

Федеральное агентство по образованию  
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГОУВПО «АмГУ»

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой энергетики  
\_\_\_\_\_ Н.В.Савина  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2007 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ  
«Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения»  
для специальности 140205 – Электроэнергетические системы и сети

:

Составитель: канд. техн. наук, проф. А.С. Степанов

Благовещенск

2007 г.

Печатается по решению  
редакционно-издательского совета  
энергетического факультета  
Амурского государственного университета

А.С. Степанов

Учебно-методический комплекс по дисциплине «Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения» для студентов очной и заочной форм обучения специальности 140205 – Электроэнергетические системы и сети – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007.

Учебно-методический комплекс ориентирован на оказание помощи студентам очной и заочной форм обучения по специальности 140205 – Электроэнергетические системы и сети для формирования специальных знаний в области дальних электропередач сверхвысокого напряжения в качестве специалиста, работающего в сфере эксплуатации энергооборудования или управления энергосистемами на любом уровне (энергосистема, предприятие электрических сетей, район электрических сетей).

© Амурский государственный университет, 2007

© А.С. Степанов

### *Аннотация*

Настоящий УМКД предназначен в помощь студентам всех форм обучения специальности «Электроэнергетические системы и сети» при изучении дисциплины «Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения».

При его написании учитывались рекомендации из положения «Об учебно-методическом комплексе дисциплины». УМКД разрабатывался на основе утвержденных в установленном порядке Государственного образовательного стандарта, типовых учебных планов и рабочей программы дисциплины, а также нормативных документов Министерства образования и науки Российской Федерации по вопросам организации учебно-воспитательного процесса.

## *Содержание*

1. Программа дисциплины, соответствующая требованиям государственного образовательного стандарта.....	5
2. Рабочая программа дисциплины.....	12
3. График самостоятельной работы студентов по дисциплине на каждый семестр с указанием ее содержания, объема в часах, сроков и форм контроля.....	26
4. Методические рекомендации по проведению семинарских и практических занятий.....	27
5. Методические рекомендации по проведению лабораторных занятий.....	29
6. Конспект лекций.....	30
7. Методические указания по выполнению курсовых проектов (работ).....	104
8. Методические указания по выполнению лабораторных работ.....	104
9. Методические указания к практическим (семинарским) занятиям.....	126
10. Методические указания по выполнению домашних заданий и контрольных работ.....	126
11. Перечень программных продуктов, используемых при изучении курса....	137
12. Методические указания по применению современных информационных технологий для преподавания учебной дисциплины.....	137
13. Методические указания профессорско-преподавательскому составу по организации межсессионного и экзаменационного контроля знаний студентов (материалы по контролю качества образования).....	137
14. Комплекты заданий для курсового проекта по дисциплине.....	139
15. Фонд тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний по дисциплине.....	140
16. Комплекты экзаменационных билетов для каждого из предусмотренных экзаменов по дисциплине и контрольные вопросы к зачету.....	147
17. Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско-преподавательского состава.....	149

**1. Программа дисциплины, соответствующая требованиям государственного образовательного стандарта.**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель Департамента образовательных программ и стандартов профессионального образования

\_\_\_\_\_ Л.С.Гребнев

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2001г.

ПРИМЕРНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ДАЛЬНИЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО  
НАПРЯЖЕНИЯ

Рекомендуется Минобразованием России для направления подготовки специалистов 650900 - ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.

Специальность 100200 - Электроэнергетические системы и сети

## 1. Цели и задачи дисциплины.

Целью изучения дисциплины является подготовка инженеров в области передачи электрической энергии по магистральным протяженным линиям переменного тока сверхвысокого напряжения. При этом основное внимание уделяется анализу режимных характеристик, что позволяет рассматривать эти линии как элементы сложной энергетической системы.

Задачей изучения дисциплины является ознакомление студентов с основными режимами линий сверхвысокого напряжения и их особенностями, методами их расчета, выбором и расстановкой компенсирующих устройств, путями повышения пропускной способности. Кроме того, в задачи изучения дисциплины входят также ознакомление с основными принципами работы новых типов линий электропередач: компактных линий, линий постоянного тока, управляемых линий.

## 2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- знать общие закономерности передачи электроэнергии по протяженным линиям электропередач сверхвысокого напряжения, основные конструктивные и режимные особенности этих линий, методы расчета режимов электропередач сверхвысокого напряжения, способы введения этих режимов в допустимые границы, методы повышения пропускной способности электропередач;
- уметь составлять схемы замещения протяженных линий сверхвысокого напряжения, рассчитывать основные параметры режимов электропередач, оптимизировать эти режимы, определять мощности и места установки компенсирующих устройств, выбирать другую аппаратуру электропередачи, пользоваться справочной литературой;
- иметь навыки проектирования электропередач сверхвысокого напряжения: выбирать номинальное напряжение электропередачи, количество цепей, конструкцию фазы, определять схемы подстанций, состав и параметры основного оборудования электропередачи, ее основные технико-экономические показатели.

## 3. Объем дисциплины и виды учебной работы.

Вид учебной работы	Всего часов	Семестр
Общая трудоемкость дисциплины	150	9
Аудиторные занятия	68	9
Лекции	34	9
Практические занятия (ПЗ)	17	9
Лабораторные работы (ЛР)	17	9
Самостоятельная работа	82	9
Курсовой проект	60	9
Подготовка к ПЗ и ЛР	22	9
Вид итогового контроля		Зачет Экзамен

## 4. Содержание дисциплины.

## 4.1. Разделы дисциплины и виды занятий.

№ п/п	Раздел дисциплины	Лекции	ПЗ	ЛР
1	Роль электропередач СВН в энергосистемах	*		
2	Особенности конструктивного исполнения линий СВН и их параметры	*	*	
3	Уравнения токов и напряжений, распределение токов и напряжений по линии	*	*	*
4	Способы представления протяженных линий в расчетных схемах	*	*	
5	Методика и особенности расчета режимов максимальных и минимальных нагрузок электропередачи	*	*	*
6	Особые режимы электропередачи и мероприятия по их нормализации	*	*	
7	Методы повышения пропускной способности электропередач СВН	*	*	*
8	Новые типы электропередач	*		

## 4.2. Содержание разделов дисциплины.

### 4.2.1. Роль электропередач СВН в энергосистемах.

Задачи, которые решаются с помощью линий СВН в энергосистемах. Особенности линий СВН, их технические и экономические характеристики, требования, предъявляемые к этим линиям. Краткий исторический обзор развития техники передачи энергии на расстояние. Применение электропередач СВН за рубежом.

4.2.2. Особенности конструктивного исполнения линий СВН и их параметры.

Габариты линий СВН и факторы, их определяющие. Конструкция фазы, выбор ее оптимальных параметров. Влияние конструкции фазы на удельные электрические параметры линии и ее пропускную способность.

4.2.3. Уравнение токов и напряжений, распределение токов и напряжений по линии.

Учет распределенности параметров линии и волновых процессов при передаче электрической энергии. Характеристики режима при передаче различных мощностей. Круговые диаграммы мощностей начала и конца линии. Эпюры распределения тока, напряжения, реактивной мощности вдоль линии. Реактивные мощности концов линии при разных нагрузках, методы их компенсации.

4.2.4. Способы представления протяженных линий в расчетных схемах.

Возможные способы представления протяженных линий в расчетных схемах. Связь параметров четырехполюсника с параметрами П- и Т-образной схемы замещения. Поправочные коэффициенты и их определение. Преобразование А.А. Горева и определение с его помощью параметров схем замещения. Учет элементов с сосредоточенными параметрами. Замещение электропередачи эквивалентным четырехполюсником, определение его постоянных.

4.2.5. Методика и особенности расчета режимов максимальных и минимальных нагрузок электропередачи.

Задачи и особенности расчета протяженных электропередач, способы задания исходной информации.

Особенности расчета режима наибольших нагрузок электропередачи, оптимизация режима, выбор мощности и места установки компенсирующих устройств.

Особенности расчета режимов малых нагрузок, загрузка генераторов и синхронных компенсаторов реактивной мощностью, стекающей с линии. Выбор мощности и места установки шунтирующих реакторов.

Расчеты режимов линий с промежуточными отборами мощности, алгоритмы расчетов.

4.2.6. Особые режимы электропередачи и мероприятия по их нормализации.

Режим одностороннего включения протяженной линии, распределение напряжения и реактивной мощности, методы ограничения напряжений и компенсации реактивной мощности. Выбор мощности и места установки шунтирующих реакторов. Самовозбуждение генераторов в данном режиме, условия, его вызывающие, и мероприятия по его устранению.

4.2.7. Методы повышенной пропускной способности электропередач СВН.

Понятие пропускной способности линии. Общая характеристика способов повышения пропускной способности. Промежуточные синхронные компенсаторы, выбор их мощности и места установки. Продольная емкостная компенсация, выбор ее параметров, воздействие на режим линии, конструкция УПК.

Переключательные пункты как средство повышения пропускной способности в послеаварийных режимах.

4.2.8. Новые типы электропередач.

Компактные линии, их конструкция, удельные параметры, пропускная способность.

Управляемые линии переменного тока. Методы введения управляющих воздействий в линию, характеристики таких линий

Электропередачи постоянного тока. Схема электропередачи, ее основные характеристики, преимущества и недостатки.

## 5. Лабораторный практикум.

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ
----------	-------------------------	---------------------------------

1	3	Исследование распределения напряжения, тока и реактивной мощности вдоль линии электропередачи.
2	3	Круговые диаграммы и угловые характеристики мощности.
3	5	Изучение режимов электропередачи с промежуточным отбором мощности.
4	7	Исследование предела передаваемой мощности и его повышение с помощью установки продольной компенсации.

## 6. Учебно-методическое обеспечение дисциплины.

### 6.1. Рекомендуемая литература.

#### а) основная литература:

1. Электрические системы. Электрические сети / Под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева - М.: Высшая школа, 1998.
2. В.А. Веников, Ю.П. Рыжов. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока - М.: Энергоатомиздат, 1985.

#### б) дополнительная литература:

1. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях / Под ред. В.А. Строева - М.: Высшая школа, 1999.
2. Дальние электропередачи в примерах / Под ред. Ю.П. Рыжова - М.: Изд-во МЭИ, 1994.
3. Г.Н. Александров. Передача электрической энергии переменным током - М.: Знак, 1998.

### 6.2. Средства обеспечения освоения дисциплины.

Расчетные компьютерные программы REGIM, MATHCAD.

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины.

Специализированные расчетные столы переменного тока.

Программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению подготовки специалистов 650900 - ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА специальности 100200 - Электроэнергетические системы и сети.

Программу составил:

Ю.П.Рыжов, доцент, МЭИ (ТУ).

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии по специальности 100200 – Электроэнергетические системы и сети

Председатель Учебно-методического совета по специальности 100200-  
Электроэнергетические системы и сети

\_\_\_\_\_ Строев В.А.

Программа одобрена на заседании Учебно-методического совета по направлению 650900 – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

от " 15 " декабря 2000 г.                      Протокол № 3

Председатель Учебно-методического совета  
по направлению 650900 – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

\_\_\_\_\_ Жуков В.В.

Председатель Совета УМО по образованию в области  
энергетики

\_\_\_\_\_ Аметистов Е.В.

## 2. Рабочая программа дисциплины.

Федеральное агентство по образованию РФ  
Амурский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по УНР  
Е.С. Астапова

\_\_\_\_\_ "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

### РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине «Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения»  
для специальности 140205 – Электроэнергетические системы и сети

Очная форма обучения

Заочная форма обучения

Курс 5

Семестр 9

Семестр 10

Лекции – 42 часа

Экзамен – 9 семестр

Лекции – 18 час.

Практические занятия – 14 часов

Практические - 10 час.

Лабораторные работы – 14 часов

Лабораторные раб. - 4 часа

Курсовой проект – 9 семестр (40 часов)

Курс. проект – 11 сем. (40)

Самостоятельная работа – 40 час.

Самост. работа – 78 час.

Всего часов - 150

Составитель: А.С. Степанов, канд.техн.наук, доцент

Факультет - Энергетический

Кафедра Энергетики

2006 г.

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 650900 «Электроэнергетика» для специальности 140205 – Электроэнергетические системы и сети

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры энергетики

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 200\_ г. (протокол № \_\_\_\_\_)

Зав.кафедрой \_\_\_\_\_ (Н.В.Савина)

Рабочая программа одобрена на заседании учебно-методического совета направления (специальности) \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 200\_ г. (протокол № \_\_\_\_\_)

Председатель УМС \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)

СОГЛАСОВАНО  
Начальник УМУ

СОГЛАСОВАНО  
Начальник УМС факультета

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 200\_ г.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 200\_ г.

СОГЛАСОВАНО  
Заведующий выпускающей  
кафедры

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 200\_ г.

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

### 1.1 Цель преподавания дисциплины

Целью изучения дисциплины является подготовка инженеров в области передачи электрической энергии по магистральным протяженным линиям переменного тока сверхвысокого напряжения. При этом основное внимание уделяется анализу режимных характеристик, что позволяет рассматривать линии как элементы сложной энергетической системы.

### 1.2 Задачи изучения дисциплины

Задачей изучения дисциплины является ознакомление студентов с основными режимами линий сверхвысоких напряжений и их особенностями, методами их расчета, выбором и расстановкой компенсирующих устройств, путями повышения пропускной способности. Кроме того, в задачи изучения дисциплины входят также ознакомление с основными принципами работы новых типов линий электропередач: компактных линий, линий постоянного тока, управляемых линий.

1.3 Дисциплины, освоение которых необходимо при изучении данной дисциплины:

«Высшая математика»

«Физика»

«Теоретические основы электротехники»,

«Передача и распределение электроэнергии»,

«Переходные процессы в электроэнергетических системах».

## 2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 2.1 Федеральный компонент

СД.06. (выдержки)

Роль передач СВН в энергосистеме; особенности их конструктивного исполнения; уравнения токов и напряжений; распределение токов и напряжений по линии; способы представления протяженных линий в расчетных схемах; методика и особенности расчета максимальных и минимальных режимов электропередачи; особые режимы электропередачи и мероприятия по их нормализации; методы повышения пропускной способности электропередач; новые типы электропередач.

## 2.2 Наименование тем, их содержание и объем в часах.

### **Тема 1.**

Введение. Общие сведения о дальних ЛЭП СВН (2 часа)

Роль дальних электропередач в современной электроэнергетике. Виды систем и электропередач. Преимущества объединения энергосистем с помощью дальних ЛЭП СВН. Техничко-экономические задачи, возникающие при передаче энергии и объединении систем. Развитие энергосистем и дальних электропередач. Перспективы развития дальних ЛЭП СВН на Дальнем Востоке.

### **Тема 2.**

Конструкция дальних электропередач (4 часа).

Задачи, возникающие при выборе основных параметров электропередач и установлении их режимов. Конструктивные особенности линий сверхвысокого напряжения. Габариты линий СВН и факторы, их определяющие.

Влияние конструкции фазы на удельные электрические параметры линии и ее пропускную способность. Влияние ЛЭП СВН на окружающую среду.

### **Тема 3.**

Физико-технические характеристики передачи электроэнергии на большие расстояния (6 часов)

Учет распределенности параметров линии и волновых процессов при передаче электрической энергии. Уравнения длинной линии. Понятие

идеальной линии. Зависимость предела передаваемой мощности линии от ее длины.

Влияние индуктивности и емкости линии на напряжение и ток. Понятие натуральной мощности. Распределение напряжения и тока в линии при передаче по ней мощности меньше и больше натуральной.

Основные соотношения между параметрами режима электропередачи переменного тока. Круговые диаграммы мощностей начала и конца линии. Определение КПД линии и электропередачи. Реактивные мощности концов линии при разных нагрузках, методы их компенсации.

#### **Тема 4.**

Способы представления дальних ЛЭП в расчетах (4 часа).

Схемы замещения дальних электропередач. Связь параметров четырехполюсника с параметрами П- и Т-образной схем замещения.

Зависимость параметров П-образной схемы замещения от длины линии. Поправочные коэффициенты и их определение. Учет элементов с сосредоточенными параметрами.

#### **Тема 5.**

Режимы максимальных и минимальных нагрузок дальних электропередач (6 часов).

Задачи расчета режимов дальних ЛЭП. Способы задания исходной информации.

Расчет режима наибольших нагрузок электропередачи, его оптимизация, выбор мощности и места установки компенсирующих устройств.

Расчет режима малых нагрузок, загрузка генераторов и синхронных компенсаторов реактивной мощностью, стекающей с линии. Выбор мощности и места установки шунтирующих реакторов.

#### **Тема 6.**

Холостой ход и особые режимы дальних электропередач (6 часов)

Определение особых режимов. Установившиеся режимы холостого хода. Методы ограничения напряжений и компенсации реактивной мощности.

Самовозбуждение генераторов в режиме одностороннего включения протяженной ЛЭП, условия, его вызывающие и мероприятия по его устранению.

Несимметричные режимы работы электропередач. Соотношения и схемы замещения, применяемые в расчетах несимметричных режимов. Определение допустимых нагрузок генераторов и трансформаторов в несимметричных режимах.

#### **Тема 7.**

Методы повышения пропускной способности ЛЭП СВН (2 часа).

Общая характеристика способов повышения пропускной способности. Промежуточные синхронные компенсаторы, выбор их мощности и места установки. Продольная емкостная компенсация, конструкция УПК.

#### **Тема 8.**

Электропередачи постоянного тока(8 часов).

Схемы и области применения электропередач постоянного тока. Схема замещения одномостового преобразователя. Уравнения токов и напряжений. Режимы малых токов, рабочих токов и перегрузки.

Внешние характеристики выпрямителя. Режимы работы выпрямителя.

Принцип действия и эквивалентная схема инвертора. Характеристики режима инвертора. Внешние характеристики одномостового инвертора.

Совместная работа выпрямителя и инвертора. Энергетические процессы в преобразователе.

#### **Тема 9.**

Новые типы электропередач (4 часа).

Компактные линии, их конструкция, удельные параметры, пропускная способность.

Управляемые линии переменного тока. Методы введения управляющих воздействий в линию, характеристики таких линий.

### 2.3 Практические занятия (14 часов)

№ темы	Название темы	Кол-во часов
1	Выбор основных проектных решений при сооружении воздушных линий сверхвысокого напряжения	2
2	Параметры и схемы замещения линий электропередач	4
3	Расчет нормальных режимов протяженных линий электропередач	4
4	Режимы одностороннего включения линий электропередач	2
5	Расчеты устойчивости и пропускной способности электропередач	2

Цель практических занятий – научить студентов выполнять расчеты по выбору конструктивных параметров дальних ЛЭП СВН, нормальных и особых режимов, параметров схем их замещения, устойчивости и пропускной способности. Практические занятия проводятся по учебным пособиям [4,5].

### 2.4 Лабораторные занятия (14 часов)

№ темы	Название темы	Кол-во часов
1	Экспериментальное исследование преобразователя, работающего в выпрямительном режиме	4
2	Экспериментальное исследование преобразователя, работающего в инверторном режиме	4
3	Экспериментальное исследование электропередачи постоянного тока	4
4	Заключительное занятие	2

### 2.5 Курсовой проект

Курсовой проект посвящен проектированию и расчету режимов дальних электропередач переменного тока и выполняется с использованием методического пособия, в котором рассматриваются следующие вопросы:

- Определение волнового сопротивления воздушной линии.
- Составление схемы замещения электропередачи и определение ее параметров.

- Определение волнового сопротивления ВЛ, требуемого по условиям устойчивости.
- Обоснование оптимальной конструкции фазы.
- Определение радиуса расщепления фазы.
- Определение области допустимых параметров расщепленной фазы.
- Выбор наилучших вариантов конструкции фазы.
- Расчет технико-экономических показателей ВЛ.
- Определение параметров схем замещения линии (четырёхполюсник и П-образная).
- Расчет для идеальной линии.
- Расчет для линии с учетом потерь.
- Выбор компенсирующих устройств.
- Расчет зарядной мощности ВЛ и выбор шунтирующих реакторов.
- Оценка уровней напряжения в режиме холостого хода при одностороннем питании ВЛ.
- Оценка уровней напряжения в режиме холостого хода при двустороннем питании.
- Расчеты режимов работы электропередачи.
- Расчет методом четырёхполюсников.
- Расчет по П-образной схеме замещения.

## 2.6 Самостоятельная работа студентов

Тематика и распределение времени на самостоятельную работу студентов представлена в разделе 4.

## 2.7 Перечень и темы промежуточных форм контроля знаний

К промежуточным формам контроля знаний относятся:

- блиц-опрос на лекциях по пройденному материалу;
- решение домашних заданий с последующей их проверкой на практических занятиях;
- составление рефератов и их последующая защита.

## 2.8 Вопросы к экзамену

1. Особенности проектирования дальних ЛЭП СВН и их применение для объединения энергосистем.
2. Преимущества объединения энергосистем с помощью дальних ЛЭП СВН.
3. Схемы выполнения электропередач СВН
4. Габариты линий СВН и факторы, их определяющие.
5. Влияние конструкции фазы на удельные электрические параметры линии и ее пропускную способность.
6. Воздействие ЛЭП СВН на окружающую среду.
7. Учет распределенности параметров ЛЭП и волнового процесса передачи энергии.
8. Уравнение длинной линии.
9. Понятие идеальной линии.
10. Зависимость предела передаваемой мощности линии от ее длины.
11. Влияние индуктивности и емкости линии на напряжение и ток.
12. Понятие натуральной мощности.
13. Распределение напряжения и тока в линии при передаче по ней мощности меньше и больше натуральной.
14. Соотношения между параметрами режима ДЭП.
15. Круговые диаграммы мощностей начала и конца линии.
16. Определение КПД линии и электропередачи.
17. Реактивные мощности концов линии при разных нагрузках, методы их компенсации.
18. Действие индуктивности и емкости линии на напряжение и ток.
19. Изменение напряжения и тока в ДЭП.
20. Процессы в дальних ЛЭП при одинаковом напряжении по её концам.
21. Схемы замещения ДЭП.
22. Представление ДЭП четырехполносниками.
23. Представление ДЭП П-образными схемами замещения.

24. Связь между параметрами различных схем замещения ДЭП.
25. Характеристики П-образной схемы замещения ДЭП.
26. Поправочные коэффициенты и их определение.
27. Учет элементов с сосредоточенными параметрами.
28. Задачи расчетов режимов ДЭП и способы задания исходной информации.
29. Задачи расчета режима наибольших нагрузок.
30. Задачи расчета режима минимальных нагрузок.
31. Определение особых режимов.
32. Установившиеся режимы холостого хода.
33. Самовозбуждение генераторов в режиме одностороннего включения протяженной ЛЭП
34. Несимметричные режимы работы электропередач.
35. Методы увеличения пропускной способности ДЭП.
36. Промежуточные синхронные компенсаторы, выбор их мощности и места установки.
37. Продольная емкостная компенсация, конструкция УПК.
38. Особенности передачи энергии по линиям постоянного тока.
39. Схема замещения ЛЭП постоянного тока.
40. Схема трехфазного вентильного моста Ларионова.
41. Униполярные и биполярные ДЭП постоянного тока.
42. Уравнения токов и напряжений для ДЭП постоянного тока.
43. Режимы малых токов, рабочих токов и перегрузки ДЭП постоянного тока.
44. Внешние характеристики выпрямителя.
45. Режимы работы выпрямителя.
46. Принцип действия и эквивалентная схема инвертора.
47. Характеристики режима инвертора.
48. Внешние характеристики однофазного инвертора.
49. Совместная работа выпрямителя и инвертора.
50. Энергетические процессы в преобразователе.

- 51.Преимущества передачи энергии по ЛЭП постоянного тока.
- 52.Компактные линии, их конструкция.
- 53.Удельные параметры и пропускная способность компактных линий.
- 54.Управляемые линии переменного тока. Методы введения управляющих воздействий в линию, характеристики таких линий.

### 3. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

#### 3.1 Основная литература

1. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии.- Ростов-на-Дону: Феникс.- 2006.- 720 с.
2. Электрические системы. Электрические сети / Под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева.- М.: Высшая школа, 1998.- 511 с.
3. Справочник по проектированию электрических сетей/ под ред. Д.Л. Файбисовича.- М.: Изд. НЦ ЭНАС.- 2006.- 352 с.
4. Веников В.А., Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
5. Дальние электропередачи в примерах./ Под ред. Ю.П. Рыжова. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – 88 с.

#### 3.2 Дополнительная литература

1. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях / Под ред. Ю.П. Рыжова – М.: Изд-во МЭИ, 1994.
2. Электрические системы. Т.3. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения/ Под ред. В.А. Веникова. - М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.
3. Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах / Под ред. Г.Н. Александрова.- Л., 1987.- 232 с.
4. Управляемые линии электропередачи / Под ред. В.А. Веникова.- Кишинев: Штиинца, 1984.- 296 с.

5. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения/  
Под ред. Г.Н. Александрова и Л.Л. Петерсона. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.
6. Режимы дальних электропередач в примерах/ Г.К. Зарудский, Е.В.Путятин, И.С. Рокотян и др. – М.: Изд-во МЭИ, 1985. – 179 с.

3.3 Методические и наглядные материалы, используемые в учебном процессе

3.3.1 Методическое пособие

Степанов А.С. Методические указания по выполнению курсовой работы по курсу «Дальние электропередачи».- Благовещенск, Изд-во БТИ, 1991. – 27 с.

3.3.2 Технические средства обучения и пособия к ним

1. Физическая модель линии постоянного тока и преобразовательных подстанций (2 установки).
2. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Дальние ЛЭП СВН».

## 4 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ

№ недели	№ темы	Вопросы, изучаемые на лекции	Занятия (номера) Практич. (семина.)	Используемые наглядные и методические пособия	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
					Содержание	Час	
1	2	3	4	5	6	7	8
	1	см. подраздел 2.2		Схемы ОЭС с межсистемными ЛЭП	История развития электропередач 330 кВ и выше	4	защита рефератов в течение семестра
	2			Слайды с конструкциями ЛЭП СВН	Изучение конструктивных особенностей ЛЭП СВН	4	Блиц-опрос
	3		Практич. занятие 1		Выполнение домашних заданий	4	Проверка на практ. занятиях
	4		Практич. занятие 2		Выполнение индивидуальных домашних заданий по расчету параметров схем замещения ДЭП	4	Проверка на практ. занятиях
	5		Практич. занятие 3		Выполнение индивидуальных домашних заданий по расчету режимов ДЭП	4	Проверка на практ. занятиях
	6		Практич. занятие 4		Решение задач по выбору компенсирующих устройств	4	Проверка на практ. занятиях
	7		Практич. занятие 5		Решение задач по расчету устойчивости электропередач	4	Проверка на практ. занятиях

1	2	3	4	5	6	7	8
	8			Схемы выполнения ЛЭП ПТ	История и перспективы развития электропередач постоянного тока	6	защита рефератов в течение семестра
	9				Современные исследования в области новых способов передачи энергии по публикациям научных журналов	6	защита рефератов в течение семестра

**3. График самостоятельной работы студентов по дисциплине на каждый семестр с указанием ее содержания, объема в часах, сроков и форм контроля.**

<i>№ тем ы</i>	<i>Содержание</i>	<i>Объем , час</i>	<i>Срок, уч. недели</i>	<i>Форма контроля</i>
1	История развития электропередач 330 кВ и выше	4	1-10	публичная защита рефератов
2	Изучение конструктивных особенностей ЛЭП СВН	4	2	Блиц-опрос
3	Выполнение домашних заданий по выбору конструктивных элементов ЛЭП СВН	4	3	Проверка на практ. занятиях
4	Выполнение индивидуальных домашних заданий по расчету параметров схем замещения ДЭП	4	5	Проверка на практ. занятиях
5	Выполнение индивидуальных домашних заданий по расчету режимов ДЭП	4	6	Проверка на практ. занятиях
6	Решение задач по выбору компенсирующих устройств	4	8	Проверка на практ. занятиях
7	Решение задач по расчету устойчивости электропередач	4	10	Проверка на практ. занятиях
8	История и перспективы развития электропередач постоянного тока	6	11-14	публичная защита рефератов
9	Современные исследования в области новых способов передачи энергии	6	11-14	публичная защита рефератов

Примечание. Список литературы, необходимый для изучения вопросов, заданных на самостоятельную работу, приведен в рабочей программы дисциплины.

#### 4. Методические рекомендации по проведению семинарских и практических занятий.

Практические занятия предусмотрены в рабочей программе в объеме 14 часов. Тематика практических занятий представлена в таблице.

№ темы	Название темы	Кол-во часов
1	Выбор основных проектных решений при сооружении воздушных линий сверхвысокого напряжения	2
2	Параметры и схемы замещения линий электропередач	4
3	Расчет нормальных режимов протяженных линий электропередач	4
4	Режимы одностороннего включения линий электропередач	2
5	Расчеты устойчивости и пропускной способности электропередач	2

Цель практических занятий – научить студентов выполнять расчеты по выбору конструктивных параметров дальних ЛЭП СВН, нормальных и особых режимов, параметров схем их замещения, устойчивости и пропускной способности.

Практические занятия проводятся по учебному пособию: Дальние электропередачи в примерах./ Под ред. Ю.П. Рыжова. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – 88 с.

Ниже приведены номера задач из данного учебного пособия, которые решаются по каждой теме, а также задания для самостоятельной работы студентов.

№ темы	№ задач	Вопросы для самостоятельной работы
1	1.1	1. Проанализировать зависимость напряженности электрического поля от расстояния между проводами в расщепленной фазе, а также от количества проводов в фазе 2. Проанализировать изменение погонных и волновых параметров линии с различным числом проводов при оптимальном расстоянии между ними
2	2.1-2.4	1. Найти параметры П-образной схемы замещения, четырехполюсника и собственные и взаимные

		сопротивления электропередачи согласно индивидуального задания. 2. Построить зависимости параметров схемы замещения линии от ее длины.
3	1.2, 1.3	Построить векторные диаграммы напряжений и токов для для режимов наибольших и наименьших нагрузок линии
4	3.1-3.4	Построить зависимости напряжения на открытом конце электропередачи от мощности шунтирующих реакторов, подключенных в различных местах линии.
5	4.1-4.4	Построить угловые характеристики мощности для электропередачи с учетом и без учета распределенности параметров линии и оценить погрешность неучета распределенности параметров.

