

Центр подготовки кадров энергетики

Г.Н.Александров

**Режимы работы воздушных линий  
электропередачи**

Учебное пособие

Санкт-Петербург  
2006

**УДК621.315.1.004.13(075.9)**

**А-465**

**Александров Г.Н.** Режимы работы воздушных линий электропередачи. Второе издание Центра подготовки кадров энергетики, 2006 г.

Настоящее учебное пособие предназначено для специалистов в области проектирования линий электропередачи и электроэнергетических систем, управления режимами их работы, диспетчерских служб энергосистем.

Научный редактор д.т.н., проф. Меркурьев Г.В.

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	4
<b>Глава 1. Режимы работы проводов воздушных линий</b> .....	6
1.1. Конструкция проводов и параметры воздушных линий .....	6
1.2. Условия работы проводов линий электропередачи .....	20
1.3. Длительно допустимые токовые нагрузки на провода .....	32
<b>Глава 2. Режимы работы линий электропередачи</b> .....	35
2.1. Пропускная способность линий электропередачи .....	35
2.2. Режимы напряжения на линиях высокого напряжения .....	37
2.3. Режимы напряжения на длинных линиях .....	45
2.4. Передача электроэнергии по линиям с шунтирующими реакторами .....	55
2.5. Пропускная способность электропередач, обусловленная ограничением перепада напряжения вдоль линии .....	62
2.6. Передача электрической энергии по линиям с управляемыми реакторами .....	67
2.7. Передача электрической энергии по линиям с управляемыми реакторами при перепаде напряжений, меньше естественного .....	74
2.8. Режим работы линий при передаче мощности сверх натуральной .....	77
2.9. Неполнофазные режимы работы линий электропередачи .....	82
2.10. Учет системного фактора при анализе режима напряжений на линиях электропередачи .....	99
<b>Глава 3. Искусственные способы повышения пропускной способности линий электропередачи</b> .....	117
3.1. Общие соображения .....	117
3.2. Увеличение пропускной способности линий за счет источников реактивной мощности на потребляющем конце линии .....	119
3.3. Продольная емкостная компенсация индуктивного сопротивления линий .....	124
3.4. Повышение пропускной способности линий путем настройки на полуволновый режим .....	133
<b>Литература</b> .....	138

## **Введение**

Объединенная электроэнергетическая система России раскинулась на тысячи километров в длину и ширину. Она содержит несколько сотен тысяч километров воздушных линий 35, 110 и 220 кВ, несколько десятков тысяч километров воздушных линий 330 и 500 кВ, несколько тысяч километров линий 750 и 1150 кВ, а также множество генерирующих и нагрузочных узлов. Вся эта система работает с одинаковой частотой и обеспечивает электроэнергией миллионы потребителей. При этом чрезвычайно важным является обеспечение высокого качества электроснабжения, под которым подразумевается прежде всего стабильность напряжения в системе электроснабжения, а также его надежность. Надежность электроснабжения в значительной степени зависит от надежности работы проводов линий электропередачи, правильного их выбора. Поэтому первая глава настоящего учебного пособия посвящена проблеме выбора проводов воздушных линий в соответствии с условиями их эксплуатации.

Качество напряжения в электроэнергетической системе зависит от многих противоречивых обстоятельств. Потребление мощности непостоянно, но имеет ярко выраженные максимумы и минимумы, как в годовом, так и в суточном диапазонах времени. В соответствии с этим изменяется режим генерации мощности и передачи ее по линиям. Линии электропередачи являются сложными электромагнитными системами, которые не только передают активную мощность, но и сами генерируют или потребляют реактивную мощность в зависимости от режима передачи. При передаче натуральной мощности по линии ее электромагнитное поле полностью скомпенсировано: линия не генерирует и не потребляет реактивную мощность. При передаче мощности меньше натуральной линия генерирует избыточную реактивную мощность. Максимальная генерация реактивной мощности соответствует режиму холостого хода линии, когда ее электрическое поле не скомпенсировано магнитным полем. По мере роста нагрузки (передаваемой по линии мощности) ток в линии увеличивается и соответственно увеличивается мощность магнитного поля, компенсирующего часть электрического поля линии. При передаче натуральной мощности по линии мощность ее электрического и магнитного полей одинакова, что обеспечивает взаимную их компенсацию. При передаче мощности сверх натуральной

мощность магнитного поля линии превышает мощность ее электрического поля и линия становится потребителем реактивной мощности аналогично реактору. И чем больше отношение передаваемой мощности к натуральной, тем большую реактивную мощность поглощает линия.

