{сн}) = \frac{A(Q - Q_{сн})^2 - AQ^2}{B + K_n Q_{сн}} \rightarrow \max. \quad (4.6)$$

График целевой функции (4.6) показан на рис. 4.3.

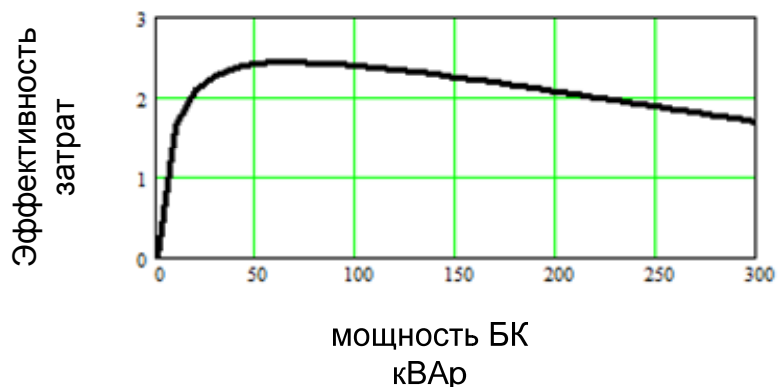


Рис. 4.3 Зависимость эффективности затрат от мощности БК

Анализ графика показывает, что наиболее эффективны затраты на компенсацию реактивной мощности установке комплектной конденсаторной установки с мощностью конденсаторной батареи 90 кВАр.

Выводы по разделу четыре:

Проведен выбор мощности низковольтной конденсаторной батареи по критерию минимальных затрат и критерию максимальной эффективности затрат. В результате принята к установке комплектная конденсаторная установка с мощностью конденсаторной батареи 90 кВАр.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ШЕСТИФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

5.1 Формирование модели в MatLab

Для базового напряжения 10 кВ реактивное сопротивление трансформатора ГПП [17] ($S_H=16$ МВА, $u_k=0.105$):

$$x_{m(1)} = \frac{u_k U_H^2}{S_H} = 0.656 \text{ Ом.}$$

Сопротивление кабельной линии 10 кВ длиной $L=1000$ м [17] ($r_0=0.153$ Ом/км, $x_0=0.148$ Ом/км) активное

$$r_{кл} = r_0 L = 0.153 \text{ Ом,}$$

реактивное

$$x_{кл} = r_0 L = 0.148 \text{ Ом.}$$

Сопротивление трансформатора ТП [17] ($S_H=1000$ кВА, $P_{кз}=10.5$ кВт, $u_k=0.06$) активное

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

полное

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

реактивное

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

При заданной мощности КЗ в точке подключения $S_k=500$ МВА сопротивление одной фазы сети

$$x_c = \frac{E_c^2}{S_k} = \frac{(10^4)^2}{0.5 \cdot 10^9} = 0.2 \text{ Ом.}$$

Складывая сопротивления элементов, получим активное сопротивление эквивалентного генератора

$$R_{эГ} = r_{кл} + r_{m2} = 1.2 \text{ Ом}$$

реактивное сопротивление генератора

$$X_{эГ} = x_{кл} + x_{m2} + x_c + x_{m1} = 6.9 \text{ Ом}$$

При пересчете на рабочее напряжение 0.4 кВ сопротивления необходимо разделить на квадрат коэффициента трансформации $K_T^2=(10/0.4)^2=625$. В результате получим

$$r = R_{эГ} / K_T^2 = 1.9 \text{ мОм, } L = X_{эГ} / (\omega K_T^2) = 0.035 \text{ мГн.}$$

Емкость конденсаторной батареи мощностью $Q_C=90$ кВАр

$$C = \frac{Q_c}{\omega U^2} = 592 \text{ мкФ.}$$

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

Комплексную нагрузку с активной мощностью $P = 280$ кВт и реактивной мощностью $Q = 350$ кВар можно представить в виде схемы замещения с параллельно соединенными сопротивлениями

$$R_{(1)} = \frac{U^2}{P} = 0.571 \text{ Ом},$$

$$L = \frac{U^2}{Q\omega} = 1.46 \text{ мГн}.$$

Для выпрямителя мощностью $S=P=400$ кВт 1-я гармоника фазного тока

$$I_{(1)} = \frac{S}{U\sqrt{3}} = 588 \text{ А}.$$

Схема замещения моделируемого участка сети показана на рис. 5.1

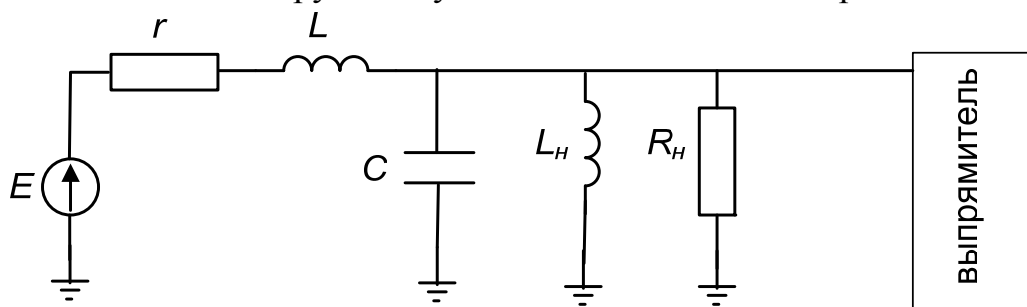


Рис. 5.1 Схема замещения для шин 0.4 кВ

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).

Модель, созданная в среде MatLab, изображена на рис. 5.2 .

