

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра управления в технических системах



СВЕРЖДАЮ:

Директор по учебной работе

*Е.И. Луковникова* Е.И. Луковникова

май 2019 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Б1.В.13

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ

27.03.04 Управление в технических системах

ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ

Управление и информатика в технических системах

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 27.03.04 Управление в технических системах от 20.10.2015 г № 1171 и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» от 01.04.2019 г № 196 для заочной формы обучения набора 2019 года

<b>СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ</b>		<b>Стр.</b>
<b>1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>		<b>3</b>
<b>2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>		<b>4</b>
<b>3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ</b>		<b>4</b>
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....		4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости .....		4
<b>4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>		<b>5</b>
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий .....		5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам .....		10
4.3 Лабораторные работы.....		31
4.4 Практические занятия.....		32
4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....		32
<b>5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>		<b>35</b>
<b>6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ</b>		<b>36</b>
<b>7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>		<b>36</b>
<b>8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ», НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>		<b>36</b>
<b>9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>		<b>37</b>
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ практических работ .....		37
9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта .....		59
<b>10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>		<b>59</b>
<b>11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>		<b>60</b>
<b>Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....</b>		<b>61</b>
<b>Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины .....</b>		<b>70</b>
<b>Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе .....</b>		<b>71</b>
<b>Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине.....</b>		<b>72</b>

# 1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

## Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к научно- исследовательскому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

## Цель дисциплины

Ознакомление студентов с типами конфигурации электрических сетей, со схемами замещения линий электропередачи, трансформаторов и автотрансформаторов, с расчетом режимов работы электрических сетей, с балансом активной и реактивной мощности в энергосистеме, с качеством электроэнергии и регулированием напряжения и частоты в электроэнергетических системах.

## Задачи дисциплины

Сформировать у обучающихся знания, умения, навыки проектирования и расчёта режимов работы электрических сетей, а также проектирования и эксплуатации систем автоматического управления технологическими процессами на электрических станциях и подстанциях.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ОК-7	способность к самоорганизации и самообразованию	<p><b>Знать:</b> -Принципы расчета режимов работы электроэнергетических систем и сетей;</p> <p><b>Уметь:</b> -Самостоятельно принимать решения, использовать полученные знания на практике;</p> <p><b>Владеть:</b> - Достаточным уровнем понимания материала, и способностью выявлять сущность проблем.</p>
ОПК-3	способность решать задачи анализа и расчета характеристик электрических цепей	<p><b>Знать:</b> - Основные приемы расчета электрических сетей;</p> <p><b>Уметь:</b> - Использовать основные приемы анализа электрических сетей;</p> <p><b>Владеть:</b> - Приемами моделирования электрических сетей.</p>
ПК-3	готовность участвовать в составлении аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам выполненной работы, в подготовке публикаций по результатам исследований и разработок	<p><b>Знать:</b> - Основные методы и способы сбора и анализа исходных данных для расчета и проектирования электрических сетей;</p> <p><b>Уметь:</b> -Оформлять публикации и отчеты по результатам исследования режимов работы электрических сетей;</p>

		<b>Владеть:</b> - Достаточным уровнем знаний для сбора и анализа исходных данных для расчета и проектирования систем электроснабжения.
--	--	---

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.В.13 Электроэнергетические системы и сети относится к вариативной части.

Дисциплина Электроэнергетические системы и сети базируется на знаниях, полученных при изучении дисциплины Электротехника и электроника.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, дисциплина Электроэнергетические системы и сети представляет основу для изучения дисциплин Динамика технических систем, Релейная защита и автоматика. Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

## 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

### 3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовой проект	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	3	6	144	54	36	-	18	90	КП	Экзамен
Заочная	3	-	144	19	11	-	8	125	КП	Экзамен
Заочная (ускоренное обучение)	3	-	144	14	8	-	6	130	КП	Экзамен
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### 3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по семестрам, час
			6
1	2	3	4
I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)	54	13	54
Лекции (Лк)	36	8	36

Практические занятия (ПЗ)	18	5	18
Курсовой проект	+	-	+
Групповые (индивидуальные) консультации	+	-	+
<b>II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)</b>	54	-	54
Подготовка к практическим занятиям	24	-	24
Подготовка к экзамену в течение семестра	12	-	12
Выполнение курсового проекта	18	-	18
<b>III. Промежуточная аттестация экзамен</b>	36	-	36
Общая трудоемкость дисциплины час. зач. ед.	144	-	144
	4	-	4

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий - для очной формы обучения:

№ раз- дела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудо- ем- кость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоёмкость; (час.)		
			учебные занятия		Самостоятельная работа обучающихся
			лекции	практические занятия	
1	2	3	4	5	6
<b>1.</b>	<b>Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения.</b>	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>10</b>
1.1.	Структурная схема производства, передачи и распределения электроэнергии.	2	2	-	1
1.2.	Выбор сечения проводов по экономической плотности тока.	6	1	2	3
1.3.	Типы трансформаторов и их обозначение. Выбор мощности трансформаторов.	6	1	-	5
1.4.	Основные типы конфигурации электрической сети.	2	1	-	1
<b>2.</b>	<b>Электрические нагрузки предприятий.</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>2</b>
2.1.	Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.	2	0,5	-	1,5
2.2.	Регулирующий эффект нагрузки.	1	0,5	-	0,5
<b>3.</b>	<b>Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов.</b>	<b>21</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>14</b>
3.1.	П-образная схема замещения линия электропередачи.	6	1	2	3
3.2.	Г-образная схемы замещения	6	1	2	3

	двухобмоточного трансформатора.				
3.3.	Схема замещения трехобмоточного трансформатора.	4,5	0,5	-	4
3.4.	Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения.	4,5	0,5	-	4
<b>4.</b>	<b>Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах.</b>	<b>32</b>	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>11</b>
4.1.	Основные методы определения потерь электроэнергии: метод графического интегрирования, метод среднеквадратичного тока, метод времени максимальных потерь.	8	1	4	1
4.2.	Потери мощности в трансформаторах	11	1	2	6
4.3.	Расчет режима ЛЭП при заданной мощности нагрузки и напряжении источника питания методом «в два этапа».	13	1	2	4
<b>5.</b>	<b>Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии.</b>	<b>11</b>	<b>4</b>	<b>-</b>	<b>7</b>
5.1.	Основные показатели качества.	3	1	-	2
5.2.	Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения.	3	1	-	2
5.3.	Баланс активной мощности.	3	1	-	2
5.4.	Регулирование частоты вращения турбины.	2	1	-	1
<b>6.</b>	<b>Регулирование напряжения в электроэнергетической системе.</b>	<b>25</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>10</b>
6.1.	Регулирование напряжения на электростанциях.	2,5	0,5	-	2
6.2.	Трансформаторы с РПН и ПБВ.	5	1	-	2
6.3.	Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов.	9	1	2	4
6.4.	Поперечная компенсация реактивной мощности.	8,5	0,5	2	2
	<b>ИТОГО</b>	<b>144</b>	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>90</b>

- для заочной формы обучения:

№ раз- дела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоем- кость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоёмкость; (час.)		
			учебные занятия		Самостоятельная работа обучающихся
			лекции	практические занятия	
1	2	3	4	5	6
<b>1.</b>	<b>Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения.</b>	<b>25</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>22</b>
1.1.	Структурная схема производства, передачи и распределения электроэнергии.	5	1	-	4
1.2.	Выбор сечения проводов по экономической плотности тока.	8	-	2	6
1.3.	Типы трансформаторов и их обозначение. Выбор мощности трансформаторов.	6	-	-	6
1.4.	Основные типы конфигурации электрической сети.	6	-	-	6
<b>2.</b>	<b>Электрические нагрузки предприятий.</b>	<b>4</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>4</b>
2.1.	Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.	2	-	-	2
2.2.	Регулирующий эффект нагрузки.	2	-	-	2
<b>3.</b>	<b>Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов.</b>	<b>26</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>24</b>
3.1.	П-образная схема замещения линия электропередачи.	7	1	-	6
3.2.	Г-образная схемы замещения двухобмоточного трансформатора.	7	1	-	6
3.3.	Схема замещения трехобмоточного трансформатора.	6	-	-	6
3.4.	Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения.	6	-	-	6
<b>4.</b>	<b>Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах.</b>	<b>26</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>18</b>
4.1.	Основные методы определения потерь электроэнергии: метод графического интегрирования, метод среднеквадратичного тока, метод времени максимальных потерь.	9	1	-	6
4.2.	Потери мощности в трансформаторах	8	-	2	6

4.3.	Расчет режима ЛЭП при заданной мощности нагрузки и напряжении источника питания методом «в два этапа».	9	1	2	6
<b>5.</b>	<b>Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии.</b>	<b>25</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>24</b>
5.1.	Основные показатели качества.	7	1	-	6
5.2.	Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения.	6	-	-	6
5.3.	Баланс активной мощности.	6	-	-	6
5.4.	Регулирование частоты вращения турбины.	6	-	-	6
<b>6.</b>	<b>Регулирование напряжения в электроэнергетической системе.</b>	<b>38</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>24</b>
6.1.	Регулирование напряжения на электростанциях.	15	-	-	6
6.2.	Трансформаторы с РПН и ПБВ.	7	1	-	6
6.3.	Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов.	8	2	-	6
6.4.	Поперечная компенсация реактивной мощности.	8	-	2	6
	<b>ИТОГО</b>	<b>144</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>125</b>

- для заочной формы (ускоренное обучение) обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)		
			учебные занятия		Самостоятельная работа обучающихся
			лекции	практические занятия	
1	2	3	4	5	6
<b>1.</b>	<b>Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения.</b>	<b>25</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>22</b>
1.1.	Структурная схема производства, передачи и распределения электроэнергии.	5	1	-	4
1.2.	Выбор сечения проводов по экономической плотности тока.	8	-	2	6
1.3.	Типы трансформаторов и их обозначение. Выбор мощности трансформаторов.	6	-	-	6
1.4.	Основные типы конфигурации электрической сети.	6	-	-	6
<b>2.</b>	<b>Электрические нагрузки предприятий.</b>	<b>6</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>6</b>
2.1.	Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.	4	-	-	4
2.2.	Регулирующий эффект нагрузки.	2	-	-	2



<b>3.</b>	<b>Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов.</b>	<b>26</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>24</b>
3.1.	П-образная схема замещения линия электропередачи.	7	1	-	6
3.2.	Г-образная схемы замещения двухобмоточного трансформатора.	7	1	-	6
3.3.	Схема замещения трехобмоточного трансформатора.	6	-	-	6
3.4.	Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения.	6	-	-	6
<b>4.</b>	<b>Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах.</b>	<b>23</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>18</b>
4.1.	Основные методы определения потерь электроэнергии: метод графического интегрирования, метод среднеквадратичного тока, метод времени максимальных потерь.	6	-	-	6
4.2.	Потери мощности в трансформаторах	8	-	2	6
4.3.	Расчет режима ЛЭП при заданной мощности нагрузки и напряжении источника питания методом «в два этапа».	9	1	2	6
<b>5.</b>	<b>Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии.</b>	<b>26</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>24</b>
5.1.	Основные показатели качества.	7	1	-	6
5.2.	Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения.	7	1	-	6
5.3.	Баланс активной мощности.	6	-	-	6
5.4.	Регулирование частоты вращения турбины.	6	-	-	6
<b>6.</b>	<b>Регулирование напряжения в электроэнергетической системе.</b>	<b>38</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>36</b>
6.1.	Регулирование напряжения на электростанциях.	15	-	-	15
6.2.	Трансформаторы с РПН и ПБВ.	8	1	-	7
6.3.	Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов.	8	1	-	7
6.4.	Поперечная компенсация реактивной мощности.	7	-	-	7
	<b>ИТОГО</b>	<b>144</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>130</b>

## 4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

Вид занятий в интерактивной форме: лекции с текущим контролем, компьютерные презентации.

### Раздел 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СХЕМАХ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

#### Тема 1.1. Структурная схема производства, передачи и распределения электроэнергии

Производство, передача и распределение электрической и тепловой энергии показаны на рис.1.1. в виде структурной (а) и принципиальной электрической схемы (б). По виду первичного источника энергии, преобразуемого в электрическую или тепловую энергию, электростанции делятся на тепловые (ТЭС), атомные (АЭС) и гидравлические (ГЭС). На ТЭС первичный источник энергии - органическое топливо (уголь, газ, нефть), на АЭС - урановый концентрат, на ГЭС - вода. ТЭС делятся на конденсационные станции (КЭС), вырабатывающие только электроэнергию, и теплофикационные (ТЭЦ), вырабатывающие и электроэнергию, и тепло.

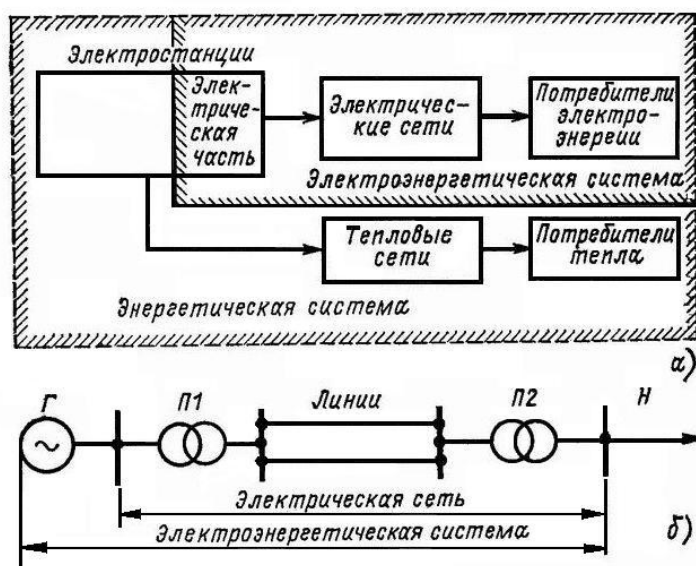


Рис.1.1. Схемы производства, передачи и распределения электрической и тепловой энергии

Кроме ТЭС, АЭС и ГЭС существуют и другие виды электростанций (гидроаккумулирующие, дизельные, солнечные, геотермальные, приливные). Однако мощность их невелика.

*Электрическая часть электростанции* включает в себя разнообразное основное и вспомогательное оборудование. К основному оборудованию относятся: синхронные генераторы, вырабатывающие электроэнергию; сборные шины, предназначенные для приема электроэнергии от генераторов и распределения ее к потребителям; коммутационные аппараты — выключатели, предназначенные для включения и отключения цепей в нормальных и аварийных условиях, и разъединители, предназначенные для снятия напряжения с обесточенных частей электроустановок и для создания видимого разрыва цепи, электроприемники собственных нужд (насосы, вентиляторы, аварийное электрическое освещение и т. д.). Вспомогательное оборудование предназначено для выполнения функций измерения, сигнализации, защиты и автоматики и т. д.

*Энергетическая система (энергосистема)* состоит из электрических станций, электрических сетей и потребителей электроэнергии, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, распределения и потребления электрической и тепловой энергии, при общем управлении этим режимом.

*Электроэнергетическая (электрическая) система*—это совокупность электрических станций, электрических сетей и потребителей электроэнергии, связанных общностью режима и непрерывностью процесса производства, распределения и потребления электроэнергии. Электрическая система — это часть энергосистемы, за исключением тепловых сетей и тепловых потребителей. *Электрическая сеть* — это совокупность электроустановок для распределения электрической энергии, состоящая из подстанций, распределительных устройств, воздушных и кабельных линий электропередачи. По электрической сети осуществляется распределение электроэнергии от электростанций к потребителям. *Линия электропередачи* (воздушная или кабельная) — электроустановка, предназначенная для передачи электроэнергии.

*Электрические подстанции* применяются для преобразования электроэнергии одного напряжения в электроэнергию другого напряжения. Подстанции состоят из трансформаторов, сборных шин и коммутационных аппаратов, а также вспомогательного оборудования: устройств релейной защиты и автоматики, измерительных

приборов. Подстанции предназначены для связи генераторов и потребителей с линиями электропередачи, а также для связи отдельных частей электрической системы.

## Тема 1.2. Выбор сечения проводов по экономической плотности тока

Рассмотрим выбор оптимального сечения провода линии, например приведенной на рис.1.2,а. Сечение — важнейший параметр линии. С увеличением сечения проводов линии возрастают затраты на ее сооружение. Одновременно уменьшаются потери электроэнергии и их стоимость за год.

Минимуму функции приведенных затрат

$$Z(F) = I + p_n K \quad (1.1)$$

соответствует некоторое значение сечения, которое назовем  $F_{\text{эк}}$ .

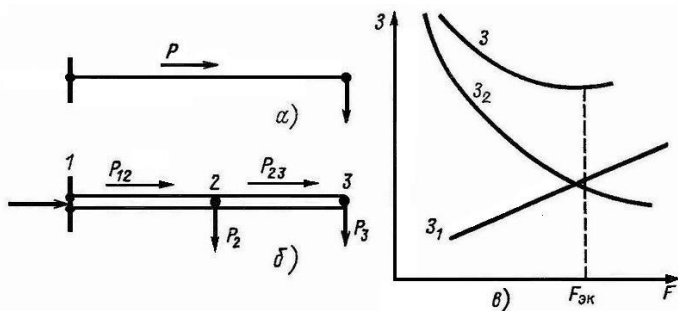


Рис.1.2. Зависимость приведенных затрат от сечения проводов линии:  
а – одноцепная линия; б – двухцепная линия; в – составляющие приведенных затрат

Стоимость линии зависит от ее длины:

$$K = K_0 l \quad (1.2)$$

где  $l$  — длина линии, км;  $K_0$  — удельные капитальные вложения, руб/км:

$$K_0 = a + bF \quad (1.3)$$

где  $a$  — капитальные вложения в 1 км линии, не зависящие от сечения (затраты на подготовку просеки, на дороги, осушение болот и т.д.), руб/км;  $b$  — часть удельных капитальных вложений, пропорциональная сечению провода,  $\text{мм}^2$ ) (стоимость металла, опор, арматуры).

Проанализируем зависимость  $I$  в выражении (1.1) от сечения. Издержки на обслуживание от сечения проводов линии практически не зависят. Стоимость потерь электроэнергии зависит от сечения:

$$I_{\Delta W} = \beta \Delta W = \beta \Delta P_{\text{нб}} \tau = \beta 3 I_{\text{нб}}^2 r_l \tau = \beta 3 I_{\text{нб}}^2 \rho \frac{l}{F} \tau, \quad (1.4)$$

где  $I_{\text{нб}}$  — наибольший рабочий ток линии, А;  $\rho$  — удельное  $\text{мм}^2/\text{м}$ ;  $\beta$  — стоимость;  $\tau$  — время наибольших потерь, т. е. время, за которое при работе с наибольшей нагрузкой потери электроэнергии за год те же, что и при работе по реальному графику нагрузок.

Эксплуатационные расходы на амортизацию и текущий ремонт зависят от сечения:

$$I_a + I_p = \alpha_3 K = \alpha_3 (a + bF) l, \quad (1.5)$$

где  $\alpha_3$  — ежегодные отчисления на амортизацию и текущий ремонт линии в относительных единицах, 1/год. Подставляя (1.7) и (1.8) в (1.1), получаем

$$Z(F) = (a + bF)(p_n + \alpha_3)l + \beta 3 I_{\text{нб}}^2 \rho \frac{l}{F} \tau = Z_1 + Z_2. \quad (1.6)$$

Первое слагаемое в (1.6) — это прямая  $Z_1$  на рис.1.2, в, представляющая ту часть расчетных затрат, которая увеличивается при росте сечения. Второе слагаемое в (1.6) — это стоимость потерь электроэнергии, убывающая при росте  $F$ , — кривая  $Z_2$  на рис.1.2, в.