При подготовке ответов на вопросы для самостоятельной работы студентам рекомендуется пользоваться программой MathCAD для построения графиков и выполнения серий расчетов.

На практических занятиях помимо решения вышеуказанных задач и проверки индивидуальных заданий рекомендуется проведение выступлений студентов с докладами по рефератам и их обсуждение (до 30 мин.) по темам:

1. История развития электропередач 330 кВ и выше.
2. История и перспективы развития электропередач постоянного тока.
3. Современные исследования в области новых способов передачи энергии.

В качестве источников информации для составления рефератов студентам рекомендуются:

- Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах / Под ред. Г.Н. Александрова.- Л., 1987.- 232 с.
- Управляемые линии электропередачи / Под ред. В.А. Веникова.- Кишинев: Штиинца, 1984.- 296 с.
- Электропередачи постоянного тока и опыт их эксплуатации/ В.В. Худяков.- М.: Изд. МЭИ, 1992.- 132 с.
- Публикации в журналах «Электричество», «Электрические станции», «Энергетика за рубежом».

## 5. Методические рекомендации по проведению лабораторных занятий.

Лабораторные занятия предусмотрены в рабочей программе в объеме 14 часов. Тематика лабораторных занятий представлена в таблице.

№ темы	Название темы	Кол-во часов
1	Экспериментальное исследование преобразователя, работающего в выпрямительном режиме	4
2	Экспериментальное исследование преобразователя, работающего в инверторном режиме	4
3	Экспериментальное исследование электропередачи постоянного тока	4
4	Заключительное занятие	2

Лабораторные занятия проводятся по учебному пособию: Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Дальние ЛЭП сверхвысокого напряжения» (составитель: А.С. Степанов).

Лабораторные работы проводятся в следующей последовательности:

1. Инструктаж по технике безопасности.
2. Теоретический опрос и допуск к работе.
3. Проведение экспериментов на лабораторных стендах.
4. Предварительная обработка результатов экспериментов.
5. Выводы по проделанной работе.
6. Защита отчетов.
7. Оформление отчетов.

### Список рекомендуемой литературы

6. Веников В.А., Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
7. Электрические системы. Т.3. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения/ Под ред. В.А. Веникова. - М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.

## 6. Конспект лекций

### 1. ВВЕДЕНИЕ

#### 1.1. Общие сведения

Электропередачи сверхвысокого напряжения (СВН) обеспечивают выдачу мощности от крупных электростанций и являются связующими звеньями ЕЭС (межсистемные связи).

Выделяют два типа ЛЭП – магистральные электропередачи для передачи больших мощностей на значительные расстояния и распределительные электропередачи для передачи электроэнергии непосредственно потребителю.

В настоящем курсе изучаются ЛЭП первого типа.

Отличительные особенности проектирования ЛЭП СВН

1. Необходимость глубокого ограничения внутренних перенапряжений.
2. Необходимость увеличения числа проводов в фазе для уменьшения коронирования (потери мощности, радио- и телевизионные помехи, уровни шума).
3. Необходимость уменьшения габаритов опор и полосы отчуждения.

Важнейшей функцией линий СВН является образование ЕЭС.

Преимущества объединения энергосистем:

1. Наиболее экономичное использование топлива для выгоднейшего распределения нагрузки между станциями (в т.ч. ГЭС).
1. Наивыгоднейшие режимы для всех параллельно работающих станций.
2. Снижение необходимого резерва мощности на станциях.
3. Увеличение доли выработки электроэнергии на дешевых местных топливах с низкой калорийностью, перевозка которых слишком дорога.
4. Строительство новых станций осуществляется далеко от крупных городов.
5. Более полное использование установленной мощности станций за счет расхождения пиков нагрузки различных районов по времени (долготный и широтный эффекты).
6. Увеличение надежности работы систем.

## 7. Повышение производительности труда.

### 1.2. Конструктивные особенности линий СВН

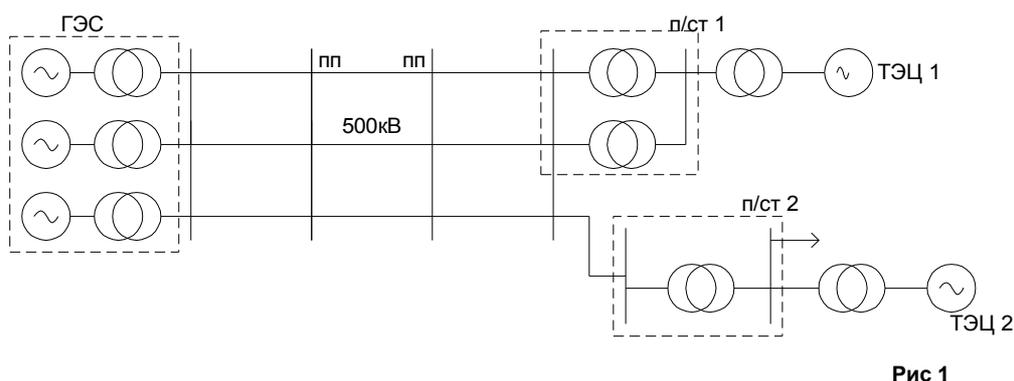
#### 1.2.1. Схемы выполнения электропередач СВН

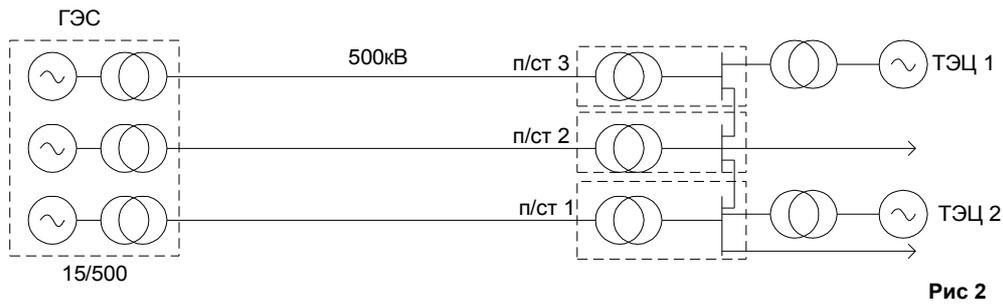
Электропередачи могут выполняться по двум основным схемам: связанной и блочной.

Связанная схема – многоцепная ЛЭП, имеющая вдоль своей трассы несколько соединений между отдельными цепями (рис. 1).

Блочная схема – такая ДЭП, в которой группы генератор – трансформатор на передающем конце соединены отдельными линиями, не связанными одна с другой, а на приемном конце эти линии присоединены к группам приемной системы (рис. 2).

При связанной схеме ПП делят данную линию на короткие участки (200-400 км). При повреждении одной из цепей на каком-либо участке последний отключается на двух смежных ПП с обеих сторон. Это увеличивает пропускную способность ДЭП, что, однако, удорожает строительство самой ДЭП.





Преимущества блочной схемы:

1. Отключение одной цепи не может существенно влиять на работу системы (при условии наличия резерва мощности в самой системе)
2. Отпадает необходимость в сооружении ПП и в проведении ряда других мероприятий по повышению динамической устойчивости электропередачи.
3. Требуется значительно меньше ВВ аппаратуры

При сооружении ДЭП по связанной схеме, когда вследствие применения специальных мер удастся существенно повысить пропускную способность (рис. 3), возможно:



1. Ограничение (не более 2) числа цепей.
2. Снижение вращающегося резерва мощности в энергосистеме во время максимальной нагрузки.
3. Улучшение организации эксплуатации и ремонта.

4. Облегчение присоединения к ДЭП нагрузок и промежуточных энергосистем.
5. Упрощение присоединения ДЭП к системе (не надо усиливать сеть 110-220 кВ для резервирования каждой цепи ДЭП).
6. Снижение внутренних перенапряжений при обеспечении надежной РЗ и каналов связи.

В перспективе ПП преобразуются в высоковольтные подстанции для отбора мощности от ДЭП.

Блочная схема в чистом виде не применяется.

Необходимое число цепей ДЭП зависит от той предельной мощности, которая может быть передана по условиям статической и динамической устойчивости.

Необходимо также учитывать наличие резерва в приемной системе.

Выбор напряжения ДЭП зависит от длины передачи и передаваемой мощности.

### 1.3. Конструктивные элементы линий СВН

#### Провода ВЛ

Современные мощные ВЛ имеют большие токовые нагрузки. Сечения проводов при этом получаются следующими:

330 кВ	500 - 1000 мм <sup>2</sup>
500 кВ	1500 мм <sup>2</sup>
750 кВ	2500 мм <sup>2</sup> и более

По конструктивным соображениям одиночные провода такого сечения не изготавливаются. Кроме того, внешний диаметр провода должен быть таким, чтобы свести к минимуму потери мощности на корону. Поэтому ЛЭП –330 кВ и выше сооружаются с расщепленными проводами. При этом эквивалентный радиус фазы, расщепленной на n проводов, равен

$$r_3 = \sqrt[n]{r * a^{(n-1)}}$$

где r – радиус одиночного провода

a – среднегеометрическое расстояние между осями проводов фазы

Погонные рабочие емкости (ф/км) и индуктивности (Гн/км) расщепленной на  $n$  проводов фазы равны

$$C = 0,0241 * 10^{-6} * \lg \frac{D}{r_3}$$

$$L = \left( 2 \ln \frac{D}{r_3} + \frac{0.5}{n} \right) * 10^{-4}$$

Им соответствуют удельные проводимости (см/км) и индуктивные сопротивления (ом/км)

$$b_0 = \omega * C = 7,58 * 10^{-6} / \lg \frac{D}{r_3}$$

$$x_0 = \omega * L = 0.1445 * \lg \frac{D}{r_3} + \frac{0,0157}{n}$$

где

$D$ -среднегеометрическое расстояние между фазами

$$\omega = 2\pi * f$$

Уменьшение индуктивности и увеличение емкости из-за расщепления проводов снижает волновое сопротивление линии.

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jy_0}}$$

$$S_c = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Z_c}$$

На ЛЭП –330 кВ применяется расщепление фазы на 2 провода, на ЛЭП –500 кВ на 3 провода, на ЛЭП –750 кВ на 4 провода, на ЛЭП –1150 кВ на 8-12 проводов

## Опоры ВЛ

Применяются одностоечные, трехстоечные, порталные, V-образные, рогатки, рюмки, четырехстоечные и другие.

### 1.4. Воздействие ЛЭП СВН на окружающую среду

Влияние ВЛ весьма разнообразно.

1. Отвод земли под опоры. Размеры этих площадок ограничиваются размерами основания опоры и шириной в 2 м в каждую сторону. Площадь, отведенная под опоры ВЛ в бессрочное пользование

$$S = \sum_1^m n_i * S_{0i}$$

где

$S_{0i}$  – площадь, занимаемая одной опорой  $i$ -го типа

$n_i$  – количество опор  $i$ -го типа

$m$  – количество типов опор на линии

Например, для ВЛ –750 кВ

$S_{0i} = 219 \text{ м}^2$  для опоры типа «рюмка»

$S_{0i} = 637 \text{ м}^2$  для порталной опоры на оттяжках

$S_{0i} = 555 \text{ м}^2$  трехстоечной анкерно-угловой опоры

2. Временное изъятие земли вдоль трассы ЛЭП на период строительства. Под действующими ЛЭП устанавливается охранная зона, в которой могут производиться сельскохозяйственные работы при соблюдении ряда ограничений и требований
3. Эстетическое воздействие ВЛ. Эта проблема актуальна для местностей с высокой плотностью населения. Т.к. стоимость кабельных ЛЭП СВН в 10 раз выше стоимости ВЛ СВН, то приходится строить ВЛ даже в густонаселенных районах. При этом стремятся, чтобы опоры, провода и

изоляторы не выделялись на местности и не портили ландшафт. Применяют следующие приемы:

- выбор трассы ВЛ с наименьшим ущербом для окружающей среды
  - естественное прикрытие (экранирование)
  - маскировка (окраска)
  - выбор лучших конфигураций опор
4. Воздействие электрического поля. Под ЛЭП наводится электростатическое поле большой напряженности. Действующими правилами предусматривается, что габарит от провода до земли в середине пролета выбирается таким образом, чтобы соблюдалась безопасность передвижения под линией транспортных средств и механизмов до 5 м. Человек, находящийся вблизи ВЛ СВН, может подвергаться следующим воздействиям:
- воздействию электрических разрядов (импульсов тока), возникающих при прикосновении человека к заземленным или изолированным от земли объектам
  - непосредственному биологическому воздействию при длительном пребывании в электрическом поле ВЛ СВН. Для обслуживающего персонала утверждены нормы пребывания без защитных средств под ВЛ. Вдоль ВЛ СВН устанавливаются предупреждающие плакаты, на которых отмечаются правила поведения в охранной зоне ВЛ.
5. Акустические шумы и радиопомехи. Из-за высокой напряженности электрического поля на поверхности проводов ВЛ СВН имеет место (особенно, при плохой погоде) высокий уровень акустического шума от короны и ВЧ радиопомех.
6. Выделение озона и азота. Коронирование проводов и деталей линейной арматуры на ВЛ СВН (особенно 750 кВ и выше ) сопровождается выделением озона и окислов азота из окружающего воздуха. Т.к. эти вещества неблагоприятно воздействуют на растительность и человека, то

устанавливаются предельно допустимые нормы их концентрации. На существующих ВЛ имеющаяся концентрация не представляет опасности для человека.

## 2. Характеристики режимов ДЭП

### 2.1. Учет распределенности параметров ЛЭП и волнового процесса передачи энергии

Передача электроэнергии по ЛЭП переменным током связано с распространяющимися электромагнитными волнами вдоль проводов. При анализе работы коротких линий (до 200-400 км) не требуется учитывать волновой характер процесса. Поэтому применяются схемы замещения с сосредоточенными параметрами. Если же длина линии соизмерима с длиной волны, появляется необходимость в учете волнового характера процесса. Поэтому применяется схема замещения с распределенными параметрами, для которых изменение состояния в какой-либо одной точке цепи не сразу проявляется в изменении состояния других ее частей. Для учета распределенности параметров линии рассмотрим элементарный участок  $dl$ . Напишем соотношение между напряжениями и токами на границе участка

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial l} = ir_0 + L_0 * \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial l} = ug_0 + C_0 * \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (2.1.)$$

Если линия включена на синусоидальное напряжение  $\dot{U}_1$ , то для установившегося режима из (2.1.)

$$\begin{cases} -\frac{d\dot{U}}{dl} = (r_0 + j\omega * L_0) * \dot{I} = \dot{Z}_0 * \dot{I} \\ -\frac{d\dot{I}}{dl} = (g_0 + j\omega * C_0) * \dot{U} = \dot{Y}_0 * \dot{U} \end{cases} \quad (2.2.)$$

Тогда получаются два однотипных дифференциальных уравнения второго порядка, характеризующих изменение напряжения и тока вдоль линии.

$$\begin{cases} \frac{d^2U}{dl^2} = -\dot{Z}_0 * \frac{d\dot{I}}{dl} = \dot{Z}_0 * \dot{Y}_0 * \dot{U} \\ \frac{d^2\dot{I}}{dl^2} = -\dot{Y}_0 * \frac{d\dot{U}}{dl} = \dot{Z}_0 * \dot{Y}_0 * \dot{I} \end{cases} \quad (2.3.)$$

Характеристическое уравнение этой системы дифференциальных уравнений имеет вид

$$K^2 - \dot{Z}_0 * \dot{Y}_0 = 0$$

Его корни

$$K_{1,2} = \pm \sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0}$$

При этом решение дифференциальных уравнений имеет вид

$$\dot{U} = \dot{A}_1 * e^{-\sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0} * l} + \dot{A}_2 * e^{\sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0} * l} \quad (2.4.)$$

Для тока имеем

$$\dot{I} = -\frac{1}{\dot{Z}_0} * \frac{d\dot{U}}{dl} = \frac{\sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0}}{\dot{Z}_0} * (\dot{A}_1 * e^{-\sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0} * l} - \dot{A}_2 * e^{\sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0} * l})$$

ИЛИ

$$\dot{I} = \frac{1}{\dot{Z}_c} * (\dot{A}_1 * e^{-\sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0} * t} - \dot{A}_2 * e^{\sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0} * t}) \quad (2.5.)$$

где

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{\dot{Z}_0}{\dot{Y}_0}}$$

В уравнениях (2.4.) и (2.5.) входят следующие коэффициенты:

- постоянные интегрирования, определяющие начальные условия

$$\begin{cases} \dot{A}_1 = A_1 * e^{j\psi_1} \\ \dot{A}_2 = A_2 * e^{j\psi_2} \end{cases}$$

- коэффициент распространения

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0} = \beta + j\alpha$$

- волновое сопротивление

$$\dot{Z}_c = Z_c * e^{-j\epsilon_c}$$

Подставляем эти коэффициенты в уравнении (2.4 и (2.5.)

$$\dot{U} = A_1 * e^{j\psi_1} * e^{-(\beta + j\alpha) * t} + A_2 * e^{j\psi_2} * e^{(\beta + j\alpha) * t} = A_1 * e^{-\beta * t} * e^{j(\psi_1 - \alpha * t)} + A_2 * e^{\beta * t} * e^{j(\psi_2 + \alpha * t)} \quad (2.6.)$$

Аналогично для тока, получим

$$\dot{I} = \frac{1}{\dot{Z}_c} [A_1 * e^{-\beta * t} * e^{j(\psi_1 - \alpha * t + \epsilon_c)} - A_2 * e^{\beta * t} * e^{j(\psi_2 + \alpha * t + \epsilon_c)}] \quad (2.7.)$$

Проектируем векторы  $\dot{U}$  и  $\dot{I}$  на ось, вращающуюся с синхронной скоростью  $\omega$ , получим выражения для мгновенных значений напряжения и тока.

$$u = \sqrt{2} * A_1 * e^{-\beta * l} * \sin(\omega * t + \psi_1 - \alpha * l) + \sqrt{2} * A_2 * e^{\beta * l} * \sin(\omega * t + \psi_2 + \alpha * l) \quad (2.8.)$$

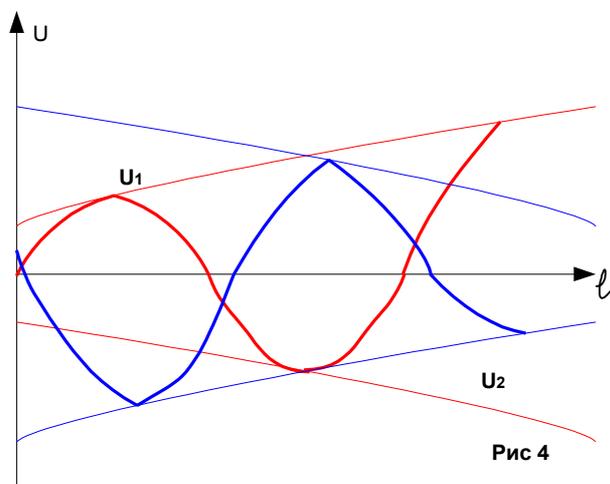
$$i = \frac{\sqrt{2}}{Z_c} * [A_1 * e^{-\beta * l} \sin(\omega * t + \psi_1 - \alpha * l + \epsilon_c) - A_2 * e^{\beta * l} * \sin(\omega * t + \psi_2 + \epsilon_c)] \quad (2.9.)$$

Из уравнений (2.8.) и (2.9.) видно, что

$$u = u_1 + u_2$$

$$i = i_1 - i_2$$

Т.е. напряжение и ток состоят из двух волн (синусоид); напряжение и ток в любой точке линии являются результатом наложения этих волн (рис.4).



Условие неизменной фазы колебаний волны  $U_1$

$$\omega * t + \psi_1 - \alpha * l = \text{const} = B$$

а для волны  $U_2$

$$\omega * t + \psi_2 + \alpha * l = \text{const} = B$$

Тогда для скорости распространения волн

$$v = \frac{dl}{dt}$$

получим: для волны  $U_1$

$$l = \frac{1}{\alpha} (\omega t + \psi - B)$$

$$v_1 = \frac{dl}{dt} = \frac{\omega}{\alpha}$$

$$v_2 = -\frac{\omega}{\alpha}$$

Т.е. волны двигаются с одинаковой скоростью в противоположные стороны. Аналогичные выводы можно сделать и для волн тока.

Волны тока и напряжения, перемещающиеся от начала линии к концу, называются прямыми ( $u_1, i_1$ ), а движущиеся в обратном направлении - обратными.

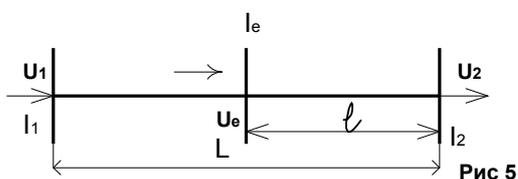
Из выражений (2.8) и (2.9) можно определить физическую сущность коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ .

$\beta$  определяет изменение волны по величине на единицу длины

$\alpha$  определяет изменение фазы на единицу длины линии

## 2.2. Уравнение длинной линии

Уравнения (2.4.) и (2.5.) показывают зависимость фазных значений напряжения и тока в точке линии, удаленной на расстояние  $l$  от ее конца (рис.5).



Линейное напряжение

$$\dot{U}_1 = \sqrt{3} * \dot{U}_{\phi 1}$$

Если воспользоваться граничными условиями, при  $l=0$ , напряжение и ток в конце линии

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2$$

Значение коэффициента  $A_1$  и  $A_2$  определяются из соотношений

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = \sqrt{3} * (\dot{A}_1 + \dot{A}_2) \\ \dot{I}_2 = \frac{1}{\dot{Z}_c} * (\dot{A}_1 - \dot{A}_2) \end{cases}$$

Отсюда имеем

$$\begin{cases} \dot{A}_1 = \frac{1}{2} * \left( \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3}} + \dot{I}_2 * \dot{Z}_c \right) \\ \dot{A}_2 = \frac{1}{2} * \left( \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3}} - \dot{I}_2 * \dot{Z}_c \right) \end{cases} \quad (2.10.)$$

Подставляя (2.10.) в (2.4.) и (2.5.) и имея в виду, что

$$\gamma = \sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0}$$

получим

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 * \frac{e^{-\gamma l} + e^{\gamma l}}{2} + \sqrt{3} * \dot{I}_2 * \frac{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}}{2} * \dot{Z}_c \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 * \frac{e^{-\gamma l} + e^{\gamma l}}{2} + \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} * \dot{Z}_c} * \frac{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}}{2} \end{cases}$$

Известно, что

$$\frac{e^{-\gamma l} + e^{\gamma l}}{2} = \operatorname{ch} \gamma l$$

$$\frac{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}}{2} = \operatorname{sh} \gamma l$$

Тогда имеем

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 * \operatorname{ch} \gamma l + \sqrt{3} * \dot{I}_2 * \dot{Z}_c * \operatorname{sh} \gamma l \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 * \operatorname{ch} \gamma l + \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} * \dot{Z}_c} * \operatorname{sh} \gamma l \end{cases} \quad (2.11.)$$

Уравнение (2.11.) называется уравнением длинной линии.

Из этих уравнений для начала линии имеем

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 * \operatorname{ch} \gamma L + \sqrt{3} * \dot{I}_2 * \dot{Z}_c * \operatorname{sh} \gamma L \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 * \operatorname{ch} \gamma L + \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} * \dot{Z}_c} * \operatorname{sh} \gamma L \end{cases} \quad (2.12.)$$

Желательно иметь выражения, связывающие токи и напряжения в линии с передаваемой мощностью

Предположим, что в конце линии на шины  $\dot{U}_2$  подключена нагрузка, характеризующаяся сопротивлением  $\dot{Z}_2$  и имеющая индуктивный характер (рис.6)

$$\dot{S} = P_2 + jQ_2 = \sqrt{3} * \dot{U}_2 * \dot{I}_2$$

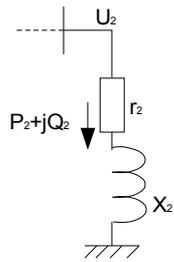


Рис 6

Отсюда

$$\dot{\mathbf{i}}_2 = \frac{\mathbf{P}_2 - \mathbf{jQ}_2}{\sqrt{3} * \hat{U}_2}$$

Подставляя это выражение в (2.11.) имеем

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 * \left[ \operatorname{ch}\dot{\gamma} * l + (\mathbf{P}_2 - \mathbf{jQ}_2) * \frac{\dot{Z}_c}{U_2^2} * \operatorname{sh}\dot{\gamma} * l \right] \\ \dot{\mathbf{i}}_1 = \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} * \dot{Z}_c} * \left[ (\mathbf{P}_2 - \mathbf{jQ}_2) * \frac{\dot{Z}_c}{U_2^2} * \operatorname{ch}\dot{\gamma} * l + \operatorname{sh}\dot{\gamma} * l \right] \end{cases} \quad (2.13.)$$

Если пренебречь влиянием активного сопротивления и проводимости, то полученные формулы упрощаются. В этом случае ( $\mathbf{r}_0 = \mathbf{0}$ ;  $\mathbf{g}_0 = \mathbf{0}$ )

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0} = \sqrt{(\mathbf{r}_0 + \mathbf{j}x_0) * (\mathbf{g}_0 + \mathbf{j}b_0)} = \sqrt{(-1) * x_0 * b_0} = \mathbf{j}\alpha$$

Тогда

$$\operatorname{sh}\dot{\gamma} * l = \operatorname{sh}\alpha * l = \frac{e^{\mathbf{j}\alpha * l} - e^{-\mathbf{j}\alpha * l}}{2} = \frac{\cos\alpha * l + \mathbf{j}\sin\alpha * l - \cos\alpha * l + \mathbf{j}\sin\alpha * l}{2} = \mathbf{j}\sin\alpha * l$$

Аналогично

$$\operatorname{ch}\dot{\gamma} * l = \operatorname{ch}\alpha * l = \cos\alpha * l$$

При этом из (2.11.) и (2.13) имеем

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 * (\cos \alpha * 1 + Q_2 * \frac{Z_c}{U_2^2} * \sin \alpha * 1 + jP_2 * \frac{Z_c}{U_2^2} * \sin \alpha * 1) \quad (2.14)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} * Z_c} * \left[ P_2 * \frac{Z_c}{U_2^2} * \cos \alpha * 1 + j(\sin \alpha * 1 - Q_2 * \frac{Z_c}{U_2^2} * \cos \alpha * 1) \right] \quad (2.15.)$$

Часто удобно мощность в ЛЭП выразить в долях от натуральной мощности

$$P_c = \frac{U^2}{Z_c}$$

или

$$P_c = \frac{U^2_{ном}}{Z_c}$$

при  $U = U_{ном}$

Если вектор  $\dot{U}_2$  совместить с действительной осью и обозначить

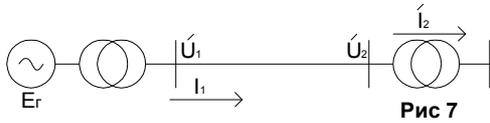
$$P_{2*} = \frac{P_2}{P_{нат}} \text{ и } Q_{2*} = \frac{Q_2}{Q_{нат}},$$

то получим

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = U_2 * (\cos \alpha * 1 + Q_{2*} * \sin \alpha * 1 + jP_{2*} * \sin \alpha * 1) \\ \dot{I}_1 = \frac{U_2}{\sqrt{3} * Z_c} * [P_{2*} * \cos \alpha * 1 + j(\sin \alpha * 1 - Q_{2*} * \cos \alpha * 1)] \end{cases} \quad (2.16.)$$

### 2.3. Соотношения между параметрами режима ДЭП.

Для линий без потерь ( $r_0=0; g_0=0$ ) из (2.16) можно вывести уравнение зависимости напряжения начала линии от ее параметров (рис. 7).



$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 * (\cos \alpha * l \pm Q_{2*} * \sin \alpha * l + jP_{2*} * \sin \alpha * l) = U_2 * K_u * e^{j\theta} \quad (2.17.)$$

Здесь  $Q_{2*}$  имеет знак + или - в зависимости от вида нагрузки (индуктивная или емкостная)

$K_u$  -перепад напряжений

$$K_u = \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{(\cos \alpha * l \pm Q_{2*} * \sin \alpha * l)^2 + P_{2*}^2 * \sin \alpha * l} \quad (2.18.)$$

Из выражений (2.17) и (2.18.) видно, что при заданной активной мощности ( $P_2 = P_1 = P$ ), изменяя соотношение напряжений  $U_1$  и  $U_2$  можно изменять потоки реактивной мощности в линии и, следовательно, изменять потери в ДЭП. И наоборот, изменяя реактивную мощность  $Q_2$  (установка СК), можно при данной  $P$  изменять соотношение между  $U_1$  и  $U_2$ .

Используя выражение (2.17.), можно построить векторную диаграмму, причем здесь нужно будет рассмотреть два случая: при индуктивном и емкостном характере нагрузки (рис. 8).

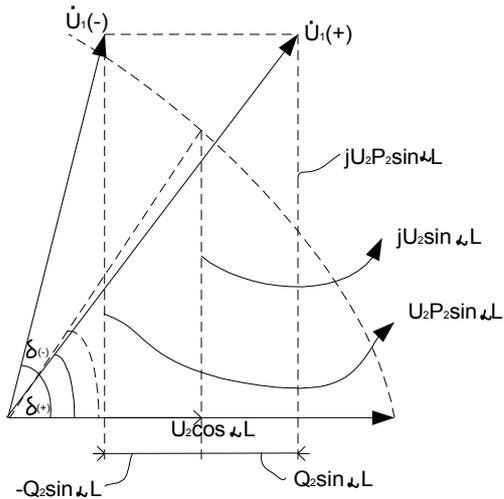


Рис 8

Из векторной диаграммы получаем соотношения между напряжениями начала и конца ДЭП

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_{2*} * \sin \alpha * l}{\cos \alpha * l + Q_{2*} * \sin \alpha * l} = \frac{P_{2*} * \operatorname{tg} \alpha * l}{1 + Q_{2*} * \sin \alpha * l} \quad (2.19.)$$

Угол  $\delta$  – важная характеристика режима ДЭП. Как известно из курса из курса электромеханических переходных процессов, эта величина характеризует устойчивость передачи и ее предельного режима.