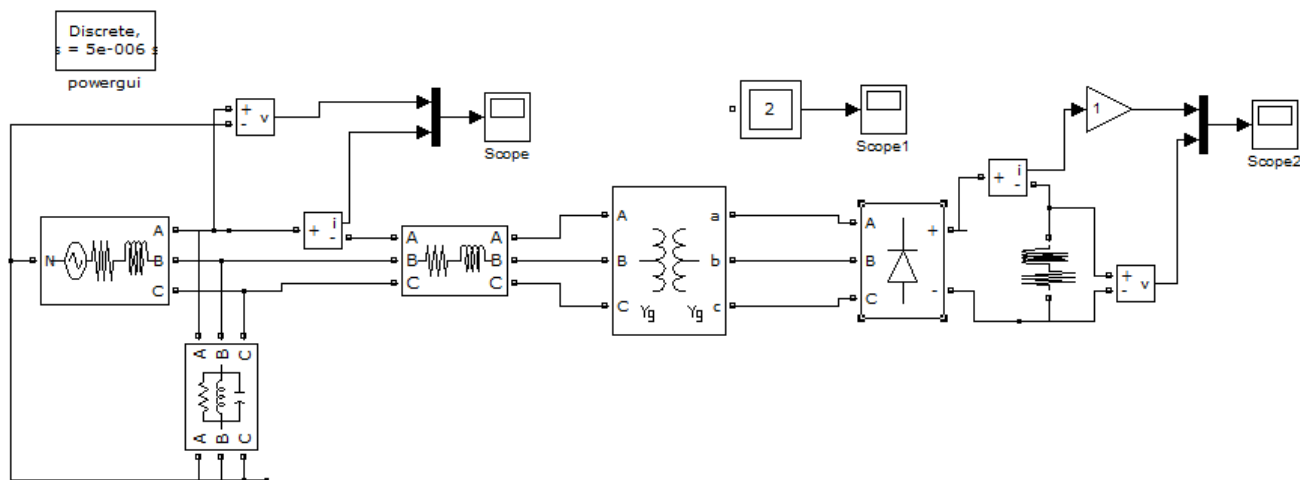


Рис. 5.2 Модель сети с 6-и фазным выпрямителем и конденсатором

На рис. 5.3 представлены данные о настройке основных элементов модели согласно проведенным выше расчетам:

- линейное напряжение сети 400 В;
- сопротивление сети 1.9 мОм;
- индуктивность сети 35 мкГн;
- сопротивление нагрузки 0.571 Ом;
- индуктивность нагрузки 1.46 мГн;
- емкость конденсаторной батареи 592 мкФ.

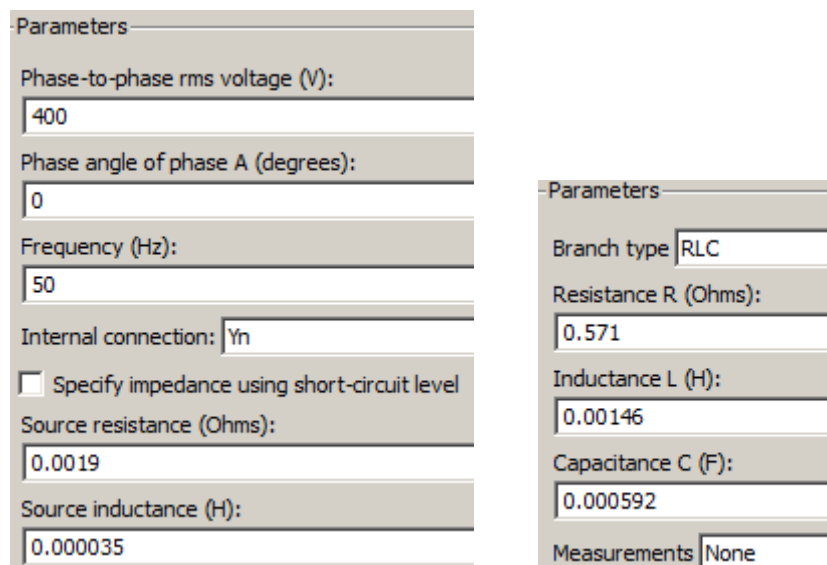


Рис. 5.3 Настройка элементов модели

5.2 Моделирование сети с 6-и фазным выпрямителем и конденсатором

Результаты моделирования электромагнитных процессов в выпрямителе, полученные для модели на рис. 5.2, представлены на рис. 5.4, 5.5 и 5.6. Зависимость выпрямленного напряжения и тока показана на рис. 5.4.

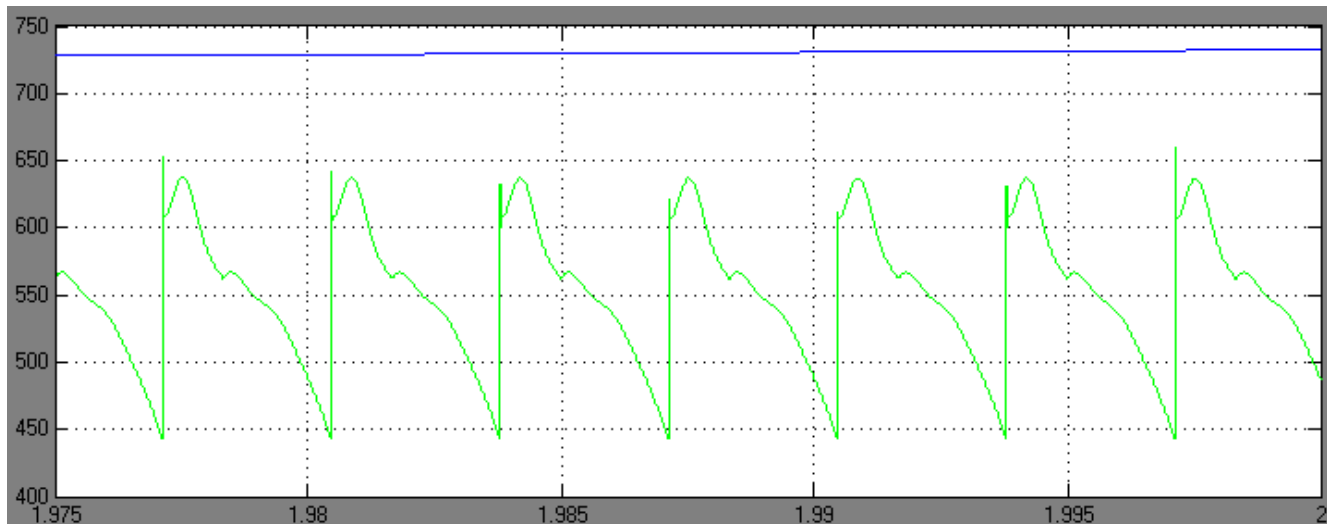


Рис. 5.4 Выпрямленное напряжение и ток

Из рис. видно, что при выпрямленном токе 730 А и выпрямленном напряжении 552 В мощность выпрямителя составляет 402 кВт, что соответствует исходным данным для моделирования.

Зависимость тока и напряжения тиристора показана на рис. 5.5.