Дифференцируя  $Z(F)$  по сечению и приравнявая производную к нулю, найдем условие минимума функции затрат (рис.1.2,в):

$$\frac{\partial Z}{\partial F} = p_n + \alpha_3 \cdot \overline{bl} - \frac{\beta 3 I_{\text{нб}}^2 \rho l \tau}{F_{\text{эк}}^2} = 0 \quad (1.7)$$

Отсюда

$$F_{\text{эк}} = I_{\text{нб}} \sqrt{\frac{3\beta\rho\tau}{b(p_{\text{н}} + \alpha_s)}} \quad (1.8)$$

Экономическая плотность тока,  $\text{А/мм}^2$ , — это отношение наибольшего протекающего в линии тока к экономическому сечению:

$$J_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{нб}}}{F_{\text{эк}}} \quad (1.9)$$

Из (1.8), (1.9) следует, что

$$J_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{b(p_{\text{н}} + \alpha_s)}{3\beta\rho\tau}} \quad (1.10)$$

Выражение (1.10) приведено для понимания сути экономической плотности тока. Оно не используется для определения  $J_{\text{эк}}$ . Экономическая плотность тока выбирается в зависимости от вида проводника и времени использования максимальной нагрузки.

Практически для выбора сечения линии по экономической плотности тока сначала из таблиц находят  $J_{\text{эк}}$ , затем рассчитывают экономическое сечение по выражению

$$F_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{нб}}}{J_{\text{эк}}} \quad (1.11)$$

и округляют до стандартного сечения.

### Тема 1.3. Типы трансформаторов и их обозначение. Выбор мощности трансформаторов

Как правило, на всех подстанциях предусматривается установка двух трансформаторов, мощность каждого из которых выбирается равной 0.65-0.7 от максимальной нагрузки подстанции с таким расчетом, чтобы при аварийном выходе одного из трансформаторов оставшийся в работе трансформатор перегружался не более чем на 40% и обеспечивал питание потребителей всех категорий. Установка трех трансформаторов обычно требует специального технико-экономического обоснования.

Применение одното трансформаторных подстанций допускается для потребителей третьей категории мощностью до 10 МВА, если в сетевом районе имеется передвижной резерв, т.е. имеется возможность заменить поврежденный трансформатор в течение суток. Мощность трансформатора определяется исходя из его стопроцентной загрузки. Таким образом, номинальная мощность трансформатора  $S_{\text{ном}i}$ , установленного на  $i$ -ой подстанции с нагрузкой в максимальном режиме  $S_{\text{на}gi}$ , должна удовлетворять следующим условиям.

Если на подстанции устанавливается один трансформатор,

$$S_{\text{ном}i} \geq S_{\text{на}gi} \quad (1.12)$$

Если на подстанции устанавливаются два трансформатора,

$$S_{\text{ном}i} \geq \frac{S_{\text{на}gi}}{K_{\text{ав}}} \quad (1.13)$$

где  $K_{\text{ав}} = 1,4$  - допустимый коэффициент перегрузки в послеаварийных режимах.

Если на подстанции устанавливаются два трехобмоточных трансформатора или два автотрансформатора, то условие выбора будет следующим:

$$S_{\text{ном}i} \geq \frac{S_{\text{с}i} + S_{\text{н}i}}{K_{\text{ав}}} \quad (1.14)$$

где  $S_{\text{с}i}$  - нагрузка на шинах среднего напряжения подстанции,

$S_{\text{н}i}$  - нагрузка на шинах низкого напряжения подстанции.

Кроме того, необходимо иметь ввиду, что у автотрансформатора номинальная мощность обмотки низкого напряжения  $S_{\text{ном} \cdot \text{н}}$  отличается от номинальной мощности автотрансформатора  $S_{\text{ном} \cdot \text{ат}}$  в  $\alpha$  раз ( $S_{\text{ном} \cdot \text{н}} = S_{\text{ном} \cdot \text{ат}} \cdot \alpha$ ). Поэтому условие (1.14) дополняется следующим условием:

$$S_{\text{ном} \cdot \text{ат}} > \frac{S_{\text{н}i}}{\alpha} \quad (1.15)$$

где  $\alpha$  - коэффициент выгоды автотрансформатора.

## Тема 1.4. Основные типы конфигурации электрической сети

Электропередача переменного тока может выполняться по двум основным схемам: связанной или блочной. Связанной схемой называется многоцепная электропередача, имеющая вдоль своей трассы несколько соединений между отдельными цепями (рис.1.3.).

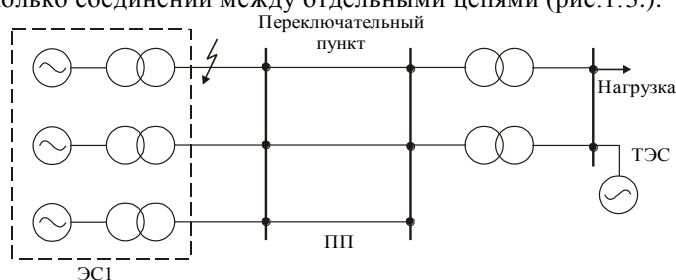


Рис. 1.3. Связанная схема ЛЭП

Если группы генератор - трансформатор соединены на передающем конце с отдельными линиями, не связанными одна с другой, то такая передача называется блочной (рис.1.4.).

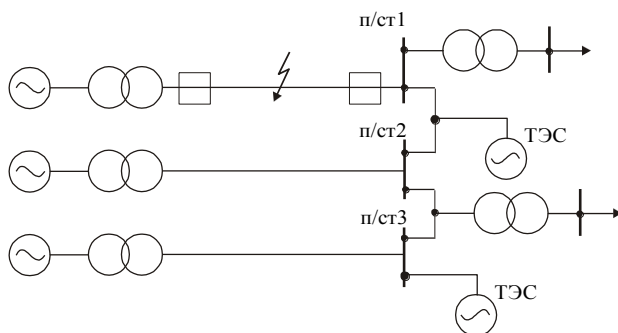


Рис. 1.4. Блочная схема ЛЭП

При блочной схеме приемная система разбивается на ряд отдельных частей, каждая из которых оказывается присоединенной к одному из блоков электропередачи. В случае выхода из строя какого-либо блока приемная система должна обеспечить мощность любой своей части за счет имеющихся станций и дополнительных перетоков мощности внутри системы. Таким образом, выполнение электропередачи по блочной схеме обязательно требует достаточно мощных связей внутри приемной системы.

Обеспечение статической и динамической устойчивости блочной передачи обычно возможно тогда, когда мощность станций, присоединенных к каждой секции приемной системы, в 3 раза или более выше мощности, передаваемой по блоку передачи.

Главным недостатком блочной схемы является то обстоятельство, что при отключении одной цепи для приемной энергосистемы теряется целый генерирующий блок передающей станции. Вследствие этого блочная схема в её чистом виде не находит применения. Для дальних передач обычно применяются так называемые связанные схемы, имеющие большую надежность электроснабжения.

Связанные электропередачи могут выполняться в различных вариантах. Выбор той или иной схемы зависит от её назначения, мощности, имеющейся или намечаемой в будущем связи с промежуточными энергосистемами, расположенными вдоль трассы электропередачи. Применение связанных электропередач позволяет не увеличивать число параллельных цепей.

В связанной электропередаче промежуточные подстанции делят линию на участки, что способствует увеличению пропускной способности электропередачи, так как при повреждении отключается только цепь одного участка, а не вся линия. Кроме того, присоединение промежуточных энергосистем в определенной мере стабилизирует напряжение на подстанции, что также является косвенной причиной увеличения передаваемой мощности. Если на начальном этапе сооружения электропередачи не предполагается строительство промежуточных подстанций, то тогда на линии предусматривают переключательные пункты.

## Раздел 2. Электрические нагрузки предприятий

### Тема 2.1. Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте

Параметры пассивных элементов электрической сети — линий и трансформаторов — в расчетах принимаются постоянными, эти элементы рассматриваются как линейные. Активные элементы схем замещения электрических сетей и систем — нагрузки и генераторы — представляются в виде линейных или нелинейных источников. В зависимости от способа задания нагрузок и генераторов уравнения ус-

тановившегося режима линейны или нелинейны. Способы представления нагрузок и генераторов при расчетах режимов зависят от вида сети и целей расчета.

Нагрузка задается постоянным по модулю и фазе током (рис.2.1,а)

$$\underline{I}_H = I'_H + jI''_H = \text{const} \quad (2.1)$$

Такая форма представления нагрузки принимается при всех расчетах сетей низкого напряжения  $U < 1$  кВ.

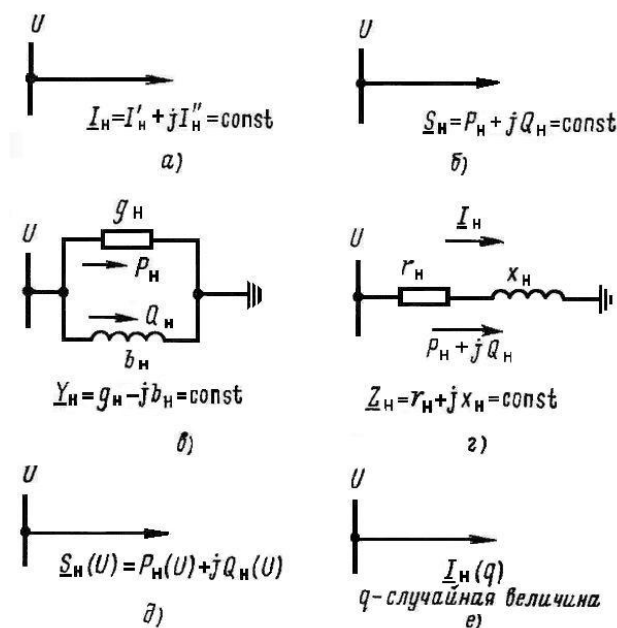


Рис. 2.1. Способы задания нагрузок при расчетах режимов:

а – постоянный по модулю и фазе ток; б – постоянная по модулю мощность; в, г – постоянные проводимость или сопротивление; д – статические характеристики нагрузки по напряжению; е – случайный ток

Как правило, так же задается нагрузка в городских, сельских и промышленных сетях с напряжением  $U \leq 35$  кВ. В распределительных сетях источниками питания являются шины низкого напряжения районных подстанций. Как правило, предполагается, что напряжение источника питания известно. При задании нагрузки в виде постоянного тока (2.1) установившийся режим описывается системой линейных алгебраических уравнений.

Задание тока в виде (2.1) при расчетах питающих сетей приводит к очень большим погрешностям, что является недопустимым.

Нагрузка задается постоянной по величине мощностью

$$\underline{S}_H = P_H + jQ_H = \text{const} \quad (2.2)$$

при расчетах установившихся режимов питающих и иногда распределительных сетей высокого напряжения (см. рис. 2.1,б).

В питающих сетях  $\underline{S}_H = \text{const}$  задается при неизвестном напряжении в узле. Это значит, что в узле задан нелинейный источник тока, мощность которого зависит от напряжения узла:

$$\underline{I}_H = \frac{\underline{S}_H^*}{\sqrt{3}\underline{U}^*} = \frac{P_H - jQ_H}{\sqrt{3}\underline{U}^*} = \text{var} \quad (2.3)$$

При использовании (2.2) и (2.3) уравнения установившегося режима питающей сети нелинейны. Задание постоянной мощности нагрузки соответствует многолетней практике эксплуатации электрических

сетей и систем. Одна из причин задания  $\underline{S}_H = \text{const}$  в том, что экономические расчеты осуществляются за полученную электроэнергию. Соответственно расчеты текущего (для данного момента времени) режима проводятся в мощностях, а не в токах.

Этот способ задания нагрузки является достаточно точным для электрических систем, полностью обеспеченных устройствами регулирования напряжения. В этих системах на электроприемниках поддерживается постоянное напряжение вследствие широкого использования трансформаторов и автотрансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН), а также путем оснащения нерегулируемых трансформаторов на существующих подстанциях линейными регулировочными трансформаторами. Кроме того, широко используются средства местного регулирования напряжения

(управляемые батареи конденсаторов, синхронные двигатели и т.д.). В этих условиях при изменениях режима напряжение на нагрузке практически не меняется, и полная мощность нагрузки остается постоянной.

В действительности у потребителей не обеспечивается поддержание постоянного по модулю напряжения. В этом случае задание нагрузки постоянной мощностью приводит к большей погрешности расчетов в сравнении с учетом статических характеристик нагрузки по напряжению  $P_n(U)$ ,  $Q_n(U)$ .

Эта погрешность тем больше, чем больше отличаются напряжения потребителей от номинального.

При расчетах распределительных сетей низкого напряжения в случае задания  $\underline{S}_n = \text{const}$  предполагают также, что напряжения во всех узлах равны номинальному. Это значит, что в узле задан линейный источник тока, не зависящий от напряжения узла:

$$\underline{I}_n = \frac{\underline{S}_n^*}{\sqrt{3}\underline{U}_{\text{ном}}^*} = \frac{P_n - jQ_n}{\sqrt{3}\underline{U}_{\text{ном}}} = \text{const} \quad (2.4)$$

При выполнении условий (2.3) и (2.4) уравнения установившегося режима в распределительных сетях линейны. Расчет потоков мощностей в линиях ведется по мощностям нагрузок, но уравнения остаются линейными.

Нагрузка представляется постоянной проводимостью или постоянным сопротивлением (рис.2.8,в,г):

$$\underline{Y}_n = g_n - jb_n = \text{const} \quad \text{или} \quad \underline{Z}_n = r_n + jx_n = \text{const} \quad (2.5)$$

Такой способ эквивалентен заданию статических характеристик нагрузки в виде квадратичных зависимостей от напряжения

$$P_n = U^2 g_n \quad \text{и} \quad Q_n = U^2 b_n \quad (2.6)$$

Уравнения установившегося режима при условиях (2.5) или (2.6) нелинейны. Задание постоянной проводимости нагрузки используется при расчете электромеханических переходных процессов.

Статические характеристики нагрузок по напряжению (рис.2.1,д) более полно отражают свойства нагрузки, чем в случае задания постоянного тока, мощности или проводимости, но их использование приводит к усложнению расчетов. Во многих случаях эти характеристики не известны, и возможно применение лишь типовых. Учет статических характеристик по напряжению оказывает существенное влияние на результаты расчета послеаварийных установившихся режимов, когда напряжение сильно отличается от номинального.

Статические характеристики нагрузки по частоте должны учитываться при расчетах послеаварийных установившихся режимов, в которых имеет место дефицит мощности и частота отличается от номинальной. Такие расчеты установившихся режимов учитывают изменение частоты и применяются для анализа действия устройств регулирования частоты и противоаварийной автоматики.

На рис.2.9 приведены статические характеристики по напряжению для различных способов задания нагрузки.

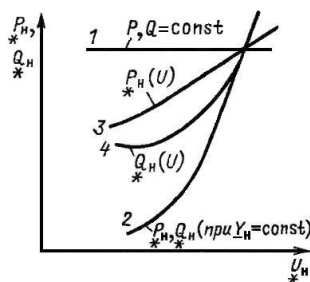


Рис. 2.2. Статические характеристики нагрузки по напряжению для различных способов задания нагрузки

Прямая 1, параллельная оси напряжений,  $\underline{S}_n = \text{const}$ ; квадратичная парабола 2 —  $\underline{Y}_n = \text{const}$ ; кривые 3,4 — типовые статические характеристики. При регулировании напряжения, обеспечивающем  $U_n \approx \text{const}$ , полная мощность нагрузки постоянна, что соответствует прямой 1.

Нагрузка представляется случайным током при расчетах электрических систем с большей долей электротяговой нагрузки. Электрифицированный транспорт — это специальный вид нагрузки, у которой во времени (по мере движения электровоза) меняются величина и место подключения. Такая нагрузка представляется в виде  $\underline{I}_n(q)$ , где  $q$  — случайная величина (рис. 2.1,е). Расчеты, учитывающие случайный характер нагрузки, применяются для специального анализа режимов электрических систем и в особенности для систем электроснабжения железных дорог.

## Тема 2.2 Регулирующий эффект нагрузки

Рассмотрим, как реагирует нагрузка на изменение режима в простейшей электрической системе, представленной на рис. 2.3.

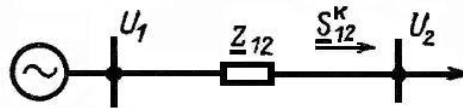


Рис.2.3. Схема простейшей электрической системы

На рис.2.4 показаны статические характеристики нагрузки по напряжению.

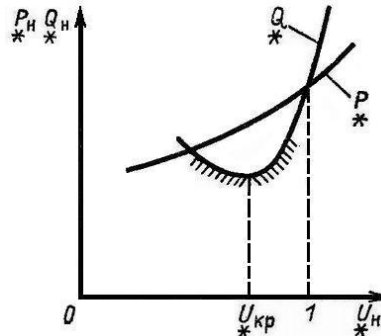


Рис.2.4. Статические характеристики нагрузки

Пусть из-за аварии или по другим причинам напряжение  $U_2$  в конце линии понижается. Покажем, что нагрузка в силу своего положительного регулирующего эффекта повысит напряжение  $U_2$ . Напряжение в конце линии можно представить в следующем виде:

$$U_2 \approx U_1 - \Delta U_{12} = U_1 - \frac{P_{12}^k r_{12} + Q_{12}^k x_{12}}{U_2}$$

где  $P_{12}^k$ ,  $Q_{12}^k$  — активная и реактивная мощности в конце линии;  $r_{12}$ ,  $x_{12}$  — активное и реактивное сопротивления линии.

При понижении  $U_2$  в соответствии со статическими характеристиками (рис.4.5) будут уменьшаться значения  $P_2$  и  $Q_2$ , а также  $P_{12}^k$  и  $Q_{12}^k$ , следовательно, будут уменьшаться потери  $U_{12}$ , а значение  $U_2$  вследствие этого будут увеличиваться. Рост  $U_2$  при уменьшении  $\Delta U_{12}$  понятен из приведенной выше формулы в предположении, что  $U_1$  поддерживается постоянным. Все это справедливо в случае, когда

$$U > U_{кр} = (0,7 \div 0,8)U_{ном}$$

Нагрузка имеет положительный регулирующий эффект при  $U \geq U_{кр}$  и отрицательный регулирующий эффект при  $U < U_{кр}$ . В последнем случае понижение  $U_2$  вызывает рост потребляемой реактивной мощности  $Q_2$ , соответственно большая реактивная мощность течет и по линии. Это вызывает увеличение потерь напряжения в линии  $\Delta U_{12}$ , следовательно, уменьшается напряжение в конце линии у потребителя. В соответствии со статической характеристикой при  $U < U_{кр}$  снова растет  $Q_2$ . Это приводит к дополнительному понижению  $U_2$  и т. д. Возникает явление, называемое лавиной напряжения. При такой аварии останавливаются (опрокидываются) асинхронные двигатели. Реактивная мощность асинхронных двигателей растет, баланс  $Q$  нарушается, причем  $\sum Q_n \gg \sum Q_r$ , что в свою очередь приводит к понижению  $U$ . Остановить снижение напряжения при этой аварии можно, лишь отключив нагрузку. В настоящее время применяются *автоматические регуляторы возбуждения* (АРВ) на генераторах и мощных синхронных двигателях, стабилизирующие напряжение, поэтому напряжение в системе не понижается ниже критического.