Из векторной диаграммы

$$\sin \delta = \frac{U_2 * P_{2*} * \sin \alpha * l}{U_1}$$

Откуда

$$P_{2*} = \frac{U_1 * \sin \delta}{U_2 * \sin \alpha * l}$$

где

$$P_2 = \frac{U_1 * U_2 * \sin \delta}{Z_c * \sin \alpha * l} = P_{\text{пр}} * \sin \delta \quad (2.20.)$$

где

$$P_{np} = \frac{U_1 * U_2}{Z_c * \sin \alpha * l}$$

Следовательно, предельный режим наступает при  $\delta=90^\circ$  и  $270^\circ$ . Графическое изображение зависимости  $P_{np} = f(L)$  приведено на рис. 9.

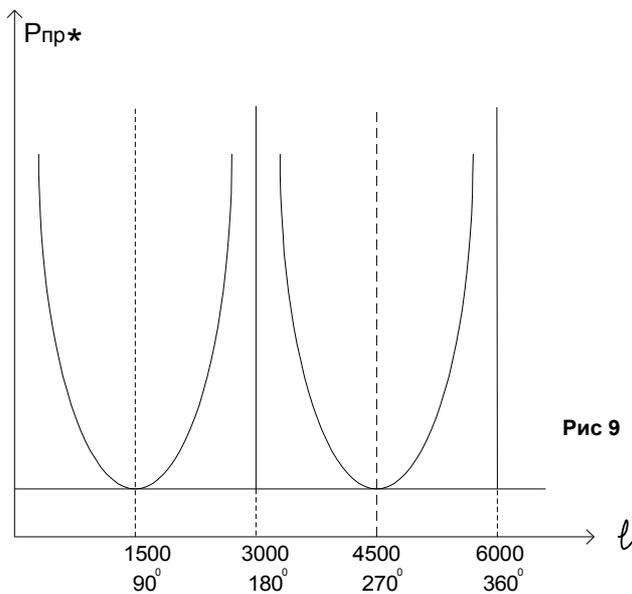


Рис 9

Разрывы в сплошных линиях на рисунке связаны с допущениями  $r_0 = 0$ . Для реальной линии график показан пунктиром.

Если длина линии невелика ( $L=200\div 250$  км), можно принять

$$\sin \alpha * L \approx \alpha * L = \sqrt{x_0 * b_0} * L$$

Тогда получим известную формулу для коротких линий, при которых волновые процессы при расчетах не учитываются

$$P_2 = \frac{U_1 * U_2 * \sin \delta}{\sqrt{\frac{x_0}{b_0}} * \sqrt{x_0 * b_0} * L} = \frac{U_1 * U_2}{x_0 * L} * \sin \delta = \frac{U_1 * U_2}{x} * \sin \delta$$

## 2.4. Физические процессы в ДЭП

### 2.4.1. Действие индуктивности и емкости линии на напряжение и ток.

-Всякая емкость, если к ней приложено напряжение, есть генератор реактивной мощности.

$$Q_c = U^2 * b = U^2 * \omega * C$$

-Всякая индуктивность, если по ней протекает ток, есть потребитель реактивной мощности

$$Q_l = I^2 * x = I^2 * \omega * L$$

-Реактивная мощность всегда вызывает снижение напряжения и увеличение тока в том направлении, в котором она течет.

Проиллюстрируем эти положения:

Падение напряжения на элементарном участке  $dl$  равно

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U} &= \sqrt{3} * I * jx_0 * dl = \frac{\hat{S}}{\hat{U}} * jx_0 * dl \\ \dot{S} &= \sqrt{3} * \dot{U} * \hat{I} \\ \sqrt{3} * \hat{i} &= \frac{\hat{S}}{\hat{U}} \end{aligned}$$

Если вектор напряжения совместить с действительной осью ( $\dot{U} = \hat{U} = U$ ), то

$$\Delta \dot{U} = \frac{\hat{S}}{\hat{U}} * jx_0 * dl = \frac{P - jQ}{U} * x_0 * dl = \frac{Q * x_0 * dl}{U} + j \frac{P * x_0 * dl}{U} = \Delta U + j\delta U$$

или, если пренебречь поперечной составляющей ( $\delta U = 0$ ), то

$$\Delta U = \frac{Q * x_0 * dl}{U} \quad (2.21.)$$

Следовательно, при  $Q > 0$   $\Delta U > 0$ , т.е. напряжение снижается

Ток в поперечной проводимости (ток утечки) на участке  $dl$

$$\Delta \dot{I} = \dot{U} * j b_0 * dl = \frac{\dot{S}}{\sqrt{3} * \hat{I}} * j b_0 * dl$$

Если вектор тока совместить с действительной осью ( $\dot{I} = \hat{I} = I$ ), то

$$\Delta I = \frac{P + jQ}{\sqrt{3} * I} * j b_0 * dl = - \frac{Q * b_0 * dl}{\sqrt{3} * I} + j \frac{P * b_0 * dl}{\sqrt{3} * I} = \Delta I + j \delta I$$

Если пренебречь поперечной составляющей  $\delta I = 0$ , то

$$\Delta I = - \frac{Q * b_0 * dl}{\sqrt{3} * I}$$

Следовательно, при  $Q >$  имеем  $\Delta I > 0$ , т.е. ток возрастает

#### 2.4.2. Изменение напряжения и тока в ДЭП

Предположим, что вся реактивная мощность, необходимая потребителю, вырабатывается на месте с помощью компенсирующих устройств (БСК, СК). Тогда от ЛЭП к потребителю будет передаваться только активная мощность  $P$ , а сопротивление нагрузки  $z_2 = r_2$  чисто активное. При этом реактивная мощность, генерируемая линией ( $Q_c$ ), потребляется ею же ( $Q_1$ ). Если нагрузка потребляет чисто активную нагрузку и в конце линии нет отражения, то такая мощность называется натуральной.

Пусть  $Q_2 = 0$  и  $U_1 = U_2$

Тогда

$$\begin{aligned}
1 &= \sqrt{\cos^2 \alpha * L + P_{2*}^2 * \alpha * L} \\
1 - \cos^2 \alpha * L &= P_{2*}^2 * \sin^2 \alpha * L \\
\sin^2 \alpha * L &= P_{2*}^2 * \sin^2 \alpha * L \\
P_{2*} &= 1
\end{aligned}$$

т.е.  $P_2 = P_{\text{нат}} = P_c$

Из уравнений (2.16.) при  $Q_{2*} = 0$  имеем ( $\alpha * 1 = \lambda_{.1}$ )

$$\begin{aligned}
\dot{U}_1 &= \dot{U}_2 * (\cos \alpha * 1 + j P_{2*} * \sin \lambda_{.1}) = U_2 * (\cos \lambda_{.1} + j \frac{U_2^2 * Z_c}{Z_2 * U_2^2} * \sin \lambda_{.1}) \\
&= U_2 * (\cos \lambda_{.1} + j \frac{Z_c}{Z_2} * \sin \lambda_{.1}) \\
\dot{I}_1 &= \frac{U_2}{\sqrt{3} * Z_c} * \frac{U_2^2 * Z_c}{Z_2 * U_2^2} * \cos \lambda_{.1} + j \frac{U_2}{\sqrt{3} * Z_c} * \sin \lambda_{.1} = I_2 * \cos \lambda_{.1} + j \frac{U_2 * Z_2}{\sqrt{3} * Z_2 * Z_c} \sin \lambda_{.1} = \\
&= I_2 * (\cos \lambda_{.1} + j \frac{Z_2}{Z_c} * \sin \lambda_{.1})
\end{aligned}$$

Абсолютные значения тока и напряжения равны

$$\begin{aligned}
U_1 &= U_2 * \sqrt{\cos^2 \lambda_{.1} + \left(\frac{Z_c}{Z_2}\right)^2 * \sin^2 \lambda_{.1}} \\
I_1 &= I_2 * \sqrt{\cos^2 \lambda_{.1} + \left(\frac{Z_2}{Z_c}\right)^2 * \sin^2 \lambda_{.1}}
\end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned}
dQ_c &= jU_1^2 * b_0 * dl = jU_2^2 * b_0 * dl * \left[ \cos^2 \lambda_{.1} + \left(\frac{Z_c}{Z_2}\right)^2 * \sin^2 \lambda_{.1} \right] \\
dQ_1 &= j3I_1^2 * x_0 * dl = j3I_2^2 * x_0 * dl * \left[ \cos^2 \lambda_{.1} + \left(\frac{Z_2}{Z_c}\right)^2 * \sin^2 \lambda_{.1} \right]
\end{aligned}$$

Проанализируем  $\frac{dQ_c}{dQ_1}$

При

$$Z_2 = Z_c$$

имея в виду, что

$$\frac{U_2^2}{3 * I_2^2} * \frac{b_0}{x_0} = Z_2^2 * \frac{1}{Z_c^2}$$

получаем

$$dQ_c = dQ_1$$

При

$$\begin{aligned} Z_2 &> Z_c \\ (P_2 < P_{нат}) \end{aligned}$$

получаем

$$dQ_c > dQ_1$$

При

$$\begin{aligned} Z_2 &< Z_c \\ (P_2 > P_{нат}) \end{aligned}$$

получаем

$$dQ_c < dQ_1$$

В зависимости от соотношения выработки и потребления реактивной мощности возможны три случая передачи по ЛЭП активной мощности.

Случай 1. (рис. 10)

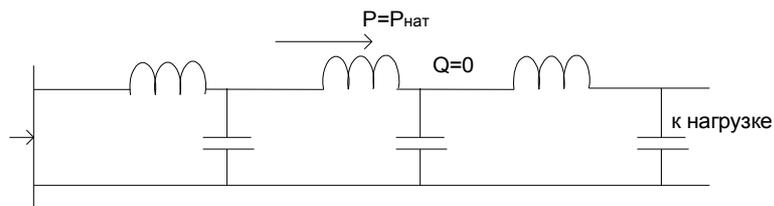


Рис 10

$$P = P_{\text{нат}}$$

$$Z_2 = Z_c = \frac{U^2}{P}$$

В этом случае на каждом элементарном участке генерируемая реактивная мощность там же и потребляется.

$$dQ_c = dQ_1$$

$$Q_c = Q_1$$

Реактивная мощность по линии не протекает, т.е.  $Q=0$ .

Тогда

$$\Delta U = 0$$

$$\Delta I = 0$$

Напряжение и ток вдоль всей линии постоянны.

Случай 2 (рис. 11)

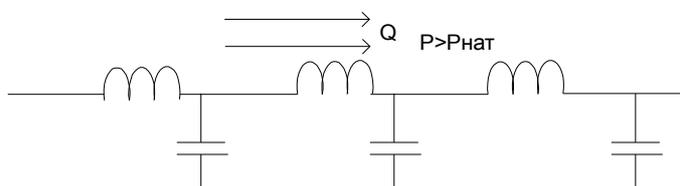


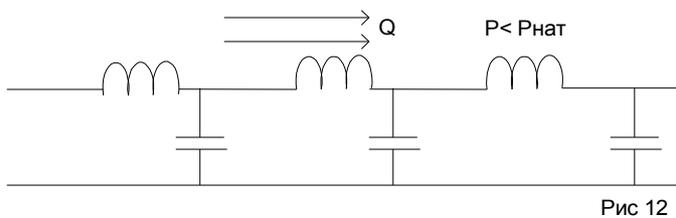
Рис. 11

$$P > P_{\text{нат}}$$

$$Z_2 = \frac{U_2^2}{P} < Z_c$$

В этом случае на каждом элементарном участке генерируемая мощность меньше потребляемой индуктивностью мощности  $(dQ_c > dQ_l)$ ,  $Q_c < Q_l$ , т.е. генерация реактивной мощности линией не в состоянии покрыть ее же потребление. Недостающая мощность  $Q_c - Q_l$  поступает из системы, т.е. реактивная мощность направлена к нагрузке. Тогда согласно (2.21. и 2.22.) напряжение падает, а ток растет от начала линии к концу.

Случай 3. (рис. 12)



$$P < P_{\text{нат}}$$

$$Z_2 = \frac{U^2}{P} > Z_c$$

В этом случае на каждом участке  $dl$  емкость будет вырабатывать больше реактивной мощности, чем ей требуется на этом участке.

$$dQ_c > dQ_l$$

$$Q_c > Q_l$$

$$Q = Q_l - Q_c < 0$$

Т.е. появляется излишек реактивной мощности в ЛЭП. Так как потребитель в реактивной мощности не нуждается (чисто активная нагрузка), то этот излишек будет стекать в систему.  $Q$  направлена от конца ЛЭП к ее началу. Согласно (2.21.) и (2.22.) напряжение в конце линии будет больше, чем в начале, а ток будет падать (рис. 13).

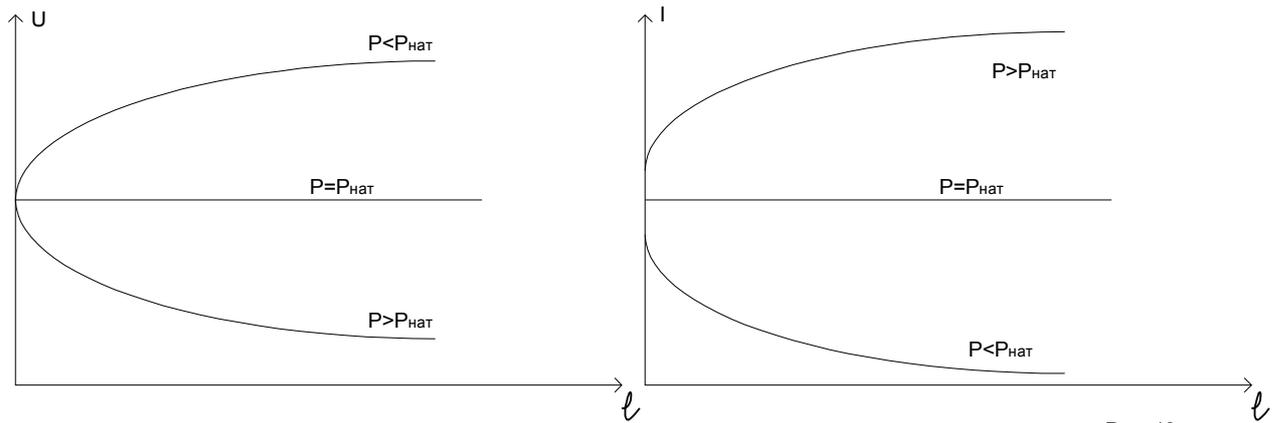


Рис. 13

Холостой ход является крайним случаем режима 2. При этом  $P=0$  и ЛЭП имеет большую избыточную реактивную мощность и напряжение в конце линии сильно возрастает, что может привести к повреждению изоляции. Такой режим может возникнуть при одновременном включении дальней линии с двух концов.

Описанный характер процессов справедлив для волновых длин линий  $\lambda < \pi/4$ , т.е. для расстояний 750 км до конца линии. Для линий большей длины характер сложнее.

#### 2.4.3. Процессы в ДЭП при одинаковом напряжении по ее концам.

Предположим, что напряжение по концам ДЭП поддерживается на заданном уровне  $U_1 = U_2$  автоматически.

Случай 1.

$$\begin{aligned}
 P &= P_{\text{натур}} \\
 Z_2 &= Z_c \\
 dQ_c &= dQ_1 \\
 Q_c &= Q_1
 \end{aligned}$$

Реактивная мощность в линии не течет. Напряжение вдоль линии постоянно.

Случай 2. (рис. 14)



Рис 14

$$\begin{aligned} P &> P_{\text{нат}} \\ Z_2 &< Z_c \end{aligned}$$

Емкость не вырабатывает необходимой для покрытия потерь в индуктивности реактивной мощности. Для сохранения баланса из обеих систем, к которым подключена ДЭП, реактивная мощность направляется к середине линии. Напряжение к середине линии будет падать.

Случай 3. (рис. 15)



Рис 15

$$\begin{aligned} P &< P_{\text{нат}} \\ Z_2 &> Z_c \end{aligned}$$

Емкость вырабатывает больше реактивной мощности, чем ее потребляет индуктивность. Избыток направляется в обе системы от середины линии к ее концам. Напряжение в середине линии будет максимальным. (рис. 16).

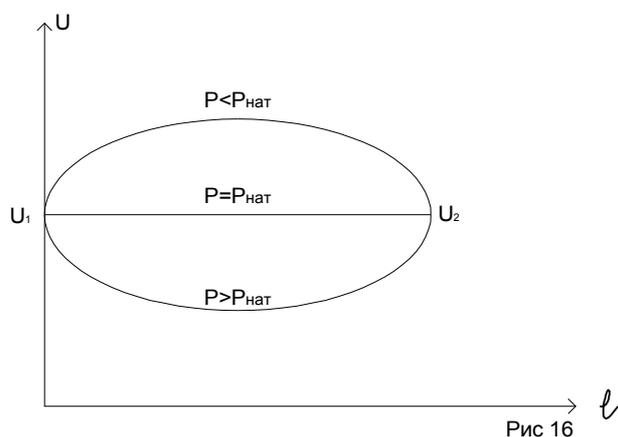


Рис 16

## 2.5. Диаграммы напряжений в ДЭП

В режиме  $P_{2*} = 1$ , т.е. при передаче натуральной мощности, когда в любой точке  $\delta = \alpha * l$ , а в конце линии нет потребления реактивной мощности ( $Q_2 = 0$ ), согласно (2.17.) имеем

$$\dot{U}_1 = U_2 * (\cos \alpha * L + j \sin \alpha * L) \quad P_{2*} = 1 \quad P_{2*} = 1$$

или

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\cos^2 \alpha * L + \sin^2 \alpha * L} = \pm 1$$

Следовательно, конец вектора  $\dot{U}_1$  (напряжение в любой точке ВЛ) лежит на окружности, т.е.  $U_1 = f(l)$ -окружность (рис. 17).

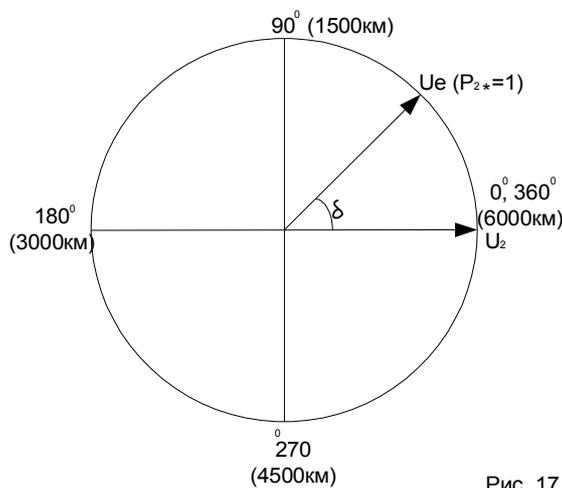


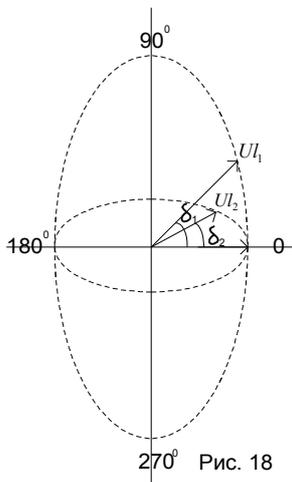
Рис. 17

Если  $P_{2*} = 1$ ,

то согласно (2.17.)

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 * (\cos \alpha * L + Q_{2*} * \sin \alpha * L)$$

При  $Q_{2*} = 0$  мы получим эллипсы (рис. 18). При  $P_{2*} > 1$  эллипс вытянут вертикально. При  $P_{2*} < 1$  -горизонтально. В режиме холостого хода окружность превращается в прямую.



При  $Q_{2*} \neq 0$  мы получим эллипсы, наклоненные относительно действительной оси. При  $Q_{2*} > 0$  эллипс напряжения вытягивается в сторону приемного конца. При  $Q_{2*} < 0$  эллипс напряжения вытянут в сторону передающего конца ВЛ.

При учете активных сопротивлений графическое изображение распределения напряжения будет иметь вид спирали.

## 2.6. Круговые диаграммы мощности

Если уравнение (2.18.) решить относительно  $Q_{2*}$ , то найдем выражение для мощности, поступающей из линии в нагрузку при различной активной мощности и заданном перепаде напряжений.

$$Q_{2*} = -\operatorname{ctg}\alpha * L + \sqrt{\left(\frac{K_u}{\sin \alpha * L}\right)^2 - P_{2*}} \quad (2.23.)$$

$$P_{2*}^2 + (Q_{2*} + \operatorname{ctg}\alpha * L)^2 = \left( \frac{K_u}{\sin\alpha * L} \right)^2 \quad (2.24.)$$

Последнее уравнение представляет собой уравнение окружности радиусом

$$\rho = \frac{K_u}{\sin\alpha * L}$$

проведенной из точки с координатами  $(0, -\operatorname{ctg}\alpha * L)$  (рис. 19).

С увеличением  $K_u = U_1/U_2$  (перепад напряжений) увеличивается радиус окружности. Изменение  $L$  изменяет как радиус  $\rho$ , так и координаты центра окружности.

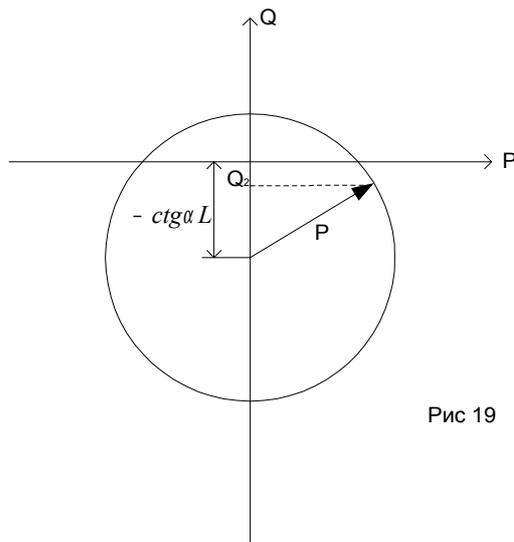


Рис 19

Найдем выражение для значения реактивной мощности начала линии.

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = \sqrt{3} * \dot{U}_1 * \hat{I}_1 = P_1 + jQ_1 \\ \hat{I}_1 = \hat{I}_2 * \cos\alpha * L - j \frac{\hat{U}_2}{\sqrt{3} * Z_c} * \sin\alpha * L \\ \hat{U}_1 = \hat{U}_2 * \cos\alpha * L - j\sqrt{3} * \hat{I}_2 * Z_c * \sin\alpha * L \end{cases} \quad (2.23.)$$

Подставляя в выражение для  $\dot{S}_1$  выражение для  $\hat{I}_1$  получим

$$\dot{S}_1 = \sqrt{3} * \dot{U}_1 * \left( \dot{I}_2 * \cos \alpha * L - j \frac{\hat{U}_2}{\sqrt{3} * Z_c} * \sin \alpha * L \right)$$

Найдя величину  $\hat{I}_2$  из выражения для  $\hat{U}_1$  и подставляя в последнее уравнение, получим

$$\dot{S}_1 = j \frac{U_1^2}{Z_c} * \operatorname{ctg} \alpha * L - j \frac{\dot{U}_1 * \hat{U}_2}{Z_c * \sin \alpha * L} \quad (2.26.)$$

Ток в конце линии равен

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} * Z_2} = \frac{U_2}{\sqrt{3} * Z_2} * \frac{\hat{Z}_2}{\hat{Z}_2} = \dot{U}_2 * \frac{R - jX_2}{\sqrt{3} * Z_2^2}$$

Подставляя это выражение в выражение для  $\dot{U}_1$ , получим

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 * (\cos \alpha * L + jZ_c * \frac{R - jX_2}{Z_2^2} * \sin \alpha * L)$$

Подставляя это выражение в (2.26.), получим

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S}_1 = \frac{U_2^2}{Z_2^2} * R_2 + j \left( \frac{U_1^2 - U_2^2}{Z_c} * \operatorname{ctg} \alpha * L - \frac{U_2^2}{Z_2^2} * X_2 \right) \\ P_1 = \frac{U_2^2}{Z_2^2} * R_2 = P_2 \\ Q_1 = \frac{U_1^2 - U_2^2}{Z_c} * \operatorname{ctg} \alpha * L - Q_2 \end{array} \right.$$

или в долях от натуральной мощности для реактивной мощности

$$Q_{1*} = -Q_{2*} + (K_u^2 - 1) * \operatorname{ctg} \alpha * L \quad (2.27)$$

Здесь величину  $(K_u^2 - 1) * \operatorname{ctg} \alpha * L$  можно рассматривать как потери в линии (или как генерацию линией) реактивной мощности.

Подставляя выражение (2.28) в (2.24.), получим

$$Q_{1*} = K_u^2 \operatorname{ctg} \alpha * L - \sqrt{\frac{K_u^2}{\sin^2 \alpha * L} - P_{2*}^2}$$

Из полученных выражений следует, что если автоматически поддерживать  $U_1 = U_2$ , т.е.  $K_u = 1$ , то при любой длине линии и при любой передаваемой активной мощности. Т.е. при  $K_u = 1$  характеристика  $Q = f(P)$  для начала линии является зеркальным отражением соответствующей характеристики в конце передачи.

Из полученных соотношений видно, что при передаче по ДЭП активной мощности, равной натуральной, реактивные мощности в начале и в конце линии отсутствуют.

Для режима холостого хода

$$\begin{aligned} Q_2 &= 0 \\ P_2 &= 0 \\ K_u &= \cos \alpha * L \end{aligned}$$

Тогда из (2.27.)

$$Q_{1*xx} = (\cos \alpha * L - 1) * \operatorname{ctg} \alpha * L = -\sin^2 \alpha * L * \frac{\cos \alpha * L}{\sin \alpha * L} = \frac{\sin 2 * \alpha * L}{2}$$

или в абсолютном выражении

$$Q_{1xx} = -\frac{U_2^2}{Z_c} * \frac{\sin 2 * \alpha}{2} \quad (2.28.)$$

Если здесь заменить  $U_2$  на  $U_1$  согласно выражению

$$U_1 = U_2 * \cos \alpha * L$$

получим

$$Q_{1xx} = -\frac{U_1^2}{Z_c} * \operatorname{tg} \alpha * L \quad (2.29.)$$

Выражение (2.28.) используется, если задано  $U_2$ , а выражение (2.29.), если задано  $U_1$ .

Значения  $Q_1$  и  $Q_2$  можно определить, используя векторную диаграмму

$$U_1 * \cos \delta = U_2 * Q_2 * \sin \alpha * L + U_2 * \cos \alpha * L$$

Отсюда

$$Q_2 = -\operatorname{ctg} \alpha * L + K_u * \frac{\cos \delta}{\sin \alpha * L} \quad (2.30.)$$

Если подставить

$$K_u = \frac{U_1}{U_2}$$

то в абсолютном выражении

$$Q_2 = -\frac{U_2^2 * \cos \alpha * L}{Z_c} + \frac{U_1 * U_2 * \cos \delta}{Z_c * \sin \alpha * L}$$

Для короткой линии при

$$\sin \alpha * L \approx \alpha * L$$

$$\cos \alpha * L = 1$$

$$\alpha = \sqrt{X_0 * B_0}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{X_0}{B_0}}$$

получим

$$Q_2 = -\frac{U_2^2}{x_0 * l} + \frac{U_1 * U_2}{x_0 * l} * \cos \delta = \frac{U_2^2}{x_0 * l} * (K_u * \cos \delta - 1)$$

$$Q_1 = -\frac{U_2^2}{x_0 * l} * (K_u * \cos \delta - K_u^2)$$

В долях от натуральной мощности

$$Q_{1*} = -K_u * (\cos\delta - K_u)$$

$$Q_{2*} = +K_u * (\cos\delta - \frac{1}{K_u})$$

Потери реактивной мощности в линии

$$\Delta Q_* = Q_{1*} - Q_{2*} = K_u^2 - 2 * K_u * \cos\delta + 1$$

### 3. Схемы замещения ДЭП

#### 3.1. Возможные способы представления ДЭП в расчетных схемах

В принципе при анализе работы ДЭП можно использовать полученные ранее уравнения длинной линии. Однако в ряде случаев удобнее оперировать с ДЭП как с четырехполюсником или представлять ее схемой замещения. Практически используются оба способа представления ДЭП: П-образной схемой замещения и четырехполюсником (рис. 20).

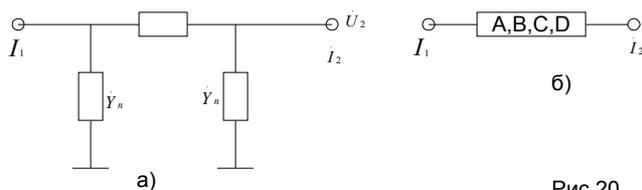


Рис 20

Эквивалентная схема замещения выявляет соотношения между режимными параметрами по концам линии ( $\dot{U}_1 \dot{I}_1$  и  $\dot{U}_2 \dot{I}_2$ ), но не позволяет судить о ее параметрах в любой точке ЛЭП, что ограничивает возможности схем замещения.