Эта особенность линий электропередачи чрезвычайно усложняет управление электроэнергетическими системами. Дело в том, что генерируемая линиями реактивная мощность должна быть поглощена в энергосистеме (генераторами, реакторами), а потребляемая линиями реактивная мощность должна быть возмещена энергосистемой. Устройства потребления и генерации реактивной мощности расположены в отдельных узлах, что определяет протекание к ним реактивного тока по линиям, вызывая колебания напряжения в электрической сети, выходящие за пределы допусков по качеству напряжения. В режимах малых нагрузок (емкостный характер реактивных токов) напряжение в энергосистеме повышается. В режимах максимальных нагрузок (индуктивный характер реактивных токов) напряжение понижается. Задачей проектирования и эксплуатации является минимизация этих колебаний напряжения. В настоящее время проблема стабилизации напряжения весьма остра во всем мире, особенно в странах с протяженными территориями, когда длина участков линий между соседними узлами превышает 300 км.

В настоящем пособии детально рассмотрена проблема стабилизации напряжения в электрических сетях, приведены расчетные соотношения, позволяющие произвести оценки колебаний напряжения во всех возможных случаях эксплуатации линий электропередачи. Эта проблема рассмотрена в связи с проблемой повышения пропускной способности электропередач. Рассмотрены также искусственные способы повышения пропускной способности линий электропередач.

Рассмотрена возможность передачи энергии по линиям при отключении одной или двух фаз.

Автор будет благодарен за замечания и предложения по совершенствованию материала книги.

## Глава 1. Режимы работы проводов воздушных линий

### 1.1. Конструкция проводов и параметры воздушных линий

Обычно на линиях высокого напряжения вплоть до класса 220 кВ применяются одиночные провода с активным сечением до 400 мм. На линиях 330 кВ и выше применяются расщепленные провода – несколько проводов в фазе с активным сечением до 600 мм. Однако, в настоящее время в разных странах эксплуатируются линии с расщепленными проводами 110 кВ (Финляндия) и 220 кВ (Россия, Китай, Бразилия). Нет сомнения, что в ближайшее время линии 69 – 220 кВ с расщепленными проводами появятся и в других странах. В связи с этим одиночные провода будем рассматривать как частный случай расщепленных проводов. Два параллельных провода в фазе (двойной расщепленный провод) подвешивают как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Три провода и более подвешивают как правило в вершинах соответствующего правильного многоугольника (треугольника, четырехугольника и т.д.). В ряде случаев три и четыре провода в фазе подвешены в горизонтальной (Китай, Бразилия) и вертикальной (Россия) плоскостях на линиях повышенной пропускной способности. Но такие конструкции приводят, как правило, к увеличению размеров фаз и опор и не имеют никаких преимуществ по пропускной способности по сравнению с расположением проводов по окружности, тогда как при расположении проводов по окружности достигается минимальный размер фаз и минимальные габариты опор. Поэтому в настоящей главе будут рассмотрены только конструкции расщепленных проводов, расположенных по окружности (в вершинах правильных многоугольников). В этом случае универсальными параметрами проводов являются:

$r_0$  – радиус описанной окружности каждого провода;

$r_p$  – радиус окружности, проведенной через оси всех составляющих проводов в фазе – радиус расщепления (см.рис.1.1);

$n$  – количество проводов в фазе.

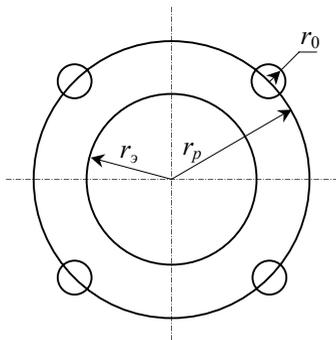


Рис. 1.1. Схема расположения проводов фазы

Все электрические параметры линий с расщепленными проводами могут быть вычислены по обычным формулам для линий с одиночными проводами при замене реального расщепленного провода эквивалентным одиночным с радиусом [1]

$$r_{\text{э}} = r_p \cdot \sqrt[n]{\frac{nr_0}{r_p}} = \sqrt[n]{nr_0 r_p^{n-1}}. \quad (1.1)$$

В случае одиночного провода ( $n = 1$ ) эквивалентный радиус равен радиусу провода  $r = r_0$ . При увеличении количества проводов в фазе эквивалентный радиус увеличивается, приближаясь к радиусу расщепления  $r_{\text{э}} \rightarrow r_p$ .

При равномерном расположении проводов на окружности (в вершинах правильного многоугольника) расстояние между осями соседних проводов в фазе (см.рис.1.1) определяется соотношением

$$d = 2r_p \cdot \sin \frac{\pi}{n}. \quad (1.2)$$

Исходя из механических характеристик проводов в расщепленной фазе (необходимость ограничения вибрации проводов), расстояние между соседними проводами в фазе ограничивается снизу:  $d \geq 30 r_0$ . Принимая это ограничение за основу конструирования расщепленных проводов с учетом возможности применения проводов с сечением от 200 до 600 мм<sup>2</sup> ( $1,0 \leq r_0 \leq 1,8$  см), получаем минимальное расстояние между проводами  $d = 30 \div 54$  см. На эксплуатируемых линиях электропередачи это расстояние варьируется от 30 до 60 см. При ограничении диапазона

изменения сечения проводов от 300 до 400 мм<sup>2</sup> (характерном для России) с радиусом  $1,2 \leq r_0 \leq 1,36$  см минимальное расстояние между проводами в фазе должно изменяться в пределах  $36 \leq d \leq 41$  см. Поэтому обычно принимается в качестве минимального расстояние  $d = 40$  см.