### Раздел 3. Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов

#### Тема 3.1. П-образная схема замещения линия электропередачи

В общем случае параметры линии электропередачи равномерно распределены по ее длине. Для линии сравнительно небольшой длины распределенность параметров можно не учитывать и использовать сосредоточенные параметры: активное и индуктивное сопротивления линии  $r_{л}$  и  $x_{л}$ , активную и емкостную проводимости линии  $g_{л}$  и  $b_{л}$ .

Воздушные линии электропередачи напряжением 110 кВ и выше длиной до 400 км обычно представляются П-образной схемой замещения (рис. 3.1.).

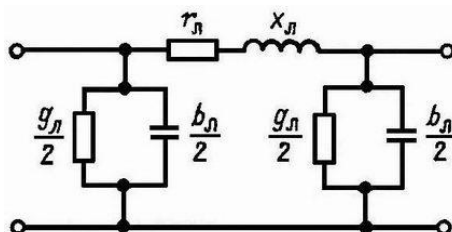


Рис. 3.1. П-образная схема замещения воздушной линии электропередачи

Активное сопротивление определяется по формуле

$$r_{л} = r_0 l, \quad (3.1)$$

где  $r_0$  — удельное сопротивление, Ом/км,  $l$  — длина линии, км.

Активное сопротивление проводов и кабелей при частоте 50 Гц примерно равно омическому сопротивлению. При этом не учитывается явление поверхностного эффекта. Удельное сопротивление  $r_0$  для сталеалюминевых и других проводов из цветных металлов определяется по таблицам в зависимости от сечения. Для стальных проводов нельзя пренебрегать поверхностным эффектом, для них  $r_0$  зависит от сечения и протекающего тока и также находится по таблицам.

Реактивное сопротивление определяется следующим образом:

$$x = x_0 l, \quad (3.2)$$

где  $x_0$  — удельное реактивное сопротивление, Ом/км.

Удельные индуктивные сопротивления фаз воздушной линии в общем случае различны. При расчетах симметричных режимов используют средние значения  $x_0$ :

$$x_0 = 0,144 \lg \left( \frac{D_{cp}}{r_{np}} \right) + 0,016, \quad (3.3)$$

где  $r_{np}$  — радиус провода, см;  $D_{cp}$  — среднегеометрическое расстояние между фазами, см, определяемое следующим выражением:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}, \quad (3.4)$$

где  $D_{ab}$ ,  $D_{bc}$ ,  $D_{ca}$  — расстояние между проводами соответственно фаз  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Например, при расположении фаз по углам равностороннего треугольника (рис. 3.2, а) со стороной  $D$  среднегеометрическое расстояние равно  $D$ .

В линиях электропередачи при  $U_{ном} \geq 330$  кВ провод каждой фазы расщепляется на несколько проводов. Это соответствует увеличению эквивалентного радиуса фазы, и в выражении (3.3) вместо  $r_{np}$  используется

$$r_{эк} = \sqrt[n_{\phi}]{r_{np} a_{cp}^{n_{\phi}-1}}, \quad (3.5)$$

где  $r_{эк}$  — эквивалентный радиус провода, см;  $a_{cp}$  — среднегеометрическое расстояние между проводами одной фазы, см;  $n_{\phi}$  — число проводов в одной фазе.

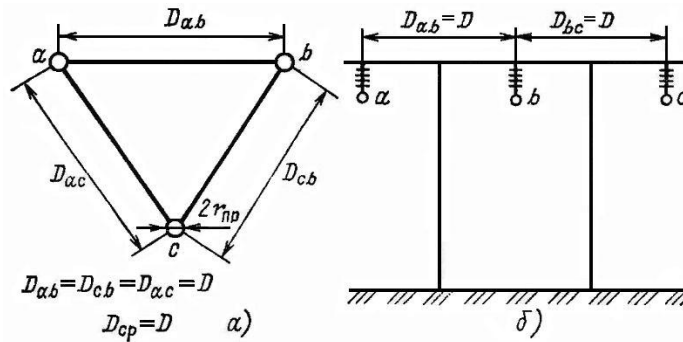


Рис. 3.2. Расположение проводов линии электропередачи:  
 а – по углам равностороннего треугольника; б – при горизонтальном расположении фаз

Для линии с расщепленными проводами второе слагаемое в (2.3) уменьшается в  $n_\phi$  раз, т. е. имеет вид  $0,016/n_\phi$ . Удельное активное сопротивление фазы линии с расщепленными проводами определяется так:

$$r_0 = r_{0np} / n_\phi,$$

где  $r_{0np}$  — удельное сопротивление провода в фазе, определенное по справочным таблицам.

Для стальных проводов  $x_0$  определяется по справочным таблицам в зависимости от сечения и тока.

Активная проводимость линии соответствует двум видам потерь активной мощности: от тока утечки через изоляторы и на корону.

Токи утечки через изоляторы малы, и потерями мощности в изоляторах можно пренебречь. В воздушных линиях напряжением 110 кВ и выше при определенных условиях напряженность электрического поля на поверхности провода возрастает и становится больше критической. Воздух вокруг провода интенсивно ионизируется, образуя свечение — корону. Короне соответствуют потери активной мощности. Наиболее радикальным средством снижения потерь мощности на корону является увеличение диаметра провода. В связи с этим задаются наименьшие допустимые сечения по короне: для ЛЭП 110 кВ — 70 мм<sup>2</sup>; 220 кВ — 240 мм<sup>2</sup>.

При расчете установившихся режимов сетей до 220 кВ активная проводимость не учитывается (рис.3.3,а). В сетях с  $U_{ном} \geq 330$  кВ при расчете режимов необходимо учитывать потери на корону. Обычно при этом учитываются различные виды зависимости потерь на корону от напряжения.

Емкостная проводимость линии  $b_\phi$  обусловлена емкостями между проводами разных фаз и емкостью провод — земля и определяется следующим образом:

$$b_\phi = b_0 l, \tag{3.6}$$

где  $b_0$  — удельная емкостная проводимость, См/км, которая может быть определена по справочным таблицам или по следующей формуле:

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{cp}}{r_{np}}}. \tag{3.7}$$

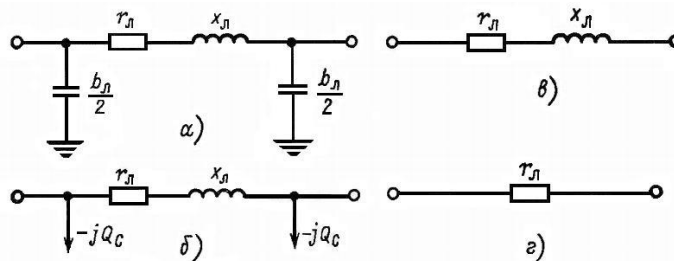


Рис. 3.3. Схемы замещения линий электропередачи:  
 а, б – воздушная линия 110–220 кВ с емкостной проводимостью и с реактивной мощностью, генерируемой емкостью линий; в – воздушная линия  $U_{ном} \leq 35$  кВ; г – кабельная линия  $U_{ном} \leq 10$  кВ

В сетях 110—220 кВ линия электропередачи обычно представляется более простой схемой замещения (рис. 3.3,б). В этой схеме вместо емкостной проводимости (рис.2.3,б) учитывается реактивная мощность, генерируемая емкостью линий. Половина емкостной мощности линии, Мвар, равна

$$Q_C = 3I_C U_\phi = 3U_\phi^2 \frac{1}{2} b_0 l = \frac{1}{2} U^2 b_\phi, \tag{3.8}$$

где  $U_\phi$  и  $U$  — фазное и междуфазное напряжение, кВ;  $I_C$  — емкостный ток на землю,  $I_C = U_\phi b_\Pi / 2$ .

Из (3.8) следует, что мощность  $Q_C$ , генерируемая линией, сильно зависит от напряжения. Чем выше напряжение, тем больше емкостная мощность.

### Тема 3.2. Г-образная схемы замещения двухобмоточного трансформатора

Двухобмоточный трансформатор (рис.234,а) можно представить в виде Г-образной схемы замещения (рис.3.4,б).

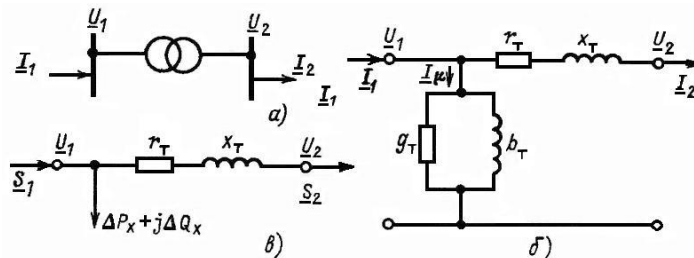


Рис. 3.4. Двухобмоточный трансформатор:  
а – условное обозначение; б – Г-образная схема замещения;  
в – упрощенная схема замещения

Продольная часть схемы замещения содержит  $r_T$  и  $x_T$  — активное и реактивное сопротивления трансформатора. Эти сопротивления равны сумме соответственно активных и реактивных сопротивлений первичной и приведенной к ней вторичной обмоток. В такой схеме замещения отсутствует трансформация, т. е. отсутствует идеальный трансформатор, но сопротивление вторичной обмотки приводится к первичной. При этом приведении сопротивление вторичной обмотки умножается на квадрат коэффициента трансформации.

Если сети, связанные трансформатором, рассматриваются совместно, причем параметры сетей не приводятся к одному базисному напряжению, то в схеме замещения трансформатора учитывается идеальный трансформатор.

Поперечная ветвь схемы (ветвь намагничивания) состоит из активной и реактивной проводимостей  $g_T$  и  $b_T$ . Активная проводимость соответствует потерям активной мощности в стали трансформатора от тока

намагничивания  $I^\mu$  (рис. 2.4,б). Реактивная проводимость определяется магнитным потоком взаимной индукции в

обмотках трансформатора. В расчетах электрических сетей двухобмоточные трансформаторы при  $U_{в.ном} \leq 220$  кВ представляют упрощенной схемой замещения (рис.2.4,в). В этой схеме вместо ветви намагничивания учитываются в виде дополнительной нагрузки потери мощности в стали трансформатора или потери холостого хода  $\Delta P_x + j\Delta Q_x$ .

### Тема 3.3. Схема замещения трехобмоточного трансформатора

Во многих случаях на подстанции нужны три номинальных напряжения — высшее  $U_B$ , среднее  $U_C$  и низшее  $U_H$ . Для этого можно было бы использовать два двухобмоточных трансформатора (рис.3.6,а). Однако экономичнее применять один трехобмоточный трансформатор (рис.3.6,б), все три обмотки которого имеют магнитную связь (рис.3.7,а). Еще более экономично применение трехобмоточных автотрансформаторов, условное обозначение которых в схемах электрических сетей приведено на рис.3.6,в.

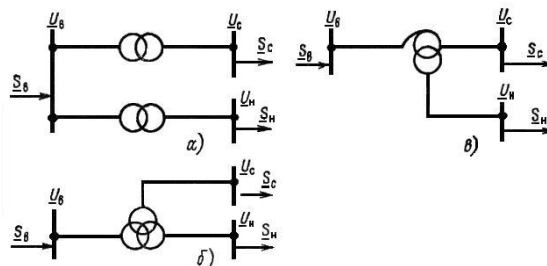


Рис.3.6. Схемы подстанции с тремя номинальными напряжениями: а – два двухобмоточных трансформатора; б – трехобмоточный трансформатор; в – автотрансформатор

Тема 3.4. Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения

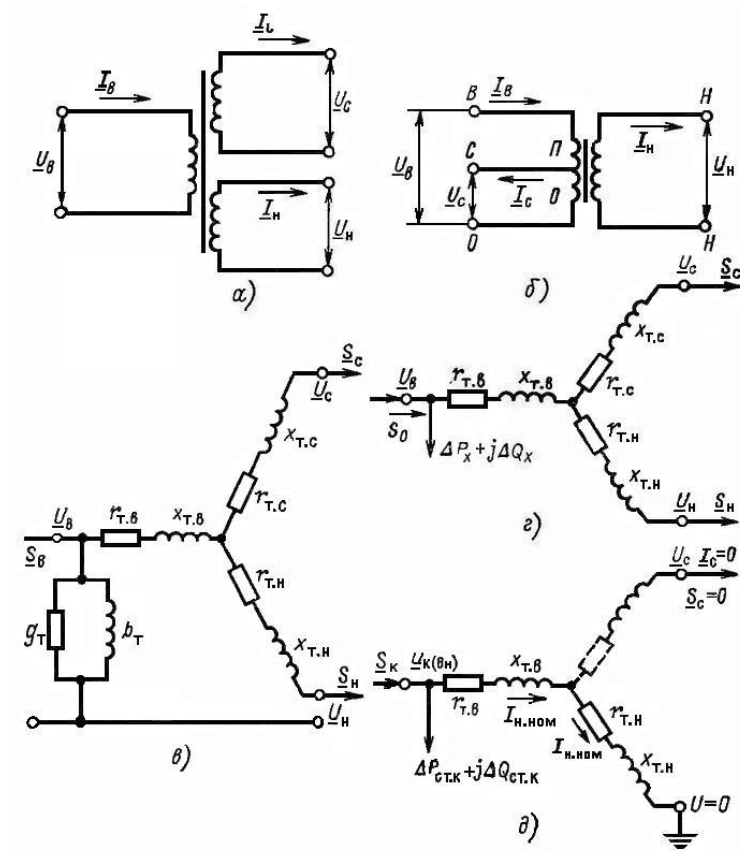


Рис. 3.7. Трехобмоточный трансформатор и автотрансформатор:  
 а, б – схемы соединения обмоток; в, г – Г-образная схема и упрощенная схемы замещения; д – схема опыта КЗ (ВН)

Схема соединения обмоток автотрансформатора показана на рис. 3.7,б. Обмотка низшего напряжения магнитно связана с двумя другими. Обмотки же последовательная и общая (П и О на рис. 3.7,б) непосредственно электрически соединены друг с другом и, кроме того, имеют магнитную связь. По последовательной обмотке течет ток  $I_B$ , а по общей —  $(I_B - I_C)$ . Номинальной мощностью автотрансформатора называют мощность, которую автотрансформатор может принять из сети высшего напряжения или передать в эту сеть при номинальных условиях работы:

$$S_{НОМ} = \sqrt{3} U_{В.НОМ} I_{В.НОМ} \quad (3.9)$$

Эта мощность также называется проходной. Она равна предельной мощности, которую автотрансформатор может передать из сети высшего напряжения в сеть среднего напряжения и наоборот при отсутствии нагрузки на обмотке низшего напряжения. Последовательная обмотка П рассчитывается на типовую мощность (рис.3.7, б).

$$S_{ТИП} = \sqrt{3}(U_{В.НОМ} - U_{С.НОМ}) I_{В.НОМ} = \sqrt{3} U_{В.НОМ} I_{В.НОМ} \left(1 - \frac{U_{С.НОМ}}{U_{В.НОМ}}\right) = \alpha S_{НОМ} \quad (3.10)$$

где  $\alpha = 1 - U_{С.НОМ} / U_{В.НОМ}$  — коэффициент выгоды, показывающий во сколько раз  $S_{ТИП}$  меньше  $S_{НОМ}$ .

## Раздел 4. Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах

### Тема 4.1. Основные методы определения потерь электроэнергии: метод графического интегрирования, метод среднеквадратичного тока, метод времени максимальных потерь

В общем виде, при постоянной нагрузке ЛЭП, потери активной энергии определяются согласно выражению:

$$\Delta W = \Delta P \cdot t \quad (4.1)$$

где  $\Delta P = \text{const}$  – потери активной мощности при неизменной нагрузке;  $t$  – время работы ЛЭП.

Однако в подавляющем большинстве случаев линии работают с переменным во времени графиком нагрузки, поэтому использование выражения (4.1) невозможно и необходимо применять один из следующих методов расчета:

- метод графического интегрирования;
- метод среднеквадратичного тока;
- метод времени максимальных потерь.

Если представить в графическом виде зависимость квадрата тока элемента электрической сети от времени, то площадь ограниченной графиком  $I^2$  фигуры пропорциональна величине потерь энергии в данном элементе (рис.4.1).

Согласно методу графического интегрирования, потери энергии за период времени, изменяющийся от 0 до  $T$ , для общего случая, определяются по выражению:

$$\Delta W = 3 \cdot R \int_0^T I^2 dt \quad (4.2)$$

где  $I(t)$  – ток в момент времени  $t$ .

В случае невозможности аналитического описания функции  $I(t)$ , используется численное интегрирование:

$$\Delta W = 3 \cdot R \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot t_i \quad (4.3)$$

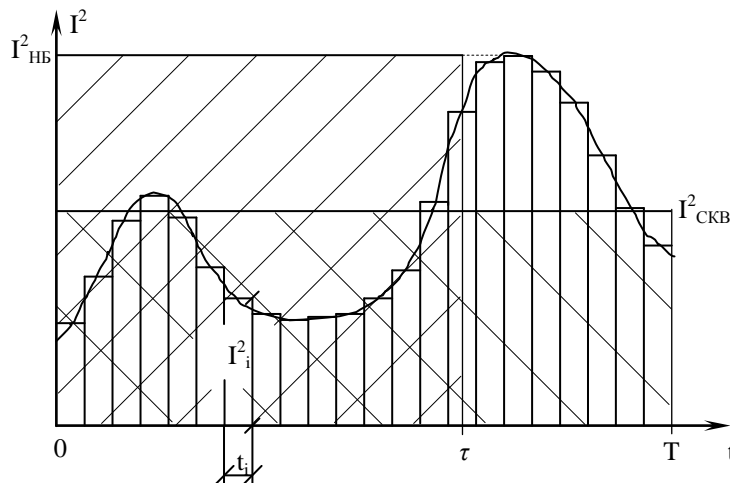


Рис.4.1 Аналитическое и численное представление зависимости квадрата тока ЛЭП от времени.

Если известна зависимость полной мощности от времени, тогда выражение (4.3) примет вид:

$$\Delta W = R \sum_{i=1}^n \frac{S_i^2}{U_i^2} \cdot t_i \quad (4.4)$$

где  $S_i$ ,  $U_i$  – полная мощность и напряжение в момент времени  $i$ .

При использовании (4.4) желательно использовать напряжение  $U_i$  из той же точки схемы, где снималось значение мощности  $S_i$ . Однако вместо  $U_i$  может быть использовано значение номинального напряжения  $U_n$ . При этом точность определения  $\Delta W$  может незначительно снижаться.

Среди прочих методов определения потерь энергии, метод графического интегрирования является самым точным, однако он также является и самым трудоемким. Наиболее часто этот метод применяется при расчетах на ЭВМ. Метод графического интегрирования используется как эталонный метод, для проверки точности других методов.