Определим параметры схем замещения ЛЭП. Если рассматривать линию как пассивный четырехполюсник, то можно записать

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{A} * \dot{U}_2 + \sqrt{3} * \dot{B} * \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}} * \dot{C} * \dot{U}_2 + \dot{D} * \dot{I}_2\end{aligned}\quad (3.1.)$$

Согласно уравнению длинной линии

$$\begin{aligned}\dot{A} &= \operatorname{ch} \dot{\gamma} * L \\ \dot{B} &= \dot{Z}_c * \operatorname{sh} \dot{\gamma} * L \\ \dot{C} &= \frac{1}{\sqrt{\dot{Z}_c}} * \operatorname{sh} \dot{\gamma} * L \\ \dot{D} &= \operatorname{ch} \dot{\gamma} * L\end{aligned}$$

Если рассматривать линию в виде П-образной схемы замещения, то рассмотрев режимы холостого хода и короткого замыкания, можно определить связь между параметрами П-образной схемы замещения и четырехполюсника.

Для режима холостого хода

$$\dot{I}_2 = 0$$

имеем

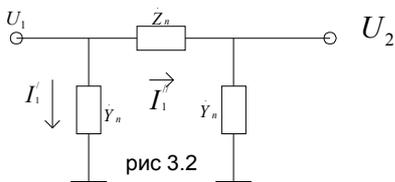


Рис 21

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{U}_2 + \sqrt{3} * \dot{I}_1'' * \dot{Z}_n = \dot{U}_2 + \dot{U}_2 * \dot{Y}_n * \dot{Z}_n \\ \dot{I}_1'' &= \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3}} * \dot{Y}_n \\ \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 * (1 + \dot{Z}_n * \dot{Y}_n) \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_1' + \dot{I}_1'' = \frac{1}{\sqrt{3}} * \dot{Y}_n * \dot{U}_1 + \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{3} * (\dot{Z}_n + \frac{1}{\dot{Y}_n})} \\ \dot{I}_1' &= \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{3}} * \left( \dot{Y}_n + \frac{\dot{Y}_n}{1 + \dot{Z}_n * \dot{Y}_n} \right)\end{aligned}$$

Подставляя выражение для  $\dot{U}_1$ , получим

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3}} (1 + \dot{Z}_n * \dot{Y}_n) * (\dot{Y}_n + \frac{\dot{Y}_n}{1 + \dot{Z}_n * \dot{Y}_n}) = \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3}} * (2 * \dot{Y}_n + \dot{Z}_n * \dot{Y}_n^2)$$

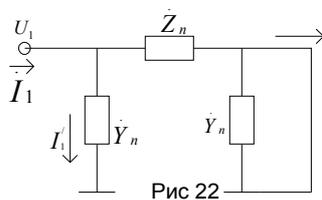
Для четырехполюсника в режиме холостого хода ( $\dot{I}_2 = 0$ ) из (3.1.) получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{A} * \dot{U}_2 \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3}} * \dot{C} \end{aligned}$$

Следовательно

$$\begin{aligned} \dot{A} &= 1 + \dot{Z}_n * \dot{Y}_n \\ \dot{C} &= 2 * \dot{Y}_n + \dot{Z}_n * \dot{Y}_n^2 \end{aligned}$$

В режиме короткого замыкания при  $\dot{U}_2 = 0$  имеем



$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \sqrt{3} * \dot{I}_2 * \dot{Z}_n \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}'_1 + \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{3}} * \dot{Y}_n + \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{3}} * \frac{1}{\dot{Z}_n} = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{3}} * \left( \dot{Y}_n + \frac{1}{\dot{Z}_n} \right) = \\ &= \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{3}} * \frac{1}{\dot{Z}_n} * (1 + \dot{Z}_n * \dot{Y}_n) \\ \dot{I}_1 &= (1 + \dot{Z}_n * \dot{Y}_n) * \dot{I}_2 \end{aligned}$$

Аналогично для четырехполюсника из (3.1.) получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \sqrt{3} * \dot{B} * \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= \dot{D} * \dot{I}_2 \end{aligned}$$

Следовательно

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{B}} &= \dot{\mathbf{Z}}_{\Pi} \\ \dot{\mathbf{D}} &= 1 + \dot{\mathbf{Z}}_{\Pi} * \dot{\mathbf{Y}}_{\Pi}\end{aligned}$$

Окончательно параметры четырехполюсника через параметры П-образной схемы замещения выражаются так

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{A}} &= \text{ch}\dot{\gamma} * \mathbf{L} = 1 + \dot{\mathbf{Y}}_{\Pi} * \dot{\mathbf{Z}}_{\Pi} \\ \dot{\mathbf{B}} &= \dot{\mathbf{Z}}_c * \text{sh}\dot{\gamma} * \mathbf{L} = \dot{\mathbf{Z}}_{\Pi} \\ \dot{\mathbf{C}} &= \frac{1}{\dot{\mathbf{Z}}_c} * \text{sh}\dot{\gamma} * \mathbf{L} = 2 * \dot{\mathbf{Y}}_{\Pi} + \dot{\mathbf{Z}}_{\Pi} * \dot{\mathbf{Y}}_{\Pi}^2 \\ \dot{\mathbf{D}} &= \text{ch}\dot{\gamma} * \mathbf{L} = 1 + \dot{\mathbf{Y}}_{\Pi} * \dot{\mathbf{Z}}_{\Pi}\end{aligned} \quad (3.2.)$$

Из (3.2.) видно, что ЛЭП является симметричным четырехполюсником, т.к.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{A}} &= \dot{\mathbf{D}} \\ \dot{\mathbf{A}} * \dot{\mathbf{D}} - \dot{\mathbf{B}} * \dot{\mathbf{C}} &= 1\end{aligned}$$

Воспользовавшись соотношением (3.2.), нетрудно определить сопротивление и проводимость П-образной схемы замещения линии.

$$\dot{\mathbf{Z}}_{\Pi} = \dot{\mathbf{Z}}_c * \text{sh}\dot{\gamma} * \mathbf{L}$$

Известно, что

$$\dot{\mathbf{Z}}_c = \sqrt{\frac{\dot{\mathbf{Z}}_0}{\dot{\mathbf{Y}}_0}} = \sqrt{\frac{\dot{\mathbf{Z}}_0^2}{\dot{\mathbf{Z}}_0 * \dot{\mathbf{Y}}_0}} = \frac{\dot{\mathbf{Z}}_0}{\dot{\gamma}} = \frac{\dot{\mathbf{Z}}_0 * \mathbf{L}}{\dot{\gamma} * \mathbf{L}}$$

Тогда

$$\dot{\mathbf{Z}}_{\Pi} = \dot{\mathbf{Z}}_0 * \mathbf{L} * \frac{\text{sh}\dot{\gamma} * \mathbf{L}}{\dot{\gamma} * \mathbf{L}} = \dot{\mathbf{Z}}_0 * \mathbf{L} * \mathbf{K}_s \quad (3.3.)$$

Здесь  $K_s$  - коэффициент, учитывающий распределенность параметров ЛЭП.

$$\dot{K}_s = K_s * e^{j\theta_s} = \frac{\text{sh}\dot{\gamma} * L}{\dot{\gamma} * L} = \frac{\text{sh}(L * \sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0})}{L * \sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0}} \quad (3.4.)$$

Из (3.2.) для  $\dot{A}$  имеем

$$\begin{aligned} 1 + \dot{Z}_n * \dot{Y}_n &= \text{ch}\dot{\gamma} * L \\ 1 + \dot{Y}_n * \dot{Z}_c * \text{sh}\dot{\gamma} * L &= \text{ch}\dot{\gamma} * L \end{aligned}$$

Тогда

$$\dot{Y}_n = \frac{\text{ch}\dot{\gamma} * L - 1}{\dot{Z}_c * \text{sh}\dot{\gamma} * L} = \frac{2 * \text{sh}^2 \frac{\dot{\gamma} * L}{2}}{2 * \dot{Z}_c * \text{sh} \frac{\dot{\gamma} * L}{2} * \text{ch} \frac{\dot{\gamma} * L}{2}} = \frac{\text{th} \frac{\dot{\gamma} * L}{2}}{\dot{Z}_c}$$

Преобразуя полученное выражение, получим

$$\dot{Y}_n = \frac{\dot{\gamma} * L}{2 * \dot{Z}_c} * \frac{\text{th} \frac{\dot{\gamma} * L}{2}}{\frac{\dot{\gamma} * L}{2}} = \frac{L}{2} * \frac{\sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0}}{\sqrt{\frac{\dot{Z}_0}{\dot{Y}_0}}} * \frac{\text{th} \frac{\dot{\gamma} * L}{2}}{\frac{\dot{\gamma} * L}{2}} = \dot{Y}_0 * \frac{L}{2} * \dot{K}_y \quad (3.5.)$$

Здесь  $\dot{K}_y$  - коэффициент, учитывающий распределенность параметров ЛЭП

$$\dot{K}_y = K_y * e^{j\theta_c} = \frac{\text{th} \frac{\dot{\gamma} * L}{2}}{\frac{\dot{\gamma} * L}{2}} = \frac{\text{th}(\frac{L}{2} * \sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0})}{\frac{L}{2} * \sqrt{\dot{Z}_0 * \dot{Y}_0}} \quad (3.6.)$$

Для определения  $K_s, K_y, A$  используют номограммы.

### 3.2. Характеристики П-образной схемы замещения длинной линии

Характеристиками схемы замещения ЛЭП являются значения ее сопротивлений и проводимостей.

$$\begin{aligned}\dot{Z}_n &= R_n + jX_n \\ \dot{Y}_n &= g_n + jb_n\end{aligned}$$

Если формулы (3.3.) и (3.5.)

$$\begin{aligned}\dot{Z}_n &= \dot{Z}_0 * L * \dot{K}_s \\ \dot{Y}_n &= \dot{Y}_0 * \frac{L}{2} * \dot{K}_y\end{aligned}$$

разложить на действительную и мнимую части, то получим выражения для характеристик П-образной схемы замещения в зависимости от погонных параметров ЛЭП. Вывод этих формул достаточно труден.

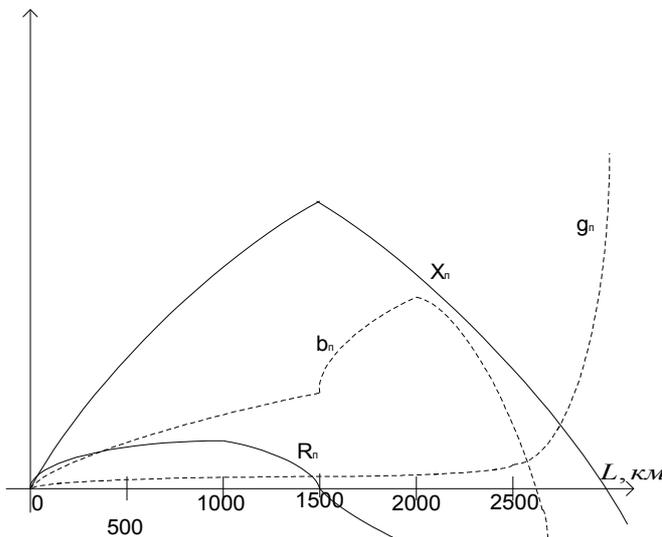


Рис 22

Проведенные расчеты и полученные кривые показывают, что в П-образной схеме появляется  $g_n$  хотя для ЛЭП по условиям короны предусматривается  $g=0$ . Это объясняется учетом активного сопротивления линии  $r_0$ . Как видно из графика, при  $L > 2000$  км  $R_n < 0$ . При отсутствии  $g_n$  это означало бы, что ЛЭП

становится источником активной мощности, чего на самом деле естественно нет. Наоборот, с увеличением длины линии растут и потери активной мощности. Поэтому при  $L > 2000$  км  $g_n$  резко возрастает. При длине линии больше длины полуволны  $L > 3000$  км  $X_n$  и  $B_n$  становятся отрицательными. Это объясняется тем, что схема замещения длинной линии дает связь между параметрами на «входе» и «выходе» схемы. При этом связь между параметрами в промежуточных точках схемы ЛЭП может нарушаться. На рисунке 23 приведены схемы замещения для ЛЭП различной длины.

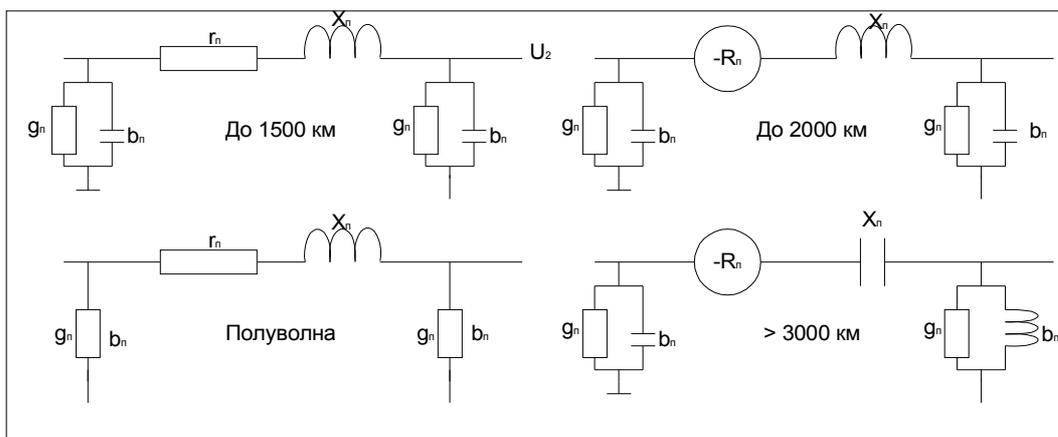


Рис 23

### 3.3. Упрощенные способы определения параметров схем замещения дальних ЛЭП.

Используя выражения (3.3.) - (3.6.), можно определить точные значения параметров схемы замещения дальней ЛЭП  $\dot{Z}_n, \dot{Y}_n$ . Однако при этом приходится оперировать с комплексными числами, что сильно затрудняет расчет. Однако можно значительно упростить расчет, если принять во внимание ряд обстоятельство. Дальние ЛЭП выполняются расщепленными проводами крупных сечений, для которых активное сопротивление составляет не более 8% от реактивного сопротивления, т.е. отношение  $\frac{r_0}{x_0}$  очень мало.

Опуская математические преобразования, запишем выражения для параметров эквивалентного четырехполюсника и П-образной схемы замещения.

$$\begin{aligned}
 \dot{A} = \dot{D} &= \text{ch} \dot{\gamma} * L = \cos \lambda + j \frac{r_0}{2 * x_0} * \lambda * \sin \lambda \\
 \dot{B} = \dot{Z}_n &= Z_c * \text{sh} \dot{\gamma} * L = Z_c * \left[ \frac{r_0}{2 * x_0} * (\sin \lambda + 2 * \cos \lambda) + j \sin \lambda \right] \\
 \dot{C} &= \frac{1}{Z_c} * \text{sh} \dot{\gamma} * L = \frac{1}{Z_c} * \left[ \frac{r_0}{2 * x_0} * (\lambda * \cos \lambda - \sin \lambda) + j \sin \lambda \right] \\
 \dot{Y}_n &= \frac{1}{Z_c} * \text{th} \frac{\dot{\gamma} * L}{2} = \frac{1}{Z_c} * \left[ \frac{r_0}{2 * x_0} * \left( \frac{\lambda}{2 * \cos^2 \frac{\lambda}{2}} - \text{th} \frac{\lambda}{2} \right) + j \text{th} \frac{\lambda}{2} \right]
 \end{aligned}$$

(3.7.)

Эти формулы справедливы для ЛЭП длиной менее 2000 км.

Если длина линии составляет 500-600 км, то потери в проводимостях составляют порядка 1% от от потерь при передаче натуральной мощности, поэтому приняв  $g_n = 0$ , можно еще более упростить схему замещения.

Параметры схемы замещения определяются по формулам

$$\begin{cases}
 R_n = r_0 * L * K_r \\
 X_n = x_0 * L * K_x \\
 b_n = b_0 * \frac{L}{2} * K_b \\
 g_n = 0
 \end{cases}
 \quad (3.8.)$$

Здесь  $K_r$ ,  $K_x$ ,  $K_b$  - поправочные коэффициенты, выражения для которых получены разложением гиперболических функций в ряд и учете первых членов

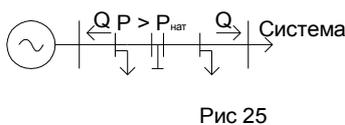
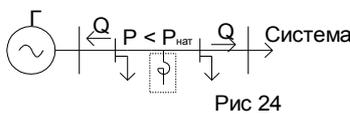
$$\begin{cases}
 K_r = 1 - \frac{L^2}{3} * x_0 * b_0 \\
 K_x = 1 - \frac{L^2}{6} * x_0 * b_0 * \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{x_0} \right)^2 \right] \\
 K_b = 0.5 * \frac{3 + K_r}{1 + K_r} = 1 + \frac{L^2 * x_0 * b_0}{12}
 \end{cases}
 \quad (3.9.)$$

#### 4. Расчеты нормальных режимов.

#### 4.1. Задачи расчетов режимов ДЭП и способы задания исходной информации.

Параметры, характеризующие установившиеся режимы, существенно зависят от таких показателей, как длина ЛЭП, передаваемая активная мощность, номинальное напряжение передачи, количество промежуточных подстанций.

Если по линии передается активная мощность  $P < P_{\text{нат}}$  при длине линии менее полуволны, в линии будет избыток реактивной мощности, ее потоки будут направлены в концы ЛЭП от ее середины, в середине линии будет повышенный уровень напряжения. При этом возникает задача ограничения потоков реактивной мощности из линии. Для этого по всей длине ЛЭП надо иметь реакторы или синхронные компенсаторы. Их мощность определяется номинальным напряжением линии, ее длиной и длиной промежуточных участков между подстанциями, передаваемой активной мощностью, условиями работы трансформаторов и системы, необходимыми уровнями напряжения на линии.



Если по линии передается  $P > P_{\text{нат}}$ , то на линии необходимо иметь источники реактивной мощности, т.к. на ней возникает дефицит реактивной мощности, приводящий к понижению напряжения на промежуточных подстанциях. Кроме того, такой поток активной мощности приводит к необходимости разработки мероприятий по повышению устойчивости, т.к. предельная мощность линии оказывается меньше, чем активная мощность, которую целесообразно передавать в систему.

Т.о. на ДЭП СВН практически невозможно обеспечить необходимые параметры режима без специальных компенсирующих устройств (КУ). Кроме

того, соотношения между режимными параметрами должны удовлетворять условиям экономичности режима в целом. Поэтому важным является выявление области целесообразного использования ДЭП, т.к. только при высоких экономических показателях электропередачи можно оправдать передачу электроэнергии на большие расстояния.

Т.о. задачей анализа режимов является техническое обоснование соотношений параметров режимов и выявление их оптимальных значений при учете требований и ограничений технического характера.

Расчеты режимов подразделяются на два вида: эксплуатационные и проектные. Первые обеспечивают наиболее выгодные соотношения параметров режимов и выявление их оптимальных значений. Вторые позволяют найти наиболее рациональные решения с точки зрения необходимого оборудования на ДЭП и обосновать их экономически.

В большинстве случаев нет необходимости обследовать всю совокупность возможных режимов. Важно проанализировать те из них, которые предъявляют наиболее высокие требования к оборудованию или могут вызвать наибольшие ограничения. Если в этих режимах выдержать все условия, то можно быть уверенными, что и в других режимах, находящихся внутри этой области (совокупности) обеспечится нормальная работа ЛЭП. Такими ограничивающими режимами являются режимы наибольших и наименьших нагрузок ДЭП.

В соответствии с задачами расчета режимов ДЭП существует два способа задания исходной информации.

1. Задание активной мощности в начале (конце) ЛЭП ( $P_1$  и  $P_2$ ), напряжений по концам ( $U_1$  и  $U_2$ ) и на шинах промежуточных подстанций ( $U_i$   $i=1.2\dots$ ). При этом проверка баланса реактивной мощности на подстанциях ДЭП позволит решить вопрос о месте установки и значении мощности компенсирующих устройств на линии.
2. Задание  $P_1, Q_1, U_1$  ( или  $P_2, Q_2, U_2$ ). Последовательно находятся напряжения на промежуточных подстанциях. Выход значения

напряжения на одной из них за допустимые пределы указывает на необходимость изменения поток реактивной мощности данного участка установкой КУ на предыдущей подстанции. При расчете режимов ДЭП определяются также потери мощности во всех ее элементах.

#### 4.2. Особенности расчета режимов ДЭП.

На ДЭП СВН могут иметь место отборы мощности, реакторы, УПК и другое оборудование.

Перед началом расчетов составляется схема замещения электропередачи в целом, где все ее элементы замещаются удобными по тем или иным соображениям схемами.

Если необходимо знать только параметры  $\mathbf{S}, \mathbf{U}, \mathbf{I}$  по концам ЛЭП, то всю передачу можно представить либо четырехполюсником, либо П-образной схемой замещения, либо с помощью собственных и взаимных проводимостей.

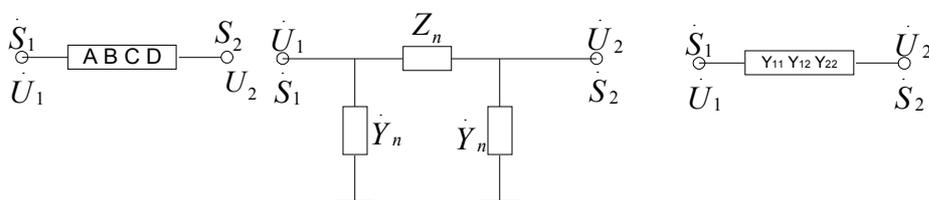


Рис 26

Чаще при расчетах ДЭП необходимо знать параметры режима в промежуточных точках. Тогда используется цепочечная схема замещения. Расчет ведется последовательно от участка к участку схемы или от четырехполюсника к четырехполюснику.

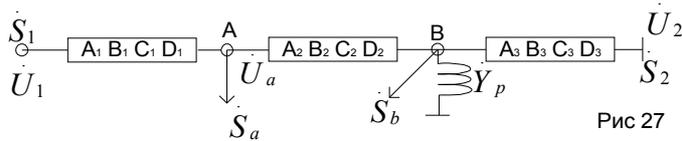


Рис 27

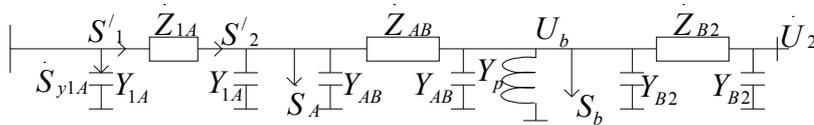


Рис 28

### 4.3. Режим наибольших нагрузок

При этом режиме передается мощность, соответствующая пропускной способности электропередачи и обеспечивается баланс активной мощности в ОЭС при учете целесообразного распределения ее между станциями.

$$P = \frac{U_1 * U_2}{Z} * \sin \alpha * L$$

для линии без потерь.

Но потребителям приемной системы нужна реактивная мощность. Однако в большинстве случаев на шинах вторичного напряжения системы  $\cos \varphi$  ограничивается, что однозначно регламентирует передаваемую по ЛЭП реактивную мощность. Для обеспечения баланса реактивной мощности в приемной системе используется:

-реактивная мощность генераторов передающей станции

-избыточная реактивная мощность линии, если по ней передается мощность меньше натуральной

-источники реактивной мощности на приемной подстанции (БСК или СК с АРВ СД)

При определении целесообразности использования того или иного способа выдачи реактивной мощности или их сочетания необходимо учитывать ряд технических ограничений.

При умеренной длине ЛЭП потребность в реактивной мощности потребителей приемной системы можно удовлетворять за счет генераторов передающей станции. Для этого необходимо обеспечить перепад напряжений по концам

ЛЭП ( $K = U_1 / U_2$ ), величина которого должна увеличиваться с ростом длины ЛЭП. Наибольшее значение этого перепада

$$K = U_{1\text{доп}} / U_{2\text{min}}$$

где  $U_{1\text{доп}}$  - максимальное длительно допустимое напряжение на линии, определяющееся условиями нормальной работы изоляции силового оборудования подстанций и ЛЭП. Для ЛЭП-220 кВ  $U_{1\text{доп}}=252$  кВ и т.п. Однако при этом надо иметь в виду, что при передаче по ЛЭП активной мощности, меньше натуральной повышение напряжения увеличивает емкостную мощность линии, что приводит к росту напряжения в отдельных ее точках. На шинах вторичного напряжения приемной системы уровень напряжения из условий устойчивости необходимо поддерживать в определенных пределах. При этом напряжение в конце передачи и напряжение системы связаны соотношением

$$U_c = (U_2 - \Delta U_{\text{ат}}) / K_{\text{ат}},$$

где  $\Delta U_{\text{ат}}$  - потери напряжения в автотрансформаторе.

$K_{\text{ат}}$  - коэффициент трансформации

Так как коэффициент трансформации может меняться только в определенных границах (РПН  $\pm 9*1,78\%$ ), то для обеспечения напряжения на шинах вторичного напряжения приемной системы в заданных пределах задается минимум напряжения  $U_{2\text{min}}$ . Таким образом  $K_{\text{max}}$  определяет предельную длину линии, когда по техническим условиям можно передавать реактивную мощность от генераторов станции в систему. Так для ЛЭП-500 кВ при передаваемой мощности 750 МВт предельная длина составляет 500 км.

Вызванный перепадом напряжений поток реактивной мощности вызывает увеличение потерь мощности, поэтому выбор экономически целесообразного перепада напряжения на ЛЭП сводится к ряду расчетов режимов при заданной реактивной мощности и вариациями  $U_1$  и  $U_2$ . При этом учитываются ограничения по напряжениям на промежуточных подстанциях, выход которых

за определенные границы указывает на необходимость установки КУ на подстанциях, что должно быть экономически обосновано. При рассмотрении режима наибольших нагрузок, когда передаваемая активная мощность меньше натуральной, возникают проблемы компенсации реактивной мощности в линиях. Генераторы передающей станции, работая с недовозбуждением, могут потреблять реактивную мощность ЛЭП. Однако величина этой мощности ограничена условиями нагрева, возможным снижением напряжения и эдс и т.п. Снижение эдс ведет к ухудшению устойчивости системы и работы механизмов собственных нужд. Поэтому на шинах ВН генераторов устанавливаются неотключаемые реакторы. Их мощность выбирается такой, чтобы  $\cos\varphi$  на шинах генераторного напряжения был не ниже 0,97 при токе, опережающем напряжение.

Таким образом, задачи расчета режима наибольших нагрузок, когда известна активная мощность передачи, таковы:

- выбор напряжения в начале ЛЭП;
- обоснование экономического перепада напряжений по концам ЛЭП и мощности источников реактивной мощности подстанций приемной системы;
- выбор мест установки и мощности компенсирующих устройств на промежуточных подстанциях и реакторов в начале ЛЭП.

#### 4.4. Режим наименьших нагрузок

Активная мощность, выдаваемая в этом режиме, определяется графиком нагрузки системы и составляет  $(0,2\div 0,4) \cdot P_c$ . При этом реактивная мощность линии близка к полной реактивной мощности, определяемой проводимостью линии. Возникающий в этом режиме избыток реактивной мощности необходимо снизить. Для этого следует уменьшить напряжение по концам линии по сравнению с режимом наибольших нагрузок. Для линий 330-750 кВ напряжение  $U_1$  можно ограничить значением  $0,95 \cdot U_{ном}$ , если не возникает сложностей с обеспечением устойчивости системы в целом. УПК в этом

режиме целесообразно зашунтировать, если при этом не снижается надежность работы ЛЭП. Способы компенсации избыточной реактивной мощности линии здесь те же, что и в режиме наибольших нагрузок.

Использование для компенсации реактивной мощности генераторов передающей станции и приемной системы и СК, а также, приема реактивной мощности промежуточными подстанциями ограничено. Поэтому избыточную мощность линии компенсируют реакторами, которые стремятся равномерно размещать на ЛЭП. Расстояния между местами установки реакторов зависят от номинального напряжения линии и передаваемой активной мощности. Реакторы, необходимые по режиму наибольших нагрузок, должны учитываться при анализе режимов минимальных нагрузок. Часть реакторов, используемая только в режиме минимальных нагрузок, обычно подключается через выключатели, чтобы их можно было отключать в режиме наибольших нагрузок.

Задачи расчета режима минимальных нагрузок таковы:

- определение целесообразного снижения напряжения начала и конца ЛЭП по сравнению с номинальным;
- выявление возможности потребления реактивной мощности приемной системы, СК приемной подстанции и генераторами передающей станции;
- определение мест установки и мощности реакторов, необходимых в этом режиме
  - проверка напряжения в промежуточных точках наиболее протяженного участка линии.

#### 4.5. Определение мощности и напряжения на шинах генераторов передающей станции

После определения режима ДЭП по известным величинам  $\dot{U}_1$  и  $\dot{S}_1$  можно рассчитать  $\dot{U}_r$  и  $\dot{S}_r$ .

Мощность, выдаваемая генератором,

$$\dot{S}_r = P_r \pm jQ_r = \dot{S}_1 + \Delta \dot{S}_T$$

где  $\Delta \dot{S}_T$  - потери мощности в повышающем трансформаторе.

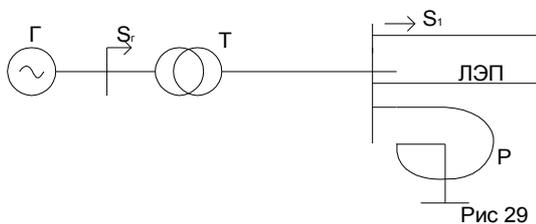
Коэффициент мощности на генераторных шинах

$$\cos \varphi_r = P_r / S_r$$

Напряжение на шинах генераторов, приведенное к стороне линии

$$\dot{U}'_r = \sqrt{(U_1 + \Delta U'_T)^2 + (\Delta U''_T)^2}$$

где  $\Delta U'_T$  и  $\Delta U''_T$  - действительная и мнимая составляющие падения напряжения в трансформаторе.