Используя это ограничение на  $d$ , получаем согласно (1.2)

$$r_{p.min} = \frac{15r_0}{\sin \frac{\pi}{n}},$$

(1.3)

$$r_{p.min} = \frac{20}{\sin \frac{\pi}{n}}. \quad (1.4)$$

Отсюда следует, что при увеличении количества проводов в фазе минимальный радиус расщепления проводов возрастает достигая 1м при  $n = 16$ .

$n$	2	3	4	5	6	8	10	12	16
$r_{p.min}$ , м	0,2	0,23	0,283	0,34	0,40	0,523	0,65	0,77	1,0

Сверху радиус расщепления ограничивается требованием ограничения коронного разряда: потерь на корону и радиопомех. Действительно, максимальная напряженность поля на поверхности проводов определяется соотношением

$$E_{max} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 \cdot n \cdot r_0} \cdot \left[ 1 + (n-1) \cdot \frac{r}{r_p} \right] = \frac{C \cdot U_\phi}{2\pi\epsilon_0 \cdot n \cdot r_0} \cdot \left[ 1 + (n-1) \cdot \frac{r}{r_p} \right]. \quad (1.5)$$

При расположении всех трех фаз линии на одинаковом расстоянии от земли (см.рис. 1.2) максимальная емкость соответствует средней фазе и приближенно равна

$$C_{max} = 1,2 \cdot 2\pi\epsilon_0 \cdot \left( \frac{1}{\ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot D}{r_s}} - 0,018 \right), \quad (1.6)$$

где  $D$  – расстояние между осями симметрии проводов соседних фаз.

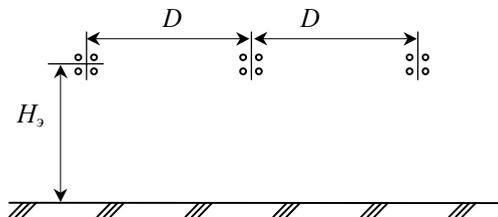


Рис. 1.2. Схема расположения проводов линии в пролете

Подставляя это выражение в формулу (1.5), получаем уравнение для определения допустимого значения  $r_p$

$$\frac{1,2U_\phi}{nr_0} \cdot \left( \frac{1}{\ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot D}{r_3}} - 0,018 \right) \cdot \left[ 1 + (n-1) \cdot \frac{r_0}{r_p} \right] = E_{\text{доп}}, \quad (1.7)$$

где  $E_{\text{доп}}$  – допустимая максимальная напряженность на поверхности проводов по условию ограничения потерь на корону и радиопомех.

С учетом (1.1), получаем

$$r_{p,\text{доп}} = D \cdot \left\{ \sqrt[3]{2} \cdot n \sqrt{\frac{D}{nr_0}} \cdot \exp \left\{ \frac{1}{\frac{E_{\text{доп}} \cdot nr_0}{1,2U_\phi \cdot \left[ 1 + (n-1) \cdot \frac{r_0}{r_p} \right]} + 0,018}} \right\} \right\}^{n/n-1}. \quad (1.8)$$

При треугольном расположении проводов (см.рис. 1.3), обеспечивающем равенство электрических параметров всех фаз (см. ниже), рабочая емкость фазы равна ( $\Delta H = H_{3,2} - H_{3,1}$ )

$$C_{TP} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot D}{r_3} \cdot \sqrt[6]{1 - \left( \frac{\Delta H}{D} \right)^2}}, \quad (1.9)$$

и уравнение для определения предельного радиуса расщепления имеет вид

$$\frac{U_{\phi}}{nr_0 \cdot \ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot D}{r_3} \cdot \sqrt[6]{1 - \left(\frac{\Delta H}{D}\right)^2}} \cdot \left[1 + (n-1) \cdot \frac{r_0}{r_p}\right] = E_{oon}, \quad (1.10)$$

откуда с учетом (1.1)

$$r_{p,oon} = D \cdot \left[ \sqrt[3]{2} \cdot \sqrt[n]{\frac{D}{nr_0}} \cdot \sqrt[6]{1 - \left(\frac{\Delta H}{D}\right)^2} \cdot \exp \left\{ \frac{U_{\phi} \cdot \left[1 + (n-1) \cdot \frac{r_0}{r_p}\right]}{nr_0 \cdot E_{oon}} \right\} \right]^{n/n-1}. \quad (1.11)$$

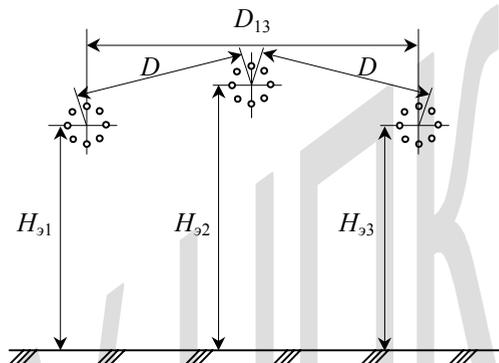


Рис. 1.3. Схема расположения проводов линии при подъеме средней фазы

Допустимая напряженность поля по условию ограничения потерь на корону определяется формулой [1, 2]

$$E_{oon} = 12,5\delta \cdot \left(1 + \frac{0,62}{r_0^{0,38} \cdot \delta^{0,3}}\right), \text{ кВ/см.} \quad (1.12)$$