Среднеквадратичный ток  $I_{СКВ}^2$  – условный ток, неизменный по величине, который, протекая по линии, в течение времени  $T$ , создает такие же потери, что и реальный ток, соответствующий графику нагрузок. Аналитически это можно выразить как:

$$3 \cdot R \cdot \int_0^T I^2 dt = 3 \cdot R \cdot I_{СКВ}^2 \cdot T$$

Отсюда можно выразить среднеквадратичный ток:

$$I_{\text{СКВ}} = \sqrt{\frac{\int_0^T I^2 \cdot dt}{T}} \quad (4.5)$$

Тогда потери энергии по методу среднеквадратичного тока равны:

$$\Delta W = 3 \cdot R \cdot I_{\text{СКВ}}^2 \cdot T \quad (4.6)$$

Если известна среднеквадратичная мощность  $S_{\text{СКВ}}$ , то (4.6) можно переписать в виде:

$$\Delta W = \frac{S_{\text{СКВ}}^2}{U^2} \cdot R \cdot T \quad (4.7)$$

Для облегчения расчётов потерь энергии  $I_{\text{СКВ}}$  можно определять по эмпирическим зависимостям, в частности для сетей напряжением 6÷35 кВ применяется следующее выражение:

$$I_{\text{СКВ}} = I_{\text{НБ}} \cdot \left( 0,12 + T_{\text{НБ}} \cdot 10^{-4} \right) \quad (4.8)$$

Физический смысл  $I_{\text{СКВ}}$  заключается в том, что это такой условный ток, который даёт потери энергии, что и реальный изменяющийся во времени ток. Таким образом, площадь фигуры, ограниченной графиком квадрата тока изменяющейся нагрузки равна площади прямоугольника, ограниченной  $I_{\text{СКВ}}^2$  и  $T$  (рис.4.1).

В соответствии с определением времени максимальных потерь можно записать следующее равенство:

$$3 \cdot R \cdot \int_0^T I^2 \cdot dt = 3 \cdot R \cdot I_{\text{НБ}}^2 \cdot \tau \quad (4.9)$$

Откуда, в аналитическом виде:

$$\tau = \frac{\int_0^T I^2 \cdot dt}{I_{\text{НБ}}^2} \quad (4.10)$$

Таким образом, потери энергии в линии равны:

$$\Delta W = 3 \cdot R \cdot I_{\text{НБ}}^2 \cdot \tau \quad (4.11)$$

При заданной полной мощности:

$$\Delta W = \frac{S_{\text{НБ}}^2}{U^2} \cdot R \cdot \tau \quad (4.12)$$

Метод времени максимальных потерь с использованием выражений (4.11) и (4.12) является самым распространённым, однако его точность определяется погрешностью расчёта  $\tau$ , при этом использование выражения (4.10) эквивалентно применению метода графического интегрирования и имеет минимальную погрешность при высокой трудоёмкости. С другой стороны выражения (4.11) и (4.12) имеют увеличенную погрешность при меньших трудозатратах.

## Тема 4.2. Потери мощности в трансформаторах

Потери в трансформаторе определяются нагрузочной составляющей и потерями холостого хода (рис.4.2).

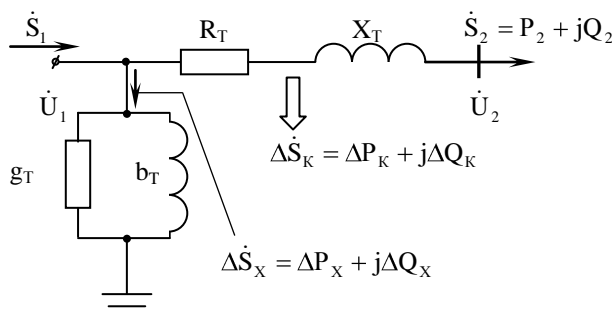


Рис.4.2. К вопросу определения потерь мощности и энергии в трансформаторе.

На рис.4.2. показаны следующие величины:  $\dot{U}_1$  – первичное напряжение трансформатора;  $\dot{U}_2$  – вторичное напряжение, приведенное к первичной обмотке;  $\Delta P_K$  – активные потери короткого замыкания на нагрев обмоток (потери в меди);  $\Delta P_X$  – активные потери холостого хода на перемагничивание стали и создание вихревых токов (потери в стали);  $\Delta Q_K$  – реактивные потери, определяющиеся намагничивающей мощностью трансформатора;  $\Delta Q_X$  – реактивные потери короткого замыкания на создание потоков рассеяния.

Тогда составляющие активных и реактивных потерь мощности в трансформаторе равны:

$$\Delta P_{\text{ТР}} = \Delta P_K + \Delta P_X \quad (4.13)$$

$$\Delta Q_{\text{ТР}} = \Delta Q_{\text{К}} + \Delta Q_{\text{Х}} \quad (4.14)$$

Потери полной мощности в трансформаторе определяются как сумма (4.13) и (4.14):

$$\Delta \dot{S}_{\text{ТР}} = \Delta P_{\text{ТР}} + j\Delta Q_{\text{ТР}} \quad (4.15)$$

Тогда мощность, потребляемая трансформатором из сети равна:

$$\dot{S}_1 = \dot{S}_2 + \Delta \dot{S}_{\text{ТР}} \quad (4.16)$$

В общем случае расчёт потерь может осуществляться как по параметрам схемы замещения, так и по паспортным данным трансформатора:

– по параметрам схемы замещения:

Потери активной и реактивной мощности соответственно:

$$\Delta P_{\text{ТР}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_1^2} \cdot R_{\text{T}} + n \cdot U_1^2 \cdot g_{\text{T}} \quad (4.17)$$

$$\Delta Q_{\text{ТР}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_1^2} \cdot X_{\text{T}} + n \cdot U_1^2 \cdot b_{\text{T}} \quad (4.18)$$

где:  $n$  – число параллельно соединенных трансформаторов на подстанции

– по паспортным данным:

Потери активной мощности:

$$\Delta P_{\text{ТР}} = \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\text{К,НОМ}} \frac{S_2^2}{S_{\text{НОМ}}^2} + n \cdot \Delta P_{\text{Х,НОМ}} \quad (4.19)$$

где  $\Delta P_{\text{К,НОМ}}$ ,  $\Delta P_{\text{Х,НОМ}}$  – паспортные значения активных потерь короткого замыкания и холостого хода.

Учитывая, что величина  $\frac{S_2}{S_{\text{НОМ}}}$  представляет собой коэффициент загрузки трансформатора  $K_3$ , выражение

(4.19) можно переписать в виде:

$$\Delta P_{\text{ТР}} = \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\text{К,НОМ}} \cdot K_3^2 + n \cdot \Delta P_{\text{Х,НОМ}} \quad (4.20)$$

Аналогично (4.20) потери реактивной мощности:

$$\Delta Q_{\text{ТР}} = \frac{1}{n} \cdot \Delta Q_{\text{К,НОМ}} K_3^2 + n \cdot \Delta Q_{\text{Х,НОМ}} \quad (4.21)$$

Применительно к паспортным данным трансформатора:

$$\Delta Q_{\text{ТР}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{U_{\text{К\%}}}{100} \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot K_3^2 + n \cdot \frac{I_{\text{Х\%}}}{100} \cdot S_{\text{НОМ}} \quad (4.22)$$

#### Тема 4.3. Расчет режима ЛЭП при заданной мощности нагрузки и напряжении источника питания методом «в два этапа»

В подавляющем большинстве случаев, при расчёте режимов известными являются следующие величины:  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{S}_2$ ,  $R$ ,  $X$  и  $B$ . Соответственно необходимо определить величины мощности в начале линии  $\dot{S}_1$  и напряжения в конце  $\dot{U}_2$ . В этом случае расчет производится методом “в два этапа”.

На первом этапе напряжение в конце линии принимается равным номинальному, т.е.  $\dot{U}_2 = \dot{U}_{\text{Н}}$ . При этом необходимо определить  $\dot{S}'$  (рис.4.3).

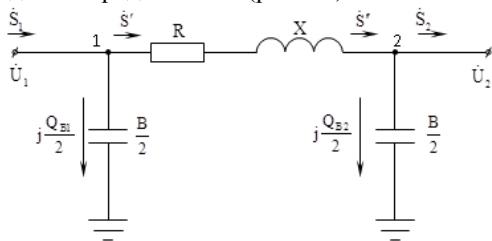


Рис.4.3. Параметры схемы замещения для расчета режима.

Зарядная мощность в конце линии равна:

$$j \frac{Q_{B2}}{2} = j \cdot \dot{U}_{\text{Н}}^2 \cdot \frac{B}{2} \quad (4.23)$$

Поток мощности перед узлом 2:

$$\dot{S}'' = \dot{S}_2 - j \frac{Q_{B2}}{2} \quad (4.24)$$

Поток мощности после узла 1:

$$\dot{S}' = \dot{S}'' + \Delta \dot{S} = \dot{S}'' + \frac{S''^2}{U_H^2} \cdot \mathbf{R} + j \cdot X \quad (4.25)$$

На втором этапе по закону Ома определяется новое значение напряжения  $\dot{U}_2$  через величину  $\dot{S}'$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \sqrt{3} \cdot \dot{I} \cdot Z = \dot{U}_1 - \frac{\dot{S}'}{U_1} \cdot \mathbf{R} + j \cdot X \quad (4.26)$$

Полученную величину  $\dot{U}_2$  необходимо подставить в выражение (4.23) и (4.24) вместо  $\dot{U}_H$ . При этом подстановка и расчет  $\dot{U}_2$  производится до тех пор, пока его величина не перестанет изменяться в пределах заданной погрешности.

Таким образом, основным недостатком метода расчёта “в два этапа” в форме мощностей является то, что результаты итерационного расчёта определяются с некоторой погрешностью. Это обусловлено тем, что на первом этапе в качестве исходного приближения используется номинальное напряжение вместо реального.

## Раздел 5. Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии

### Тема 5.1. Основные показатели качества

Основные показатели качества электрической энергии (ПКЭ), прежде всего, определяются параметрами режима электрической сети: напряжением и частотой.

В отечественных электрических сетях показатели качества регламентируются требованиями ГОСТ. К ним относятся:

- отклонение частоты  $\Delta f$  :

$$\Delta f = f - f_{\text{ном}} \quad (5.1)$$

где  $f$ ,  $f_{\text{ном}}$  – фактическое и номинальное значение частоты;

- установившееся отклонение напряжения  $\delta U_y$  :

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \quad (5.2)$$

где  $U_y$  - установившееся значение напряжения;  $U_{\text{ном}}$  - номинальное значение напряжения.

- размах изменения напряжения  $\delta U_t$  :

$$\delta U_t = \frac{|U_{\text{max}} - U_{\text{min}}|}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \quad (5.3)$$

где  $U_{\text{max}}$ ,  $U_{\text{min}}$  - максимальное и минимальное значения напряжения.

- доза фликера  $P_t$  - длительная и кратковременная, характеризующая степень воздействия колебаний светового потока на зрение человека;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой междуфазного (фазного) напряжения  $K_U$  :

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (5.4)$$

где  $U_1$  - действующее значение напряжения основной частоты;  $U_n$  - действующее значение напряжения  $n$ -ной гармоники;

- коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$  :

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \quad (5.5)$$

- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$  :

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \quad (5.6)$$

где  $U_2$  - действующее значение напряжения обратной последовательности;

- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$  :

$$K_{0U} = \frac{U_0}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \quad (5.7)$$

где  $U_0$  - действующее значение напряжения нулевой последовательности;

- длительность провала напряжения  $\Delta t_n$  :



- импульсное напряжение  $U_{имп}$  ;
- коэффициент временного перенапряжения  $K_{перU}$  .

$$K_{перU} = \frac{U_{amax}}{\sqrt{2}U_{ном}} \quad (5.8)$$

где  $U_{amax}$  - максимальное амплитудное значение напряжения.

Все ПКЭ имеют нормально-допустимые и предельно-допустимые величины (табл.5.1). Электрическая сеть считается соответствующей требованиям по качеству электроэнергии, если предельно допустимые уровни наблюдаются не чаще чем в 5% измерений, причём в остальных 95% измерений ПКЭ не должны превышать нормально-допустимых значений. Если в одном или более случаях ПКЭ превышает предельно-допустимые значения, то электрическая сеть считается несоответствующей требованиям по качеству электроэнергии.

Таблица 5.1. – Нормально допустимые и предельно допустимые уровни некоторых показателей качества электроэнергии

ПКЭ	$\delta U_y, \%$			$K_U, \%$				$K_{2U}, \%$	$K_{0U}, \%$	$\Delta f, \text{Гц}$	$K_{U(n)}, \%$ Нечетная (четная) гармоника			
	до 1 кВ	6÷20 кВ	35кВ и выше	до 1 кВ	6÷20 кВ	35кВ	110кВ				до 1 кВ	6÷20 кВ	35кВ	110кВ
Норм.	±5	-	-	5	4	3	2	2	2	±0,2	-	-	-	-
Пред.	±10	±10	±10	10	8	6	4	4	4	±0,4	6(3)	5(2,5)	4(2)	2(1)

В настоящее время в электрических сетях сложилась практика, когда поставщики электроэнергии сертифицируются только по двум показателям, измеряемым в центрах питания, – отклонению частоты и установившемуся отклонению напряжения. Это связано, прежде всего, с отсутствием действующей нормативной базы, регламентирующей надбавки и штрафы за пониженное качество электроэнергии.

### Тема 5.2. Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения

В общем виде выражение баланса реактивной мощности (РМ) в электрической сети имеет вид:

$$\sum Q_{выр} = \sum Q_{потр} \quad (5.9)$$

где  $Q_{выр}$  и  $Q_{потр}$  – вырабатываемая и потребляемая в электрической сети мощность.

Выработка реактивной мощности определяется генерацией на электростанциях  $\sum Q_G$ , выработкой устройствами компенсации РМ  $\sum Q_{КУ}$  и генерацией реактивной мощности линиями электропередачи  $\sum Q_B$ :

$$\sum Q_{выр} = \sum Q_G + \sum Q_{КУ} + \sum Q_B \quad (5.10)$$

Потребление РМ определяется мощностью нагрузок  $\sum Q_H$ , потерями в линиях электропередачи РМ  $\sum \Delta Q_L$  и потерями в трансформаторах  $\sum \Delta Q_T$ :

$$\sum Q_{потр} = \sum Q_H + \sum \Delta Q_L + \sum \Delta Q_T \quad (5.11)$$

В среднем около 50% потребления РМ в энергосистеме приходится на потребителей, при этом на потери в линиях приходится до 15%. Остальные 35% расходуются на потери в трансформаторах.

Баланс реактивной мощности в узлах электрической сети оказывает значительное влияние на уровни напряжения. В частности увеличение выработки РМ в узле приводит к росту напряжения, в то время как дефицит реактивной мощности приводит к снижению напряжения в узле.

Таким образом, одним из эффективных способов регулирования напряжения в узлах является регулирование баланса РМ.

### Тема 5.3. Баланс активной мощности

Частота в энергосистеме является общесистемным параметром и определяется частотой вращения синхронных генераторов, питающих данную систему.

В общем виде выражение баланса активной мощности имеет вид:

$$\sum P_G = \sum P_{п} \quad (5.12)$$

где  $\sum P_G$  – суммарная выработка активной мощности генераторами электростанций;  $\sum P_{п}$  - потребление активной мощности в энергосистеме, которое определяется как сумма активных нагрузок потребителей  $\sum P_H$  и активных потерь в энергосистеме  $\sum \Delta P$ .

$$\sum P_{п} = \sum P_H + \sum \Delta P \quad (5.13)$$

В общем виде связь баланса активной мощности с частотой в энергосистеме определяется статическими характеристиками нагрузки и генератора по частоте (рис.5.1).

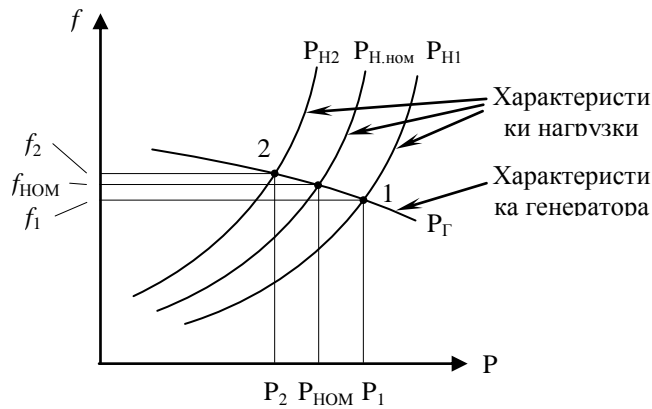


Рис.5.1. Статические характеристики нагрузки и генератора по частоте.

Согласно рисунку 5.1 при увеличении потребления нагрузкой активной мощности статическая характеристика нагрузки по частоте переместится вправо до  $P_{Н1}$ . При этом баланс активной мощности в энергосистеме установится в точке 1, при новом пониженном значении частоты  $f_1$ . И наоборот, снижение активной нагрузки в энергосистеме приведёт к перемещению статической характеристики нагрузки по частоте влево до  $P_{Н2}$ , а баланс активной мощности установится при повышенном значении частоты  $f_2$ .

Таким образом, рост частоты в энергосистеме наблюдается при дефиците активной мощности, в то время как её избыток приводит к снижению частоты. При этом выражение баланса (9.12) всегда выполняется, но при различных значениях частоты.

К причинам нарушения баланса активной мощности относятся:

- ремонтное или аварийное отключение генераторов;
- незапланированный рост нагрузки;
- отключение межсистемных линий электропередачи.

В последнем случае изменение частоты может наблюдаться в обеих энергосистемах, связанных отключаемой межсистемной линией (рис.5.2).

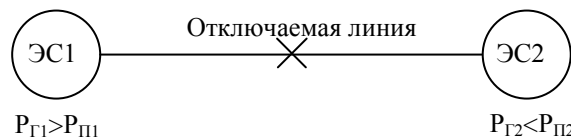


Рис.5.2. К вопросу об отключении межсистемной линии электропередачи.

До отключения линии избыток активной мощности перетекает из ЭС1 в ЭС2, и баланс в обеих энергосистемах соблюдается при одной общей частоте:  $P_{Г1} + P_{Г2} = P_{П1} + P_{П2}$ . Однако поскольку баланс внутри систем не соблюдается, то отключение линии приведёт к росту частоты в ЭС1 и её снижению в ЭС2.

В настоящее время, задача регулирования частоты в энергосистемах решается гидроэлектростанциями, которые являются наиболее маневренными по сравнению с тепловыми и атомными станциями, и имеют наименьшую себестоимость выработки электроэнергии. В подавляющем большинстве случаев функцию точного регулирования частоты осуществляет одна мощная станция энергосистемы, работающая с переменным суточным графиком нагрузки. Остальные станции работают с постоянным или базовым графиком. Координация режимов работы всех станций энергосистемы осуществляется из единого диспетчерского центра.

Задачи оперативного управления выработкой активной мощности и регулирования частоты на отдельных электростанциях энергосистемы осуществляются групповыми регуляторами активной и реактивной мощности (ГРАРМ). Такие регуляторы позволяют оперативно реагировать на изменение нагрузки в энергосистеме и регулировать выработку мощности всей станцией в целом. Более подробно вопрос регулирования частоты в энергосистеме рассмотрен далее.

Основными мероприятиями по борьбе с повышением частоты являются снижение мощности генераторов или их отключение. В случае понижения частоты необходимо увеличивать выработку мощности генераторами или включать резервные агрегаты.

Генерирующие резервы можно разделить на:

- нагрузочные, предназначенные для покрытия случайной нагрузки;
- ремонтные, для обеспечения текущих и капитальных ремонтов;
- аварийные, необходимые для замены аварийно вышедших из работы агрегатов.

При отсутствии доступных резервов применяется автоматическая частотная разгрузка (АЧР), которая срабатывает при снижении частоты в энергосистеме ниже предельно допустимого уровня и отключает часть нагрузок системы.

## Тема 5.4. Регулирование частоты вращения турбины

В общем случае, под процессом регулирования частоты в энергосистеме понимается поддержание частоты в допустимых пределах.