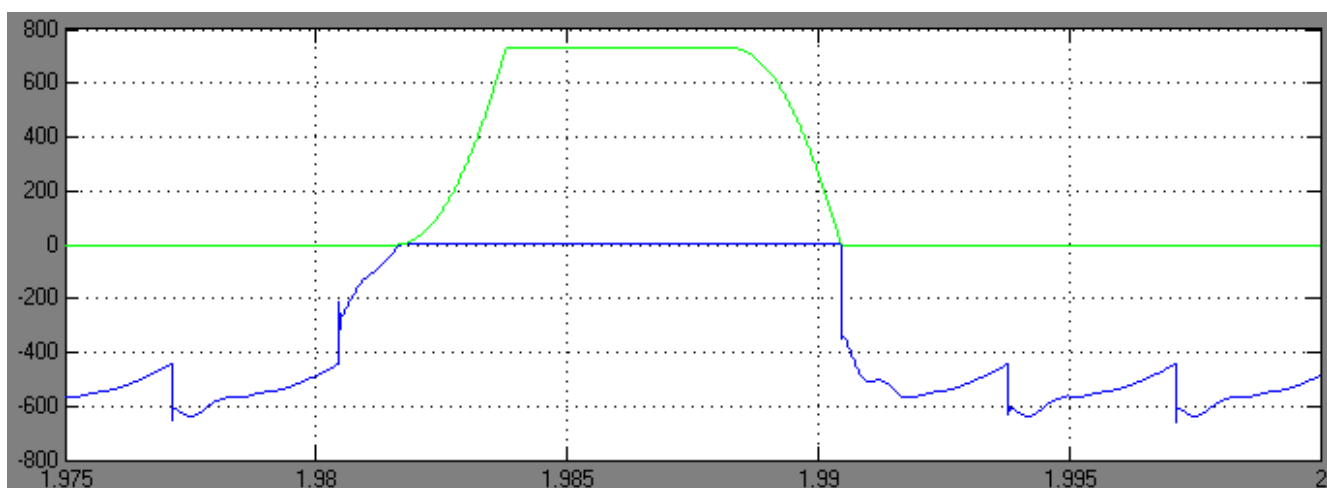


Рис. 5.4 Ток и напряжение тиристора

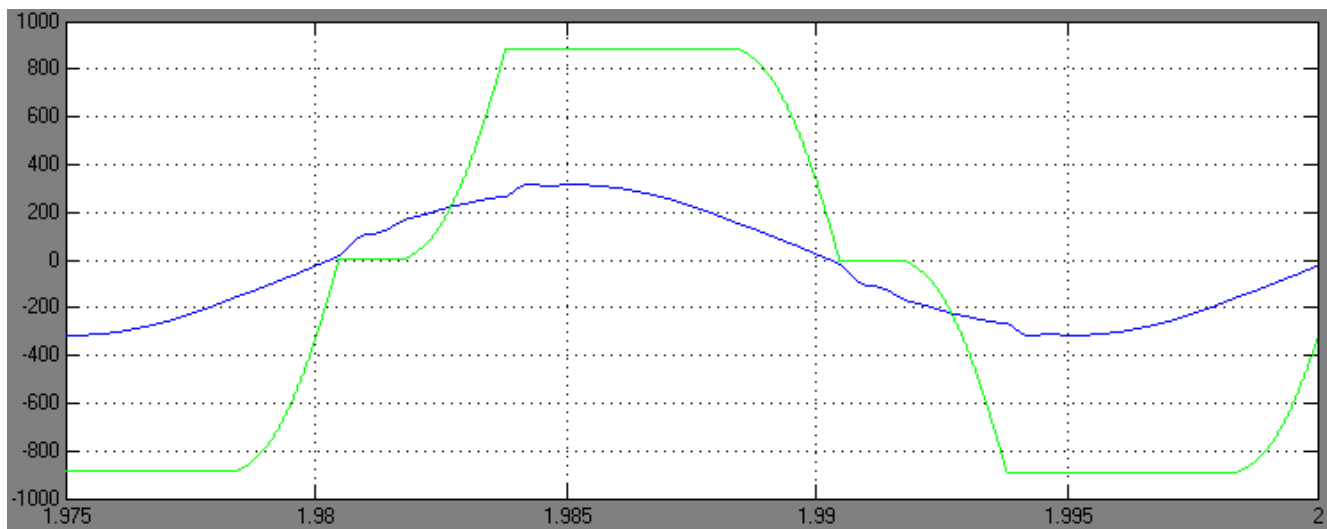


Рис. 5.5 Ток и напряжение выпрямителя в точке подключения к сети

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

На рис. 5.5 показана зависимость тока и напряжение выпрямителя в точке подключения к сети 0.4 кВ. Нормативные требования на качество электроэнергии имеются на напряжение на шинах 0.4 кВ. Поэтому проведем спектральный анализ этого напряжения (рис. 5.6).