Допустимая напряженность по условию ограничения радиопомех определяется другой формулой [2]

$$E_{oon,рад} = 22,7 - 12,3 \lg r_0, \text{ кВ/см.} \quad (1.13)$$

Как видно из формул (1.8), (1.11), в обоих случаях допустимый радиус расщепления по условию ограничения коронного разряда примерно пропорционален расстоянию между осями соседних фаз, уменьшается при

увеличении напряжения и увеличивается при увеличении количества проводов в фазе. Поскольку в обеих формулах для  $r_{p,доп}$  радиус расщепления присутствует в показателе степени при экспоненте, решение получается методом последовательных приближений.

Формулы (1.7), (1.10) позволяют определить связь между количеством проводов в фазе и минимальным междуфазовым расстоянием, получаемую в результате приравнивания  $r_{p,доп}$  минимальному радиусу расщепления согласно (1.3), (1.4):

при одинаковом расстоянии всех фаз до земли

$$D_{мин} = \frac{r_0 \cdot \sqrt[n]{n} \cdot 15^{n/n-1}}{\sqrt[3]{2} \cdot \left(\sin \frac{\pi}{n}\right)^{n/n-1}} \cdot \exp \left\{ \frac{1}{\frac{E_{доп} \cdot nr_0}{1,2U_\phi \cdot \left[1 + (n-1) \cdot \frac{r_0}{r_p}\right]} + 0,018}} \right\} \quad (1.14)$$

и при треугольном расположении проводов

$$D_{мин} = \frac{r_0 \cdot \sqrt[n]{n} \cdot 15^{n/n-1}}{\sqrt[3]{2} \cdot \left(\sin \frac{\pi}{n}\right)^{n/n-1}} \cdot \frac{1}{\sqrt[6]{1 - \left(\frac{\Delta H}{D_{мин}}\right)^2}} \exp \frac{U_\phi \cdot \left[1 + \frac{n-1}{15} \cdot \sin \frac{\pi}{n}\right]}{E_{доп} \cdot nr_0} \quad (1.15)$$

В последних формулах число проводов в фазе входит в правую и левую части, что определяет необходимость их решения методом итераций. Минимальное число проводов в фазе сечением 300 мм<sup>2</sup>, соответствующее минимальному радиусу расщепления, возрастает при увеличении класса напряжения и при минимально допустимых междуфазовых расстояниях соответственно равно (см. табл. 1.1).

Таблица 1.1

$U_{ном},$ кВ	110	220	330	500	750	1150
$D_{мин},$ м	3	4	6	8	12	15
$n_{мин}$	1	2	3	4	5	10

При обычно применяемых в России конструкциях опор междуфазовые расстояния больше и соответственно минимальное число проводов в фазе меньше (см.табл.1.2).

Таблица 1.2

$U_{ном}$ , кВ	110	220	330	500	750	1150
$D_{мин}$ , м	4,5	7	9	12	16	23
$n_{мин}$	1	1	2	3	4	8
$Z_{макс}$ , Ом	400	400	300	280	268	250

Количество проводов в фазе и соответствующий радиус расщепления определяют электрические параметры линии: среднюю рабочую емкость при равенстве расстояний всех фаз до земли

$$C = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot D}{r_s} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{\left[1 + \left(\frac{D}{2H_s}\right)^2\right]} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{D}{H_s}\right)^2}}} \quad (1.16)$$

и при треугольном расположении проводов согласно формуле (1.9); рабочую индуктивность:

при равенстве расстояний всех фаз до земли

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot D}{r_s} + \frac{\mu}{4\mu_0 \cdot n} \right) \quad (1.17)$$

и при треугольном расположении проводов

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot D}{r_s} \cdot \sqrt[6]{1 - \left(\frac{\Delta H}{D}\right)^2} + \frac{\mu}{4\mu_0 \cdot n} \right).$$

(1.18)

Волновое сопротивление линии:

при равенстве расстояний всех фаз до земли

$$Z = 60 \cdot \sqrt{\ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot D}{r_s} \cdot \ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot D}{r_s \cdot \sqrt[3]{\left[1 + \left(\frac{D}{2H_s}\right)^2\right]} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{D}{H_s}\right)^2}}} \quad (1.19)$$

и при треугольном расположении проводов

$$Z = 60 \ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot D}{r_s} \cdot \sqrt[6]{1 - \left(\frac{\Delta H}{D}\right)^2}. \quad (1.20)$$