Существует три взаимосвязанных вида регулирования частоты: первичное, вторичное и третичное.

Первичное регулирование частоты осуществляется автоматическими регуляторами частоты вращения (АРЧВ) турбин. При изменении частоты вращения турбины такие регуляторы осуществляют воздействие на регулирующие органы турбины, изменяя подачу энергоносителя. При повышении частоты вращения регулятор уменьшает впуск энергоносителя в турбину, а при снижении частоты – увеличивает.

Назначение первичного регулирования заключается в удержании частоты в допустимых пределах при нарушении баланса активной мощности. При этом частота до номинального значения не восстанавливается, что обусловлено статизмом регуляторов.

Вторичное регулирование частоты – процесс восстановления планового баланса мощности путём использования вторичной регулирующей мощности для компенсации возникшего небаланса, ликвидации перегрузки транзитных связей, восстановления частоты и использованных при первичном регулировании резервов первичной регулирующей мощности. Вторичное регулирование может осуществляться автоматически или по командам диспетчера.

Вторичное регулирование начинается после действия первичного и предназначено для восстановления номинальной частоты и плановых перетоков мощности между энергосистемами.

Третичное регулирование используется для восстановления резервов первичного и вторичного регулирования и для оказания взаимопомощи энергосистемам при неспособности отдельных энергосистем в составе ОЭС самостоятельно обеспечить вторичное регулирование.

Следует также отметить, что участие в первичном регулировании частоты является обязательным для всех электростанций, тогда как другие виды регулирования частоты осуществляются отдельными электростанциями объединённых энергосистем.

Частота в энергосистеме определяется точкой пересечения статической характеристики генераторов и нагрузки по частоте (рис.5.3, точка 0). В свою очередь, частота вращения генераторов определяется частотой вращения турбин. Каждая турбина снабжена направляющим аппаратом, который регулирует скорость энергоносителя, пропускаемого через турбину. В свою очередь направляющий аппарат управляется с помощью ГРАМ станции.

В случае понижения частоты в энергосистеме статическая характеристика нагрузки по частоте перемещается вправо (рис.5.3) и баланс активной мощности в системе устанавливается в точке 1 при частоте  $f$ .

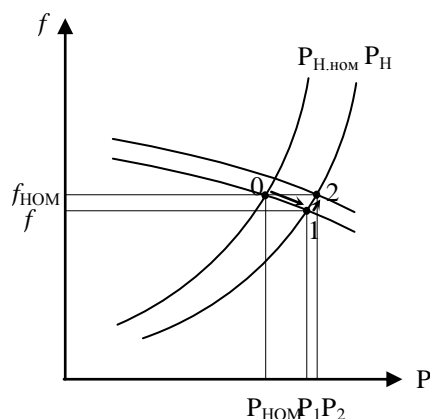


Рис.5.3. Регулирование частоты в энергосистеме.

Для восстановления значения частоты на уровне  $f_{НОМ}$  ГРАМ открывает направляющий аппарат, увеличивая пропуск энергоносителя через турбину. При этом статическая характеристика генератора по частоте перемещается вверх, и баланс активной мощности устанавливается в точке 2, а частота восстанавливается до  $f_{НОМ}$ .

Таким образом, для увеличения частоты в системе необходима дополнительная активная мощность.

Аналогичным образом регулятор турбины снижает частоту при уменьшении нагрузки энергосистемы путём закрытия направляющего аппарата.

## Раздел 6. Регулирование напряжения в электроэнергетической системе

### Тема 6.1. Регулирование напряжения на электростанциях

Одним из возможных способов регулирования напряжения в электрической сети является использование возможностей генераторов электростанций, устройство которых позволяет регулировать уровень напряжения на шинах путем изменения тока возбуждения. Такое регулирование напряжения называют централизованным.

Конструктивно допустимыми пределами регулирования являются  $(0,95 \div 1,05) U_{\text{НОМ.Г}}$ . При этом номинальное напряжение генераторов больше номинального напряжения сетей на 5% [6,10]. Например, в сетях 6 и 10 кВ номинальное напряжение генераторов составляет 6,3 и 10,5кВ соответственно. Тогда диапазон регулирования напряжения для таких генераторов составляет 6÷6,6 и 10÷11кВ соответственно.

Нетрудно показать, что этого диапазона недостаточно для качественного регулирования напряжения.

Так приближенная величина потерь напряжения в трансформаторе может быть определена исходя из выражения:

$$\Delta U_{T\%} \approx 0,1 \cdot S_{T*} \cdot 100 \quad (6.1);$$

где  $S_{T*}$  – мощность нагрузки трансформатора, приведенная к номинальной:

$$S_{T*} = \frac{S_T}{S_{\text{НОМ}}} \quad (6.2);$$

где  $S_T$  – мощность нагрузки трансформатора;  $S_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность трансформатора.

Поскольку в реальных электрических сетях от генератора до потребителя имеется не менее 3÷4 ступеней трансформации, то в соответствии с (6.1) суммарные потери напряжения составляют:

$$\sum \Delta U_{T\%} \approx (0,3 \div 0,4) \cdot S_{T*} \cdot 100 \quad (6.3).$$

Если принять во внимание, что приведенная мощность трансформаторов в наибольшем режиме составляет  $S_{T*} = 1$ , а в наименьшем  $S_{T*} = 0,4$ , то можно определить суммарные значения потерь напряжения для режима наибольших и наименьших нагрузок соответственно:  $\sum \Delta U_{T\%.\text{нб}} = (30 \div 40)\%$  и  $\sum \Delta U_{T\%.\text{нб}} = (12 \div 16)\%$ .

Результаты практических замеров установившегося отклонения напряжения в реальных электрических сетях показали, что  $\delta U_y = (18 \div 24)\%$ .

В целом, можно выделить две причины невозможности широкого использования генераторов в качестве основного средства регулирования напряжения:

- диапазон регулирования напряжения генераторов недостаточен для обеспечения соответствия качества электрической энергии требованиям;
- существует трудность согласования уровней напряжения у близких и дальних потребителей.

Таким образом, централизованное регулирование с помощью генераторов применяется только как вспомогательное средство регулирования напряжения.

### Тема 6.2. Трансформаторы с РПН и ПБВ

Рассмотрим однолинейную схему трансформатора с ПБВ (рис. 6.1), на которой имеются 5 регулировочных ответвлений. При подключении трансформатора через основное ответвление коэффициент трансформации соответствует номинальному.

Для увеличения напряжения на низкой стороне необходимо перейти на ответвление с меньшим количеством витков, при этом коэффициент трансформации будет уменьшен, а напряжение на низкой стороне увеличится.

Диапазон регулирования напряжения трансформаторов с ПБВ составляет  $\pm 2 \times 2,5\%$  ( $\pm 5$ ). В настоящее время большинство силовых трансформаторов с напряжениями 6÷10кВ на высокой стороне выпускаются с устройством ПБВ.

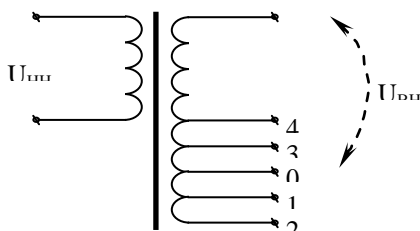


Рис.6.1. Принципиальная электрическая схема трансформатора с ПБВ.

Однако в большинстве системообразующих и распределительных сетей высокого напряжения использование трансформаторов с ПБВ не представляется возможным, поскольку одним из важнейших требований, предъявляемых к этим сетям, является бесперебойность, а переключатели ПБВ требуют

обязательного отключения нагрузки при переключении ответвлений. Для решения данной проблемы и был разработан переключатель РПН. Существует много вариантов схем РПН, но для пояснения принципа работы рассмотрим упрощенную схему переключателя (рис. 6.2).

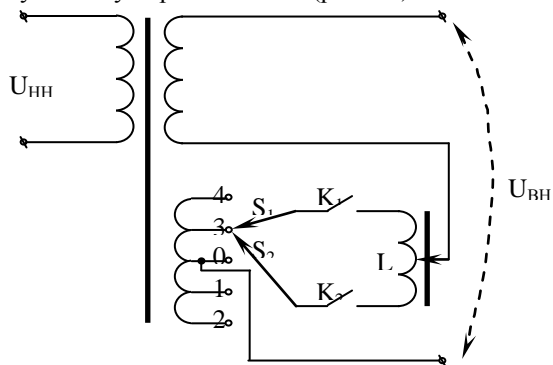


Рис. 6.2. Упрощенная принципиальная электрическая схема трансформатора с РПН.

Обмотка высокого напряжения трансформатора с РПН содержит две части: регулируемую и нерегулируемую. На регулируемой части имеется ряд ответвлений к неподвижным контактам 0 – 4. Переключатель РПН имеет также подвижные контакты  $S_1$  и  $S_2$ , контакторы  $K_1$  и  $K_2$ , а также сдвоенный реактор LR.

Для перехода на другое ответвление переключатель РПН осуществляет следующие действия:

- отключается контактор  $K_1$ ;
- подвижный контакт  $S_1$  переводится на соседнее ответвление;
- замыкается контактор  $K_1$ , при этом через реактор LR протекают уравнивающие токи, величина которых незначительна, поскольку реактор обладает большой индуктивностью;
- отключается контактор  $K_2$ ;
- подвижный контакт  $S_2$  переводится на ответвление, куда был переведён  $S_1$ ;
- замыкается контактор  $K_2$ .

В нормальном режиме работы токи в плечах реактора LR создают одинаковые по величине, и противоположные по направлению магнитные поля, которые компенсируют друг друга, в результате чего индуктивное сопротивление реактора оказывается весьма незначительным.

Управление процессом работы переключателем РПН осуществляется системой автоматического регулирования коэффициента трансформации (АРКТ).

Диапазон регулирования напряжения большинства двухобмоточных трансформаторов с РПН составляет  $\pm 9 \times 1.78\%$  ( $\pm 16\%$ ) или  $\pm 8 \times 1.5\%$  ( $\pm 12\%$ ) в зависимости от класса напряжения.

Следует отметить, что применение РПН экономически оправдано только на мощных трансформаторах, поскольку на маломощных стоимость переключателя оказывается сопоставима со стоимостью самого трансформатора.

### Тема 6.3. Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов

Существует несколько методов выбора регулировочных ответвлений, наиболее простым из которых является метод, основанный на непосредственном определении напряжения регулировочного ответвления.

Для реализации данного метода используется 3 этапа:

- Определение напряжения на низкой стороне  $U'_2$ , приведённого к напряжению высокой стороны трансформатора  $U_1$ .

$$U'_2 = U_1 - \Delta U_{\text{ТР}} \quad (6.4)$$

где  $\Delta U_{\text{ТР}}$  - потери напряжения в трансформаторе.

Величина потерь напряжения может быть определена двумя способами:

- а) через параметры схемы замещения  $R_T$  и  $X_T$ :

$$\Delta U_{\text{ТР}} = \frac{P' \cdot R_T + Q' \cdot X_T}{U_1} \quad (6.5)$$

$$P' = P_H + \Delta P_{\text{ТР}} \quad (6.6)$$

$$Q' = Q_H + \Delta Q_{\text{ТР}} \quad (6.7)$$

где  $P_H$ ,  $Q_H$  - нагрузка на низкой стороне трансформатора;  $\Delta P_{\text{ТР}}$  и  $\Delta Q_{\text{ТР}}$  - нагрузочные потери активной и реактивной мощности в трансформаторе (потери в меди).

- б) через паспортные данные трансформатора:

$$\Delta U_{\text{ТР}} = \frac{U_{\text{В.НОМ}}}{100} \cdot \left( U_{\text{А\%}} \cdot \cos \varphi_H + U_{\text{Р\%}} \cdot \sin \varphi_H \right) \cdot K_3 \quad (6.8)$$

где  $\Delta U_{\text{А\%}}$  и  $\Delta U_{\text{Р\%}}$  - активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания;  $K_3$  - коэффициент загрузки трансформатора.

$$\Delta U_{A\%} = \frac{P_K}{S_{НОМ}} \cdot 100\% \quad (6.9)$$

$$\Delta U_{P\%} \approx U_{K\%} \quad (6.10)$$

$$K_3 = \frac{S_H}{n \cdot S_{НОМ}} = \frac{\sqrt{P_H^2 + Q_H^2}}{n \cdot S_{НОМ}} \quad (6.11)$$

$$\varphi_H = \arctg\left(\frac{Q_H}{P_H}\right) \quad (6.12)$$

где  $P_H$ ,  $Q_H$  и  $S_H$  - активная, реактивная и полная мощности нагрузки трансформатора;  $n$  - количество параллельно работающих трансформаторов.

- Определение желаемого напряжения на высокой стороне:

$$U_{В.Ж.} = U_1 - \Delta U_{ТР} \cdot \frac{U_{Н.НОМ}}{U_{2.Ж.}} \quad (6.13)$$

где:  $U_{Н.НОМ}$  - номинальное напряжение трансформатора на низкой стороне;  $U_{2.Ж.}$  - желаемое напряжение на низкой стороне.

В зависимости от режима работы электрической сети рекомендуется применять  $U_{2.Ж.} = 1,05 \cdot U_{НОМ.СЕТИ}$  и  $U_{2.Ж.} = (\div 1,02) \cdot U_{НОМ.СЕТИ}$  для максимального и минимального режимов соответственно.

- Выбор номинального напряжения регулировочного ответвления, ближайшего к  $U_{В.Ж.}$  :

Напряжение ступени регулирования:

$$\Delta U_{СТ} = \frac{\Delta U_{СТ\%}}{100} \cdot U_{В.НОМ} \quad (6.14)$$

где:  $\Delta U_{СТ\%}$  - напряжение ступени регулирования в процентах от номинального (в зависимости от типа трансформатора 1,5% или 1,78%).

Номер ответвления, соответствующего желаемому напряжению:

$$n = \frac{U_{В.Ж.} - U_{В.НОМ}}{\Delta U_{СТ}} \quad (10.17)$$

Полученное значение  $n$  необходимо округлить до ближайшего целого, с учётом предельного значения  $n$ , определяемого конструкцией переключателя РПН ( $\pm 8$  или  $\pm 9$ ).

Напряжение регулировочного ответвления:

$$U_{ОТ} = U_{В.НОМ} \pm n \cdot \Delta U_{СТ} \quad (6.15)$$

Правильность выбора знака в (6.15) проверяется выполнением условия  $U_{ОТ} = U_{В.Ж.}$

- Определение действительного напряжения на выходе трансформатора:

$$U_{2.Д.} = U_1 - \Delta U_{ТР} \cdot \frac{U_{Н.НОМ}}{U_{ОТ}} \quad (6.16)$$

В подавляющем большинстве случаев выбор ответвлений трансформаторов с РПН необходимо выполнять для максимальных и минимальных режимов работы сети.

#### Тема 6.4. Поперечная компенсация реактивной мощности

Под компенсацией реактивной мощности понимается выработка и потребление реактивной мощности, так называемыми компенсирующими устройствами (КУ), к которым относятся конденсаторные батареи, синхронные компенсаторы, реакторы и статические источники реактивной мощности.

Основными целями установки компенсирующих устройств являются:

- Обеспечение баланса реактивной мощности

$$Q_{Г(60\%)} + Q_{В(20\%)} + Q_{К(20\%)} = Q_{НАГ} + \Delta Q_{Л} + \Delta Q_{Т} \quad (6.17)$$

В среднем генераторами вырабатывается около 60% потребляемой реактивной мощности. Недостающие 40% обусловлены как зарядной мощностью линий  $Q_{В}$  (20%) так и выработкой компенсирующими устройствами (20%).

- Снижение потерь электроэнергии.
- Регулирование напряжения.

Снижение потерь электроэнергии может быть получено путём установки КУ в непосредственной близости от потребителя. При этом вырабатываемая компенсирующими устройствами реактивная мощность потребляется нагрузкой, а поток реактивной мощности по линии от генератора уменьшается (рис.6.3).

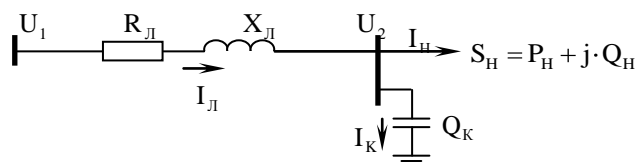


Рис.6.3. Параллельная компенсация реактивной мощности

Поток мощности по линии без компенсирующих устройств равен:

$$S_{\text{л}} = P_{\text{н}} + j \cdot Q_{\text{н}} \quad (6.18),$$

После установки компенсирующих устройств величина потока уменьшится на величину  $j \cdot Q_{\text{к}}$ :

$$S_{\text{л}} = P_{\text{н}} + j \cdot (Q_{\text{н}} - Q_{\text{к}}) \quad (6.19),$$

Таким образом, после установки компенсирующих устройств, за счет уменьшения величины реактивной мощности может быть увеличена передаваемая активная мощность.

Потери активной мощности до установки КУ равны:

$$\Delta P = \frac{P_{\text{н}}^2 + Q_{\text{н}}^2}{U^2} \cdot R_{\text{л}} \quad (6.20).$$

После установки КУ величина потерь мощности равна:

$$\Delta P_{\text{КУ}} = \frac{P_{\text{н}}^2 + (Q_{\text{н}} - Q_{\text{к}})^2}{U^2} \cdot R_{\text{л}} \quad (6.21).$$

В соответствии с выражением (10.52), после установки КУ величина потерь активной мощности в линии снижается.

Аналогичным способом можно показать снижение потерь напряжения. До компенсации можно записать:

$$\Delta U = \frac{P_{\text{н}} \cdot R_{\text{л}} + Q_{\text{н}} \cdot X_{\text{л}}}{U} \quad (6.23)$$

После установки КУ величина потерь напряжения равна:

$$\Delta U_{\text{КУ}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot R_{\text{л}} + (Q_{\text{н}} - Q_{\text{к}}) \cdot X_{\text{л}}}{U} \quad (6.24).$$

### 4.3. Лабораторные работы

Учебным планом не предусмотрено.

### 4.4. Практические занятия

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование тем практических занятий</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах (час.)</i>
1	1.	Выбор номинального напряжения и сечения проводов ЛЭП	2	разбор конкретных ситуаций (1 час.)
2	3.	Схема замещения ЛЭП и расчет ее параметров	2	разбор конкретных ситуаций (1 час.)
3	3.	Схема замещения трансформатора и расчет ее параметров	2	-
4	4.	Расчет потерь напряжения в ЛЭП	2	-
5	4.	Расчет потерь мощности и энергии в ЛЭП	2	-
6	4.	Расчет потерь мощности и энергии в трансформаторах	2	разбор конкретных ситуаций (1 час.)
7	4.	Расчет режима работы электрической сети	2	разбор конкретных ситуаций (1 час.)
8	6.	Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов	2	-

9	6.	Выбор параметров установки поперечной компенсации	2	разбор конкретных ситуаций (1 час.)
<b>ИТОГО</b>			<b>18</b>	<b>5</b>

#### 4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект

Тема: «Проектирование районной электрической сети»

Цель: приобретение навыков проектирования, расчета и оптимизации режимов работы электрических сетей.

Структура:

1. Расчет нагрузок подстанций и выбор возможных вариантов конфигурации сети.
2. Выбор номинального напряжения и сечения провода линий электропередачи.
3. Выбор трансформаторов на подстанциях.
4. Расчет потерь напряжения и мощности в линиях электропередачи и в трансформаторах.
5. Техничко-экономическое сравнение вариантов сети.
6. Снижение потерь мощности при помощи установок поперечной компенсации.