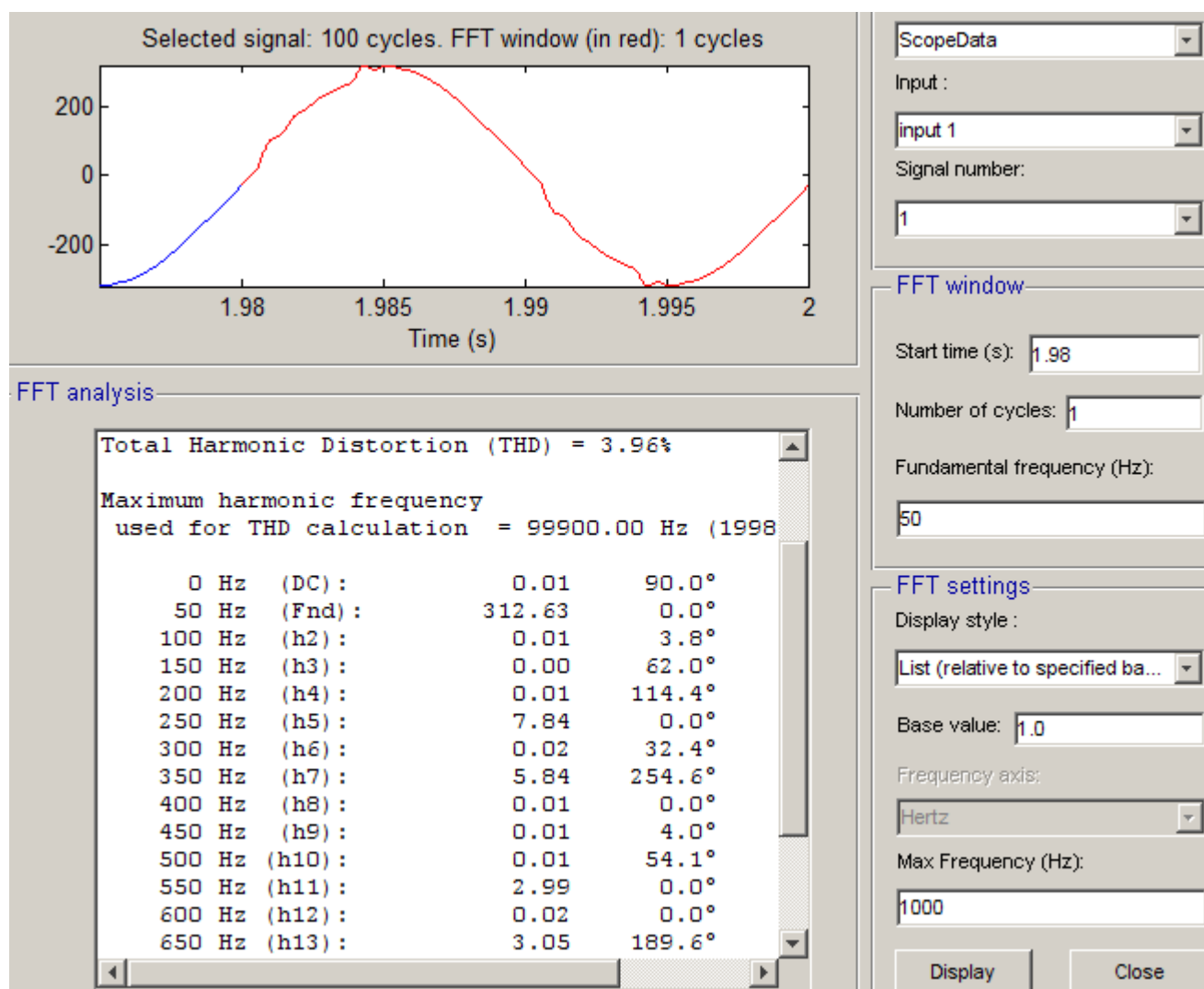


Рис. 5.6 Спектр напряжения на шинах 0.4 кВ

Согласно рис. 5.6 коэффициент несинусоидальности напряжения 3.96 %, что меньше максимально допустимого значения 8% для сети 0.4 кВ [20].

Однако при изменении нагрузки картина существенно изменяется. Спектр выпрямленного напряжения при уменьшении мощности остальной комплексной нагрузки в 10 раз показан на рис. 5.7.

Согласно рис. 5.7 коэффициент несинусоидальности напряжения 10.35 %, что больше максимально допустимого значения 8% для сети 0.4 кВ. Кроме того, на 23-ей гармонике в системе возникает резонанс и коэффициент 23-ей гармоники выше допустимого значения.

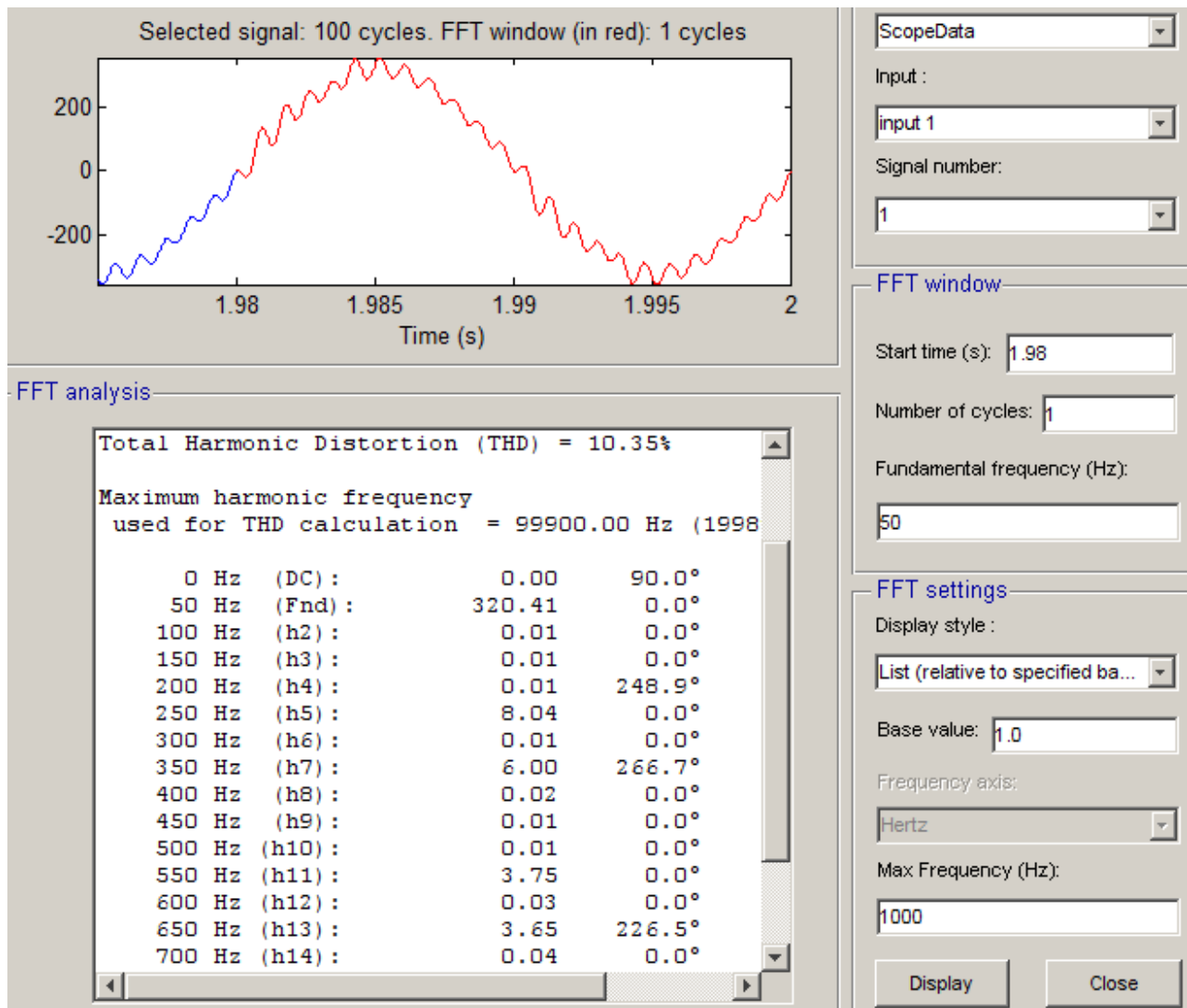


Рис. 5.7 Спектр напряжения на шинах 0.4 кВ

5.3 Моделирование сети с 6-и фазным выпрямителем и фильтром

Изменим модель сети, добавив в нее фильтр 5-ой гармоники с конденсатором емкостью $C=592$ мкФ и индуктивностью

$$L = \frac{1}{5^2 \omega^2 C} = 0.865 \text{ мГн.}$$

Схема замещения СЭС для этого случая показана на рис. 5.8.