Если известен коэффициент трансформации повышающего трансформатора, можно найти действительное напряжение на генераторных шинах

$$U_r = U'_r / K_T$$

Если поток реактивной мощности направлен от линии в трансформатор, то  $U_r$  и  $\cos \varphi_r$  могут оказаться низкими

$$\dot{U}'_r = U_1 + j \frac{P_1 * R_T + (-Q_1) * X_T}{U_1} + j \frac{P_1 * X_T - (-Q_1) * R_T}{U_1}$$

В этом случае необходимо уменьшить поток реактивной мощности за счет установки реакторов в начале ЛЭП.

#### 4.6. Определение напряжения в промежуточных точках участков линии

При анализе режимов ДЭП необходимо знать, не возникает ли перенапряжение в середине участков линии в режиме наименьших нагрузок.

Пусть требуется определить напряжение в средней точке участка АВ

Для решения этой задачи представим этот участок двумя четырехполюсниками с параметрами

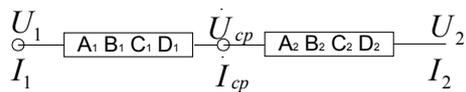


Рис 30

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_2 = \mathbf{A}$$

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 = \mathbf{B}$$

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{C}_2 = \mathbf{C}$$

$$\mathbf{D}_1 = \mathbf{D}_2 = \mathbf{D}$$

Если заданы величины  $U_2$  и  $I_2$ , то напряжение в средней точке

$$\dot{U}_{cp} = \dot{A} * \dot{U}_2 + \sqrt{3} * \dot{B} * \dot{I}_2 \quad (4.1.)$$

Ток в средней точке

$$\dot{I}_{cp} = \frac{1}{\sqrt{3}} * \dot{C} * \dot{U}_2 + \dot{D} * \dot{I}_2 \quad (4.2.)$$

Напряжение в начале участка

$$\dot{U}_1 = \dot{A} * \dot{U}_{cp} + \sqrt{3} * \dot{B} * \dot{I}_{cp} \quad (4.3.)$$

Если в (4.3.) подставить выражения для (4.1.) и (4.2.), то получим

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= A^2 * \dot{U}_2 + \sqrt{3} * \dot{A} * \dot{B} * \dot{I}_2 + \dot{B} * \dot{C} * \dot{U}_2 + \sqrt{3} * \dot{D} * \dot{B} * \dot{I}_2 = \\ &= (A^2 + \dot{B} * \dot{C}) * \dot{U}_2 + \sqrt{3} * (\dot{A} * \dot{B} + \dot{B} * \dot{D}) * \dot{I}_2\end{aligned}$$

Если принять во внимание, что четырехполюсники симметричные, т. е. ,  $\dot{A} = \dot{D}$  то окончательно

$$\dot{U}_1 = (A^2 + \dot{B} * \dot{C}) * \dot{U}_2 + 2 * \sqrt{3} * \dot{A} * \dot{B} * \dot{I}_2 \quad (4.4.)$$

Отсюда ток  $\dot{I}_2$ , выраженный через напряжение начала и конца участка, равен

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_1 - (A^2 + \dot{B} * \dot{C}) * \dot{U}_2}{2 * \sqrt{3} * \dot{A} * \dot{B}} \quad (4.5.)$$

Подставляя (4.5.) в (4.1.) и учитывая, что

$$\begin{aligned}A^2 &= \dot{A} * \dot{D} \\ \dot{B} * \dot{C} &= \dot{A} * \dot{D} - 1\end{aligned}$$

получим

$$\begin{aligned}\dot{U}_{cp} &= \dot{A} * \dot{U}_2 + \sqrt{3} * \dot{B} * \frac{\dot{U}_1 - (A^2 + \dot{B} * \dot{C}) * \dot{U}_2}{2 * \sqrt{3} * \dot{A} * \dot{B}} = \\ &= \frac{(A^2 - \dot{B} * \dot{C}) * \dot{U}_2 + \dot{U}_1}{2 * \dot{A}}\end{aligned}$$

Таким образом

$$\dot{U}_{cp} = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_2}{2 * \dot{A}} \quad (4.6.)$$

Если принять за ось отсчета напряжение  $\dot{U}_2 = U_2$ , то

$$\dot{U}_1 = U_1 * e^{j\delta} = U_1 * \cos \delta + jU_1 * \sin \delta$$

Тогда получим выражение для напряжения в средней точке

$$\dot{U}_{\text{cp}} = \frac{U_1 * e^{j\delta} + U_2}{2 * \dot{A}} = \frac{U_1 * \cos \delta + U_2 + jU_1 * \sin \delta}{2 * \dot{A}}$$

Модуль этого выражения равен

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{2 * |A|} * \sqrt{(U_2 + U_1 * \cos \delta)^2 + (U_1 * \sin \delta)^2} \quad (4.7.)$$

В частном случае, когда  $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}$ , это выражение упрощается

$$U_{\text{cp}} = \frac{U}{2 * |A|} * \sqrt{(1 + \cos \delta)^2 + \sin^2 \delta} = \frac{U}{2 * |A|} * \sqrt{2 * (1 + \cos \delta)}$$

Поскольку

$$\cos \delta = \cos^2 \frac{\delta}{2} - \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

получим

$$U_{\text{cp}} = \frac{U * \cos 2 \frac{\delta}{2}}{|A|}$$

При этом для линии без потерь, когда  $A = \cos \frac{\alpha}{2}$ , имеем

$$U_{\text{cp}} = \frac{U * \cos \frac{\delta}{2}}{\cos \frac{\alpha * L}{2}} = U * \sqrt{\frac{1 + \cos \delta}{1 + \cos \alpha * L}} \quad (4.8.)$$

Напряжение в средней точке участка можно выразить и через активную мощность. Так, из векторной диаграммы для линии без потерь имеем

$$\sin \delta = \frac{P_* * U_2 * \sin \alpha * L}{U_1}$$

При  $U_1 = U_2$

$$\begin{aligned} \sin \delta &= P_* * \sin \alpha * L \\ \cos \delta &= \sqrt{1 + P_*^2 * \sin \alpha * L} \end{aligned}$$

Подставляя последнее соотношение в (4.8.), получим

$$U_{cp} = U * \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 - P_* * \sin \alpha * L}}{1 + \cos \alpha * L}} = \frac{U}{\sqrt{2 * \cos \frac{\alpha * L}{2}}} * \sqrt{1 + \sqrt{1 - P_*^2 * \sin \alpha * L}}$$

Если для расчета используется П-образная схема замещения, то напряжения промежуточных точек участков можно определить по напряжению  $U_1$  и потоку  $S_1$  или по  $U_2$  и  $S_2$ .

#### 4.7. Мощность СК, устанавливаемых на подстанциях приемной системы.

Как уже отмечалось, в режиме наибольших нагрузок для обеспечения баланса реактивной мощности в приемной системе очень часто используется установка СК на шинах НН приемной подстанции. При этом мощность СК выбирается на основе результатов расчета вариантов режима наибольших нагрузок, отличающихся напряжениями по концам передачи, а следовательно, и величине  $Q_2$ .

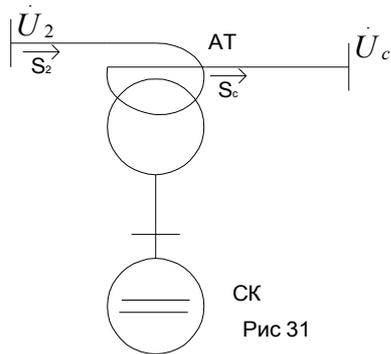


Рис 31

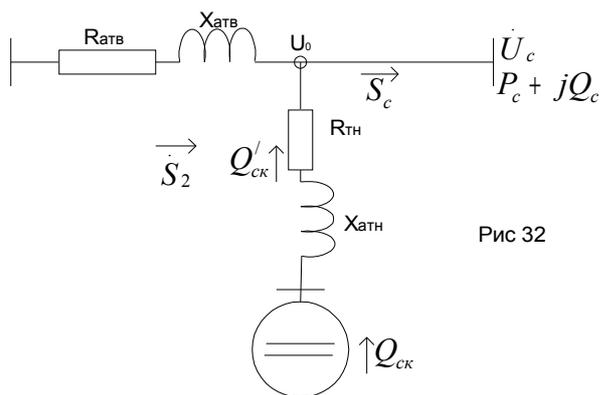


Рис 32

Схема замещения рассматриваемого участка ДЭП приведена на рис. В соответствии со схемой мощность СК для каждого принятого перепада напряжений по концам

$$Q_{\text{СК}} = Q'_{\text{СК}} + (Q'_{\text{СК}})^2 * \frac{X_{\text{атн}}}{U_0^2}$$

где

$$Q'_{\text{СК}} = Q_c - (Q_c - \frac{S^2}{U_2^2} * X_{\text{атв}})$$

Здесь

$Q_c$  - реактивная мощность, передаваемая в систему;  $R_{\text{атв}}, X_{\text{атв}}, R_{\text{атн}}, X_{\text{атн}}$  - активное и реактивное сопротивления схемы замещения АТ.

После определения  $Q_{\text{СК}}$  выбирают тип, номинальное напряжение и номинальную мощность СК.

Целесообразно использовать СК с водородным охлаждением, допускающим перегрузку в послеаварийном режиме. Обычно устанавливают два или более СК на случай внезапных повреждений и вывода СК в ремонт. Но при этом установленная мощность СК должна быть не больше мощности обмоток НН АТ.

Для каждого I-го сочетания параметров режима ДЭП, отличающихся величиной напряжения в конце линии, можно найти приведенные затраты

$$Z_i = Q_{ск} * (\alpha_{ск} + p_n) * K_{ск} + Q_{рi} * (\alpha_p + p_n) * K_p + (\alpha_{ат} + p_n) * K_{ати} + \Delta P_{перi} * Z_{yэ} + \Delta Z_{постi} * Z'_{yэ}$$

где

$Q_{скi}, Q_{рi}$  - установленная мощность СК приемной подстанции и реакторов на всей электропередаче.

$p_n$  - нормативный коэффициент эффективности

$\alpha_{ск}, \alpha_p, \alpha_{ат}$  - амортизационные отчисления от стоимости реакторов, СК и автотрансформаторов

$K_{ати}$  - стоимость автотрансформаторов ( может быть разной, если понадобится поставить АТ большей мощности для обеспечения выдачи мощности больших СК)

$K_{ск}, K_p$  - удельные стоимости мощности СК и реакторов

$Z_{yэ}, Z'_{yэ}$  - удельные приведенные затраты, связанные с производством энергии на покрытие потерь на нагрев и потерь, не зависящих от нагрузки

$\Delta P_{перi}$  - суммарные потери мощности в электропередаче, зависящие от нагрузки

$\Delta P_{постi}$  - суммарные потери мощности в электропередаче, не зависящие от нагрузки

Потери, зависящие от нагрузки, определяются суммой потерь в ЛЭП, потерь обмоток повышающих трансформаторов, потерь в реакторах, потерь в СК (потери в меди, добавочные)

Потери, не зависящие от нагрузки складываются из потерь в стали трансформаторов, АТ, СК и механических потерь в последних.

Наиболее целесообразный вариант сочетания режимных параметров соответствует условию

$$Z_i = \min$$

В общем случае зависимость

$$Z = f(U_2)$$

приведена на рисунке 33

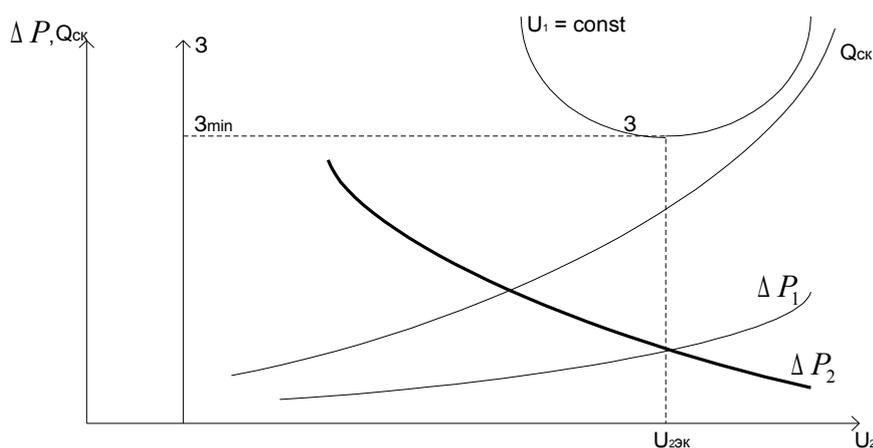


Рис 33

Здесь также показаны зависимости

$$Q_{ck} = f(U_2), \Delta P_1 = f(U_2), \Delta P_2 = f(U_2).$$

Полученный оптимальный вариант должен проверяться на удовлетворение техническим требованиям. Другими словами, должно выполняться условие

$$U_{2эк} > U_{2min}$$

При этом экономически целесообразный перепад напряжений

$$K = \frac{U_1}{U_{2эк}}$$

В противном случае, когда  $U_{2эк} < U_{2min}$ , мощность СК выбирается в соответствии с требованиями обеспечения минимально допустимого напряжения в конце ДЭП  $U_{2min}$ . Тогда

$$K = \frac{U_1}{U_{2min}}$$

## 5. Особые режимы ДЭП.

### 5.1. Общая характеристика рабочих режимов.

Кроме длительно существующих нормальных и послеаварийных режимов (отключение одной цепи или одного участка на параллельных цепях, одной из группы параллельно работающих трансформаторов), по которым определяются технико-экономические показатели ДЭП, в электропередаче могут иметь место и некоторые непродолжительные режимы. Их нельзя считать аварийными, т.к. они возникают на неповрежденной линии, когда оборудование находится в нормальном состоянии, но они в то же время не являются нормальными. Поэтому их называют особыми режимами. К особым режимам ДЭП переменного тока относятся:

1. Режимы очень больших нагрузок и форсировок, режимы асинхронного хода, когда выпавший из синхронизма генератор (или группа генераторов), работая как асинхронный, выдает активную мощность и потребляет некоторую реактивную мощность.
2. Режимы при отключении одной из фаз ДЭП или трансформатора (работа на «двух фазах» или «пяти фазах» при двухцепной передаче)
3. Режимы работы малозагруженных линий, режимы холостого хода.
4. Режимы самовозбуждения генераторов, СД, и АД.

Несмотря на относительную кратковременность, эти режимы могут иметь важное значение и должны учитываться при проектировании и эксплуатации.

## 5.2. Установившиеся режимы холостого хода.

При холостом режиме ДЭП на ней возникают разнообразные явления:

- повышение напряжения, возникающие при несимметричном к.з. (динамические перенапряжения)
- повышение напряжения во время переходного процесса, при включении открытой на конце линии
- коммутационные перенапряжения, появляющиеся при повторном зажигании дуги в выключателях во время отключения или большого емкостного тока холостой линии и т.д.

Для установившегося режима холостого хода характерно повышение напряжения на открытом конце линии, перегрузки генераторов реактивным током, самовозбуждение генераторов.

Реактивная мощность, появляющаяся (генерируемая) в начале линии, наз. Зарядной мощностью. Для холостой некомпенсированной линии длиной  $L$

$$\begin{aligned} P_2 &= 0; Q_2 = 0 \\ U_1 &= U_2 * \cos \alpha * L \\ I_1 &= j \frac{U_2}{\sqrt{3} * Z_c} * \sin \alpha * L \end{aligned}$$

$$S_1 = Q_1 = \sqrt{3} * U_1 * I_1 = \frac{U_2^2}{Z_c} * \sin \alpha * L * \cos \alpha * L = \frac{U_2^2}{2 * Z_c} * \sin 2 * \alpha * L$$

Если вместо  $U_2$  подставить  $U_2 = \frac{U_1}{\cos \alpha * L}$ ,

то

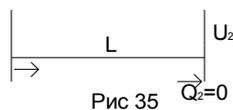
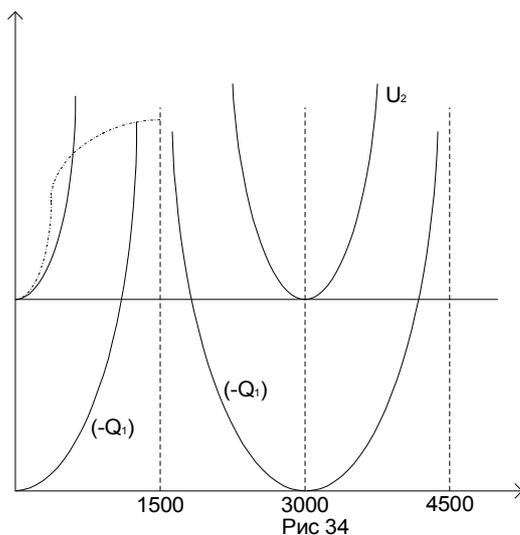
$$Q_1 = \frac{U_1^2}{Z_c * \cos \alpha * L} * \sin \alpha * L * \cos \alpha * L = \frac{U_1^2}{Z_c} * \operatorname{tg} \alpha * L$$

$$Q_1 = - \frac{U_1^2}{Z_c} * \operatorname{tg} \alpha * L \quad (5.1.)$$

Если выразить зарядную мощность через напряжение конца ВЛ, то

$$Q_1 = - \frac{U_2^2}{2 * Z_c} * \sin 2 * \alpha * L \quad (5.2.)$$

Если по формуле (5.1.) построить зависимость  $Q_1 = f(L)$  при  $U_1 = \text{const}$  и зависимость  $U_2 = f(L)$  по формуле  $U_2 = \left| \frac{U_1}{\cos \alpha * L} \right|$ , то они примут вид, показанный на рисунке.



Это зависимости зарядной мощности линии и напряжения в конце линии при фиксированном напряжении в начале линии.

Аналогичные кривые можно построит по формуле (5.2.).

$Q_1 = f(L)$  при  $U_2 = \text{const}$  и  $U_1 = f(L)$  по формуле  $U_1 = |U_2 * \cos \alpha * L|$

Кривые показаны на рисунке. Это зависимости зарядной мощности линии и напряжения в начале линии при фиксированном напряжении в конце линии.

Указанные зависимости относятся к случаю, когда не учтены потери активной мощности в проводах ЛЭП и явление короны. При учете этих факторов их кривых  $Q_1 = f(L)$  и  $U = f(L)$  исчезнут разрывы и они не проходят через ноль при  $L=1500$  км,  $3000$  км,  $4500$  км. Кроме того, кривые теряют свою симметричность.

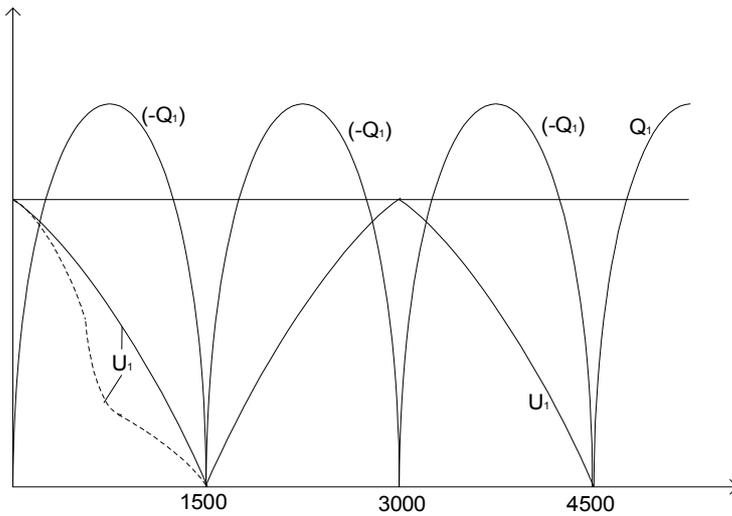


Рис 36

При длинах линий 400-600 км коронирование проводов почти не влияет на напряжение в конце линии, а при больших длинах оно вызывает увеличение напряжения. В линиях длиной 1200-1400 км корона резко замедляет рост напряжения на открытом конце линии.

Рассмотрим для примера режим холостого хода линии длиной 1000 км.

$$\alpha * L = 60 \text{эл.град}$$

$$X_0 = 0.293 \text{ом / км}$$

$$b_0 = 3.93 * 10^{-6} \text{ом / км}$$

$$U_1 = 500 \text{кВ}$$

Найдем зарядную мощность линии

$$Q_1 = - \frac{U_1^2 * \operatorname{tg} \alpha * L}{\sqrt{\frac{X_0}{b_0}}} = - \frac{500^2 * \operatorname{tg} 60^\circ}{\sqrt{\frac{29.3}{3.93}}} * 10^{-2} = -1580 \text{ Мвар}$$

$$U_2 = \frac{U_1}{\cos 60^\circ} = 2 * U_1 = 1000 \text{ кВ}$$

Следовательно, если на линию работает один генератор мощностью 300 МВА, то при отключении линии с приемного конца генератор получит перегрузку

$$\alpha = - \frac{1580}{300} * 100\% = 500\%$$

Если желательно в конце линии иметь напряжение

$$U_2 = 500 \text{ кВ},$$

то в начале линии необходимо поддерживать

$$U_1 = U_2 * \cos 60^\circ = 250 \text{ кВ}$$

В этом случае зарядная мощность

$$Q_1 = \frac{250^2 * 1.73}{\sqrt{\frac{29.3}{3.93}}} * 10^{-2} \approx -3.96 \text{ Мвар}$$

т.о. даже при снижении вдвое напряжения на передающем конце ВЛ зарядная мощность линии превышает мощность генератора.

В ряде случаев необходимо знать распределение напряжения в режиме холостого хода на ЛЭП. Очевидно, что напряжение в некоторой точке линии, находящейся на расстоянии  $l$  от ее конца,

$$U_1 = U_2 * \cos \alpha * l$$

Перепад напряжений при этом равен

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\cos \alpha * L}{\cos \lambda}$$

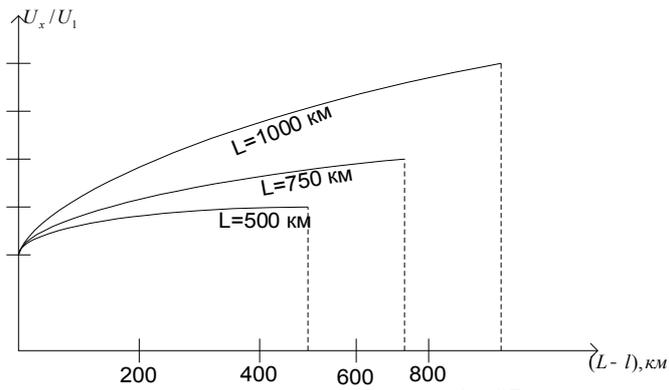
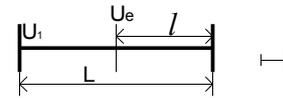


Рис 37



Мощность в начале некомпенсированной линии можно найти из выражения

$$\dot{S} = \sqrt{3} * \dot{U} * \dot{I}_1$$

При  $I_2 = 0$  имеем

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 * \operatorname{ch} \gamma * L \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} * Z_c} * \operatorname{sh} \gamma * L \end{cases}$$

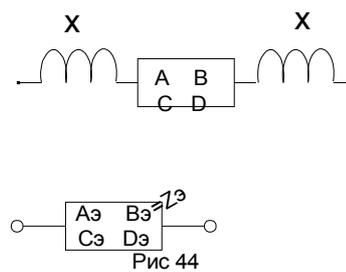
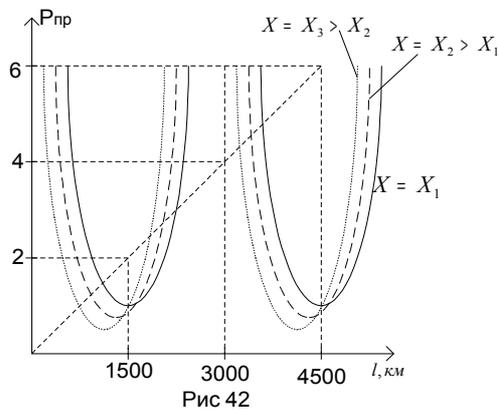
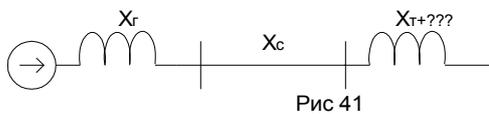
$$\begin{cases} \operatorname{ch} \gamma * L = \cos \lambda + j \frac{r_0}{2 * x_0} * \lambda * \sin \lambda \\ \operatorname{sh} \gamma * L = \frac{r_0}{2 * x_0} * \lambda * \cos \lambda + j \sin \lambda \end{cases}$$

$$\dot{S}_1 = \frac{U_2^2}{Z_c} * \operatorname{ch} \gamma * L * \operatorname{sh} \gamma * L = \frac{U_2^2}{2 * Z_c} * \left[ \frac{r_0}{x_0} * \lambda - j \left( 1 - \frac{r_0^2 * \lambda^2}{x_0^2} \right) * \sin 2 * \lambda \right]$$

Характерной особенностью режимов холостого хода некомпенсированной линии является значительная загрузка генераторов реактивной мощностью. При этом генераторы выдают реактивную мощность, необходимую для покрытия потерь в самих генераторах, трансформаторах, и линиях. При повышенном напряжении передачи, больших емкостных токах, заметных потерях на корону мощность генераторов получается довольно значительной.

### 6. Увеличение пропускной способности ДЭП.

Ограничение пропускной способности ДЭП связано с необходимостью обеспечения статической и динамической устойчивости в нормальном и послеаварийном режимах. Предельная мощность зависит от длины линии и включенных по концам линии устройств (генераторы, трансформаторы,  $X_{\text{сист.}}$ ).



Например, при

$$X_{\Gamma} = X_{\Gamma} + X_{\text{сист}} = X$$

с увеличением  $X$  график смещается влево и вниз. Для увеличения предела передаваемой мощности необходимо:

1. воздействовать на  $Z_c$

2. воздействовать на  $\lambda$

$$P_{\text{пр}} = \frac{U_1 * U_2}{Z_c * \sin \alpha_0 * l} = \frac{U_1 * U_2}{Z_c * \sin \lambda}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{X_0}{B_0}}$$

$$\alpha_0 = \sqrt{X_0 * B_0}$$

Если изменить  $X_0$  в  $n$  раз и  $B_0$  в  $\frac{1}{n}$  раз, то  $Z_c$  изменится в  $n$  раз, а  $\alpha_0$  не изменится.

Если же в  $n$  раз изменить  $X_0$  и  $B_0$ , то  $\alpha_0$  изменится в  $n$  раз, а  $Z_c$  не изменится.

При изменении только  $\lambda$  характеристика смещается только горизонтально, а при изменении только  $Z_c$  - только вертикально.

Одним из способов увеличения предела передаваемой мощности является компенсация параметров ДЭП, т.е. включение в линию компенсирующих устройств.

Способы компенсации:

1. Компенсация всех параметров ЛЭП к нулевой длине, т.е. добиваются  $X_{\lambda} \approx 0$  и  $B_{\lambda} \approx 0$  (остается только  $R_{\lambda}$ )
2. Компенсация волнового сопротивления или компенсация линии. Т.е. компенсирующие устройства выбираются так, чтобы в первую очередь уменьшалось волновое сопротивление линии. ( $X_{\lambda}$  уменьшают в  $n$  раз, а  $B_{\lambda}$  увеличивают в  $n$  раз).
3. Компенсация волновой длины линии или настройка ЛЭП (увеличение  $X_{\lambda}$  и  $B_{\lambda}$  в  $n$  раз).

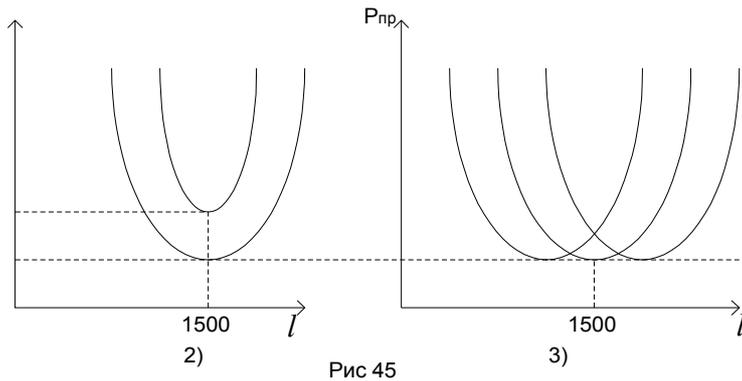


Рис 45

В чистом виде эти способы не применяются .

Если  $P < P_c$ , то на линии имеется избыток зарядной мощности и его компенсируют с помощью реакторов.

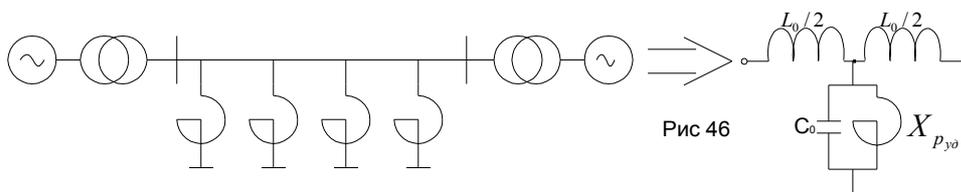


Рис 46

При этом

$$Z_{cl} * \sqrt{\frac{X_0}{B_0 - \frac{1}{X_{руд}}}}$$

$$P_{cl} = P_c * \sqrt{1 - \frac{1}{X_{руд} * B_0}}$$

Если  $P > P_c$  то дефицит зарядной мощности можно восполнить включением устройств поперечной компенсации. При этом

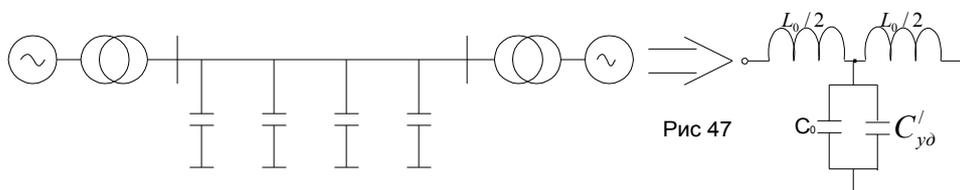


Рис 47

$$Z_{cl} * \sqrt{\frac{X_0}{B_0 + \omega * C'_{уд}}}$$

$$P_{cl} = P_c * \sqrt{1 + \frac{C'_{уд}}{C_0}}$$

Если в линию включаются конденсаторы последовательно, то волновое сопротивление будет уменьшаться.

$$Z_c = \sqrt{\frac{X_0 - X_{\text{куд}}}{B_0}}$$

$$P_{\text{с1}} = P_c * \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{X_0 * X_{\text{куд}}}}}$$

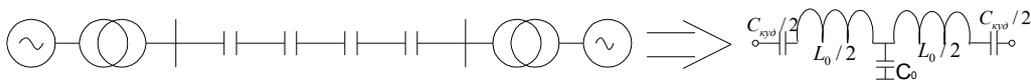


Рис 48

Очевидно, что продольная емкостная компенсация увеличивает длину волны и сокращает электрическую длину. А при поперечной компенсации, наоборот, волновая длина увеличивается.