Рекомендуемый объем: Пояснительная записка объемом 30-35 страниц должна содержать титульный лист, задание, описание выполняемых действий по каждому разделу и полученные результаты.

Выдача задания, защита КП проводится в соответствии с календарным учебным графиком.

Оценка	Критерии оценки курсового проекта
отлично	соответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; правильность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами, самостоятельность выполнения; оформление работы ;соответствует требованиям; грамотность, отсутствие стилистических ошибок; уверенное владение материалом при защите.
хорошо	соответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; правильность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами; самостоятельность выполнения; оформление работы; не полностью соответствует требованиям; грамотность, отсутствие стилистических ошибок; хорошее владение материалом при защите.
удовлетворительно	не полное соответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; неточность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами, переходными характеристиками; частичная самостоятельность выполнения; оформление работы; не полностью соответствует требованиям; наличие некоторых стилистических ошибок; не уверенное владение материалом при защите.
неудовлетворительно	несоответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; неправильность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами, переходными характеристиками; отсутствие самостоятельности выполнения; оформление работы; не соответствует требованиям; отсутствие владения материалом при защите.



**5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

<i>Компетенции</i> <i>№, наименование</i> <i>разделов дисциплины</i>	<i>Кол-во</i> <i>часов</i>	<i>Компетенции</i>			<i>Σ</i> <i>комп.</i>	<i>t<sub>ср</sub>, час</i>	<i>Вид</i> <i>учебных занятий</i>	<i>Оценка</i> <i>результатов</i>
		<i>ОК</i>	<i>ОПК</i>	<i>ПК</i>				
		<i>7</i>	<i>3</i>	<i>3</i>				
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>1.</b> Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения.	20	+	+	+	3	6,66	Лк, ПЗ, СРС	Экзамен, КП
<b>2.</b> Электрические нагрузки предприятий.	5	+	+	+	3	1,67	Лк, СРС	Экзамен, КП
<b>3.</b> Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов.	23	+	+	+	3	7,66	Лк, ПЗ, СРС	Экзамен, КП
<b>4.</b> Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах.	22	+	+	+	3	7,34	Лк, ПЗ, СРС	Экзамен, КП
<b>5.</b> Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии.	17	+	+	+	3	5,67	Лк, СРС	Экзамен, КП
<b>6.</b> Регулирование напряжения в электроэнергетической системе.	21	+	+	+	3	7	Лк, ПЗ, СРС	Экзамен, КП
<b>всего часов</b>	<b>108</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>3</b>	<b>36</b>		

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Лыкин, А.В. Электрические системы и сети: учебное пособие / А. В. Лыкин. - Москва: Логос, 2006. - 254 с.
2. Справочник по проектированию электрических сетей: справочное издание / Под ред. Д. Л. Файбисовича. - Москва: НЦ ЭНАС, 2006. - 320 с.

## 7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	Наименование издания	Вид занятия (Лк, ЛР, ПЗ, КП)	Количество экземпляров в библиотеке, шт.	Обеспеченность, (экз./ чел.)
1	2	3	4	5
<b>Основная литература</b>				
1.	Струмеляк, А.В. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие / А.В. Струмеляк. – Братск: БрГУ, 2014. – 186 с.	Лк, ПЗ	73	1
<b>Дополнительная литература</b>				
2.	Игнатьев, И.В. Электрические системы и сети: учебное пособие / И.В. Игнатьев. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 210 с.	Лк, ПЗ, КП	139	1
3.	Ванюков, А.П. Передача и распределение электроэнергии: методические указания / А. П. Ванюков, И. В. Игнатьев, Е. М. Савицкая. - Братск: БрГТУ, 2004. - 64 с.	ПЗ	55	1
4.	Булатов, Ю.Н. Математическое и компьютерное моделирование в расчетах и исследованиях режимов электрических систем: учебное пособие / Ю.Н. Булатов – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. - 207 с.	ПЗ	24	1
5.	Игнатьев, И.В. Проектирование районной электрической сети: методические указания к выполнению курсового проекта / И. В. Игнатьев, А. В. Струмеляк. - Братск: БрГУ, 2014. - 82 с.	КП	112	1

## 8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО - ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ  
[http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r\\_15/cgiirbis\\_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=](http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=).
2. Электронная библиотека БрГУ <http://ecat.brstu.ru/catalog> .
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online» <http://biblioclub.ru> .
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань» <http://e.lanbook.com> .
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"  
<http://window.edu.ru> .
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru> .
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ) <https://uisrussia.msu.ru/> .
8. Национальная электронная библиотека НЭБ <http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/>

## 9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

### 9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению практических работ

#### Практическое занятие № 1

##### Выбор номинального напряжения и сечения проводов ЛЭП

###### Цель занятия:

Приобрести навыки выбора номинального напряжения и сечения проводов линий электропередачи

###### Задание:

###### Задача 1.1.

Промышленное предприятие предполагается питать от районной подстанции, имеющей напряжения 220, 110 кВ и расположенной на расстоянии 80 км. Максимальная активная нагрузка предприятия 102 МВт. Коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,85$ . Время использования максимальной нагрузки составляет 4800 ч.

Определить целесообразное напряжение электропередачи и сечение провода.

###### Пример решения.

$$U = 4,34 \sqrt{l + 16P} = 4,34 \sqrt{80 + 16 \cdot 102} = 179 \text{ кВ}$$

Следовательно, целесообразно использовать напряжение 220 кВ.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U}, \quad S = \frac{P}{\cos \varphi}, \quad \text{тогда} \quad I = \frac{102 \cdot 10^3}{0,85 \cdot \sqrt{3} \cdot 220} = 315 \text{ А}$$

$$F = \frac{I}{j\epsilon} = \frac{315}{1} = 315 \text{ мм}^2$$

Ближайшее большее стандартное сечение провода 400 мм<sup>2</sup>. Принимаем провод АС 400.

###### Форма отчетности:

Отчет не предусмотрен.

###### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

###### Основная литература

1. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие / А.В. Струмяляк. – Братск: БрГУ, 2014. – 186 с.

###### Дополнительная литература

2. Электрические системы и сети: учебное пособие / И.В. Игнатьев. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 210 с.
3. Булатов Ю.Н. Математическое и компьютерное моделирование в расчетах и исследованиях режимов электрических систем: учебное пособие. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 207 с.

#### Практическое занятие № 2

##### Схема замещения ЛЭП и расчет ее параметров

###### Цель занятия:

Приобрести навыки расчета параметров схем замещения линий электропередачи различных номинальных напряжений.

###### Задание:

###### Задача 2.1.

Нарисовать схему замещения и определить ее параметры для линии электропередачи 110 кВ, выполненной проводом АС-70 длиной 40 км. Подвеска проводов горизонтальная, расстояние между проводами 4 м.

Удельное сопротивление алюминия 31,5 Ом·мм<sup>2</sup>/км.

Диаметр провода АС-70  $d_{\text{пр}} = 11,4$  мм.

### Пример решения.

Удельное активное сопротивление:

$$r_0 = \frac{\rho}{F} = \frac{31,5}{70} = 0,45 \text{ Ом/км}$$

Активное сопротивление линии:

$$R_{\text{л}} = r_0 \cdot l = 0,45 \cdot 40 = 18 \text{ Ом}$$

Среднегеометрическое расстояние между проводами:

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} = \sqrt[3]{4 \cdot 4 \cdot 8} = 5,04 \text{ м}$$

Удельное индуктивное сопротивление:

$$X_0 = 0,144 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{np}}} + 0,016 = 0,44 \text{ Ом/км}$$

Индуктивное сопротивление линии:

$$X_{\text{л}} = X_0 \cdot l = 0,44 \cdot 40 = 17,6 \text{ Ом}$$

Удельная емкостная проводимость:

$$\epsilon_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{np}}}} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{5,04}{0,0057}} = 2,57 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$$

Реактивная проводимость линии:

$$B_{\text{л}} = \epsilon_0 \cdot l = 2,57 \cdot 10^{-6} \cdot 40 = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ См}$$

Форма отчетности:

Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

### Основная литература

1. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие /А.В. Струмяляк. – Братск: БрГУ, 2014. – 186 с.

### Дополнительная литература

2. Электрические системы и сети: учебное пособие / И.В. Игнатъев. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 210 с.
3. Булатов Ю.Н. Математическое и компьютерное моделирование в расчетах и исследованиях режимов электрических систем: учебное пособие. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 207 с.

## **Практическое занятие № 3**

### **Схема замещения трансформатора и расчет ее параметров**

Цель занятия:

Приобрести навыки расчета параметров схем замещения двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов.

Задание:

Задача 3.1.

Нарисовать схему замещения и определить ее параметры для трансформатора типа ТДЦН – 63000/230. Паспортные данные трансформатора : $U_{\text{ном}}=230 \text{ кВ}$ ,  $\Delta P_{\text{х}}=82 \text{ кВт}$ ,  $\Delta P_{\text{к}}=300 \text{ кВт}$ ,  $I_{\text{х}} = 0,8 \%$ ,  $U_{\text{к}} = 12 \%$ .

Пример решения.

Активное сопротивление обмоток:

$$R_m = \frac{\Delta P_{\text{к}} \cdot U_{\text{ном}}^2 \cdot 10^3}{S_{\text{ном}}^2} = \frac{300 \cdot 230^2 \cdot 10^3}{63000^2} = 4 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление обмоток:

$$X_m = \frac{U_k \cdot U_{ном}^2 \cdot 10^3}{100 S_{ном}} = \frac{12 \cdot 230^2 \cdot 10^3}{100 \cdot 63000} = 100 \text{ Ом}$$

Активная проводимость трансформатора:

$$q_m = \frac{\Delta P_x \cdot 10^{-3}}{U_{ном}^2} = \frac{82 \cdot 10^{-3}}{230^2} = 1,55 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

Реактивная проводимость:

$$b_m = \frac{I_x S_{ном} \cdot 10^{-3}}{100 U_{ном}^2} = \frac{0,8 \cdot 63000 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 230^2} = 9,53 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

Форма отчетности:

Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие / А.В. Струмеляк. – Братск: БрГУ, 2014. – 186 с.

Дополнительная литература

2. Электрические системы и сети: учебное пособие / И.В. Игнатъев. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 210 с.
3. Булатов Ю.Н. Математическое и компьютерное моделирование в расчетах и исследованиях режимов электрических систем: учебное пособие. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 207 с.

#### Практическое занятие № 4

#### **Расчет потерь напряжения в ЛЭП**

Цель занятия:

Приобрести навыки расчета потерь и падения напряжения в линиях электропередачи.

Задание:

Задача 4.1.

Определить продольную и поперечную составляющие падения напряжения, напряжение в конце линии, питающей нагрузку, мощность которой  $(9600 + j7200)$  кВА.

Длина линии 120 км, выполнена она проводом АС-120, напряжение в начале линии равно 115 кВ. Удельное активное сопротивление провода АС-120  $r_0 = 0,21$  Ом/км, удельное индуктивное сопротивление  $x_0 = 0,42$  Ом/км

Пример решения.

Продольная составляющая падения напряжения:

$$\Delta U = \frac{Pr_0 + Qx_0}{U_1} l = \frac{9600 \cdot 0,21 + 7200 \cdot 0,42}{115} 120 = 5259 \text{ В}$$

Поперечная составляющая падения напряжения:

$$\delta U = \frac{Px_0 - Qr_0}{U_1} l = \frac{9600 \cdot 0,42 - 7200 \cdot 0,21}{115} 120 = 2629 \text{ В}$$

Напряжение в конце линии:

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U)^2 + (\delta U)^2} = \sqrt{(115 - 5,26)^2 + 2,63^2} = 109,8 \text{ кВ}$$

Форма отчетности:

Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в четвертом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие / А.В. Струмеляк. –

Братск: БрГУ, 2014. – 186 с.

Дополнительная литература

2. Электрические системы и сети: учебное пособие / И.В. Игнатъев. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 210 с.
3. Булатов Ю.Н. Математическое и компьютерное моделирование в расчетах и исследованиях режимов электрических систем: учебное пособие. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 207 с.

### Практическое занятие №5

#### Расчет потерь мощности и энергии в ЛЭП

Цель занятия:

Приобрести навыки расчета потерь активной и реактивной мощности, активной энергии методом максимальных потерь в линиях электропередачи.

Задание:

Задача 5.1.

Завод, потребляющий мощность  $(40+j30)$  МВА, питается по линии электропередачи напряжением 220 кВ длиной 180 км, выполненной проводом АС 240.

Напряжение на конце линии при максимальной нагрузке равно 215 кВ.

Определить потери мощности в линии.

Активное сопротивление провода АС240  $r_0 = 0,13$  Ом/км, индуктивное сопротивление  $x_0 = 0,43$  Ом/км, реактивная проводимость  $b_0 = 2,66 \cdot 10^{-6}$  См/км, удельные потери на корону  $\Delta P_{кор,0} = 2,7$  кВт/км.

Пример решения.

$$R_{\text{л}} = r_0 \cdot l = 0,13 \cdot 180 = 23,4 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{л}} = x_0 \cdot l = 0,43 \cdot 180 = 77,4 \text{ Ом}$$

Мощность, генерируемая линией:

$$Q_B = U^2 \cdot b_0 \cdot l = 215^2 \cdot 2,66 \cdot 10^{-6} \cdot 180 = 22 \text{ Мвар}$$

Потери мощности на корону

$$\Delta P_{кор} = \Delta P_{кор,0} \cdot l = 2,7 \cdot 180 = 486 \text{ кВт} = 0,486 \text{ МВт}$$

Нагрузка на конце линии, учитывая, что в схеме замещения половина активной и реактивной проводимости включены в конце линии

$$S = P_2 + jQ_2 + 0,5(\Delta P_{кор} - jQB) =$$

$$40 + j30 + 0,5(0,486 - j22) = 40,243 + j19 \text{ МВА}$$

Потери мощности в линии:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R_{\text{л}} = \frac{40,243^2 + 19^2}{215^2} \cdot 23,4 = 1 \text{ МВт}$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot X_{\text{л}} = \frac{40,243^2 + 19^2}{215^2} \cdot 77,4 = 3,3 \text{ Мвар}$$

Задача 5.2.

Определить потери активной мощности и энергии в линии 35 кВ, выполненной проводом АС-70 длиной 30 км. Линия питает завод, потребляющий максимальную мощность 4200 кВт при  $\cos\varphi=0,9$ . Годовое потребление электроэнергии составляет 26400 МВт·ч. Удельное активное сопротивление провода АС 70  $r_0=0,42$  Ом/км.

Пример решения.

Найдем время использования максимальной нагрузки

$$W_e = P_{\text{max}} \cdot T_{\text{max}}$$

$$T_{\text{max}} = \frac{26400 \cdot 10^3}{4200} = 6286 \text{ ч}$$

Время максимальных потерь:

$$\tau = (0,124 + T_{\text{max}} \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760 = 4962 \text{ ч}$$

Активное сопротивление линии:

$$R_{\lambda} = r_0 \cdot l = 0,42 \cdot 30 = 12,6 \text{ Ом}$$

Полная мощность нагрузки:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{4,2}{0,9} = 4,67 \text{ МВА}$$

Потери мощности:

$$\Delta P = \frac{S^2}{U^2} \cdot R_{\lambda} = \frac{4,67^2}{35^2} \cdot 12,6 = 0,224 \text{ МВт}$$

Потери энергии:

$$\Delta W_{\varepsilon} = \Delta P \cdot \tau = 0,224 \cdot 4962 = 1113 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

Форма отчетности:

Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в четвертом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие / А.В. Струмяляк. – Братск: БрГУ, 2014. – 186 с.

Дополнительная литература

2. Электрические системы и сети: учебное пособие / И.В. Игнатьев. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 210 с.
3. Булатов Ю.Н. Математическое и компьютерное моделирование в расчетах и исследованиях режимов электрических систем: учебное пособие. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 207 с.

### Практическое занятие №6

#### **Расчет потерь мощности и энергии в трансформаторах**

Цель занятия:

Приобрести навыки расчета потерь активной и реактивной мощности, активной энергии методом максимальных потерь в трансформаторах.

Задание:

Задача 6.1.

На главной понижающей подстанции завода установлены два трансформатора ТДН 16000/110. Максимальная мощность, потребляемая заводом, равна 25 МВА.

Паспортные данные трансформатора:  $\Delta P_{\kappa} = 85 \text{ кВт}$ ,  $\Delta P_{\chi} = 21 \text{ кВт}$ ,  $U_{\kappa} = 10,5 \%$ ,  $I_{\chi} = 0,85 \%$ . Время максимальных потерь  $\tau = 3000 \text{ ч}$ .

Определить потери активной и реактивной мощности в трансформаторах, а также потери активной энергии за год.

Пример решения.

Потери активной мощности:

$$\Delta P_m = \frac{\Delta P_{\kappa} \cdot S^2}{n \cdot S_{ном}^2} + n \cdot \Delta P_{\chi} = \frac{85 \cdot 25000^2}{2 \cdot 16000^2} + 2 \cdot 21 = 145 \text{ кВт}$$

Потери реактивной мощности:

$$\Delta Q_m = \frac{U_{\kappa} \cdot S^2}{n \cdot 100 \cdot S_{ном}} + \frac{I_{\chi} \cdot S_{ном} \cdot n}{100} = \frac{10,5 \cdot 25000^2}{2 \cdot 100 \cdot 16000} + \frac{0,85 \cdot 16000 \cdot 2}{100} = 2322 \text{ квар}$$

Потери энергии:

$$\Delta W = \frac{\Delta P_{\kappa} \cdot S^2}{n \cdot S_{ном}^2} \cdot \tau + n \cdot \Delta P_{\chi} \cdot 8760 = 679000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Форма отчетности:

Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в четвертом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие / А.В. Струмеляк. – Братск: БрГУ, 2014. – 186 с.

Дополнительная литература

2. Электрические системы и сети: учебное пособие / И.В. Игнатьев. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 210 с.
3. Булатов Ю.Н. Математическое и компьютерное моделирование в расчетах и исследованиях режимов электрических систем: учебное пособие. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 207 с.

**Практическое занятие №7**

**Расчет режима работы электрической сети**

Цель занятия:

Приобрести навыки расчета режима работы методом «в два этапа».

Задание:

Задача 7.1.