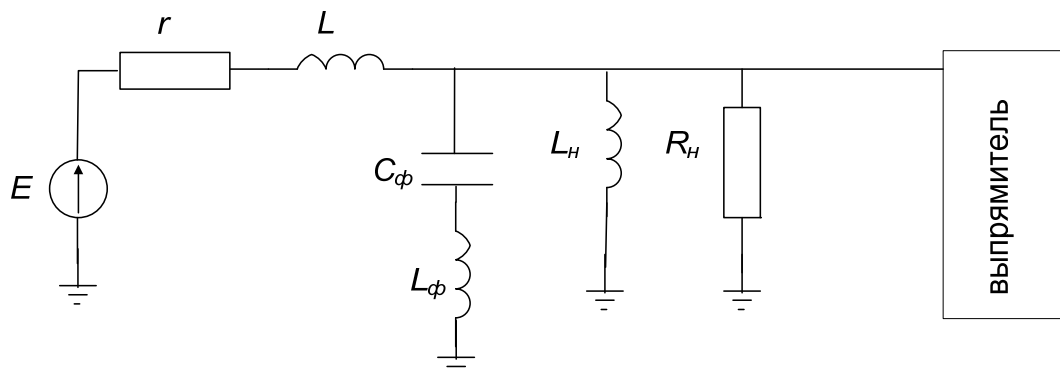


Рис. 5.8 Схема замещения СЭС

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Модель, созданная в среде MatLab по схеме на рис. 5.8, изображена на рис. 5.9.

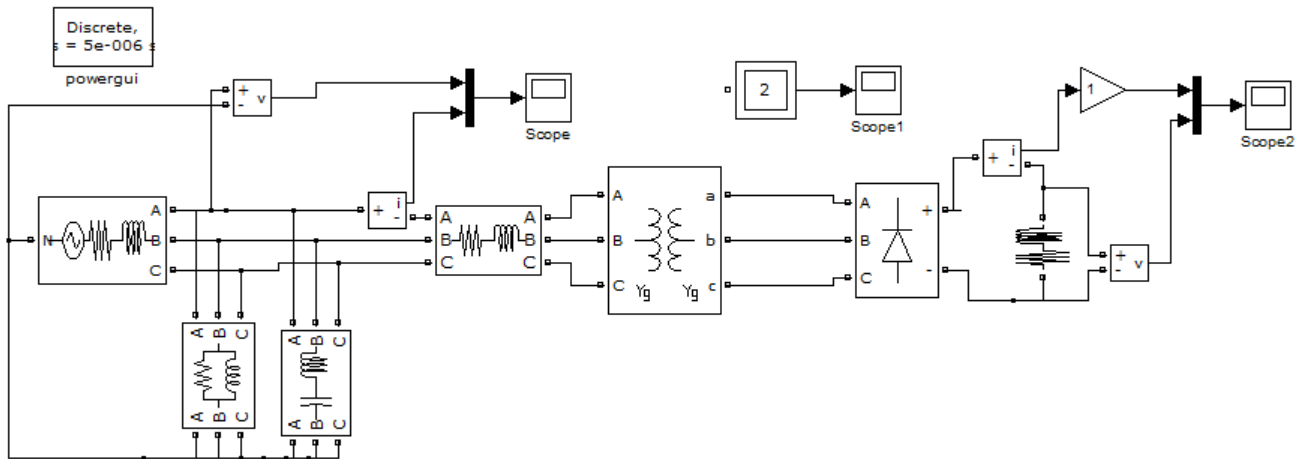


Рис. 5.9 Модель сети с 6-и фазным выпрямителем и фильтром

Спектральный анализ напряжения на шинах 0.4 кВ представлен на рис. 5.10.