Подставляя в последнюю формулу выражение (1.1) для эквивалентного радиуса с учетом (1.3) для минимального радиуса расщепления, получаем

$$Z = 60 \ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot D \cdot \sin \frac{\pi}{n}}{15r_0 \cdot \sqrt[6]{0,067n \cdot \sin \frac{\pi}{n}}} \cdot \sqrt[6]{1 - \left(\frac{\Delta H}{D}\right)^2}. \quad (1.21)$$

Подставляя в эту формулу значения  $D$  и  $n$  из табл. 1.2 при  $r_0 = 1,2$  см, получаем соответствующие значения максимальных волновых сопротивлений линий разных классов напряжения, приведенные также в табл.1.2. Как видно, при переходе от одиночного к расщепленным проводам наблюдается резкое уменьшение волнового сопротивления линии, а дальше изменение волнового сопротивления при увеличении класса напряжения незначительно, несмотря на значительное увеличение числа проводов в фазе.

Различие емкостей фаз определяется в основном различием среднегеометрических расстояний от каждой из фаз до двух соседних. Для средней фазы среднегеометрическое расстояние до соседних фаз минимально и равно междуфазовому расстоянию. Поэтому рабочая емкость средней фазы максимальна. Для обеих крайних фаз среднегеометрическое расстояние до соседних фаз в 2 раз больше, что определяет уменьшение рабочих емкостей этих фаз по сравнению со средней фазой.

Изменить это соотношение величин рабочих емкостей фаз можно только изменив взаимное расположение фаз либо относительные размеры фаз. Так можно увеличить размеры крайних фаз по сравнению с размерами средней фазы и тем самым компенсировать различие среднегеометрических расстояний до соседних фаз. Другой вариант позволяет при одинаковых размерах всех фаз уменьшить емкость средней фазы относительно крайних, увеличив ее расстояние до земли – поднять среднюю фазу относительно крайних на определенную высоту. Тогда более сильная электростатическая связь средней фазы с двумя крайними будет

компенсирована уменьшением ее электростатической связи с землей. Кроме того, при увеличении расстояния до земли средней фазы можно сократить расстояние между крайними фазами, не уменьшая междуфазового расстояния (рис. 1.3), что приводит к уменьшению различия среднегеометрических расстояний до средних фаз.

В общем виде задача отыскания оптимального расположения фаз либо оптимального соотношения размеров фаз может быть решена приравниванием емкостей трех фаз линии. Применительно к схеме рис. 1.3 решение получено в форме соотношения эквивалентных радиусов средней и крайних фаз

$$\frac{r_{\text{э}2}}{r_{\text{э}1}} = \frac{2H_{\text{э}1}}{r_{\text{э}1}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta H}{H_{\text{э}1}}\right) \cdot \exp \left[ - \frac{\ln \left( \frac{2H_{\text{э}1}}{r_{\text{э}1} \cdot B} \right) \cdot \ln \left( \frac{2H_{\text{э}1}}{r_{\text{э}1}} \cdot B \sqrt{A} \right) + 1,5 \cdot (\ln A)^2}{\ln \left( \frac{2H_{\text{э}1}}{r_{\text{э}1}} \cdot \sqrt{B} \right)} \right], \quad (1.22)$$

где

$$A = \sqrt{1 + \left( \frac{2H_{\text{э}1}}{D} \right)^2} \cdot \left(1 + \frac{\Delta H}{H_{\text{э}1}}\right),$$

$$B = \sqrt{1 + \frac{1}{\left( \frac{D}{H_{\text{э}1}} \right)^2 - \left( \frac{\Delta H}{H_{\text{э}1}} \right)^2}}, \quad (1.23)$$

$$H_{\text{э}1} = H_{1,\text{мин}} + \frac{1}{3} \cdot f_1,$$

(1.23 а)

где  $H_{1,\text{мин}}$  – минимальное расстояние до земли крайних фаз;  $f_1$  – стрела провеса проводов крайних фаз.

$$r_{\text{э}1} = r_{\text{р}1} \cdot \sqrt[n]{\frac{nr_0}{r_{\text{р}1}}}, \quad (1.24)$$

$$r_{\text{э}2} = r_{\text{р}2} \cdot \sqrt[n]{\frac{nr_0}{r_{\text{р}2}}}, \quad (1.25)$$

$r_{p,1}$  и  $r_{p,2}$  – радиусы расщепления крайних и средней фаз (радиусы окружностей, на которых расположены провода фазы);  $n$  и  $r_0$  – число проводов в фазе и радиус их сечения.