Рассчитаем рабочие режимы линий питающей сети, схема которой изображена на рис.7.1,а. Мощности нагрузок на стороне ВН трансформаторов

$$\underline{S}_2 = 22,13 + j18,35 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad \underline{S}_3 = 17,11 + j14,45 \text{ МВ}\cdot\text{А};$$

$$\underline{S}_4 = 41,21 + j34,72 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$$

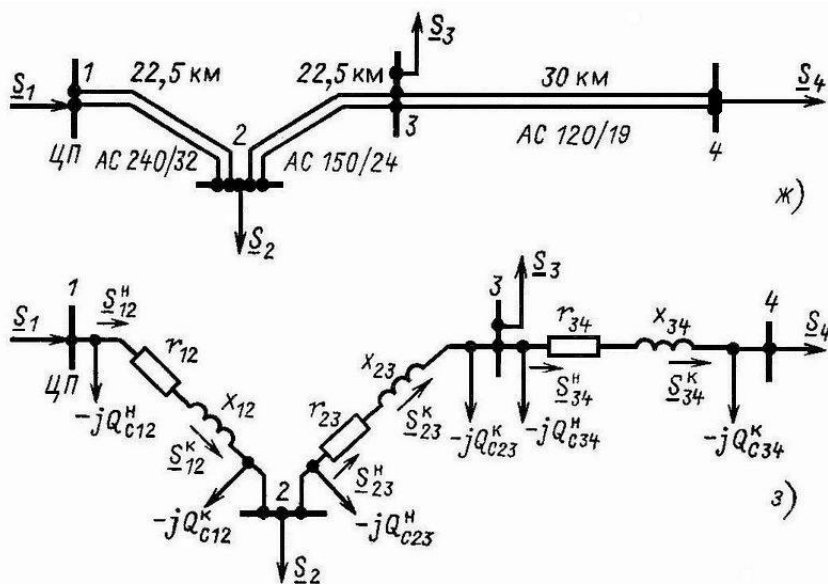


Рис. 7.1, а, б. Расчет режима разомкнутой питающей сети:

а – схема сети из трех линий; б – схема замещения сети из трех линий

Длины линий и марки использованных проводов указаны на схеме. Напряжение в ЦП поддерживается равным 117,7 кВ. Удельные сопротивления проводов АС 240/32, АС 150/24, АС 120/19, удельные емкостные проводимости и активные и реактивные сопротивления и проводимости двухцепных линий:

$$r_{12} = 0,5 \cdot 0,12 \cdot 22,5 = 1,35 \text{ Ом}; \quad x_{12} = 0,5 \cdot 0,405 \cdot 22,5 = 4,56 \text{ Ом};$$

$$b_{12} = 2 \cdot 2,81 \cdot 10^{-6} \cdot 22,5 = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ См}.$$

$$r_{12} = 0,5 \cdot 0,198 \cdot 22,5 = 2,23 \text{ Ом}; \quad x_{12} = 0,5 \cdot 0,42 \cdot 22,5 = 4,72 \text{ Ом};$$

$$b_{12} = 2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} \cdot 22,5 = 1,22 \cdot 10^{-4} \text{ См}.$$

$$r_{12} = 0,5 \cdot 0,249 \cdot 30 = 3,74 \text{ Ом}; \quad x_{12} = 0,5 \cdot 0,427 \cdot 30 = 6,4 \text{ Ом};$$



$$b_{12} = 2 \cdot 2,66 \cdot 10^{-6} \cdot 30 = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ См.}$$

Составим схему замещения линии (рис.7.1, б). Поскольку в местах подключения нагрузок напряжения неизвестны, а известно напряжение в начале линии, расчет проведем в два этапа.

Пример решения.

Составим схему замещения линии (рис.7.1, б). Поскольку в местах подключения нагрузок напряжения неизвестны, а известно напряжение в начале линии, расчет проведем в два этапа.

1-й этап. Емкостные мощности, потери и потоки мощности определим по номинальному напряжению, т.е. по выражениям (3.21) — (3.24). Реактивная мощность, генерируемая линией 34,

$$Q_{C34} = \frac{1}{2} U_{\text{ном}}^2 b_{34} = \frac{1}{2} 110^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-4} = 0,97 \text{ Мвар.}$$

Мощность в конце линии 34

$$\underline{S}_{34}^k = \underline{S}_4 - jQ_{C34} = 41,21 + j34,72 - j0,97 = 41,21 + j33,75 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Потери мощности в линии 34 определяются по выражению (3.22):

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S}_{34} &= \frac{\underline{Q}_{34}^k + \underline{Q}_{34}^k}{U_{\text{ном}}^2} (r_{34} + jx_{34}) = \\ &= \frac{41,21^2 + 33,75^2}{110^2} (3,74 + j6,4) = 0,88 + j1,5 \text{ МВ} \cdot \text{А.} \end{aligned}$$

Мощность в начале линии 34

$$\underline{S}_{34}^h = \underline{S}_{34}^k + \Delta \underline{S}_{34} = 41,21 + j33,75 + 0,88 + j1,5 = 42,09 + j35,25 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Аналогично проведем расчеты для линий 23 и 12:

$$Q_{C23} = \frac{1}{2} 110^2 \cdot 1,22 \cdot 10^{-4} = 0,74 \text{ Мвар;}$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{23}^k &= \underline{S}_{34}^h - jQ_{C34} + \underline{S}_3 - jQ_{C23} = 42,09 + j35,25 - j0,97 + 17,11 + \\ &+ j14,45 - j0,74 = 59,2 + j48 \text{ МВ} \cdot \text{А;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S}_{23} &= \frac{\underline{Q}_{23}^k + \underline{Q}_{23}^k}{U_{\text{ном}}^2} (r_{23} + jx_{23}) = \\ &= \frac{59,2^2 + 48^2}{110^2} (2,23 + j4,72) = 1,07 + j2,27 \text{ МВ} \cdot \text{А;} \end{aligned}$$

$$\underline{S}_{23}^h = \underline{S}_{23}^k + \Delta \underline{S}_{23} = 59,2 + j48 + 1,07 + j2,27 = 60,27 + j50,27 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

$$Q_{C12} = \frac{1}{2} 110^2 \cdot 1,264 \cdot 10^{-4} = 0,76 \text{ Мвар;}$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{12}^k &= \underline{S}_{23}^h - jQ_{C23} + \underline{S}_2 - jQ_{C12} = \\ &= 60,27 + j50,27 - j0,74 + 22,13 + j18,35 - j0,76 = 82,4 + j67,12 \text{ МВ} \cdot \text{А;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S}_{12} &= \frac{\underline{Q}_{12}^k + \underline{Q}_{12}^k}{U_{\text{ном}}^2} (r_{12} + jx_{12}) = \\ &= \frac{82,4^2 + 67,12^2}{110^2} (1,35 + j4,56) = 1,26 + j4,26 \text{ МВ} \cdot \text{А;} \end{aligned}$$

$$\underline{S}_{12}^h = \underline{S}_{12}^k + \Delta \underline{S}_{12} = 82,4 + j67,12 + 1,26 + j4,26 = 83,66 + j71,37 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Мощность, текущая с шин ЦП в линию 12,

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{12}^h - jQ_{C12} = 83,66 + j71,37 - j0,76 = 83,66 + j70,61 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

2-й этап. Определим напряжения в узлах.

Напряжение  $\underline{U}_2$ :

$$\Delta U_{12}^h = \frac{P_{12}^h + Q_{12}^h x_{12}}{U_1} = \frac{83,66 \cdot 1,35 + 71,37 \cdot 4,56}{117,7} = 3,72 \text{ кВ;}$$

$$\delta U_{12}^h = \frac{P_{12}^h + Q_{12}^h r_{12}}{U_1} = \frac{83,66 \cdot 4,56 - 71,37 \cdot 1,35}{117,7} = 2,42 \text{ кВ;}$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta U_{12}^h - j\delta U_{12}^h = 117,7 - 3,72 - j2,42 \approx 114 - j2,42 \text{ кВ.}$$

Определим модуль напряжения:

$$U_2 = \sqrt{114^2 + 2,42^2} = 114 \text{ кВ.}$$

В сетях с напряжением 110 кВ и ниже поперечной составляющей падения напряжения можно пренебречь. Ее учет заметно не сказывается на точности расчета режима сети. Так, в рассматриваемом примере, если учесть только продольную составляющую падения напряжения,

напряжение в узле 2 будет

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{12}^H = 117,7 - 3,72 \approx 114 \text{ кВ},$$

т. е. ошибка в определении  $U_2$  не превышает погрешности округления. В дальнейшем поперечной составляющей падения напряжения пренебрегаем.

Определим напряжения в узлах 3, 4:

$$\Delta U_{23}^H = \frac{P_{23}^H r_{23} + Q_{23}^H x_{23}}{U_2} = \frac{60,27 \cdot 2,23 + 50,27 \cdot 4,72}{114} = 3,26 \text{ кВ};$$

$$U_3 = 114 - 3,26 \approx 110,7 \text{ кВ};$$

$$\Delta U_{34}^H = \frac{P_{34}^H r_{34} + Q_{34}^H x_{34}}{U_3} = \frac{42,09 \cdot 3,74 + 35,25 \cdot 6,4}{110,7} = 3,45 \text{ кВ};$$

$$U_4 = 110,7 - 3,45 \approx 107,2 \text{ кВ};$$

Форма отчетности:

Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в четвертом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие / А.В. Струмяляк. – Братск: БрГУ, 2014. – 186 с.

Дополнительная литература

2. Электрические системы и сети: учебное пособие / И.В. Игнатьев. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 210 с.
3. Булатов Ю.Н. Математическое и компьютерное моделирование в расчетах и исследованиях режимов электрических систем: учебное пособие. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 207 с.

### Практическое занятие №8

#### **Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов**

Цель занятия:

Приобрести навыки выбора регулировочных ответвлений трансформаторов с РПН и с ПБВ.

Задание:

Задача 8.1.

На районной подстанции установлен трансформатор ТДН 10000/110. Напряжение на первичной обмотке трансформатора при максимальной нагрузке равно 103,8 кВ, а потери напряжения в трансформаторе составляют  $\Delta U_m = 4,5\%$ .

Определить напряжение регулировочного ответвления, позволяющее обеспечить на вторичной стороне напряжение 10,5 кВ. Номинальное напряжение обмоток:  $U_{ВН} = 115$  кВ,  $U_{НН} = 11$  кВ. Диапазон регулирования:  $\pm 9 \times 1,78\%$ .

Пример решения.

Потери в трансформаторе:

$$\Delta U_m = \frac{\Delta U_m}{100} \cdot U_{ВН} = \frac{4,5 \cdot 115}{100} = 5,18 \text{ кВ}$$

Желаемое напряжение регулировочного ответвления:

$$U_{ВЖ} = (U_1 - \Delta U_m) \frac{U_{НН}}{U_{НЖ}} = (103,8 - 5,18) \frac{11}{10,5} = 103,32 \text{ кВ}$$

$$\Delta U_{см} = \frac{1,78 \cdot 115}{100} = 2,047 \text{ кВ}$$

Количество ступеней регулирования:

$$n = \frac{U_{ВН} - U_{ВЖ}}{\Delta U_{см}} = \frac{115 - 103,32}{2,047} = 5,7 \quad n = 6$$

Стандартное напряжение регулировочного ответвления:

$$U_{от} = U_{ВН} - n \cdot \Delta U_{см} = 115 - 6 \cdot 2,047 = 102,72 \text{ кВ}$$

Напряжение на вторичной стороне при выбранном ответвлении:

$$U_H = (U_1 - \Delta U_m) \frac{U_{HH}}{U_{om}} = (103,8 - 5,18) \frac{11}{102,72} = 10,56 \text{ кВ}$$

Форма отчетности:

Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в шестом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие / А.В. Струмеляк. – Братск: БрГУ, 2014. – 186 с.

Дополнительная литература

2. Электрические системы и сети: учебное пособие / И.В. Игнатьев. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 210 с.
3. Булатов Ю.Н. Математическое и компьютерное моделирование в расчетах и исследованиях режимов электрических систем: учебное пособие. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 207 с.

### Практическое занятие №9

#### **Выбор параметров установки поперечной компенсации**

Цель занятия:

Приобрести навыки выбора мощности конденсаторной батареи.

Задание:

Задача 9.1.

Подстанция, находящаяся на расстоянии 3 км от главной понижающей подстанции, питается по воздушной линии 10 кВ, выполненной проводом А 70. Передаваемая по линии мощность равна  $(960 + j840)$  кВА. Определить мощность конденсаторной батареи, которую необходимо установить на подстанции, чтобы потери напряжения в сети снизились на 0,8 % от  $U_{ном}$ .

Определить потери напряжения в линии до и после установки конденсаторной батареи.

Удельные параметры провода А 70:  $r_0 = 0,45$  Ом/км,  $x_0 = 0,327$  Ом/км.

Пример решения.

Активное и индуктивное сопротивления линии:

$$R_l = r_0 \cdot l = 0,45 \cdot 3 = 1,35 \text{ Ом}$$

$$X_l = x_0 \cdot l = 0,327 \cdot 3 = 0,981 \text{ Ом}$$

Мощность конденсаторной батареи:

$$Q_k = \frac{\Delta U \cdot U_{ном}^2 \cdot 10^3}{100 \cdot X_l} = \frac{0,8 \cdot 10^2 \cdot 10^3}{100 \cdot 0,981} = 815 \text{ квар}$$

Потеря напряжения до установки батареи:

$$\Delta U = \frac{PR_l + QX_l}{U_{ном}} = \frac{960 \cdot 1,35 + 840 \cdot 0,981}{10} = 212 \text{ В}$$

Потеря напряжения после установки батареи:

$$\Delta U = \frac{PR_l + (Q - Q_k)X_l}{U_{ном}} = \frac{960 \cdot 1,35 + (840 - 815) \cdot 0,981}{10} = 132 \text{ В}$$

Форма отчетности:

Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в шестом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие / А.В. Струмеляк. – Братск: БрГУ, 2014. – 186 с.

Дополнительная литература

2. Электрические системы и сети: учебное пособие / И.В. Игнатъев. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 210 с.
3. Булатов Ю.Н. Математическое и компьютерное моделирование в расчетах и исследованиях режимов электрических систем: учебное пособие. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 207 с.

## 9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта

### Порядок выполнения курсового проекта.

Готовый курсовой проект сдается преподавателю на проверку за 2 недели до начала экзаменационной сессии. Результатом проверки могут быть:

- «допущен к защите»;
- «допущен к защите после доработки по замечаниям»;
- «не допущен к защите».

Если после проверки курсовой проект рекомендован преподавателем к защите, то следует подготовиться к его защите.

В случае выявления при проверке ошибок и неточностей, студент допускается к защите курсового проекта только после их устранения. В последнем случае требуется переделать курсовой проект в соответствии с предъявляемыми требованиями.

Если курсовой проект не рекомендован преподавателем к защите, то после переработки работа вновь сдается на проверку.

Без защиты курсового проекта студент не допускается к сдаче экзамена по дисциплине.

Защита курсового проекта производится в часы, определенные в соответствии с расписанием занятий.

На защите курсового проекта студент в краткой форме излагает основные результаты, полученные в ходе его выполнения, отвечает на возникшие в ходе защиты вопросы.

### Рекомендации по выполнению курсового проекта.

Задание: спроектировать районную электрическую сеть для электроснабжения пяти подстанций от одного источника питания.

Исходные данные: географическое месторасположение подстанций и источника питания, максимальная активная мощность подстанций, категория потребителей по надежности.

Во введении необходимо сформулировать поставленную при проектировании электрической сети задачу и основные этапы ее решения..

Основная часть содержит этапы: выбор вариантов конфигурации сети, выбор номинального напряжения и сечения проводов воздушных линий электропередачи, расчет потерь напряжения и мощности, выбор трансформаторов на подстанциях, технико-экономическое сравнение вариантов сети, выбор мощности установок поперечной компенсации и оценка эффективности их работы.

В заключении необходимо провести анализ выполненной работы. Сделать выводы по работе.

### Список литературы:

1. Проектирование районной электрической сети: методические указания к выполнению курсового проекта / И. В. Игнатъев, А. В. Струмеяк. - Братск: БрГУ, 2014. - 82 с.
2. Электрические системы и сети: учебное пособие / И.В. Игнатъев. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 210 с.

## 10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Пакет прикладных программ Microsoft (Microsoft Word, Microsoft Excel, Microsoft PowerPoint, Microsoft Visio и др.)
2. ОС WINDOWS
3. Среда разработки и использования электронных обучающих ресурсов iLogos

4. Программная система разработки и моделирования MATLAB
5. SCADA–системы «Трейс Моуд»

## 11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ЛР или ПЗ</i>
1	2	3	4
ПЗ	Дисплейный класс	Учебная мебель. Интерактивная доска	
КП	Читальный зал №3	Оборудование 15- CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF); принтер HP LaserJet P3005	-

### Приложение 1

## ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

### 1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОК-7	способность к самоорганизации и самообразованию	1. Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения	1.1. Структурная схема производства, передачи и распределения электроэнергии.	Экзаменационные вопросы 1-4
			1.2. Выбор сечения проводов по экономической плотности тока.	
			1.3. Типы трансформаторов и их обозначение. Выбор мощности трансформаторов.	
			1.4. Основные типы конфигурации электрической сети.	
		2. Электрические нагрузки предприятий	2.1. Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.	Экзаменационные вопросы 5-6

			2.2.Регулирующий эффект нагрузки.	
	<b>3. Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов</b>		3.1.П-образная схема замещения линия электропередачи.	Экзаменационные вопросы 7-10
		3.2.Г-образная схемы замещения двухобмоточного трансформатора.		
		3.3.Схема замещения трехобмоточного трансформатора.		
		3.4.Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения.		
	<b>4. Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах</b>		4.1.Основные методы определения потерь электроэнергии: метод графического интегрирования, метод среднеквадратичного тока, метод времени максимальных потерь.	Экзаменационные вопросы 11-13
		4.2.Потери мощности в трансформаторах		
		4.3.Расчет режима ЛЭП при заданной мощности нагрузки и напряжении источника питания методом «в два этапа».		
	<b>5. Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии</b>		5.1.Основные показатели качества.	Экзаменационные вопросы 14-17
		5.2.Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения.		
		5.3.Баланс активной мощности.		
		5.4.Регулирование частоты вращения турбины.		
	<b>6.Регулирование напряжения в электроэнергетической системе</b>		6.1.Регулирование напряжения на электростанциях.	Экзаменационные вопросы 18-21
		6.2.Трансформаторы с РПН и ПБВ.		
		6.3.Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов.		
		6.4.Поперечная компенсация реактивной мощности.		

ОПК-3	способность решать задачи анализа и расчета характеристик электрических цепей	<b>1. Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения</b>	1.1. Структурная схема производства, передачи и распределения электроэнергии.	Экзаменационные вопросы 1-4
			1.2. Выбор сечения проводов по экономической плотности тока.	
			1.3. Типы трансформаторов и их обозначение. Выбор мощности трансформаторов.	
			1.4. Основные типы конфигурации электрической сети.	
		<b>2. Электрические нагрузки предприятий</b>	2.1. Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.	Экзаменационные вопросы 5-6
			2.2. Регулирующий эффект нагрузки.	
		<b>3. Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов</b>	3.1. П-образная схема замещения линия электропередачи.	Экзаменационные вопросы 7-10
			3.2. Г-образная схемы замещения двухобмоточного трансформатора.	
			3.3. Схема замещения трехобмоточного трансформатора.	
			3.4. Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения.	
		<b>4. Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах</b>	4.1. Основные методы определения потерь электроэнергии: метод графического интегрирования, метод среднеквадратичного тока, метод времени максимальных потерь.	Экзаменационные вопросы 11-13
			4.2. Потери мощности в трансформаторах	
			4.3. Расчет режима ЛЭП при заданной мощности нагрузки и напряжении источника питания методом «в два этапа».	
<b>5. Баланс активной и реактивной</b>	5.1. Основные показатели качества.	Экзаменационные вопросы		

		мощности в энергосистеме, качество электроэнергии	5.2.Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения. 5.3.Баланс активной мощности. 5.4.Регулирование частоты вращения турбины.	14-17
		6.Регулирование напряжения в электроэнергетической системе	6.1.Регулирование напряжения на электростанциях. 6.2.Трансформаторы с РПН и ПБВ. 6.3.Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов. 6.4.Поперечная компенсация реактивной мощности.	Экзаменационные вопросы 18-21
ПК-3	готовность участвовать в составлении аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам выполненной работы, в подготовке публикаций по результатам исследований и разработок	1.Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения	1.1.Структурная схема производства, передачи и распределения электроэнергии.	Экзаменационные вопросы 1-4
			1.2.Выбор сечения проводов по экономической плотности тока.	
			1.3.Типы трансформаторов и их обозначение. Выбор мощности трансформаторов.	
			1.4.Основные типы конфигурации электрической сети.	
		2.Электрические нагрузки предприятий	2.1.Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.	Экзаменационные вопросы 5-6
			2.2.Регулирующий эффект нагрузки.	
		3.Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов	3.1.П-образная схема замещения линия электропередачи.	Экзаменационные вопросы 7-10
			3.2.Г-образная схемы замещения двухобмоточного трансформатора.	
			3.3.Схема замещения трехобмоточного	



			трансформатора.	
			3.4.Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения.	
		4. Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах	4.1.Основные методы определения потерь электроэнергии: метод графического интегрирования, метод среднеквадратичного тока, метод времени максимальных потерь.	Экзаменационные вопросы 11-13
			4.2.Потери мощности в трансформаторах	
			4.3.Расчет режима ЛЭП при заданной мощности нагрузки и напряжении источника питания методом «в два этапа».	
		5. Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии	5.1.Основные показатели качества.	Экзаменационные вопросы 14-17
			5.2.Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения.	
			5.3.Баланс активной мощности.	
			5.4.Регулирование частоты вращения турбины.	
		6.Регулирование напряжения в электроэнергетической системе	6.1.Регулирование напряжения на электростанциях.	Экзаменационные вопросы 18-21
			6.2.Трансформаторы с РПН и ПБВ.	
			6.3.Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов.	
			6.4.Поперечная компенсация реактивной мощности.	