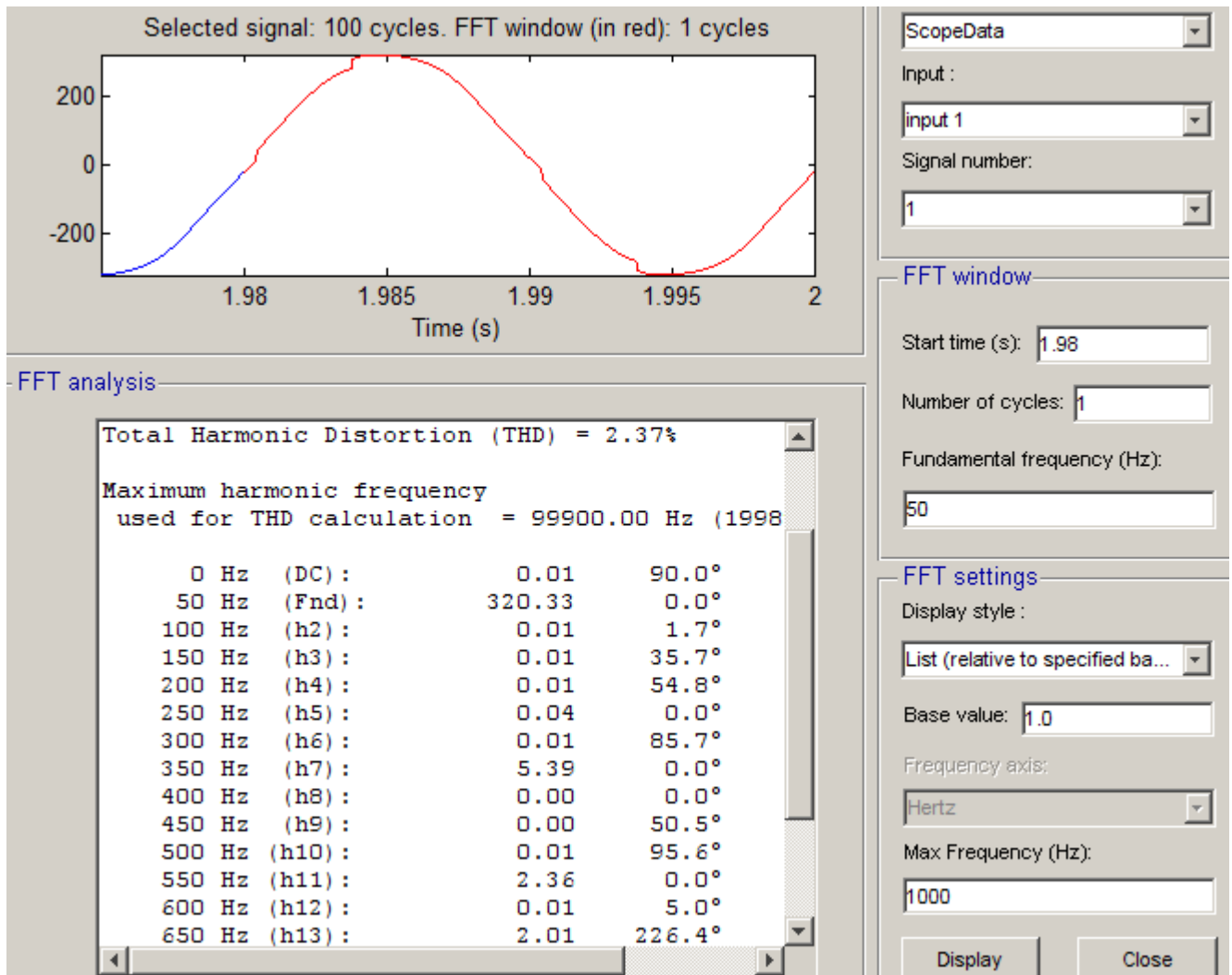


Рис. 5.10 Спектр напряжения на шинах 0.4 кВ в модели с фильтром

Согласно рис. 5.10 коэффициент несинусоидальности напряжения 2.37 %, что меньше максимально допустимого значения 8% для сети 0.4 кВ [20]. Аналогичная картина наблюдается при изменении мощности комплексной нагрузки. Поэтому

применение фильтрокомпенсирующего устройства для компенсации реактивной мощности возможно.

Анализ стоимости фильтрокомпенсирующих устройств показывает, что стоимость дополнительного оборудования не сильно зависит от мощности фильтрокомпенсирующего устройства. В (4.5) при выбранной мощности конденсаторной батареи для фильтра 5-ой гармоники в приведенных затратах $B=100$ т.р коэффициент $K_n=8.8$ т.руб/кВАр. [30].

Целевую функцию формируем как максимум эффективности вложений, т.е. делим приведенный экономический эффект от компенсации реактивной мощности фильтрокомпенсирующим устройством на приведенные затраты на их установку

$$\mathcal{E}(Q_{сн}) = \frac{A(Q - Q_{сн})^2 - AQ^2}{B + K_n Q_{сн}} \rightarrow \max. \quad (5.1)$$

График целевой функции (5.1) показан на рис. 5.11. Сплошной линией показаны данные для фильтрокомпенсирующей установки, пунктирной – для конденсаторной батареи.

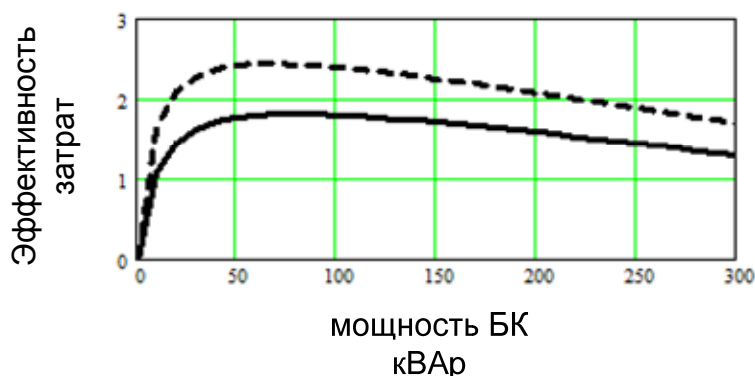


Рис. 5.11 Зависимость эффективности вложений от мощности компенсирующего устройства

Анализ графика показывает, что наиболее эффективны затраты на компенсацию реактивной мощности установке фильтрокомпенсирующего устройства с мощностью конденсаторной батареи 90 кВАр. Замена конденсаторной батареи фильтрокомпенсирующим устройством делает затраты менее эффективными, однако как показали результаты предыдущего моделирования установка конденсаторной батареи выбранной мощности технически невозможна.

Выводы по разделу пять:

Для выполнения требований к качеству электроэнергии принятую ранее батарею конденсаторов мощностью 90 кВАр необходимо заменить на фильтрокомпенсирующее устройство.

6 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ТП

6.1 Общие правила электробезопасности

В современных условиях, при наличии разнообразных опасных для людей воздействий электрического тока, электромагнитного поля, электрических разрядов и электрической дуги необходимо на должном уровне обеспечить защиту персонала электrorаспределительных объектов. Для этого необходимо применить комплексный подход, включающий организационные мероприятия, технические мероприятия по электробезопасности, а также мероприятия, связанные с применением специальных средств защиты.

Согласно [25] электробезопасность должна обеспечиваться:

- конструкцией электроустановок;
- техническими способами и средствами защиты;
- организационными и техническими мероприятиями.

Электроустановки и их части должны быть выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности.

Для обеспечения защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям применяются следующие способы и средства защиты:

- защитные оболочки;
- защитные ограждения ячеек (временные или стационарные);
- безопасное расположение токоведущих частей;
- изоляция токопроводящих частей (рабочая, дополнительная, усиленная, двойная);
- изоляция рабочего места;
- сверхнизкое напряжение;
- защитное отключение;
- предупредительная сигнализация, блокировка, знаки безопасности.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетокопроводящим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, применяют:

- защитное заземление;
- зануление;
- выравнивание потенциала;
- система защитных проводов;
- защитное отключение;
- изоляцию нетокопроводящих частей;
- электрическое разделение сети;
- малое напряжение;
- контроль изоляции;
- компенсация токов замыкания на землю;
- средства индивидуальной защиты.

Одним из важнейших объектов системы электроснабжения городских сетей являются трансформаторные подстанции, в то же время трансформаторная под-

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

станция – 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 соблюдать правила технической эксплуатации, техники безопасности и охраны труда.

6.2 Планировка и конструктивная часть ТП

Местоположение ТП, согласно требованиям ПУЭ [16], определяется местоположением центра электрических нагрузок зданий, питающихся от соответствующей ТП, особенностями планировочных решений по микрорайону, маршрутами коммуникаций и розы ветров данного района.

Оборудование ТП располагается таким образом, чтобы обеспечивались возможности выполнения монтажа и ремонта оборудования. Минимальные расстояния от токоведущих частей сведены в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Минимальные 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

Питание щита 0,4 кВ осуществляется через автоматический выключатель ВА55-43. 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 трехфазном коротком замыкании [16].

В ТП предусматривается установка следующих измерительных приборов:

- амперметров на отходящих линиях 0,4 кВ;
- вольтметров на секции шин 0,4 кВ;
- амперметров на стороне 0,4 кВ силовых трансформаторов.

Для облегчения визуальной дифференциации арматура изоляторов РУ-10 кВ и шин ТП должна быть окрашена в желтый, зеленый и красный цвета (фаза А, В, С) [16]. Все кабели ТП в местах присоединения обязательно должны иметь таблички с адресом, маркой и сечением.