Анализ формулы (1.22) показывает, что отношение эквивалентных радиусов средней и крайних фаз является функцией трех переменных

$$\frac{r_{3,2}}{r_{3,1}} = f\left(\frac{2H_{3,1}}{r_{3,1}}, \frac{H_{3,1}}{D}, \frac{H_{3,2}}{H_{3,1}}\right).$$

Вычисленные по формуле (1.22) зависимости  $r_{3,2}/r_{3,1} = f(H_{3,1}/D; H_{3,2}/H_{3,1})$  приведены на рис.1.4, где отношение  $H_{3,1}/D$  использовано в качестве параметра функции  $r_{3,2}/r_{3,1} = f(1 + \Delta H/H_{3,1}) = f(H_{3,2}/H_{3,1})$ . Как видно, при одинаковых высотах всех фаз над землей ( $\Delta H = 0$ ;  $H_{3,2} = H_{3,1}$ ) для выравнивания емкостей трех фаз линии эквивалентные радиусы крайних фаз должны быть значительно больше, чем у средней фазы при любых возможных отношениях  $H_{3,1}/D = 1-3$ . Чем больше отношение  $H_{3,1}/D$ , тем больше должно быть различие радиусов  $r_{3,2}$  и  $r_{3,1}$ .

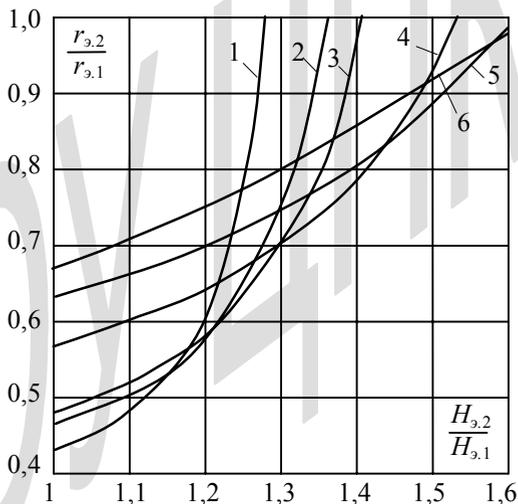


Рис. 1.4. Зависимости  $r_{3,2}/r_{3,1} = f(H_{3,2}/H_{3,1})$  при заданных отношениях  $H_{3,1}/D_0 = 3$  (кривая 1); 2,5 (кривая 2); 2 (кривая 3); 1,5 (кривая 4); 1,2 (кривая 5) и 1 (кривая 6)

При увеличении высоты средней фазы по сравнению с крайними необходимое различие эквивалентных радиусов фаз уменьшается и тем быстрее, чем больше отношение  $H_{3,1}/D$ . Следует заметить, что для линий традиционного исполнения с одинаковым расстоянием всех фаз до земли отношение  $H_{3,1}/D \approx 1$ . Для линий специального исполнения с уменьшенными междуфазовыми расстояниями примерно вдвое, получившими название компактных линий, отношение  $H_{3,1}/D \approx 2$ . При применении междуфазовых изоляционных распорок, исключающих взаимное сближение проводов в пролете под воздействием бокового ветра, расстояния между фазами могут быть сокращены еще больше, что позволяет довести отношение  $H_{3,1}/D$  до 3 (суперкомпактные линии).

Полученные результаты можно представить в более наглядной форме, если превышение средней фазы над крайними отнести к высоте равностороннего треугольника со сторонами, равными  $D$ :  $\Delta H_{np} = 0,866D$  (когда расстояние между осями всех фаз одинаковы). При таком представлении этих зависимостей видно (см. рис.1.5), что именно случай равностороннего треугольника является предельным для трехфазной линии (когда  $\Delta H = 0,866D$ ). При этом, чем меньше отношение  $H_{3,1}/D$ , тем при меньшем отношении  $\Delta H/0,866D$  достигается равенство размеров всех фаз.

Все зависимости отношения от  $r_{3,2}/r_{3,1}$  относительного превышения средней фазы, приведенные на рис.1.4 и 1.5, получены при отношении  $H_{3,1}/r_{3,1} = 30$ . В действительности это отношение может изменяться от 15 до 50. На рис.1.5 штриховыми линиями показаны границы области изменения отношения  $r_{3,2}/r_{3,1}$  при изменении отношения  $H_{3,1}/r_{3,1}$  в этом диапазоне при отклонении  $H_{3,1}/D = 2$ . Как видно, эта область очень узка, что свидетельствует о слабом влиянии параметра  $H_{3,1}/r_{3,1}$  на отношение  $r_{3,2}/r_{3,1}$ .

По данным рис.1.4 и 1.5 могут быть определены соотношения высот средней и крайних фаз, при которых равенство емкостей трех фаз достигается при одинаковых размерах всех фаз ( $r_{3,2} = r_{3,1}$ ). Эти данные приведены на рис.1.6. На этом же рисунке приведены необходимые для выравнивания емкостей трех фаз отношения  $H_{3,2}/H_{3,1}$  при допущении неравенства размеров фаз. При всех рассмотренных отношениях  $r_{3,2}/r_{3,1}$  зависимости  $H_{3,2}/H_{3,1} = f(H_{3,1}/D)$  имеют максимумы, положение которых

относительно оси  $H_{3,1} / D$  смещается в сторону больших значений при уменьшении отношения  $r_{3,2} / r_{3,1}$ . После этого максимума необходимое относительное превышение средней фазы быстро уменьшается при увеличении отношения  $H_{3,1} / D$ . Причем, чем больше отношение  $r_{3,2} / r_{3,1}$ , тем больше необходимое превышение средней фазы над крайними.