## 2. Экзаменационные вопросы

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1	ОК-7	способность к	1.Структурная схема производства,	1.Общие сведения о

		самоорганизации и самообразование	передачи и распределения электроэнергии.	схемах внешнего электроснабжения
			2.Выбор сечения проводов по экономической плотности тока.	
			3. Выбор трансформаторов на подстанциях.	
			4.Основные типы конфигурации электрической сети.	
			5.Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.	2.Электрические нагрузки предприятий
			6.Регулирующий эффект нагрузки.	
			7.Схема замещения линия электропередачи.	3. Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов
			8.Схема замещения двухобмоточного трансформатора.	
			9.Схема замещения трехобмоточного трансформатора.	
			10.Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения.	
			11.Основные методы определения потерь электроэнергии.	4.Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах
			12.Потери мощности и энергии в трансформаторах	
			13.Расчет режима ЛЭП методом «в два этапа».	
			14.Основные показатели качества.	5. Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии
			15.Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения.	
			16.Баланс активной мощности.	
			17.Регулирование частоты вращения турбины.	
			18.Регулирование напряжения на электростанциях.	6.Регулирование напряжения в электроэнергетической системе
			19.Трансформаторы с РПН и ПБВ.	
			20.Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов.	
			21.Поперечная компенсация реактивной мощности.	
2	ОПК-3	способность решать задачи анализа и расчета характеристик электрических цепей	1.Структурная схема производства, передачи и распределения электроэнергии.	1.Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения
			2.Выбор сечения проводов по экономической плотности тока.	
			3. Выбор трансформаторов на подстанциях.	
			4.Основные типы конфигурации электрической сети.	
			5.Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.	2.Электрические нагрузки предприятий
			6.Регулирующий эффект нагрузки.	

1	ПК-3		7.Схема замещения линия электропередачи.	<b>3.</b> Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов		
			8.Схема замещения двухобмоточного трансформатора.			
			9.Схема замещения трехобмоточного трансформатора.			
			10.Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения.			
			11.Основные методы определения потерь электроэнергии.	<b>4.</b> Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах		
			12.Потери мощности и энергии в трансформаторах			
			13.Расчет режима ЛЭП методом «в два этапа».			
			14.Основные показатели качества.	<b>5.</b> Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии		
			15.Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения.			
			16.Баланс активной мощности.			
			17.Регулирование частоты вращения турбины.			
			18.Регулирование напряжения на электростанциях.	<b>6.</b> Регулирование напряжения в электроэнергетической системе		
			19.Трансформаторы с РПН и ПБВ.			
			20.Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов.			
			21.Поперечная компенсация реактивной мощности.			
				готовность участвовать в составлении аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам выполненной работы, в подготовке публикаций по результатам исследований и разработок	1.Структурная схема производства, передачи и распределения электроэнергии.	<b>1.</b> Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения
					2.Выбор сечения проводов по экономической плотности тока.	
					3. Выбор трансформаторов на подстанциях.	
					4.Основные типы конфигурации электрической сети.	<b>2.</b> Электрические нагрузки предприятий
					5.Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.	
					6.Регулирующий эффект нагрузки.	<b>3.</b> Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов
7.Схема замещения линия электропередачи.						
8.Схема замещения двухобмоточного трансформатора.						
9.Схема замещения трехобмоточного трансформатора.						
10.Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения.						
11.Основные методы определения	<b>4.</b> Расчет режимов					

		потеря электроэнергии.	ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах
		12.Потери мощности и энергии в трансформаторах	
		13.Расчет режима ЛЭП методом «в два этапа».	
		14.Основные показатели качества.	5. Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии
		15.Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения.	
		16.Баланс активной мощности.	
		17.Регулирование частоты вращения турбины.	
		18.Регулирование напряжения на электростанциях.	6.Регулирование напряжения в электроэнергетической системе
		19.Трансформаторы с РПН и ПБВ.	
		20.Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов.	
		21.Поперечная компенсация реактивной мощности.	

### 3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<b>Знать</b> <b>ОК-7:</b> - Принципы расчета режимов работы электроэнергетических систем и сетей; <b>ОПК-3:</b> - Основные приемы расчета электрических сетей; <b>ПК-3:</b> - Основные методы и способы сбора и анализа исходных данных для расчета и проектирования электрических сетей. <b>Уметь:</b> <b>ОК-7:</b> -- Самостоятельно принимать решения, использовать полученные знания на практике; <b>ОПК-3:</b>	<b>отлично</b>	Оценка «отлично» выставляется в случае, если студент демонстрирует: <ul style="list-style-type: none"> <li>– всестороннее систематическое знание программного материала;</li> <li>– правильное выполнение практических заданий, направленных на применение программного материала;</li> <li>– правильное применение основных положений программного материала.</li> </ul>
	<b>хорошо</b>	Оценка «хорошо» выставляется в случае, если студент демонстрирует: <ul style="list-style-type: none"> <li>– недостаточно полное знание программного материала;</li> <li>– выполнение с несущественными ошибками практических заданий, направленных на применение программного материала;</li> <li>– применение с несущественными ошибками основных положений программного материала.</li> </ul>

<p>- Использовать основные приемы анализа электрических сетей;  <b>ПК-3:</b>  - Оформлять публикации и отчеты по результатам исследования режимов работы электрических сетей.  <b>Владеть:</b>  <b>ОК-7:</b>  - Достаточным уровнем понимания материала, и способностью выявлять сущность проблем.</p>	<b>удовлетворительно</b>	<p>Оценка «удовлетворительно» выставляется в случае, если студент демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– частичное знание программного материала;</li> <li>– частичное выполнение практических заданий, направленных на применение программного материала;</li> <li>– частичное применение основных положений программного материала.</li> </ul>
<p><b>ОПК-3:</b>  - Приемами моделирования электрических сетей;  <b>ПК-3:</b>  - Достаточным уровнем знаний для сбора и анализа исходных данных для расчета и проектирования систем электроснабжения.</p>	<b>неудовлетворительно</b>	<p>Оценка «неудовлетворительно» выставляется в случае, если студент демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– существенные пробелы в знании программного материала;</li> <li>– принципиальные ошибки при выполнении практических заданий, направленных на применение программного материала;</li> <li>– невозможность применения основных положений программного материала.</li> </ul>

#### 4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина Электроэнергетические системы и сети направлена на формирование у обучающихся знаний, умений, навыков проектирования и расчёта режимов работы электрических сетей, как одного из самых сложных технических объектов управления.

Изучение дисциплины Электроэнергетические системы и сети предусматривает:

- лекции,
- практические занятия,
- курсовой проект,
- самостоятельную работу студента,
- экзамен.

В ходе освоения раздела 1 «Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения» студенты должны изучить: структурную схему производства, передачи и распределения электроэнергии, методику выбора сечения высоковольтных ЛЭП, методику выбора трансформаторов на подстанциях, основные типы конфигурации электрической сети.

В ходе освоения раздела 2 «Электрические нагрузки предприятий» студенты должны изучить: способы моделирования нагрузок при расчете режимов работы сети.

В ходе освоения раздела 3 «Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов» студенты должны изучить схемы замещения основных элементов электрических сетей и методы расчета их параметров.

В ходе освоения раздела 4 «Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах» студенты должны изучить следующие вопросы: Основные методы определения потерь мощности и энергии в линиях электропередачи и трансформаторах, методику расчета режима сети.

В ходе освоения раздела 5 «Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме,

качество электроэнергии» студенты должны изучить следующие вопросы: основные показатели качества электроэнергии, баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме.

В ходе освоения раздела 6 «Регулирование напряжения в электроэнергетической системе» студенты должны изучить основные способы регулирования напряжения, вопросы выбора параметров установок поперечной компенсации.

В процессе проведения лабораторных работ происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков представления об различных способах моделирования электрических сетей.

В процессе проведения практических работ происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков расчета различных параметров электрического режима работы сетей.

При подготовке к экзамену рекомендуется особое внимание уделить методам определения основных параметров режима работы электрических сетей.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературы. Дополнительные сведения по изучаемым темам можно найти в Интернете.

## **АННОТАЦИЯ**

### **рабочей программы дисциплины**

### **Электроэнергетические системы и сети**

#### **1. Цель и задачи дисциплины**

Целью изучения дисциплины является ознакомление студентов с типами конфигурации электрических сетей, со схемами замещения линий электропередачи, трансформаторов и автотрансформаторов, с расчетом режимов работы электрических сетей, с балансом активной и реактивной мощности в энергосистеме, с качеством электроэнергии и регулированием напряжения и частоты в электроэнергетических системах

Задачей изучения дисциплины является формирование у обучающихся знаний, умений, навыков проектирования и расчёта режимов работы электрических сетей, а также проектирования и эксплуатации систем автоматического управления технологическими процессами на электрических станциях и подстанциях.

#### **2. Структура дисциплины**

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: лекции – 18 часов, лабораторные работы – 18 часов, практические занятия- 18 часов, самостоятельная работа студента – 54 часа.  
Общая трудоемкость дисциплины составляет 144 часа, 4 зачетные единицы.

##### 2.2 Основные разделы дисциплины:

1. Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения.
2. Электрические нагрузки предприятий.
3. Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов.
4. Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах.
5. Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии.
6. Регулирование напряжения в электроэнергетической системе.

#### **3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование компетенций:

ОК-7 - способность к самоорганизации и самообразованию;

ОПК-3 - способность решать задачи анализа и расчета характеристик электрических цепей;

ПК-3 -готовность участвовать в составлении аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам выполненной работы, в подготовке публикаций по результатам исследований и разработок.

#### **4. Вид промежуточной аттестации: экзамен, КП.**

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе  
на 201\_\_-201\_\_ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

---

---

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

---

---

---

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.,  
(разработчик)

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)



**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО  
КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОК-7	способность к самоорганизации и самообразованию	1. Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения	1.1. Структурная схема производства, передачи и распределения электроэнергии.	Курсовой проект
			1.2. Выбор сечения проводов по экономической плотности тока.	Курсовой проект
			1.3. Типы трансформаторов и их обозначение. Выбор мощности трансформаторов.	Курсовой проект
			1.4. Основные типы конфигурации электрической сети.	Курсовой проект
		2. Электрические нагрузки предприятий	2.1. Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.	Курсовой проект
			2.2. Регулирующий эффект нагрузки.	Курсовой проект
		3. Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов	3.1. П-образная схема замещения линия электропередачи.	Курсовой проект
			3.2. Г-образная схемы замещения двухобмоточного трансформатора.	Курсовой проект
			3.3. Схема замещения трехобмоточного трансформатора.	Курсовой проект
			3.4. Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения.	Курсовой проект
		4. Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах	4.1. Основные методы определения потерь электроэнергии: метод графического интегрирования, метод среднеквадратичного тока, метод времени максимальных потерь.	Курсовой проект

			4.2. Потери мощности в трансформаторах	Курсовой проект		
			4.3. Расчет режима ЛЭП при заданной мощности нагрузки и напряжении источника питания методом «в два этапа».	Курсовой проект		
		<b>5. Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии</b>	5.1. Основные показатели качества.	Курсовой проект		
			5.2. Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения.	Курсовой проект		
			5.3. Баланс активной мощности.	Курсовой проект		
			5.4. Регулирование частоты вращения турбины.	Курсовой проект		
		<b>6. Регулирование напряжения в электроэнергетической системе</b>	6.1. Регулирование напряжения на электростанциях.	Курсовой проект		
			6.2. Трансформаторы с РПН и ПБВ.	Курсовой проект		
			6.3. Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов.	Курсовой проект		
			6.4. Поперечная компенсация реактивной мощности.	Курсовой проект		
		ОПК-3	способность решать задачи анализа и расчета характеристик электрических цепей	<b>1. Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения</b>	1.1. Структурная схема производства, передачи и распределения электроэнергии.	Курсовой проект
					1.2. Выбор сечения проводов по экономической плотности тока.	Курсовой проект
					1.3. Типы трансформаторов и их обозначение. Выбор мощности трансформаторов.	Курсовой проект
					1.4. Основные типы конфигурации электрической сети.	Курсовой проект
				<b>2. Электрические нагрузки предприятий</b>	2.1. Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.	Курсовой проект
					2.2. Регулирующий эффект нагрузки.	Курсовой проект

	<b>3. Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов</b>	3.1. П-образная схема замещения линия электропередачи.	Курсовой проект
		3.2. Г-образная схемы замещения двухобмоточного трансформатора.	Курсовой проект
		3.3. Схема замещения трехобмоточного трансформатора.	Курсовой проект
		3.4. Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения.	Курсовой проект
	<b>4. Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах</b>	4.1. Основные методы определения потерь электроэнергии: метод графического интегрирования, метод среднеквадратичного тока, метод времени максимальных потерь.	Курсовой проект
		4.2. Потери мощности в трансформаторах	Курсовой проект
		4.3. Расчет режима ЛЭП при заданной мощности нагрузки и напряжении источника питания методом «в два этапа».	Курсовой проект
	<b>5. Баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии</b>	5.1. Основные показатели качества.	Курсовой проект
		5.2. Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения.	Курсовой проект
		5.3. Баланс активной мощности.	Курсовой проект
		5.4. Регулирование частоты вращения турбины.	Курсовой проект
	<b>6. Регулирование напряжения в электроэнергетической системе</b>	6.1. Регулирование напряжения на электростанциях.	Курсовой проект
		6.2. Трансформаторы с РПН и ПБВ.	Курсовой проект
		6.3. Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов.	Курсовой проект
		6.4. Поперечная компенсация реактивной мощности.	Курсовой проект

ПК-3	готовность участвовать в составлении аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам выполненной работы, в подготовке публикаций по результатам исследований и разработок	<b>1. Общие сведения о схемах внешнего электроснабжения</b>	1.1. Структурная схема производства, передачи и распределения электроэнергии.	Курсовой проект
			1.2. Выбор сечения проводов по экономической плотности тока.	Курсовой проект
			1.3. Типы трансформаторов и их обозначение. Выбор мощности трансформаторов.	Курсовой проект
			1.4. Основные типы конфигурации электрической сети.	Курсовой проект
		<b>2. Электрические нагрузки предприятий</b>	2.1. Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.	Курсовой проект Курсовой проект
			2.2. Регулирующий эффект нагрузки.	
		<b>3. Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов</b>	3.1. П-образная схема замещения линия электропередачи.	Курсовой проект
			3.2. Г-образная схемы замещения двухобмоточного трансформатора.	Курсовой проект
			3.3. Схема замещения трехобмоточного трансформатора.	Курсовой проект
			3.4. Автотрансформатор в электрических сетях и его схема замещения.	Курсовой проект
		<b>4. Расчет режимов ЛЭП и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах</b>	4.1. Основные методы определения потерь электроэнергии: метод графического интегрирования, метод среднеквадратичного тока, метод времени максимальных потерь.	Курсовой проект
			4.2. Потери мощности в трансформаторах	Курсовой проект
			4.3. Расчет режима ЛЭП при заданной мощности нагрузки и напряжении источника питания методом «в два этапа».	Курсовой проект
		<b>5. Баланс активной и реактивной</b>	5.1. Основные показатели качества.	Курсовой проект

	мощности в энергосистеме, качество электроэнергии	5.2.Баланс реактивной мощности и его оценка при регулировании напряжения.	Курсовой проект
		5.3.Баланс активной мощности.	Курсовой проект
		5.4.Регулирование частоты вращения турбины.	Курсовой проект
	6.Регулирование напряжения в электроэнергетической системе	6.1.Регулирование напряжения на электростанциях.	Курсовой проект
		6.2.Трансформаторы с РПН и ПБВ.	Курсовой проект
		6.3.Выбор регулировочных ответвлений трансформаторов.	Курсовой проект
		6.4.Поперечная компенсация реактивной мощности.	Курсовой проект

## 2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p><b>Знать</b>  <b>ОК-7:</b>  - Принципы расчета режимов работы электроэнергетических систем и сетей;  <b>ОПК-3:</b>  - Основные приемы расчета электрических сетей;  <b>ПК-3:</b>  - Основные методы и способы сбора и анализа исходных данных для расчета и проектирования электрических сетей.</p> <p><b>Уметь:</b>  <b>ОК-7:</b>  -- Самостоятельно принимать решения, использовать полученные знания на практике;  <b>ОПК-3:</b>  - Использовать основные приемы анализа электрических сетей;  <b>ПК-3:</b>  - Оформлять публикации и отчеты по результатам исследования режимов работы электрических сетей.</p>	<b>отлично</b>	соответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; правильность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами; самостоятельность выполнения; оформление работы и списка использованных источников соответствует требованиям; грамотность, отсутствие стилистических ошибок; уверенное владение материалом при устной защите.
	<b>хорошо</b>	соответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; правильность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами; самостоятельность выполнения; оформление работы и списка использованных источников не полностью соответствует требованиям; грамотность, отсутствие стилистических ошибок; хорошее владение материалом при устной защите.

<p><b>Владеть:</b>  <b>ОК-7:</b>  - Достаточным уровнем понимания материала, и способностью выявлять сущность проблем.  <b>ОПК-3:</b>  - Приемами моделирования электрических сетей;  <b>ПК-3:</b>  - Достаточным уровнем знаний для сбора и анализа исходных данных для расчета и проектирования систем электроснабжения.</p>	<b>удовлетворительно</b>	<p>не полное соответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; неточность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами, , частичная самостоятельность выполнения; оформление работы и списка использованных источников не полностью соответствует требованиям; наличие некоторых стилистических ошибок; не уверенное владение материалом при устной защите.</p>
	<b>неудовлетворительно</b>	<p>несоответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; неправильность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами, отсутствие самостоятельности выполнения; оформление работы и списка использованных источников не соответствует требованиям; наличие стилистических ошибок; отсутствие владения материалом при устной защите.</p>