Вводы линий 10 кВ и 0,4 кВ имеют кабельное исполнение. Для удобства прокладки кабелей в РУ–10 и 0,4 кВ предусматривается устройство двойного пола. Светильники и трубы электропроводки освещения в РУ–10 кВ крепятся металлоконструкциями шинных мостов. В целях безопасности светильники и шинные мосты снизу закрыты кожухом.

Для осуществления вентиляции в камерах трансформаторов предусмотрены жалюзийные решетки в створках ворот и над воротами, а также вентиляционная диафрагма, металлическая конструкция которой используется для крепления шин, идущих от трансформаторов в РУ–10 и 0,4 кВ. Согласно [16] (п. 4.2.222), стенки вентиляционных каналов и шахт должны быть выполнены из материалов с пределом огнестойкости не менее 45 мин.

6.3 Обеспечение электробезопасности на ТП

Работы по техническому обслуживанию и текущему ремонту, а также другие виды работ по электрооборудованию выполняются в соответствии с [25].

В связи с опасностью для жизни и здоровья людей при выполнении многих видов работ, системой охраны труда предусматриваются организационные мероприятия по обеспечению их безопасности. Оформление работ нарядом-допуском, распоряжением или в порядке текущей эксплуатации, является основой таких мероприятий. Виды работ в действующих электроустановках, которые производят по распоряжению:

- переключение кабеля до 1000 В;
- подтяжка и зачистка контактов на оборудовании до 1000 В;
- монтаж, проверка, регулировка оборудования связи, защиты, телемеханики до 1000 В;
- замена предохранителей до 1000 В;
- уборка помещений РУ, благоустройство территории и мест;
- проверка фазировки;
- проверка изоляции мегаомметром.

Работы, выполняемые по наряду-допуску:

- обслуживание осветительных устройств, выполняют не менее двух человек, один из которых имеет 3-ю группу допуска по электробезопасности;
- обслуживание коммутационных аппаратов с их последующим пуском;
- перекладка кабеля, если он находится под напряжением;
- испытания электрооборудования, в том числе вне электроустановок с использованием передвижной испытательной установки;
- работы во вторичных цепях, устройствах релейной защиты, автоматики и т.п. при их расположении в распределительных устройствах ;
- неотложные работы, более 1 часа по времени, с участием более трех работников.

Рассмотрим список работ, которые производятся в порядке текущей эксплуатации. Со снятием напряжения:

- работы в электроустановках с односторонним питанием;
- ремонт контакторов, пускателей, автоматических выключателей, пусковых кнопок, рубильников, установленных вне РУ сборок, щитов;
- ремонт отдельных электрокалориферов;
- замена ламп, чистка светильников, ремонт осветительной арматуры, электропроводки, электроустановочных изделий на высоте до 2,5 метров с постоянных приспособлений;
- смена предохранителей в сборках, щитах;
- установка, снятие электросчетчиков, средств измерения, других приборов.

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

Без снятия напряжения на токоведущих частях и вблизи них:

- проверка отсутствия напряжения в осветительной цепи, коммутационной аппаратуре до 1000 В;
- замена пробочных предохранителей.

Все выполненные в порядке текущей эксплуатации работы, должны записываться в оперативный журнал. При наличии вышестоящего оперативного персонала, его уведомляют о месте работы, ее характере, начале, окончании.

Все защитные средства принятые в эксплуатацию проходят систематическую проверку и испытания согласно [26]. Нормы комплектования средствами защиты сведены в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Нормы комплектования средствами защиты

Наименование средств защиты	Количество
Распределительные устройства напряжением выше 1000 В	
Изолирующая штанга (оперативная или универсальная)	2 шт. на каждый класс напряжения
Указатель напряжения	То же
Изолирующие клещи (при отсутствии универсальной штанги)	1 шт. на каждый класс напряжения (при наличии соответствующих предохранителей)
Диэлектрические перчатки	Не менее 2 пар
Диэлектрические боты (для ОРУ)	1 пара
Переносные заземления	Не менее 2 на каждый класс напряжения
Защитные ограждения (щиты)	Не менее 2 шт.
Плакаты и знаки безопасности (переносные)	По местным условиям
Противогаз изолирующий	2 шт.
Защитные щитки или очки	2 шт.

Двери РУ–10 и 0,4 кВ, ворота камер трансформаторов должны быть 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 у дежурного персонала либо у административно-технического персонала. Ключи пронумерованы, один комплект запасной. Для предотвращения неправильных операций при обслуживании и ремонте оборудования в РУ–10 кВ предусматриваются оперативные блокировки, исключающие возможность:

- включения выключателей нагрузки и разъединители на включенные заземляющие ножи сборных шин;
- включение заземляющих ножей сборных шин на ошиновку, не отделенную разъединителем от ошиновки, находящейся под напряжением.

В камерах КСО предусмотрены следующие оперативные блокировки:

- блокировка, не допускающая включение заземляющих ножей при включенных главных ножах выключателя нагрузки или разъединителя;
- блокировка, не допускающая включение главных ножей выключателя нагрузки или разъединителя при включенных заземляющих ножах.

6.4 Заземление ТП

В электрических установках возможны случаи, когда конструктивные металлические части нормально не являющиеся токоведущими и не находящиеся под напряжением, электрически соединяются с элементами цепи электрического тока и получают вследствие этого разность потенциалов по отношению к земле. Человек, не имеющий специальных защитных средств (диэлектрические галоши и резиновые перчатки) в случае прикосновения к этим частям может оказаться под такой разностью потенциалов, которая вызовет прохождение через него тока, опасного или даже смертельного для организма.

Для снижения этой разности потенциалов применяется защитное заземление, как одно из важнейших мер обеспечения электробезопасности.

Корпуса электроприемников заземляются по следующему принципу: если электроприемник расположен близко к полосе заземления, то его корпус соединяется с ней при помощи заземляющей шины; в случае удаленного местоположения электроприемника, его корпус заземляется через нулевую жилу четырехжильного кабеля.

На трансформаторной подстанции нейтрали силовых трансформаторов 10 / 0,4 кВ глухозаземленные. Согласно ПУЭ, в четырехпроводных сетях с глухим заземлением нейтрали обязательна металлическая связь корпусов электрооборудования с заземленной нейтралью трансформатора, что и сделано за счет нейтральной жилы питающих кабелей.

Сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединена нейтраль трансформатора, должно быть не более 4 Ом [27]. Произведем проверку контура заземления ТП по этому условию.

Примем параметры заземляющего контура: $n = 16$ – число заземлителей; $l = 2,8$ м – длина заземлителей; $h = 0,7$ м – глубина заложения. Заземлители соединены между собой полосой из стали 3, сечением 5×50 мм², грунт – «суглинок».