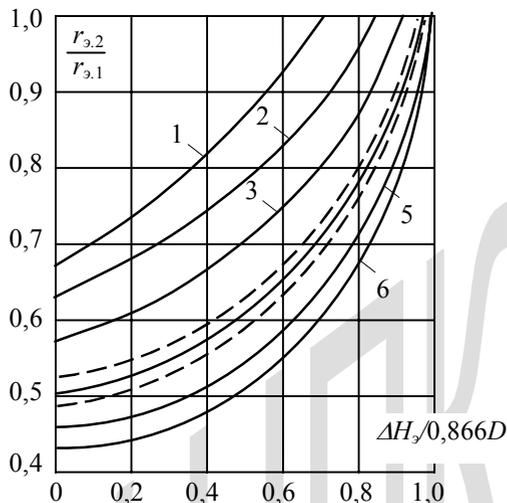


Рис. 1.5. Зависимости  $r_{3,2} / r_{3,1} = f(\Delta H_3 / 0,866 D_0)$  при заданных отношениях  $H_{3,1} / D = 1$  (кривая 1); 1,2 (кривая 2); 1,5 (кривая 3); 2 (кривая 4); 2,5 (кривая 5) и 3 (кривая 6)

Для линий традиционного исполнения ( $H_{3,1} / D \approx 1$ ) выравнивание емкостей трех фаз при одинаковых их размерах достигается при отношении  $H_{3,1} / D = 1,6$ , для компактных линий ( $H_{3,1} / D \approx 2$ ) – при  $H_{3,2} / H_{3,1} \approx 1,4$  и для суперкомпактных линий ( $H_{3,1} / D \approx 3$ ) – при  $H_{3,2} / H_{3,1} \approx 1,3$ .

Следует отметить, что полученные зависимости справедливы для пролета. В зоне опоры необходимо сохранять расстояние между крайними фазами, но превышение средней фазы может быть уменьшено. При этом тяжения проводов крайних и средней фаз должны быть различны.

При уменьшении  $\Delta H$  и сохранении расстояния между крайними фазами уменьшается междуфазовое расстояние. Это допустимо (до

определенного предела, ограничиваемого электрической прочностью междуфазового воздушного промежутка), поскольку в зоне опоры провода имеют значительно меньшую свободу движения, чем в пролете.

Таким образом, рабочие емкости трех фаз воздушных линий могут быть выравнены либо путем увеличения размеров крайних фаз по сравнению со средней, либо путем увеличения высоты средней фазы по сравнению с крайними при одинаковых размерах всех фаз, либо одновременным использованием обеих мер (рис.1.6). Однако следует заметить, что с практической точки зрения предпочтительным является вариант с одинаковыми размерами всех фаз, обеспечивающий значительное упрощение монтажа и эксплуатации линий.

Весьма существенно, что при приближении к равностороннему треугольнику обеспечивается не только выравнивание емкостей фаз, но и уменьшение необходимого радиуса расщепления проводов (см. рис. 1.7), так как это позволяет уменьшить междуфазовые расстояния по условию обеспечения необходимых изоляционных расстояний. Уменьшение междуфазовых расстояний в свою очередь согласно формулам (1.8), (1.11) позволяет дополнительно уменьшить радиус расщепления проводов. В итоге уменьшаются габариты опор и, соответственно, расход металла и стоимость опор и линии в целом, что особенно важно при увеличенном числе проводов в фазе по сравнению с минимальным. Такое увеличение позволяет снизить волновое сопротивление линии

$$Z = \frac{U_{\phi} \cdot \left[ 1 + (n-1) \cdot \frac{r_0}{r_p} \right]}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot v \cdot n \cdot r_0 \cdot E_{дон}} \quad (1.26)$$

и увеличить ее натуральную мощность

$$P_H = \frac{3U_{\phi}^2}{Z} = \frac{6\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot v \cdot n \cdot r_0 \cdot E_{дон} \cdot U_{\phi}}{1 + (n-1) \cdot \frac{r_0}{r_p}}, \quad (1.27)$$

где  $v$  – скорость распространения электромагнитной волны вдоль линии.

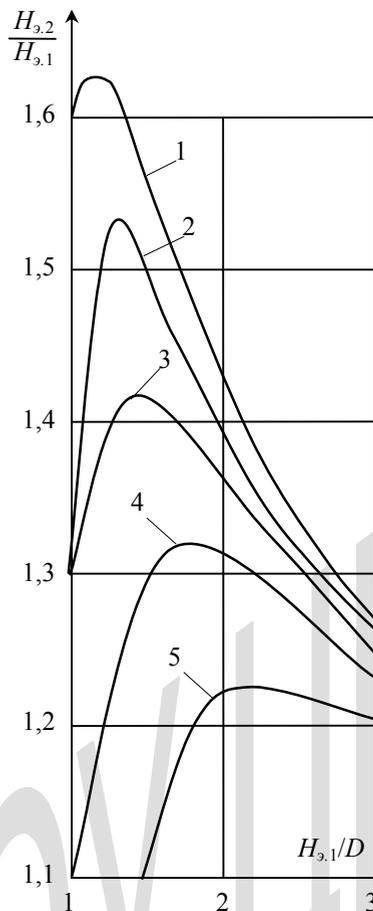


Рис. 1.6. Зависимости  $H_{3,2}/H_{3,1}$  от отношения  $H_{3,1}/D$  при разных значениях  $r_{3,2}/r_{3,1}=1$  (кривая 1); 0,9 (кривая 2); 0,8 (кривая 3); 0,7 (кривая 4); 0,6 (кривая 5)