Если одновременно включать и УПК и реакторы, то это уменьшит волновую длину линии и повысит  $P_c$ .

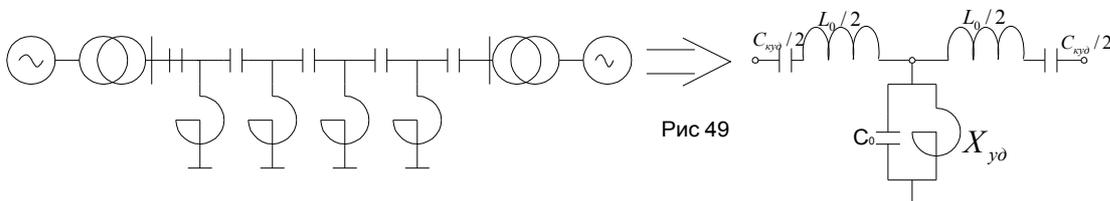


Рис 49

Весьма эффективный, но дорогой способ компенсации – установка вдоль линии СК.

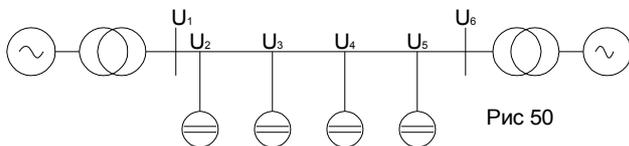
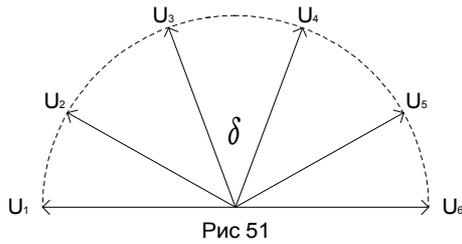


Рис 50

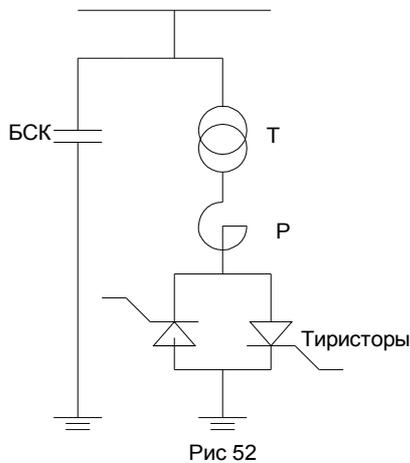
При этом, если мощности СК достаточны для поддержания

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = U_5 = U_6,$$

то электропередача может работать с любым углом  $\delta$  между напряжениями концов ЛЭП, т.е. расширяется область устойчивых режимов.



Вместо СК сейчас предлагается использовать СТК. При этом за счет плавного регулирования всегда можно настроить линию на режим передачи натуральной мощности, т.е.  $P = P_c$ .



Если проводимость СТК равна  $B_k$ , а удельная их проводимость на единицу длины ЛЭП

$$B_{k0} = \frac{\sum B_k}{l}$$

тогда имеем

$$Z_{сэк} = \sqrt{\frac{X_0}{B_0 \pm B_{k0}}} = Z_c * \sqrt{\frac{1}{1 \pm K}}$$

$$\alpha_{эк} = \sqrt{X_0 * B_0} * \sqrt{1 \pm K}$$

Здесь  $K = \frac{B_{k0}}{B_k}$  - степень компенсации линии.

При этом

$$P = \frac{U^2}{Z_{\text{эк}} * \sin \lambda_{\text{эк}}} * \sin \delta - \text{передаваемая мощность.}$$

В относительных единицах натуральной мощности некомпенсированной линии

$$P_* = \frac{P}{P_c} = \frac{\sqrt{1 \pm K}}{\sin \sqrt{1 \pm K} * l} * \sin \delta$$

Предел передаваемой мощности

$$P_{\text{пр}*} = \frac{\sqrt{1 \pm K}}{\sin \sqrt{1 \pm K} * l}$$

Т.е. предел передаваемой мощности зависит не только от длины ЛЭП, но и от степени компенсации.

Если вспомнить выражение

$$U_1 = U_2 * (\cos \lambda + Q_{2*} * \sin \lambda + jP_{2*} * \sin \lambda)$$

и соответствующую векторную диаграмму,

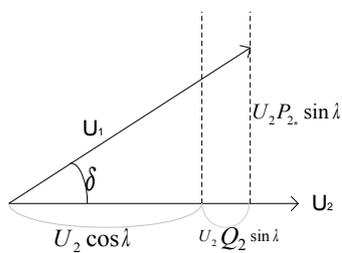


Рис 53

ТО

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_{2*} * \sin \lambda}{\cos \lambda + Q_{2*} * \sin \lambda} = \frac{P_{2*} * \operatorname{tg} \lambda}{1 + Q_{2*} * \operatorname{tg} \lambda}$$

При  $Q_2 = 0$  (режим передачи натуральной мощности, т.е.  $P_{2*} = 1$ ), получаем

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \lambda$$

т.е.  $\delta = \lambda$ .

Тогда

$$P = \frac{U^2}{Z_{\text{сэк}}} * \frac{\sin \delta}{\sin \lambda_{\text{эк}}} = \frac{U^2}{Z_{\text{сэк}}}$$

Это означает, что если с помощью управляемой компенсации мы настроим линию так, чтобы натуральная мощность стала равной передаваемой, то передаваемая мощность не зависит от угла  $\delta$  между векторами напряжений по ее концам.

## 7. Электропередачи постоянного тока

### 7.1. Способы и области применения ППТ.

Передача энергии в этом случае не связана с волновыми электромагнитными процессами, т.е. характер передачи энергии принципиально иной.

Уравнения длинной линии справедливы и в этом случае и, поскольку  $\omega = 0$ , приобретает вид

$$U_1 = U_2 * \operatorname{ch} \sqrt{r_0 * g_0} * l + I_2 * \sqrt{\frac{r_0}{g_0}} * \operatorname{sh} \sqrt{r_0 * g_0} * l$$

$$I_1 = I_2 * \operatorname{ch} \sqrt{r_0 * g_0} * l + \frac{U_2}{\sqrt{\frac{r_0}{g_0}}} * \operatorname{sh} \sqrt{r_0 * g_0} * l$$

Величина  $g_0$  характеризует потери на корону. Т.к. для ППТ потери на корону много меньше, чем для ЛЭП переменного тока, то можно принять  $g_0 = 0$ . Тогда в уравнениях возникает неопределенность

$$\sqrt{\frac{r_0}{g_0}} * \operatorname{sh} \sqrt{r_0 * g_0} * l = \infty * 0$$

Раскрыв эту неопределенность при  $g_0 \rightarrow 0$ , получим

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 + I_2 * r_0 * l \\ I_1 &= I_2 \end{aligned}$$

Т.о. необходимым условием передачи активной мощности здесь является наличие перепада напряжений, т.е.  $U_1 \neq U_2$ . При этом отсутствует сдвиг напряжений по фазе, как в ЛЭП переменного тока. В общем случае максимальная мощность (предел передаваемой мощности) по ЛЭП равен

$$P_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Z_c * \operatorname{sh} \gamma_0 * l}$$

После преобразования при  $\omega = 0$ , получим

$$P_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{r_0 * l}$$

Т.о. для ППТ предел передаваемой мощности зависит только от ограничений по нагреву проводов. Поэтому  $P_{\text{припт}} \gg P_{\text{приптока}}$  при равных номинальных напряжениях и длинах передачи.

Так как вектора напряжений в данном случае не сдвинуты друг относительно друга ( $\delta = 0$ ), то проблемы со статической и динамической устойчивостью

отсутствуют. ППТ можно использовать для связи несинхронно работающих энергосистем и для связи систем с разной частотой.

В ППТ отсутствует зарядная мощность линии, поэтому отпадает необходимость в КУ, а также появляется возможность строительства КЛ СВН, причем очень большой длины (например, через проливы).

### Структурная схема ППТ

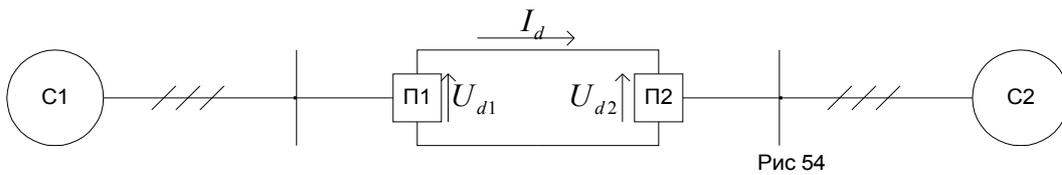


Рис 54

П1 и П2- преобразователи пост/перем (выпрямитель и инвертор). Если мощность передается из С1 в С2, то П1 – выпрямитель, а П2 – инвертор и наоборот, т.е. преобразователи реверсивны.

### Схема замещения ЛЭП ПТ

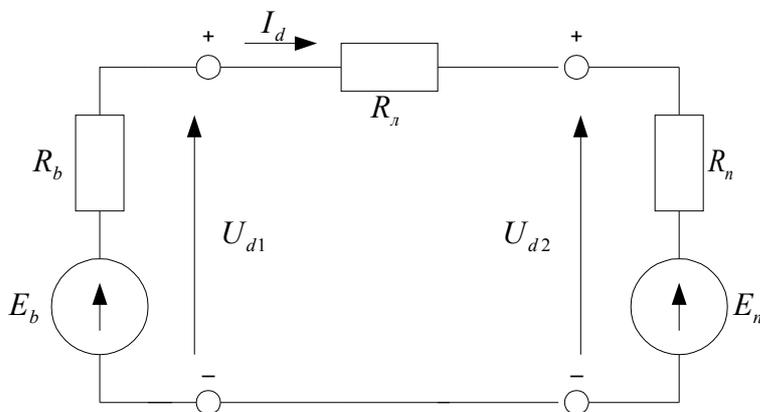


Рис 55

$R_b, R_n$  - внутренние сопротивления выпрямителя и инвертора, определяющиеся свойствами П1 и П2 системы С1 и С2

$E_b$  - средняя эдс выпрямителя

$E_n$  - противо-эдс инвертора

$E_n$  - индекс «d» - direct

Согласно схеме

$$I_d = \frac{E_b - E_n}{R_b + R_n + R_d}$$

Мощность, отдаваемая выпрямителем в ЛЭП ПТ ( $P_{d1}$ ), и мощность, получаемая инвертором ( $P_{d2}$ ), равны

$$P_{d1} = U_{d1} * I_d$$

$$P_{d2} = U_{d2} * I_d$$

Для выпрямителя направление  $E_b$  и  $I_d$  совпадают, т.е. выпрямитель является генератором электрической энергии по отношению к ЛЭП ПТ.

В инверторе направления вышеуказанных параметров противоположны, т.е. он потребляет энергию от ЛЭП ПТ. При этом выполняются условия

$$E_b > E_n$$

$$E_b > U_{d1}$$

$$E_b < U_{d1}$$

В качестве преобразователей используются статические управляемые вентильные преобразователи, собранные в трехфазную мостовую схему Ларионова. Иногда эту схему называют шестифазным преобразователем.

Схема вентильного моста

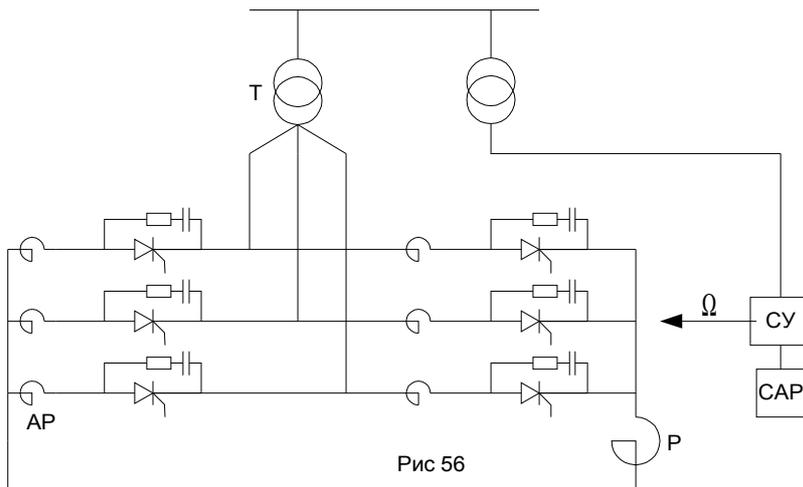


Рис 56

Каждый вентиль характеризуется:

1. Средним током, протекающим через вентиль ( $I_{cp}$ )
2. Максимальным напряжением, которое к нему прикладывается, когда он закрыт ( $U_{max}$ )

Т.к.  $P_d = f(U_{max}, I_{cp})$ , то необходимо стремиться к увеличению этих параметров.

Чтобы достичь необходимой мощности  $P_d$  вентили в одной фазе включают последовательно и параллельно. Силовой трансформатор выполняет две функции:

1. Создает необходимое выпрямленное напряжение на выходе моста с помощью выбора необходимого коэффициента трансформации
2. Электрически разделяет цепь выпрямленного тока от цепи переменного тока

Обмотка трансформатора, подключенная к сети переменного тока, называется сетевой, а подключенная к мосту – вентильной.

Каждый вентиль является тиристором, т.е. вентили являются управляемыми, открытие их происходит только после подачи на управляемый электрод импульса тока небольшой мощности. Изменяя момент подачи импульса, можно регулировать  $P_d, U_d$ , переводить мост из выпрямительного в инверторный режимы. Все это выполняется практически безынерционно. Управление осуществляется с помощью СУ, команды на который подает САР.

В каждое плечо включен анодный реактор АР для демпфирования высокочастотных колебаний, возникающих при работе вентиля (индуктивность невелика)

В полюс моста включается другой реактор, служащий для сглаживания пульсаций в выпрямленном токе (большая индуктивность).

Демпфирующие цепочки (С, R) предназначены для демпфирования высокочастотных колебаний в вентилях и трансформаторе.

ППТ делятся на униполярные и биполярные.

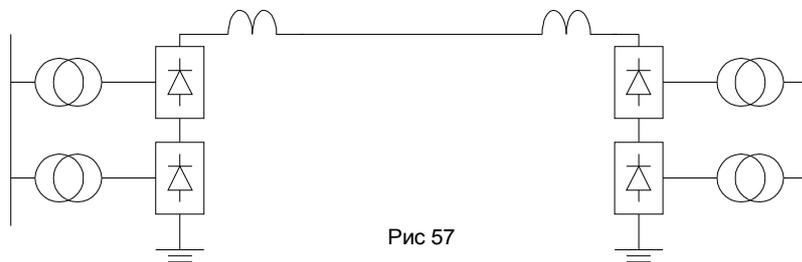


Рис 57

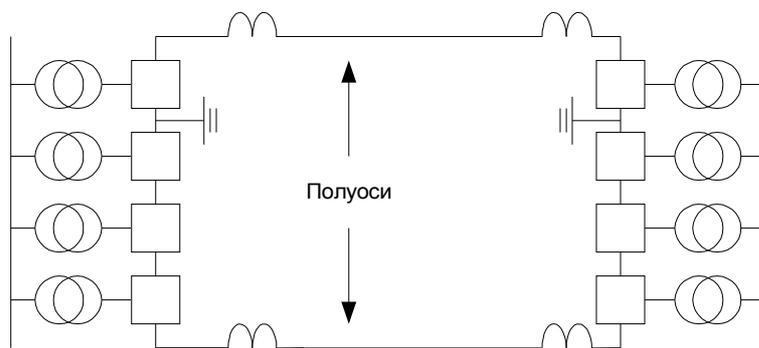


Рис 58

Первые предназначены для передачи небольших мощностей (в основном, через водные преграды), а вторые – для передачи больших мощностей. Биполярные линии могут работать при выходе из строя одной полупеи, как униполярные, но мощность при этом падает вдвое.

На ППТ не требуются выключатели. Чтобы отключить ППТ, надо снять управляющие импульсы с СУ или перевести выпрямитель в режим инвертора.

Достоинства ППТ:

1. Отсутствие предела передаваемой мощности, т.е. независимость передаваемой мощности от длины ВЛ

2. Возможность связи систем с разными частотами или несинхронно работающих систем
3. Безынерционность управления режимом, что повышает устойчивость соединяемых ЭС
4. Отсутствие зарядной мощности линии, что позволяет сооружать длинные КЛ, отсутствие КУ
5. Ограничение мощности к.з. в связываемых ЭС.

## **7. Методические указания по выполнению курсовых проектов (работ)**

В качестве методического обеспечения курсового проектирования используется пособие:

Степанов А.С. Методические указания по выполнению курсовой работы по курсу «Дальние электропередачи».- Благовещенск, Изд-во БТИ, 1991. – 27 с.

## **8. Методические указания по выполнению лабораторных работ (практикумов)**

### Лабораторная работа № 1

#### "ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В ВЫПРЯМИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ"

Цель работы:

1. Ознакомиться с устройством трёхфазного мостового преобразователя.
2. Определить характеристики трёхфазного мостового преобразователя в нерегулируемом выпрямительном режиме.

Программа работы:

1. Ознакомиться с моделью электропередачи постоянного тока и правилами безопасности при работе на ней.
2. Осуществить включение модели электропередачи постоянного тока.

3. Проверить правильность работы системы управления преобразователя, использующегося в режиме выпрямителя.
4. Получить экспериментальные внешние характеристики выпрямителя при нескольких постоянных значениях угла включения вентилей.
5. Снять для одного из режимов выпрямителя осциллограммы выпрямленного напряжения  $U_d$  на полюсах моста, анодного напряжения и анодного тока вентиля, линейного напряжения и тока вентильной обмотки трансформатора, выпрямленного тока.
6. Измерить в одном из режимов углы включения вентилей  $\alpha$  и углы коммутации  $\delta$ .
7. Опробовать способ отключения преобразователя путём снятия импульсов управления вентилями.
8. Отключить модель электропередачи постоянного тока.
9. Составить отчёт о работе, который должен содержать схему цепей мостового преобразователя с указанием мест включения измерительных приборов, указания по очередности операций при включении и выключении преобразователя, таблицы и графики, экспериментальных внешних характеристик, расшифрованные осциллограммы с определением углов  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\delta$ , напряжения  $U_d$ , линейных, фазных и пропорциональных им напряжений, анализ результатов и выводы по работе.

Пояснения к работе.

1. Питание модели осуществляется от трёхфазной сети напряжением 380 В. Для подключения питания необходимо вставить четырехштырьковую вилку модели в соответствующую розетку с указанным выше напряжением.
2. Включение модели под напряжением для работы преобразователей без регуляторов производится таким образом, что действие устройства ПИР имитируется вручную:
  - включить тумблер "Защита", чем исключается возможность включения

вентилей;

-включить тумблер питания модели;

-выключить тумблеры регулирующих устройств (РТ на выпрямителе и КУ на инверторе);

-включить тумблеры включения напряжения сети переменного тока выпрямителя и инвертора;

-установить по стрелочным индикаторам с помощью потенциометров " $\alpha$ " и " $\beta$ " углы управления  $\alpha > 90^\circ$  и  $\beta = (40 - 60^\circ)$ , соответствующие работе обоих преобразователей в инверторном режиме;

-выключить тумблер "Защита", обеспечивая подачу импульсов управления на вентили;

-перевести выпрямительный мост в режим выпрямления путём уменьшения угла запаздывания включения  $\alpha$  с помощью потенциометра " $\alpha$ " до появления тока  $I_d$ , что соответствует действию устройства ПИР;

-с помощью потенциометров " $\alpha$ " и " $\beta$ " установить желаемый режим, контролируя его по приборам, показывающим выпрямленное напряжение выпрямителя  $U_{ds}$  и инвертора  $U_{du}$ , выпрямленный ток  $I_d$  значения углов  $\alpha$  и  $\beta$ , например,  $I_d = 1$  А,  $U_{ds} = 22,5$  В,  $U_{du} = 11,5$  В.

3. Далее может быть проверена правильность работы системы управления преобразователем, например, выпрямителем. Система управления должна:

-выдавать за период силового напряжения 0,02 сек импульсы управления всеми шестью вентилями;

-импульсы в установившемся режиме работы преобразователя должны следовать с интервалами в 60 электрических градусов;

-включение тумблера "Защита" должно приводить к исчезновению импульсов управления вентилями, а выключение - к их возникновению;

Для проверки выполнения указанных требований к системе управления вентилями преобразователя используем осциллограф с синхронизацией от сети.

Включим осциллограф так, чтобы его измерительные проводники были подключены к паре гнёзд, на которые выведены напряжения, полученные при суммировании импульсов управления всеми вентилями преобразователя, тщательно прослеживая соответствие заземлений при этом включении.

Подбирая необходимый коэффициент усиления в блоке регулирования амплитуды сигнала и частоту в блоке развёртки так, чтобы на экране были видны импульсы управления вентилями и выведенная осциллограмма имела протяженность в 0,02 сек, убедимся визуально, что система управления преобразователем вырабатывает именно шесть импульсов за период промышленной частоты. Из этой же осциллограммы может быть сделан вывод о следовании импульсов с интервалами, близкими к  $1/6$  части периода, то есть в 60 электрических градусов. Для более точного сравнения интервалов между импульсами следует изменить частоту развёртки так, чтобы протяженность осциллограммы на экране осциллографа составляла 60 электрических градусов. Поскольку синхронизация выполняется от сети с частотой напряжения 50 Гц, а частота развёртки в 6 раз превышает частоту синхронизации, то на экране увидим, как бы шесть осциллограмм, наложенных одна на одну, в каждой из которых имеется один импульс управления. При интервале между соседними импульсами точно в 60 электрических градусов передние фронты всех шести импульсов на такой, осциллограмме совместятся. В реальных условиях всегда имеется неодинаковость интервалов, приводящая к разбросу передних фронтов импульсов на осциллограмме. Величина разброса может быть оценена в электрических градусах путём замера в миллиметрах протяженности осциллограммы, составляющей 60 электрических градусов, протяженности разброса, выраженной также в миллиметрах, и решение соответствующей пропорции.

В реальных электропередачах постоянного тока разброс не превышает долей электрического градуса, на модели он может быть на порядок больше.

Для проверки действия тумблера "Защита" следует при выключенном тумблере получить на экране осциллографа изображение импульсов управления, как указывалось выше, а затем включить тумблер. При правильной работе системы управления импульсы управления должны исчезнуть. При выключении тумблера "Защита" они возникают на экране осциллографа.

4. Для получения экспериментальных внешних данных выпрямителя при постоянных значениях угла запаздывания включения следует:

-установить на включенной модели желаемое значение угла  $\alpha$  потенциометром " $\alpha$ ", не допуская с помощью потенциометра " $\beta$ " исчезновения тока  $I_d$ ;

-изменяя нагрузку выпрямителя путём изменения режима инвертора с помощью потенциометра " $\beta$ ", зафиксировать несколько пар соответствующих значениям выпрямленного тока  $I_d$  и выпрямленного напряжения  $U_d$  выпрямителя, например,  $\alpha = 27^\circ$

$I_d, \text{A}$	0,5	1	1,5	1,85
$U_d, \text{В}$	26	24,7	23,4	22,5

Приведённая таблица отражает внешнюю характеристику выпрямителя при  $\alpha = 27^\circ$ . Аналогично, могут быть получены внешние характеристики выпрямителя при других постоянных значениях угла включения вентилей, например,  $\alpha = 10,8$ .

$I_d, \text{A}$	2	1,5	1	0,75
$U_d, \text{В}$	24,8	26,1	27,5	28,3

$$\alpha = 45$$

$I_d, A$	1,4	1	0,5	0,2
$U_d, B$	17,3	18,5	19,8	20,6

$$\alpha = 60$$

$I_d, A$	1	0,6	0,2
$U_d, B$	10,8	11,75	12,5

На рис.1 представлены в виде графиков полученные внешние характеристики выпрямителя при постоянных значениях угла включения вентилей  $\alpha$ .

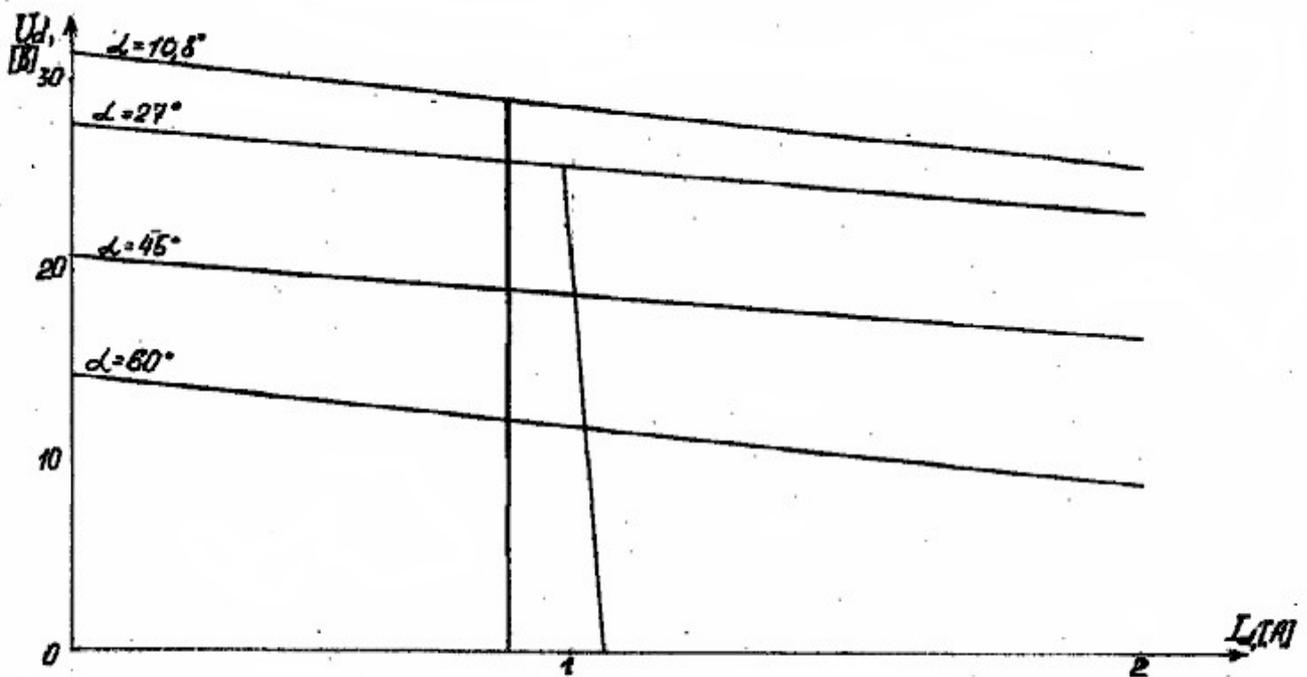


Рис. 1 Экспериментальные внешние характеристики выпрямителя ( $\alpha = \text{const}$ )

Выполним качественное сопоставление экспериментальных внешних характеристик выпрямителя, приведённых на рис.1, и теоретических внешних характеристик выпрямителя:

— экспериментальные характеристики представляются прямыми линиями, как и теоретические;

- при увеличении угла  $\alpha$  экспериментальная внешняя характеристика смещается параллельно самой себе в область меньших напряжений, как и теоретическая;
- при увеличении тока  $I_d$  напряжение  $U_d$  преобразователя, работающего с постоянным значением угла  $\alpha$ , снижается; этот вывод справедлив в отношении как экспериментальных, так и теоретических внешних характеристик выпрямителя.

5. Для получения осциллограмм токов в разных местах схемы включены резисторы, форма осциллограмм напряжений на которых совпадает с формой осциллограмм токов. Резистор, включенный последовательно с вентилем 5 преобразователя, позволяет получить осциллограмму анодного тока этого вентиля, резистор, включенный в цепь фазы С вентильной обмотки трансформатора, используется для получения осциллограммы тока на стороне переменного тока преобразователя. Форма выпрямленного тока может быть получена с помощью резисторов  $R_{д1}$  или  $2 R_{д1}$ .

Следует иметь в виду, что сопротивления резисторов и напряжения на них невелики, поэтому чувствительность осциллографа должна быть высокой. При снятии других осциллограмм, на осциллограф подаются более высокие напряжения и его чувствительность должна быть своевременно снижена для исключения перегрузки его усилителя входного сигнала. Настройка блока частоты развёртки должна подбираться таким образом, чтобы на осциллограмме был виден интервал времени 0,02 сек (1 период при частоте 50 Гц). Фиксация осциллограмм производится путём наложения прозрачной бумаги (например, кальки) на экран осциллографа и обводки кривой карандашом, ручкой или другими пишущими инструментами.

Провести качественное сравнение полученных осциллограмм с идеализированными осциллограммами, построенными теоретическим путём.

Выполнить расшифровку осциллограмм, указав на них углы  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\delta$ , обозначив имеющиеся на них линейные, фазные или пропорциональные им

напряжения. Убедиться, что значение угла  $\delta$  для вентиля выпрямителя много больше  $\delta_{\min}$ .