Расчетное удельное сопротивление грунта /53/

$$\rho_p = \kappa_c \rho,$$

где $\kappa_c = 1.29$ – коэффициент сезонности, учитывающий промерзание и просыхание грунта, $\rho = 10^4$ Ом*см – удельное сопротивление грунта.

Сопротивление одного вертикального электрода

$$R_B = \frac{0.366 \rho_p}{L_B} \left(\lg\left(\frac{2L_B}{d}\right) + \frac{1}{2} \lg\left(\frac{4t + L_г}{4t - L_г}\right) \right) = 36 \text{ Ом},$$

где $t = 0.7$ м – глубина заложения вертикального электрода от поверхности земли до середины электрода; $L_B = 2800$ см – длина электрода; $d = 1.8$ см – диаметр электрода.

С учетом экранирующего влияния, сопротивление растеканию тока стержневых заземлителей:

$$R_{вз} = \frac{R_г}{n \eta_B}$$

где $n = 16$ – количество заземлителей;

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

$\eta_b = 0,55$ [27] – коэффициент использования вертикальных заземлителей.

Сопротивление соединительной полосы:

$$R_b = \frac{0.366 \rho_p}{L_b} \left(\lg \left(\frac{2L^2}{bt} \right) \right) = 4.8 \text{ Ом},$$

где $L = 63.6$ м – длина и $b = 0.5$ см – ширина полосы; $t = 0.7$ м – глубина заложения.

Сопротивление протяжённого заземления:

$$R_n = \frac{R_{\text{зо}}}{\eta_r} = 12.4 \text{ Ом},$$

где $\eta_r = 0,36$ [27] – коэффициент использования протяжённого заземления.

Общее сопротивление контура подстанции:

$$R = \frac{R_g R_n}{R_g + R_n} = 2.9 \text{ Ом}.$$

Таким образом, нормативное условие $R < 4$ Ом удовлетворяется. Конструктивное исполнение заземления представлено на плакате 5.

6.5 Освещение ТП

В ТП предусматривается рабочее освещение на напряжение 220 В и ремонтное освещение на напряжение 36 В [28, 29]. 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:

$$S = b \cdot l = 66,87 \text{ м}^2,$$

где $b = 6,25$ м – ширина ТП;

$l = 10,7$ м – длина ТП.

Высота помещения $H_p = 5$ м. По нормам освещенности ТП принимаем $E_n = 10$ лк. Определяем световой поток:

$$F_p = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot K_n}{h \cdot N} = 675,13 \text{ лм}$$

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

$K_n = 1,5$ – коэффициент, учитывающий потери света в зависимости от конфигурации освещенности площади;

$\eta = 0,52$ – К.П.Д. светильника;

$N = 4$ число ламп.

Освещение помещения примем светильниками типа НСП-03-60 в количестве 4-х штук. Световой поток ламп данного светильника $\Phi_{\text{л}} = 730$ лм.

Проверим пригодность данных светильников по световому потоку:

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

$$-0,1 \leq \frac{\Phi_{л} - \Phi_{р}}{\Phi_{р}} \leq 0,2, \quad -0,1 \leq 0,08 \leq 0,2$$

Данный тип светильников проходит по проверке, следовательно, в помещении устанавливаем светильники типа НСП-03-60, в которых устанавливаем лампы типа: Б-215-225-60. Удельная мощность светильников:

$$\Delta P = \frac{N \cdot P}{S} = 3.59 \text{ Вт/м}^2$$

Выводы по разделу семь:

В данном разделе рассмотрено обеспечение электробезопасности и безопасных условий труда при эксплуатации электроустановок на трансформаторной подстанции, произведен расчет заземления цеха и показано его конструктивное исполнение.

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время для различных технологических установок используются выпрямители. В ВКР рассмотрены некоторые проблемы, возникающие в СЭС при большом количестве выпрямителей. Сначала проведено сравнение различных схем нерегулируемых выпрямителей.

Далее методом упорядоченных диаграмм была вычислена электрическая нагрузка цеха и промышленного предприятия. По результатам расчета нагрузки выбраны основные элементы системы электроснабжения – трансформаторы главной понизительной и цеховой трансформаторной подстанций и кабельные линии.

Для проверки кабелей на термическую стойкость выполнен расчет токов короткого замыкания и термических импульсов. В результате сечения кабельных линий были увеличены.

Компенсирующее устройство на шинах 10 кВ необходимо для выполнения требований энергосистемы. Для выбора схемы компенсирующего устройства был проведен расчет несинусоидальности напряжения на шинах 10 кВ. При установке конденсаторной батареи нормативные требования по качеству электроэнергии не выполняются. Поэтому было принято решение об установке фильтрокомпенсирующего устройства. Параметры фильтра были выбраны из условия наименьшей установленной мощности конденсаторной батареи. Для выбранного фильтрокомпенсирующего устройства нормативные требования выполнялись.

Компенсирующее устройство на шинах 0.4 кВ было установлено для экономии электроэнергии в элементах СЭС. Выбор мощности конденсаторной батареи выполнен по критерию наибольшей эффективности приведенных затрат. Проверка качества электроэнергии на шинах 0.4 кВ.

В разделе БЖД рассмотрен вопрос о безопасности жизнедеятельности на цеховой трансформаторной подстанции, проведен расчет заземления и освещения подстанции.

Система электроснабжения удовлетворяет всем нормативным требованиям по качеству электроэнергии, надежности и безопасности.

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

18. ГОСТ Р 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. – М.: Стандартинформ, 2007. – 44 с.

19. 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.

20. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 52 с.

21. Информация на сайте ТОО «Астанаэнергосбыт», для юридических лиц, в разделе «Тарифы. – http://www.astanaenergobyt.kz/tarif_ur.

22. Петров, О.А. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий: учебное пособие для студентов-заочников / О.А. Петров. – Челябинск: ЧПИ, 1986. – 49 с.

23. Комплектные конденсаторные установки от 0,4 до 10 кВ.- http://slavenergo.ru/kondensatornaja_ustanovka.

24. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с., ил. (Серия «Проектирование»).

25. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Челябинск: ООО «Центр безопасности труда», 2003. – 273 с.

26. СО 153-34.03.603-2003. Инструкции по применению и испытанию средств защиты, используемых в электроустановках. – М.: Изд-во стандартов 2003. – 36 с.

27. ГОСТ 12.1.030-87. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 16 с.

28. Справочная книга для проектирования электрического освещения / под ред. Г.М. Кнорринга. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 448 с.

29. СНиП 23-05-10. Естественное и искусственное освещение. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 32 с.

30. Комплектные конденсаторные установки от 0,4 до 10 кВ.- http://slavenergo.ru/kondensatornaja_ustanovka.

					140400.2018.092.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51