6. Полученные при выполнении п.5 программы осциллограммы позволяют определить численные значения углов  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\delta$ , характеризующих работу преобразователя. Для этого следует на осциллограммах измерить масштабной линейкой протяжённость, какого-либо известного интервала времени, который может быть выражен и в электрических градусах или в радианах, например, периода промышленной частоты (0,02 сек. или  $360^\circ$ , или  $2\pi$  радиан) и протяжённость измеряемого угла. Составив и разрешив пропорцию, находим значение угла, выраженное соответственно либо в секундах, либо в электрических градусах или радианах. Для увеличения точности измерения углов следует настроить осциллограф на более высокую частоту развёртки, например, 6-кратную, как описывалось в п.3. Однако, в этих случаях выбор измеряемых масштабной линейкой интервалов должен быть проведён очень тщательно для исключения ошибок.

7. Получить на экране осциллографа осциллограмму выпрямленного тока, как описывалось в п.5. Глядя на экран осциллографа, включить тумблер "Защита", прекращая тем самым подачу управляющих импульсов на вентили преобразователей. По осциллограмме видно, что ток в модели электропередачи прекратился. Это же может быть зафиксировано по стрелочному амперметру, установленному в цепи выпрямленного тока. Внимательный экспериментатор увидит на экране осциллографа процесс уменьшения выпрямленного тока вплоть до его полного исчезновения и сможет оценить длительность этого процесса по методике, описанной в п.6. При необходимости опыт следует повторить несколько раз.

Из этого эксперимента может быть сделан вывод о возможности быстрого выключения преобразователей, работающих в выпрямительном режиме, путём прекращения подачи импульсов управления на его вентили. Это положение является очень важным в связи с тем, что дешёвой и надёжной в работе

конструкции высоковольтного выключателя постоянного тока к настоящему времени не предложено.

8.Операции по отключению модели электропередачи постоянного тока обратны операциям по включению, рассмотренным в п.2.

## Лабораторная работа № 2

### "ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В ИНВЕРТОРНОМ РЕЖИМЕ"

Цель исследования:

Ознакомиться с характеристиками нерегулируемого трёхфазного мостового инвертора.

Программа работы :

1. Включить модель электропередачи постоянного тока и проверить правильность действия системы управления преобразователя, работающего в режиме инвертирования.
2. Получить экспериментальные внешние характеристики инвертора при нескольких постоянных значениях углов опережения включения  $\beta$  и углов коммутации  $\gamma$ .
3. Снять для одного из режимов инвертора осциллограммы выпрямленного напряжения  $U_d$  на полюсах моста, анодного напряжения и анодного тока вентилья, линейного напряжения и тока вентильной обмотки преобразовательного трансформатора, выпрямленного тока и сопоставить их с аналогичными осциллограммами, полученными для выпрямителя.
4. Опробовать аварийные условия, приводящие к опрокидыванию нерегулируемого инвертора, и проанализировать его причину.
5. Составить отчёт о работе, который должен содержать схему цепей мостового преобразователя с указанием мест включения измерительных приборов, таблицы и графики экспериментальных внешних характеристик

инвертора, расшифрованные осциллограммы с определением углов  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ , напряжения  $U_d$ , линейных, фазных и пропорциональных им напряжений, анализ результатов и выводы по работе.

Пояснения к работе.

1. Включение модели осуществляется так, как описано в лабораторной работе 1.

2. Получение внешних характеристик нерегулируемого инвертора выполняется в значительной степени аналогично тому, как это было сделано выше в лабораторной работе 1 для выпрямителя. Отличие заключается лишь в том, что постоянное значение придаётся углу опережения включения вентилей инвертора  $\beta$ , а значения выпрямленного тока  $I_d$ , протекающего через инвертор, изменяются путём установки вручную различных значений угла запаздывания включения  $\alpha$  вентилей выпрямителя. Измеряются при проведении эксперимента угол  $\beta$ , выпрямленный ток  $I_d$ , выпрямленное напряжение  $U_d$  инвертора, например,

$$\beta = 25,2^\circ$$

$I_d, \text{A}$	0,2	0,24	0,4	0,45
$U_d, \text{B}$	-19,5	-19,7	-20	-20,1

Приведённая таблица описывает внешнюю характеристику инвертора при  $\beta = 25,2^\circ$ .

Подобным образом могут быть получены внешние характеристики инвертора при других постоянных значениях угла опережения включения вентилей инвертора. Например,

$$\beta = 36^\circ$$

$I_d, \text{A}$	0,2	0,5	0,65
$U_d, \text{B}$	-18,5	-19,5	-19,9

$$\beta = 54^\circ$$

$I_d, A$	0,2	0,24	0,4	0,45
$U_d, B$	-19,5	-19,7	-20	-20,1

$$\beta = 60^\circ$$

$I_d, A$	0,2	0,5	0,75	1,0
$U_d, B$	-12,4	-13,2	-13,9	-14,7

$$\beta = 90^\circ$$

$I_d, A$	0,2	0,5	1,0	1,5
$U_d, B$	-0,5	-1,4	-2,7	-4,1

$$\beta = 97,2^\circ$$

$I_d, A$	0,64	1,0	1,5	1,85
$U_d, B$	0	-1,0	-2,4	-3,4

На рис. 2 представлены полученные внешние характеристики инвертора в виде графиков. Выполним качественное сопоставление этих экспериментальных характеристик с теоретическими:

-экспериментальные характеристики при  $\beta = \text{const}$  представляются прямыми линиями, как и теоретические;

-при увеличении угла  $\beta$  экспериментальная внешняя характеристика перемещается параллельно самой себе в область меньших по абсолютной величине напряжений;

-при увеличении тока  $I_d$  выпрямленное напряжение инвертора  $U_d$  возрастает по абсолютной величине: этот вывод справедлив как по отношению к экспериментальным данным внешних характеристик при  $\beta = \text{const}$ , так и по отношению к теоретическим;

-из теоретических внешних характеристик следует, что при работе преобразователя в режиме 2-3 с постоянным значением угла включения вентилей в зависимости от величины выпрямленного тока  $I_d$  может

установиться либо выпрямительный режим, либо инверторный: это положение иллюстрируется экспериментальной внешней характеристикой, полученной при  $\beta = 97,2^\circ$

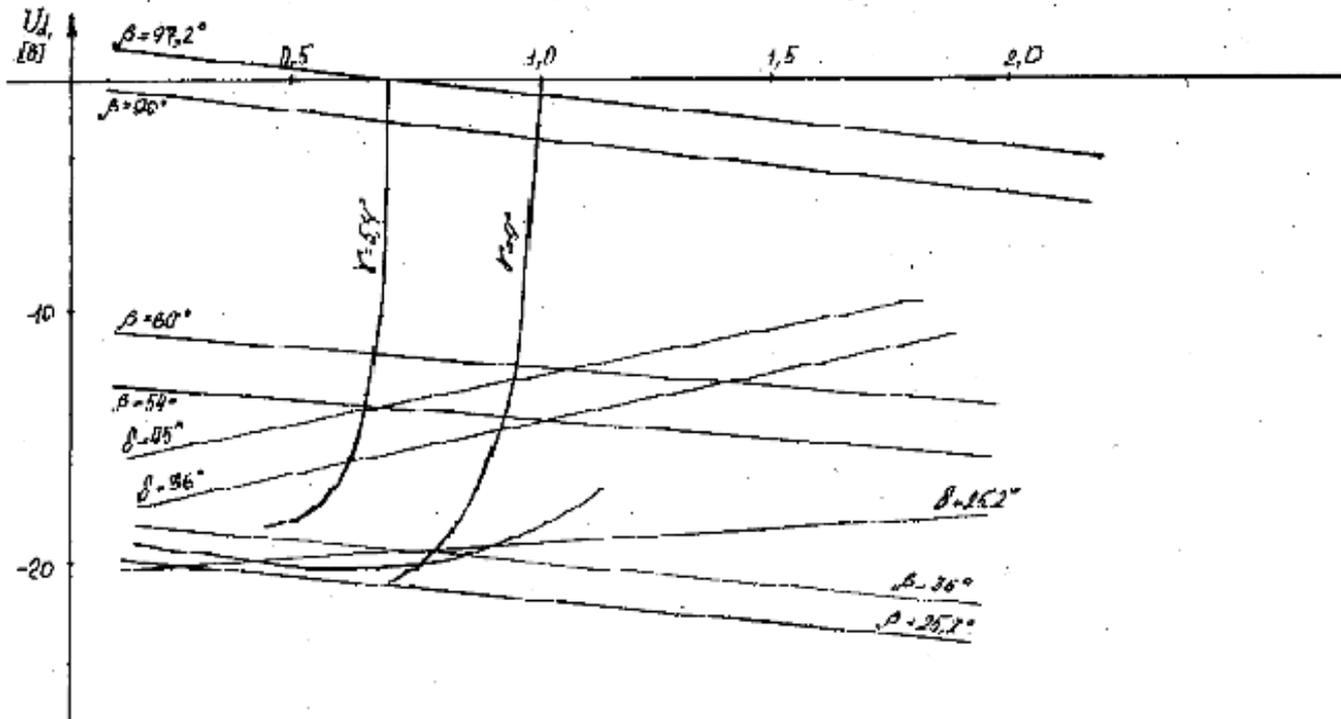


Рис. 2 Внешние характеристики нерегулируемого инвертора

При снятии внешних характеристик инвертора при постоянных значениях угла коммутации используют осциллограф для контроля значения угла так, как это описано выше при обсуждении п:6 программы, приведённой в работе 1. Путём изменение режима выпрямителя инвертора добиваются одного и того же значения угла коммутации при различных значениях выпрямленного тока. При проведении эксперимента измеряются значения угла коммутации выпрямленного тока и выпрямленного напряжения инвертора. Например, при

$$\gamma = 5,4^\circ$$

$I_d, A$	0,32	0,51	0,58	0,62
$U_d, B$	-18,3	-13,8	-8,2	-0,6

Наиболее важные отличия осциллограмм, снятых для выпрямительного и инверторного режимов работы преобразователей, состоят в следующем :

- выпрямленное напряжение выпрямителя положительно, инвертора - отрицательно,
- абсолютная величина выпрямленного напряжения в межкоммутационном интервале увеличивается в инверторном режиме и уменьшается в выпрямительном режиме,
- большую часть периода анодное напряжение вентиля инвертора положительно, а выпрямительного - отрицательное,
- угол выключения вентиля  $\delta$  у инвертора значительно меньше, чем у выпрямителя, поэтому на инверторе требуются автоматические регуляторы, препятствующие чрезмерному уменьшению угла  $\delta$ .
- анодный ток вентиля при его увеличении во время коммутации в инверторном режиме представляется выпуклой кривой, а в выпрямительном режиме - вогнутой, что соответствует кривой тока коммутации,
- интервалы коммутации между соответствующими вентилями на всех кривых в инверторном и выпрямительном режимах взаимно смещены, что отражает различие углов управления вентилями.

4. В реальных условиях работы инвертора возможны различные причины, приводящие к его опрокидыванию: снижение напряжений, в приёмной сети переменного тока, нарушения нормальной работы системы управления вентилями, пропуск включения вентиля, увеличение выпрямленного тока. Наиболее просто на модели может быть воспроизведена последняя причина.

На осциллограф следует вывести анодное напряжение вентиля инвертора и, меняя углы управления вентилями нерегулируемых выпрямителя и инвертора, установить режим преобразователей так, чтобы угол выключения  $\delta$

вентилей инвертора был близок к минимально допустимому, а угол запаздывания включения  $\alpha$  вентилей выпрямителя составлял несколько десятков градусов.

Затем следует постепенно уменьшать угол  $\alpha$  на выпрямителе, наблюдая с помощью осциллографа за уменьшением угла выключения вентилей инвертора. При этом выпрямленный ток  $I_d$  будет нарастать. Если исходный режим был подобран неудачно, то угол  $\delta$ , уменьшаясь, примет недопустимые по условиям устойчивости работы инвертора значения, что приведёт к опрокидыванию инвертора. Факт опрокидывания может быть зафиксирован по резкому увеличению значения выпрямленного тока  $I_d$ , изменению характера кривой напряжения на вентиле, а также по значению выпрямленного напряжения инвертора, близкому к нулевому. Если опрокидывания не произошло, то следует поменять исходный режим в сторону уменьшения угла  $\delta$  и увеличения угла  $\alpha$ .

Напомним кратко причину опрокидывания.

Если угол выключения вентилей  $\delta$  за счёт протекания слишком большого тока оказывается меньше допустимого, коммутация не заканчивается выключением  $K$ -го вентиля с переходом тока на  $(K+2)$ -й вентиль и  $K$ -й вентиль продолжает находиться в проводящем состоянии. Через  $60^\circ$  после включения  $(K+2)$ -го вентиля включается  $(K+3)$ -й вентиль и образуется короткое замыкание инвертора, при котором выпрямленный ток  $I_d$  протекает по вентилям  $K$  и  $(K+3)$ , минуя Фазы трансформатора инвертора. Такая ситуация называется однофазным опрокидыванием инвертора.

Из этого эксперимента следует, что для предотвращения опрокидывания необходимо следить за величиной угла включения  $\delta$  и не допускать его чрезмерного уменьшения. Такую функцию в электропередаче постоянного тока выполняет автоматический быстродействующий регулятор угла включения вентилей инвертора.

5. Выключение установки производится путём выполнения операций, обратных выполненным при её включении.

Лабораторная работа № 3  
 "ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ  
 ПОСТОЯННОГО ТОКА".

Цель работы:

Ознакомиться с влиянием на работу электропередачи постоянного тока основных быстродействующих регуляторов и проследить организацию её рабочего режима.

Программа работы.

1. Включить установку.
2. Получить экспериментальные внешние характеристики регулируемого выпрямителя при нескольких значениях угла запаздывания включения  $\alpha$  и нескольких значениях тока уставки  $I_u$  регулятора тока.
3. Получить внешние характеристики регулируемого инвертора при различных значениях коэффициента усиления токового элемента компаундирующего устройства и различных значениях угла опережения включения вентиляей.
4. Установить режим электропередачи так, чтобы он определялся:
  - а) характеристикой инвертора, соответствующей постоянному значению угла выключения вентиляей, и характеристикой регулируемого выпрямителя, определяемой постоянным значением угла запаздывания включения вентиляей при токе уставки регулятора тока, незначительно превышающем ток передачи;
  - б) током передачи, определяемым током уставки регулятора тока и незначительным увеличением угла  $\alpha$  под действием регулятора тока.
5. Выключить установку.
6. Составить отчёт, который должен содержать:

- структурную схему и схему включения устройств регулирования электропередачи постоянного тока,
- таблицы опытных данных,
- графики внешних характеристик регулируемых выпрямителя и инвертора,
- графическое определение величин, характеризующих режимы электропередачи, с нанесением опытных точек,
- анализы результатов и выводы по работе.

Пояснения к работе.

1. Включение установки производится так, как описано в лабораторной работе 1.

2. Способ получения экспериментальных внешних характеристик регулируемого выпрямителя аналогичен описанному в работе 1. При проведении эксперимента на выпрямителе должен быть включен регулятор тока (тумблер РТ включен). Ток уставки регулятора тока определяется положением движка потенциометра РТ, который рекомендуется установить в некоторое промежуточное (не крайнее положение).

Напомним, что тумблер РТ и движок потенциометра РТ располагаются на вертикальной лицевой панели установки.

Следует иметь в виду, что внешняя характеристика регулируемого с помощью регулятора тока выпрямителя состоит из двух участков: при значениях выпрямленного тока  $I_d$ , меньших или равных току уставки, сигнал регулятора тока равен нулю и внешняя характеристика совпадает с полученной в работе 1, для нерегулируемого выпрямителя, работающего с таким же углом запаздывания включения вентилей  $\alpha$ : при значениях тока  $I_d$ , стремящихся превзойти ток уставки, регулятор тока автоматически увеличивает угол включения вентилей  $\alpha$ , что сопровождается снижением напряжения выпрямителя до значений, ограничивающих выпрямленный ток выпрямителя величиной, близкой к току уставки. Экспериментальные точки должны быть сняты так, чтобы была возможность воспроизвести оба участка

характеристики, каждый из которых близок к прямолинейному. Абсцисса точки пересечения участков даст значение тока уставки. Следует снять две или более внешние характеристики выпрямителя при разных исходных значениях угла  $\alpha$  и одном и том же токе уставки регулятора и убедиться, что регулятор ограничивает выпрямленный ток  $I_d$  на одном и том же уровне, не зависящем от значения исходной величины угла. Кроме того, необходимо снять внешние характеристики выпрямителя при одном и том же исходном значении угла включения и разных токах уставки. В этом эксперименте следует убедиться, что ограничение тока  $I_d$  происходит на разных уровнях, в зависимости от величины тока уставки регулятора тока. Результаты экспериментов могут быть, например, такими, как указано в таблицах работы 1, с той лишь разницей, что при вступлении в работу регуляторов тока наступает ограничение значения тока  $I_d$ . Эти результаты представлены в графическом виде на рис. 1. Из приведённых характеристик видно, что регулятору тока соответствует практически астатическая внешняя характеристика.

3. Установить желаемый угол опережения включения вентилей инвертора  $\beta$ . Это значение может быть выбрано равным желаемому значению угла выключения вентилей  $\delta$ , то есть  $\delta = \beta = 15^\circ - 25^\circ$ . Получить внешнюю характеристику инвертора при этом постоянном значении угла  $\beta$ . Если такая характеристика была получена в работе 2, то её можно считать известной. Например, пусть  $\delta = \beta = 25,2^\circ$ , такая характеристика получена в работе 2.

4. Включить тумблер КУ на вертикальной лицевой панели установки, что создаёт возможность работы инвертора с токовым элементом компаундирующего устройства, который при надлежащем коэффициенте усиления обеспечивает неизменность угла выключения вентилей инвертора при изменении выпрямленного тока.

При том же значении угла опережения включения вентилей инвертора  $\beta$  получить внешние характеристики инвертора, работающего с компаундирующим устройством, при разных значениях его коэффициента

усиления, устанавливаемого с помощью потенциометра КУ на вертикальной лицевой панели установки. Изменение режима выпрямителя достигается за счёт изменения либо уставки регулятора, либо угла  $\alpha$ . Результаты таких экспериментов могут быть, например, такими:

$\beta = 25,2 = const$  тумблер КУ выключен.

Id, A	0,2	0,24	0,4	0,45
Ud, B	-19,5	-19,7	-20,0	-20,1

$\beta = 25,2^\circ$ , тумблер КУ включен, коэффициент усиления мал

Id, A	0,3	0,5	0,75	0,8
Ud, B	-19,5	-19,4	-19,1	-19,0

$\beta = 25,2^\circ$ , тумблер КУ включён, коэффициент усиления увеличен.

Id, A	0,2	0,3	0,65	0,75
Ud, B	-19,25	-19,2	-19,1	-18,9

При этих экспериментах можем, пользуясь методикой измерения углов, описанной в работе 1, контролировать с помощью осциллографа значение угла выключения вентиля инвертора  $\delta$ . Напомним, что угол  $\delta$  может быть получен на экране при осциллографировании анодного напряжения вентиля инвертора как интервал отрицательного напряжения после момента выключения вентиля. Экспериментам, описанным первыми двумя таблицами, соответствует уменьшение угла  $\delta$  при увеличении тока Id . В последнем эксперименте угол практически не зависит от величины выпрямленного тока, что свидетельствует о правильной настройке компаундирующего устройства.

Полученные внешние характеристики инвертора представлены в виде графиков на рис.3 . Как следует из теоретических предпосылок, полученных ранее, внешние характеристики инвертора, работающего с постоянным углом выключения вентиля  $\delta$ , должны быть прямыми линиями, исходящими из тех же точек оси ординат, что и характеристики при  $\delta = \beta = const$  и их наклон к оси абсцисс равен наклону характеристик при  $\beta = const$ , что сопровождается уменьшением модуля напряжения Ud при увеличении тока. Заметим, что эти

обстоятельства могут быть использованы, с одной стороны, для подбора необходимой величины коэффициента усиления компандирующего устройства, с другой стороны, для оценки совпадения теоретических результатов с экспериментальными.

При выбранной настройке компандирующего устройства могут быть получены внешние характеристики регулируемого инвертора и при других постоянных значениях угла выключения вентилей, которые устанавливаются из условия, что угол  $\delta$ , поддерживаемый компандирующим устройством при изменении тока, равен углу опережения включения  $\beta$ , установленному вручную (без действия регулирующих устройств).

Результаты экспериментов могут быть, например, такими :

$$\delta=36^{\circ}$$

Id, A	0,3	0,5	0,75	1,0
Ud, B	-17,0	-16,7	-16,2	-15,5

Эти результаты представлены в виде графиков на рис. 3. Внешние характеристики инвертора при постоянных значениях угла представляют собой в соответствии с теорией при  $\beta < 60^{\circ}$  семейство параллельных прямых.

4. Режимные параметры электропередачи должны удовлетворять условию, что ток Id определяется выпрямленным напряжением выпрямителя, инвертора и сопротивлением линии. Напряжения выпрямителя и инвертора определяются при заданном токе амплитудой коммутирующих э.д.с.  $E_m$  и углами управления вентилями.

На модели электропередачи преобразовательные трансформаторы имеют фиксированное значение коэффициентов трансформации, поэтому для установления режима могут выбираться только угол запаздывания включения вентилей выпрямителя  $\alpha$ , угол выключения вентилей инвертора  $\delta$ , ток уставки регулятора тока  $I_u$ . Предполагается, что при выполнении предыдущего пункта программы работы был выбран и установлен необходимый коэффициент усиления компандирующего устройства инвертора.

Методика установления номинального режима сводится к следующему. На инверторе устанавливаем желаемый угол выключения вентиля, например,  $\beta = \delta = 25,2^\circ$ . Внешняя характеристика, соответствующая выбранному в этом примере значению угла выключения была получена выше при выполнении предыдущего пункта программы. На выпрямителе устанавливаем максимальное значение тока уставки  $I_u$  регулятора тока и желаемое значение угла запаздывания включения вентиля  $\alpha$ , например,  $\alpha = 10,8$ . Внешняя характеристика выпрямителя при  $\alpha = 10,8^\circ$  получена в работе 1. Уменьшая ток уставки регулятора тока, добиваемся:

а) его минимального значения, не изменяющего величины выпрямленного тока;

б) незначительного (на 4-5% уменьшения выпрямленного тока).

Полученное номинальное значение тока  $I_d$  при выбранных в качестве примера параметрах в случае а) равно 0,86 А. На этом установление номинального режима заканчивается. Углы, характеризующие работу выпрямителя и инвертора имеют желаемые значения, регулятор тока предотвратит перегрузки оборудования по току при возмущении режима, ограничив, их значениями, близкими к номинальным, и в режиме б) обеспечивает лучшие условия по статической устойчивости совместно работающих преобразователей.

Результаты эксперимента могут быть при необходимости использованы для вспомогательных целей. Поскольку параметры режима связаны, то любой из них может быть определён через другие, измеренные в эксперименте. Покажем в качестве примера способ определения сопротивления линии электропередачи в режиме а) по приведённым выше данным. На рис. 3 показаны: внешняя характеристика выпрямителя при  $\alpha = 10,8$ , внешняя характеристика инвертора при  $\delta = 25,2$ , отображённая симметрично оси абсцисс - в первый квадрат, на которой отмечена квадратом точка, соответствующая номинальному току 0,86 А. Внешняя характеристика выпрямителя, приведенная к полюсам инвертора, то есть выпрямителя, к которому отнесено и сопротивление линии, может быть

представлена прямой, проходящей через точку холостого выпрямителя, расположенную на оси ординат, и точку номинального режима на характеристике инвертора, отмеченную квадратом. (Разница в напряжении собственно выпрямителя и выпрямителя, приведённого к полюсам инвертора, при токе  $I_d = I_A$  численно равна сопротивлению линии  $R_{л}$ . Из построения, выполненного на рис.3, получим  $R_{л} = 11,6 \text{ Ом}$ ).

Очевидно, что указанные операции по установлению режима могут быть выполнены только тогда, когда выбранные желаемые параметры обеспечивают существование режима. В случае отсутствия режима значения желаемых параметров можно изменить.

5.Выключение установки может быть выполнено путём выполнения операций, обратных операций включения.

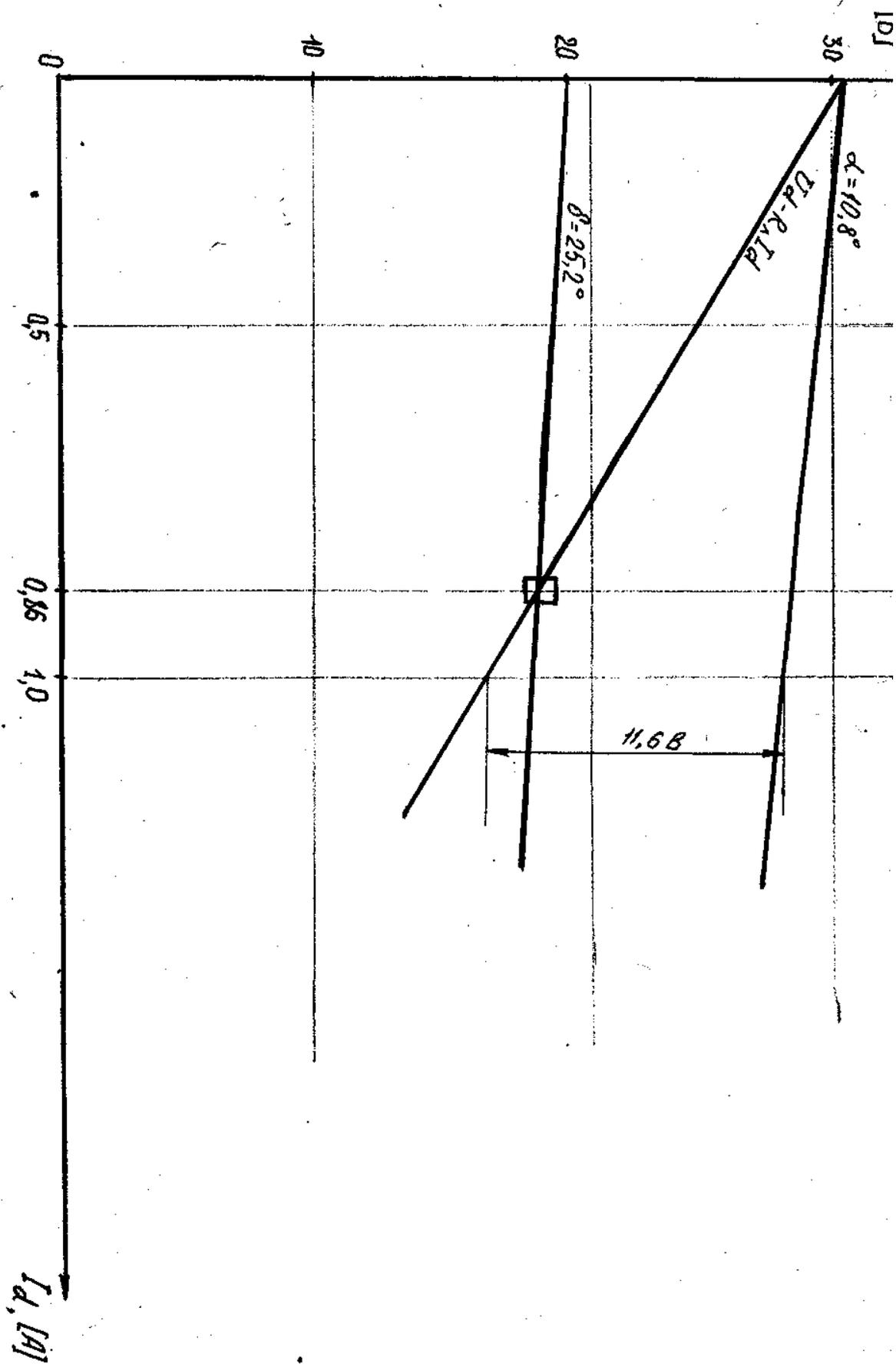


Рис. 4.3 К определению сопротивления лампы

В качестве методического обеспечения практических занятий используется пособие:

Дальние электропередачи в примерах./ Под ред. Ю.П. Рыжова. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – 88 с.

## **10. Методические указания по выполнению домашних заданий и контрольных работ**

Задание на контрольную работу состоит из двух частей: вопроса по теоретической части курса и задач, которые приведены ниже. Каждому студенту выдается индивидуальный набор вопросов по теоретической части курса и задачи с учетом варианта исходных данных.

### **1. Вопросы по теоретической части курса**

1. Изложите методику выбора и обоснования напряжения дальней электропередачи СВН переменного тока.
2. Поясните назначение линий электропередач сверхвысокого напряжения, перспективы повышения напряжений. Как осуществляется обоснование величины расчетной пропускной способности электропередачи?
3. Опишите методику выбора сечения и конструкции фазных проводов ВЛ СВН.
4. Схемы и области применения электропередач постоянного тока.
5. В чем состоят технико-экономические задачи, возникающие при передаче энергии и объединении систем?
6. Чем отличается выбор номинального напряжения и числа цепей воздушных линий электропередач СВН и УВН от выбора номинального напряжения, и числа цепей ВЛ более низких классов напряжения?
7. Поясните явление коронного разряда на проводах ВЛ и методику расчета среднегодовых потерь мощности и энергии на корону для линий переменного тока.

8. Выведите основные уравнения, характеризующие ток и напряжение в любой точке линии. В чем состоит волновой характер процессов в длинной линии?
9. Изложите принципы и порядок построения круговых диаграмм мощности длинных линий.
10. Проанализируйте распределение напряжения вдоль длинной линии в различных режимах.
11. Как изменяется предельно передаваемая мощность в зависимости от длины линии? Какими способами можно увеличить предел передаваемой мощности по линии?
12. Схемы замещения дальних электропередач. Как связаны параметры схем замещения с волновыми параметрами длинной линии?
13. Как составить расчетную схему замещения дальней электропередачи переменного тока СВН? Покажите особенности определения параметров схем замещения.
14. Проанализируйте зависимость КПД длинной линии от режима передаваемой мощности, длины линии и величины напряжения.
15. Проанализируйте зависимость КПД длинной линии СВН, содержащей компенсирующие устройства, от режима передаваемой мощности.
16. Составьте описание способов компенсации параметров дальних электропередач в целях повышения их пропускной способности.
17. По каким признакам производится классификация средств повышения пропускной способности дальних электропередач?
18. Осветите особенности осуществления рабочих режимов электропередач СВН.
19. Как осуществляется выбор числа и мощности синхронных компенсаторов, устанавливаемых на промежуточных подстанциях системы ДЭП; на подстанции приемной системы?
20. Как осуществляется выбор числа и мощности шунтирующих реакторов для электропередач СВН?

21. Рассмотрите установки продольной емкостной компенсации, их размещение и схемы.
22. Компенсация реактивной мощности в системах дальних электропередач СВН. Выполните сравнение различных типов источников реактивной мощности.
23. При каких условиях можно осуществить экономически наивыгоднейший режим работы системы ДЭП? Перечислите средства, повышающие экономичность режима работы ДЭП.
24. Опишите схемы статических компенсаторов реактивной мощности (СКРМ). В чем состоят преимущества их использования для ДЭП СВН?
25. Перечислите и опишите средства регулирования напряжения в электропередачах СВН.
26. Как определить параметры режима установившегося холостого хода длинной линии переменного тока; компенсированной ДЭП?
27. Рассмотрите возможные способы включения системы дальней электропередачи под напряжение. Сравните величины напряжений по длине передачи.
28. Настроенные электропередачи. Условия настройки. Схемы настройки. Покажите изменения коэффициентов четырехполосников от длины линии.
29. Как выполнить настройку линии на нулевую длину? Условия настройки, схемы настройки, параметры режима.
30. Как выполнить настройку линии на режим полуволны? Условия настройки, схемы настройки, параметры режима.
31. Самовозбуждение генераторов, работающих на ненагруженные линии переменного тока. Как производится оценка возможности появления самовозбуждения?
32. Рассмотрите схемы замещения и расчетные режимы для проверки статической и динамической устойчивости системы ДЭП.
33. Как выполняется синхронизация удаленной станции, связанной с

- приемной системой линией электропередачи переменного тока большой длины?
34. Опишите особые режимы дальних линий электропередач переменного тока. Какое влияние оказывают особые режимы на выбор параметров и условия работы ДЭП?
  35. В чем состоят особенности несимметричных режимов длинных линий? Приведите соотношения и схемы замещения, применяемые при расчетах несимметричных режимов.
  36. Чем определяются допустимые нагрузки генераторов и трансформаторов в несимметричных режимах?
  37. Проанализируйте причины, вызывающие перенапряжения в длинных линиях. Как оценить возможную величину внутренних перенапряжений?
  38. Рассмотрите принципы, устройства и мероприятия, позволяющие ограничить внутренние перенапряжения в системе ДЭП.
  39. Как определить несимметрию токов и напряжений в электрической системе при пофазном различии параметров линий электропередачи?
  40. Как выбирается число изоляторов в поддерживающей и натяжной гирляндах ВЛ СВН? Рассмотрите комплектацию и конструкцию поддерживающих и натяжных гирлянд изоляторов.
  41. Опишите конструкции опор и фундаментов электропередач СВН. От чего зависит область применения различных типов опор (свободностоящих и на оттяжках, металлических и железобетонных)?
  42. Как осуществляется выбор изоляции воздушных линий и ОРУ подстанций для электропередач СВН (в том числе в районах с загрязненной атмосферой)?
  43. Какими условиями определяется выбор схем подвески грозозащитных тросов на воздушных линиях СВН?
  44. Схемы и области применения электропередач постоянного тока. Поясните устройство высоковольтного тиристорного вентиля.
  45. Изобразите схему замещения одномостового преобразователя. Запишите

уравнения токов и напряжений.

46. Рассмотрите работу преобразователя в выпрямительном режиме.
47. Рассмотрите работу преобразователя в инверторном режиме.
48. Рассмотрите энергетические процессы в преобразователе. Как определить составляющие мощности на входе преобразователя?
49. Потери мощности и энергии в элементах электропередачи постоянного тока. Как они влияют на величину КПД ЭППТ?
50. Сделайте сравнение технических и экономических достоинств и недостатков электропередач постоянного тока в сравнении с передачами переменного тока.

## 2. Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Одноцепная линия электропередачи напряжением  $U$  длиной  $L$  выполнена проводами сечением  $F$ . Требуется:

- а) представить линию четырехполюсником и найти обобщенные постоянные  $A, B, C, D$  с учетом и без учета потерь;
- б) составить цепочечную схему замещения и найти ее параметры;
- в) найти параметры П-образной схемы замещения с учетом поправочных коэффициентов.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 1 по вариантам.

Таблица 1 - Варианты заданий к задаче 1.

Вариант	Напряжени е $U$ , кВ	Длина линии $L$ , км	Марка и сечение провода $F$ , мм <sup>2</sup>
1	1150	1600	8хАС-300/39
2	750	1050	5хАС-330/43
3	500	875	3хАС-500/64
4	330	412	2хАС-400/51

Задача 2. Линия электропередачи напряжением  $U$  выполнена проводами сечением  $F$  и разделена на два участка длиной  $L_1$  и  $L_2$  установкой  $n$  групп шунтирующих реакторов.

Требуется:

- а) определить параметры схемы замещения линии и выбрать мощность реакторов по условию выравнивания напряжения в режиме холостого хода.
- б) определить обобщенные постоянные  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  линии при поочередном отключении  $n$  групп реакторов.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 2 по вариантам.

Таблица 2 – Варианты заданий к задаче 2

Вариант	$U$ , кВ	$F$ , мм <sup>2</sup>	$L_1$ , км	$L_2$ , км	$n$ , шт
1	750	4хАС-400/51	530	315	3
2	1150	8хАС-300/66	565	635	4
3	500	3хАС-500/27	360	90	2
4	750	5хАС-240/32	410	570	3

Задача 3. Линия электропередачи напряжением  $U$ , выполненная проводами сечением  $F$  установкой продольной емкостной компенсации разделена на два участка длиной  $L_1$  и  $L_2$ .

Требуется:

- а) определить параметры схемы замещения линии и предельную величину мощности продольной емкостной компенсации при равенстве напряжений на концах линии;
- б) Определить обобщенные постоянные  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  линии при различной степени продольной емкостной компенсации  $K_c$ .

Исходные данные для расчета представлены в таблице 3 по вариантам.

Таблица 3 – Варианты заданий к задаче 3

Вариант	U, кВ	F, мм <sup>2</sup>	L <sub>1</sub> , км	L <sub>2</sub> , км	K <sub>c</sub>
1	500	3хАС-330/43	420	560	0,25; 0,5
2	750	5хАС-330/30	525	615	0,3; 0,6
3	500	3хАС-400/22	360	470	0,3; 0,6
4	750	4хАС-300/39	350	640	0,25; 0,6

**Задача 4.** Линия электропередачи напряжением U длиной L выполнена проводами сечением F.

Требуется:

- а) найти волновые параметры линии;
- б) определить напряжение в средней точке линии при передаче мощности  $P_{2min}$  и  $P_{2max}$ , а также определить фазу напряжения и тока в начале линии.

Линия рассматривается без потерь. В обоих случаях напряжения по концам линии равны  $U_2$ .

Исходные данные для расчета представлены в таблице 4 по вариантам.

Таблица 4 – Варианты заданий к задаче 4

Вариант	U, кВ	L, км	F, мм <sup>2</sup>	$P_{2min}/P_c$	$P_{2max}/P_c$	$U_2$ , кВ
1	750	970	5хАС-400/22	0,4	1,1	765
2	1150	1280	7хАС-400/51	0,6	1,0	1150
3	500	850	3хАС-400/51	0,5	1,3	510
4	330	430	2хАС-500/64	0,3	1,4	340

**Задача 5.** Линия электропередачи напряжением U длиной L выполнена проводами сечением F. В середину линии включены конденсаторы и реакторы со следующими параметрами:  $Z_k$ ,  $Y_p$ .

Требуется:

- а) определить волновые параметры линии;
- б) найти напряжение в середине линии (до конденсатора и за конденсатором).

Исходные данные для расчета представлены в таблице 5 по вариантам.

Таблица 5 – Варианты заданий к задаче 5

Вариант	U, кВ	F, мм <sup>2</sup>	L, км	Z <sub>к</sub> , Ом	Y <sub>р</sub> , См·10 <sup>-3</sup>
1	500	3хАС-330/43	420	70	0,9
2	750	5хАС-330/30	525	100	1,8
3	500	3хАС-400/22	360	90	1,2
4	750	4хАС-300/39	350	85	1,1

Задача 6. Линия электропередачи напряжением U длиной L и сечением F должна иметь пропускную способность  $P=P_c$ .

Требуется:

- а) определить волновые параметры линии;
- б) определить потребность в компенсирующих устройствах на линии.

Фазовый сдвиг векторов напряжений на концах линии не должен превосходить  $\delta_0$ .

Исходные данные для расчета представлены в таблице 6 по вариантам.

Таблица 6 – Варианты заданий к задаче 6

Вариант	U, кВ	F, мм <sup>2</sup>	L, км	$\delta_0$ , град.
1	500	3хАС-500/64	900	55
2	750	5хАС-500/64	1100	65
3	1150	8хАС-500/64	1250	70
4	330	2хАС~500/64	450	45

Задача 7. Участки линии длиной  $L_1$  и  $L_2$  напряжением U, выполненные проводами сечением F, работают с постоянным напряжением в начале участков  $U_1=1,05U$  при изменяющейся нагрузке  $P_1$  и  $P_1'$ .

Требуется:

- а) представить линию четырехполюсником и найти обобщенные постоянные A, B, C, D для каждого из участков;

б) определить параметры режима на приемном конце каждого участка и потери активной мощности при различных величинах реактивной мощности  $Q_1$  отправного конца.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 7 по вариантам.

Таблица 7 – Варианты заданий к задаче 7

Вариант	U, кВ	L <sub>1</sub> , км	L <sub>2</sub> , км	F, мм <sup>2</sup>	P <sub>1</sub> /P <sub>c</sub>	P <sub>1</sub> '/P <sub>c</sub>	Q <sub>1</sub> , МВАр
1	750	450	600	6хАС-240/56	0,8	1,0	700,900
2	500	505	325	3хАС-400/22	0,9	1,2	400,600
3	1150	615	705	7хАС-500/64	0,7	0,9	900,1200
4	330	265	315	2хАС-600/72	0,6	1,3	100,300

Задача 8. Линии передачи напряжением U длиной L<sub>1</sub> и L<sub>2</sub>, выполненные проводами сечением F, отходят от электростанции, на шинах высшего напряжения которой поддерживается постоянное напряжение U<sub>1</sub>=1,03U, и разомкнуты на приемных концах.

Требуется:

- а) найти волновые параметры линий;
- б) определить величину повышения напряжения, возникающего на разомкнутых концах линий, и распределение напряжения и тока вдоль линий.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 8 по вариантам.

Таблица 8 – Варианты заданий к задаче 8

Вариант	U, кВ	F, мм <sup>2</sup>	L <sub>1</sub> , км	L <sub>2</sub> , км
1	1150	10хАС-300/39	380	930
2	750	6хАС~300/39	460	815
3	500	3хАС-500/64	510	775
4	330	2хАС-500/64	305	460

Задача 9. Одноцепная линия электропередачи напряжением  $U$  длиной  $L$  выполнена проводами сечением  $F$  и подключена к шинам высшего напряжения электростанции, на которых поддерживается напряжение  $1,05U$ . В середине линии имеется установка продольной емкостной компенсации, сопротивление которой  $Z_c$ . На приемном конце линия разомкнута.

Требуется определить:

- а) волновые параметры линии;
- б) напряжение в конце электропередачи и распределение напряжения и тока вдоль линии в случае включенной и зашунтированной УПК.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 9 по вариантам.

Таблица 9 – Варианты заданий к задаче 9

Вариант	$U$ , кВ	$F$ , мм <sup>2</sup>	$L$ , км	$Z_c$ , Ом
1	750	6хАС-330/43	1070	100
2	500	3хАС-500/64	840	80
3	750	6хАС-300/66	990	120
4	500	3хАС-400/51	770	90

Задача 10. Электропередача напряжением  $U$  работает на выдачу мощности крупной конденсационной электростанции (КЭС). Воздушная линия длиной  $L$  с числом цепей  $n$  выполнена проводами с сечением  $F$ . Мощности максимального режима передачи  $P_{\max}$ , минимального режима  $P_{\min}$ , коэффициент мощности системы  $\cos\varphi=0,92$ . Перепады напряжений по концам линии составляют  $K_{\max}$ ,  $K_{\min}$  соответственно режиму.

Определить:

- а) волновые параметры электропередачи;
- б) реактивные мощности по концам передачи и напряжение в средней точке линии в указанных режимах;

в) произвести проверку допустимости загрузки генераторов КЭС реактивной мощностью и выяснить необходимость установки на приемной подстанции системы синхронных компенсаторов.

Исходные данные для расчета приведены в таблицах 10 и 11 по вариантам.

Таблица 10 – Варианты заданий к задаче 10

Вариант	Генераторы КЭС	Трансформаторы		U, кВ	n, шт.	L, км	F, мм <sup>2</sup>
		на КЭС	АТ связи				
1	4хТГВ-500	2хОРЦ(3х417)	2х(3х417)	750	1	1040	6хАС-330/43
2	8хТГВ-500	4хОРЦ(3х417)	4х(3х417)	750	2	980	5хАС-400/51
3	4хТГВ-300	4хТДЦ-400	2х(3х267)	500	1	790	3хАС-500/64
4	8хТГВ-300	8хТДЦ-400	3х(3х267)	500	2	830	3хАС-400/51

Таблица 11 – Варианты заданий к задаче 10 (продолжение)

Вариант	$P_{max}$ , МВт	$P_{min}$ , МВт	$K_{umax}$	$K_{umin}$
1	2000	1200	1,05	0,99
2	4000	3000	1,03	1,01
3	1200	600	1,04	1,0
4	2400	1400	1,02	0,98

## 11. Перечень программных продуктов, используемых при изучении курса

1. MathCAD
2. RASTR WIN
3. СДО-6

## 12. Методические указания по применению современных информационных технологий для преподавания учебной дисциплины.

1. Презентации, слайды;

2. Схемы, таблицы, рисунки под медиапроектор;
3. Лазерные пленки к проектоскопу.

### **13. Методические указания профессорско-преподавательскому составу по организации межсессионного и экзаменационного контроля знаний студентов (материалы по контролю качества образования)**

В процессе изучения дисциплины предусмотрены следующие виды промежуточного контроля знаний студентов:

- пятиминутный опрос студентов на каждой лекции;
- студенты, не посещающие лекционные и практические занятия, представляют рефераты по пропущенным темам.

К промежуточным формам контроля знаний относятся:

- блиц-опрос на лекциях по пройденному материалу;
- контрольные работы;
- выполнение рефератов с последующей их защитой;
- выступление с докладом.

### 14. Комплекты заданий для курсового проекта по дисциплине

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$P_{\text{max}}, \text{МВт}$	$\ell, \text{км}$	$T_{\text{max}}, \text{час}$	$S_{\text{кз1}}, \text{ГВА}$	$S_{\text{кз2}}, \text{ГВА}$	$K_0,$ т.руб/км	$\nu_F,$ т.руб/км·мм <sup>2</sup>	$\nu_{\text{пр}},$ т.руб/км·см	Район	Ф.И.О. студента
330	400	400	4800	3	8	30	0,005	4	Европа	
500	600	600	5200	5	10	35	0,008	1,5	Казахстан	
750	800	800	5700	8	12	60	0,003	4,5	Сибирь	
1150	1800	1000	6000	12	18	110	0,003	4,5	Д. Восток	
330	600	300	5300	5	10	28	0,006	3	Д. Восток	
500	800	500	4700	4,5	8	37	0,01	1,2	Сибирь	
750	1000	600	5000	9	15	62	0,005	4,2	Европа	
1150	1600	900	5500	10	16	120	0,005	4	Сибирь	
330	500	500	5400	4	9	29	0,007	2,5	Казахстан	
500	400	800	4500	6	11	38	0,012	1,0	Д. Восток	
750	1200	550	5200	9	14	64	0,007	3,5	Д. Восток	
1150	2000	1200	5700	18	12	130	0,009	2,5	Казахстан	
330	350	500	4400	7	4,5	32	0,01	2	Сибирь	
500	1000	450	5100	11	6,5	40	0,014	0,8	Европа	
750	1400	700	5300	22	13	65	0,009	2,6	Казахстан	
1150	2400	1500	5800	25	15	125	0,008	2,8	Европа	
330	550	300	4900	8	3	29	0,008	2,3	Европа	
500	900	550	5300	10	5	40	0,013	0,9	Сибирь	
750	700	1000	5900	12	8	61	0,004	4,3	Казахстан	
1150	2800	1000	6200	16	24	128	0,007	2,9	Д. Восток	
330	420	750	6500	14	21	28,5	0,006	3,8	Д. Восток	
500	1000	600	6600	12	9	36	0,011	1,0	Казахстан	
750	1400	650	6400	13	19	61	0,007	2,8	Сибирь	
1150	2600	1100	6300	28	18	115	0,006	4,1	Европа	
330	300	700	6200	9	5	29,5	0,009	2,1	Казахстан	
500	800	1000	6100	11	6	37,5	0,011	1,2	Сибирь	
750	1500	900	6000	17	10	61,5	0,008	2,6	Европа	
1150	2500	900	5900	27	19	112	0,007	3,0	Д. Восток	
330	450	600	5800	9,5	7	30	0,008	3,5	Казахстан	
500	1200	500	5700	11	18	39,5	0,01	1,1	Европа	
750	1800	600	5600	20	15	62,5	0,004	4,0	Д. Восток	
1150	1900	1400	5500	16	21	123	0,008	2,2	Казахстан	

## 15. Фонд тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний по дисциплине

1. Сколько проводов в фазе ЛЭП-330 кВ?

- а) один
- б) два
- в) три

2. Сколько проводов в фазе ЛЭП-500 кВ?

- а) один
- б) два
- в) три

3. Сколько проводов в фазе ЛЭП-750 кВ?

- а) два-три
- б) четыре-пять
- в) шесть и более

4. Какая из схем выполнения ЛЭП СВН обладает большей надежностью?

- а) блочная
- б) связанная

5. По какому выражению определяется волновое сопротивление ЛЭП?

- а)  $\sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}}$
- б)  $\sqrt{Z_0 Y_0}$
- в)  $\frac{U^2}{Z_c}$

6. По какому выражению определяется коэффициент распространения волны по ЛЭП?

- а)  $\sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}}$
- б)  $\sqrt{Z_0 Y_0}$
- в)  $\frac{U^2}{Z_c}$

7. По какому выражению определяется натуральная мощность ЛЭП?

а)  $\sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}}$

б)  $\sqrt{Z_0 Y_0}$

в)  $\frac{U^2}{Z_c}$

8. Как изменится зарядная мощность ЛЭП с увеличением радиуса расщепления фазы?

- а) увеличится
- б) уменьшится
- в) не изменится

9. Как изменится зарядная мощность ЛЭП с увеличением расстояния между проводами расщепленной фазы?

- а) увеличится
- б) уменьшится
- в) не изменится

10. Как изменится зарядная мощность ЛЭП с увеличением расстояния между фазами?

- а) увеличится
- б) уменьшится
- в) не изменится

11. Как изменится индуктивность ЛЭП с увеличением расстояния между фазами?

- а) увеличится
- б) уменьшится
- в) не изменится

12. Как изменится индуктивность ЛЭП с увеличением расстояния между проводами расщепленной фазы?

- а) увеличится
- б) уменьшится
- в) не изменится

13. Как изменится индуктивность ЛЭП с увеличением радиуса расщепления фазы?
- а) увеличится
  - б) уменьшится
  - в) не изменится
14. Увеличение передачи активной мощности по ЛЭП приводит к:
- а) увеличению напряжения на приемном конце
  - б) уменьшению напряжения на приемном конце
  - в) напряжение на приемном конце не изменится
15. Предел передаваемой мощности больше
- а) у линии четвертьволновой длины
  - б) у линии полуволновой длины
  - в) у линии волновой длины
16. Реактивная мощность в направлении протекания вызывает
- а) снижение напряжения
  - б) увеличение напряжения
  - в) напряжение не меняется
17. Реактивная мощность в направлении протекания вызывает
- а) снижение тока
  - б) увеличение тока
  - в) ток не меняется
18. Каким соотношением выработки ( $Q_c$ ) и потребления ( $Q_l$ ) реактивной мощности ЛЭП характеризуется режим передачи активной мощности больше натуральной?
- а)  $Q_c > Q_l$
  - б)  $Q_c < Q_l$
  - в)  $Q_c = Q_l$
19. Каким соотношением выработки ( $Q_c$ ) и потребления ( $Q_l$ ) реактивной мощности ЛЭП характеризуется режим передачи активной мощности меньше натуральной?

- а)  $Q_c > Q_1$
- б)  $Q_c < Q_1$
- в)  $Q_c = Q_1$

20. Каким соотношением выработки ( $Q_c$ ) и потребления ( $Q_1$ ) реактивной мощности ЛЭП характеризуется режим передачи активной мощности, равной натуральной?

- а)  $Q_c > Q_1$
- б)  $Q_c < Q_1$
- в)  $Q_c = Q_1$

21. Идеальная линия отличается от реальной:

- а) неучетом реактивных элементов схемы замещения
- б) неучетом активных элементов схемы замещения
- в) активная передаваемая мощность принимается равной натуральной

22. При одинаковом напряжении по концам ЛЭП в режиме передачи мощности меньше натуральной в середине линии наблюдается

- а) понижение напряжения
- б) повышение напряжения
- в) примерное равенство напряжения его уровню по концам

23. При одинаковом напряжении по концам ЛЭП в режиме передачи мощности больше натуральной в середине линии наблюдается

- а) понижение напряжения
- б) повышение напряжения
- в) примерное равенство напряжения его уровню по концам

24. При одинаковом напряжении по концам ЛЭП в режиме передачи мощности равной натуральной в середине линии наблюдается

- а) понижение напряжения
- б) повышение напряжения
- в) примерное равенство напряжения его уровню по концам

25. Какой из параметров четырехполюсника равен продольному сопротивлению П-образной схемы замещения ЛЭП?

- а) А

- б) В
- в) С
- г) D

26. Какой из агрегатов является только потребителем реактивной мощности?

- а) синхронный компенсатор
- б) статический тиристорный компенсатор
- в) шунтирующий реактор

27. Какой из агрегатов является только источником реактивной мощности?

- а) синхронный компенсатор
- б) статический тиристорный компенсатор
- в) батарея конденсаторов

28. При планировании какого режима необходима проверка напряжения в промежуточных точках наиболее протяженного участка дальней ЛЭП?

- а) режима наибольших нагрузок
- б) режима наименьших нагрузок

29. Снижение напряжения по концам электропередачи необходимо для

- а) режима наибольших нагрузок
- б) режима наименьших нагрузок

30. Для режима холостого хода идеальной линии напряжение на включенном конце передачи  $U_1$  равно

- а)  $U_2 \cos \lambda$
- б)  $U_2 / \cos \lambda$
- в)  $U_2$

31. Чем характеризуется компенсация линии?

- а) уменьшением волнового сопротивления ЛЭП
- б) изменением волновой длины ЛЭП
- в) изменением напряжения по концам ЛЭП

32. Чем характеризуется настройка линии?

- а) уменьшением волнового сопротивления ЛЭП
- б) изменением волновой длины ЛЭП

в) изменением напряжения по концам ЛЭП

33. Подключение к ЛЭП шунтирующих реакторов

а) увеличивает предел передаваемой мощности ЛЭП

б) уменьшает предел передаваемой мощности ЛЭП

в) не изменяет предел передаваемой мощности ЛЭП

34. Включение на ЛЭП установок продольной компенсации

а) увеличивает предел передаваемой мощности ЛЭП

б) уменьшает предел передаваемой мощности ЛЭП

в) не изменяет предел передаваемой мощности ЛЭП

35. Волновая длина ЛЭП измеряется в

а) километрах

б) секундах

в) градусах или радианах

36. По какому выражению определяется предел передаваемой мощности дальней ЛЭП?

а)  $\frac{U^2}{Z_c \sin \lambda}$

б)  $\frac{U^2}{Z_c}$

37. По какому выражению определяется натуральная мощность дальней ЛЭП?

а)  $\frac{U^2}{Z_c \sin \lambda}$

б)  $\frac{U^2}{Z_c}$

38. При одинаковых параметрах электропередачи (длина, марка провода) предел передаваемой мощности

а) больше у линии переменного тока

б) больше у линии постоянного тока

в) одинаков

39. В мостовой схеме Ларионова в качестве вентиля применяются

а) диоды

- б) тиристоры
- в) транзисторы

40. Устойчивость энергосистем, соединенных передачей постоянного тока

- а) повышается
- б) понижается
- в) такая же, как с линией связи переменного тока

41. Соединение энергосистем передачей постоянного тока приводит к

- а) возрастанию мощности КЗ в связываемых системах
- б) ограничению мощности КЗ в связываемых системах
- в) снижению мощности КЗ в связываемых системах

42. Какая часть капиталовложений больше у электропередач постоянного тока по сравнению с электропередачами переменного тока?

- а) капиталовложения в ЛЭП
- б) капиталовложения в подстанции

43. Компактная ЛЭП отличается от обычной

- а) меньшей длиной
- б) меньшим сечением проводов
- в) меньшим расстоянием между фазами

44. Укажите неверный вариант ответа на вопрос «Что позволяют осуществить в системе гибкие линии?»

- а) повысить устойчивость системы
- б) снизить уровень токов КЗ
- в) повысить пропускную способность существующих ЛЭП

45. Один из путей осуществления управления передаваемой по линии мощностью заключается в

- а) изменении активного сопротивления линии
- б) изменении геометрических размеров линии
- в) изменении реактивного сопротивления линии

**16. Комплекты экзаменационных билетов для каждого из предусмотренных экзаменов по дисциплине и контрольные вопросы к зачету.**

1. Особенности проектирования дальних ЛЭП СВН и их применение для объединения энергосистем.
2. Преимущества объединения энергосистем с помощью дальних ЛЭП СВН.
3. Схемы выполнения электропередач СВН
4. Габариты линий СВН и факторы, их определяющие.
5. Влияние конструкции фазы на удельные электрические параметры линии и ее пропускную способность.
6. Воздействие ЛЭП СВН на окружающую среду.
7. Учет распределенности параметров ЛЭП и волнового процесса передачи энергии.
8. Уравнение длинной линии.
9. Понятие идеальной линии.
10. Зависимость предела передаваемой мощности линии от ее длины.
11. Влияние индуктивности и емкости линии на напряжение и ток.
12. Понятие натуральной мощности.
13. Распределение напряжения и тока в линии при передаче по ней мощности меньше и больше натуральной.
14. Соотношения между параметрами режима ДЭП.
15. Круговые диаграммы мощностей начала и конца линии.
16. Определение КПД линии и электропередачи.
17. Реактивные мощности концов линии при разных нагрузках, методы их компенсации.
18. Действие индуктивности и емкости линии на напряжение и ток.
19. Изменение напряжения и тока в ДЭП.
20. Процессы в дальних ЛЭП при одинаковом напряжении по её концам.
21. Схемы замещения ДЭП.
22. Представление ДЭП четырехполюсниками.

23. Представление ДЭП П-образными схемами замещения.
24. Связь между параметрами различных схем замещения ДЭП.
25. Характеристики П-образной схемы замещения ДЭП.
26. Поправочные коэффициенты и их определение.
27. Учет элементов с сосредоточенными параметрами.
28. Задачи расчетов режимов ДЭП и способы задания исходной информации.
29. Задачи расчета режима наибольших нагрузок.
30. Задачи расчета режима минимальных нагрузок.
31. Определение особых режимов.
32. Установившиеся режимы холостого хода.
33. Самовозбуждение генераторов в режиме одностороннего включения протяженной ЛЭП
34. Несимметричные режимы работы электропередач.
35. Методы увеличения пропускной способности ДЭП.
36. Промежуточные синхронные компенсаторы, выбор их мощности и места установки.
37. Продольная емкостная компенсация, конструкция УПК.
38. Особенности передачи энергии по линиям постоянного тока.
39. Схема замещения ЛЭП постоянного тока.
40. Схема трехфазного вентильного моста Ларионова.
41. Униполярные и биполярные ДЭП постоянного тока.
42. Уравнения токов и напряжений для ДЭП постоянного тока.
43. Режимы малых токов, рабочих токов и перегрузки ДЭП постоянного тока.
44. Внешние характеристики выпрямителя.
45. Режимы работы выпрямителя.
46. Принцип действия и эквивалентная схема инвертора.
47. Характеристики режима инвертора.
48. Внешние характеристики одномостового инвертора.
49. Совместная работа выпрямителя и инвертора.

50. Энергетические процессы в преобразователе.
51. Преимущества передачи энергии по ЛЭП постоянного тока.
52. Компактные линии, их конструкция.
53. Удельные параметры и пропускная способность компактных линий.
54. Управляемые линии переменного тока. Методы введения управляющих воздействий в линию, характеристики таких линий.

На основе вопросов, представленных в данном пункте составляются экзаменационные билеты.

**17. Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско-преподавательского состава.**

Вид учебной нагрузки	ППС
Лекции	Степанов А.С., доц., доктор. техн. наук
Практические занятия	Степанов А.С.
Лабораторные занятия	Ильченко Т.Ю., ассистент
Курсовой проект	Степанов А.С.
Экзамен	Степанов А.С.