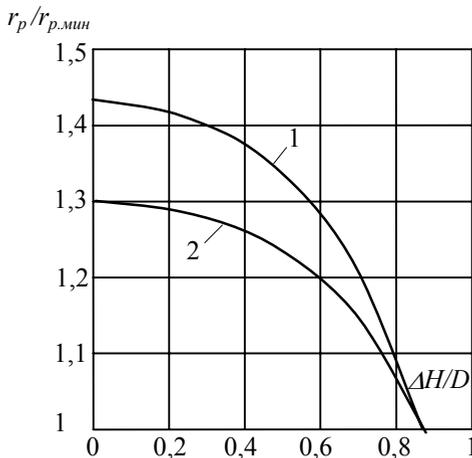


Рис. 1.7. Зависимости отношения радиуса расщепления провода ВЛ 500 кВ к его минимальному значению от отношения  $\Delta H/D$  при числе проводов в фазе  $n=3$  (кривая 1) и  $n=10$  (кривая 2)

Эти формулы для  $Z$  и  $P_H$  справедливы, если радиус расщепления соответствует формулам (1.8) или (1.11). В этом случае волновое сопротивление уменьшается обратнопропорционально числу проводов в фазе, а натуральная мощность увеличивается пропорционально числу проводов в фазе. Если радиус расщепления меньше определяемого этими формулами, зависимости  $Z=f(n)$  и  $P_H=f(n)$  могут быть вычислены по формулам (1.19), (1.20).

## 1.2. Условия работы проводов линий электропередачи

Провода воздушных линий электропередачи работают в сложных условиях: они находятся под высоким напряжением, по ним протекает электрический ток, и они подвергаются также воздействию климатических и атмосферных факторов (колебаниям температуры, воздействию ветра, атмосферных осадков, в том числе образованию на их поверхности гололеда).

Под воздействием колебаний температуры и ветра, а также под воздействием гололеда провода деформируются (удлиняются или

укорачиваются) и изменяется их тяжение. Поэтому появляется опасность разрыва проводов и тросов в местах местных дефектов.

Образование гололеда на проводах часто приводит к их повреждению. В отдельных случаях обрывы проводов происходят от очень большой гололедной нагрузки, превышающей расчетную. Большинство повреждений проводов происходит из-за схлестывания проводов или проводов и тросов при их пляске, сбросе гололеда или мокрого снега и при неравномерной гололедной нагрузке проводов в соседних пролетах. Эти повреждения связаны с образованием электрической дуги и проявляются в виде оплавлений и пережогов проводов.

В процессе эксплуатации линии с заданной длиной пролета стрела провеса не сохраняется неизменной. При увеличении нагрузок от гололеда или ветра стрела провеса провода увеличивается. Соответственно увеличивается и длина провода, определяемая формулой

$$\ell_{np} = \ell + \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{\ell} = \ell + \frac{g^2 \cdot \ell^3}{24\sigma^2} = \ell \cdot \left( 1 + \frac{1}{24} \cdot \frac{g^2}{\sigma^2} \cdot \ell^2 \right), \quad (1.28)$$

где  $\ell$  – длина пролета,  $f$  – стрела провеса,  $g$  – удельная нагрузка проводов (на единицу их длины, отнесенная к их сечению),  $\sigma$  – механическое напряжение провода (тяжение, отнесенное к сечению провода).

Изменение температуры также приводит к изменению длины провода и стрелы провеса. Наименьшая стрела провеса соответствует наиминимальной температуре без гололеда и ветра. Наибольшая стрела провеса может наблюдаться либо при наибольшей температуре (режим I), либо при гололеде без ветра (режим II). Для того чтобы не нарушать требования ПУЭ [3] по габариту между проводом и землей (табл.1.3), необходимо определить, при каких условиях стрела провеса будет наибольшая  $f_{наиб}$  и соответственно выбрать высоту подвески провода к опоре (рис.1.8)

$$H_{II} = \Gamma + f_{наиб} \cdot \quad (1.29)$$

Таблица 1.3

Характеристики местности	Наименьшее расстояние $\Gamma$ при напряжении ВЛ, кВ, равном					
	110	150	220	330	500	750
Населенная *)	7/6	7,5/6,5	8/5	11/10	15,5/15,5	23/23
Ненаселенная *)	6/5	6,5/5,5	7/6	7,5/7	8/7	12/10
Труднодоступная	5	5,5	6	6,5	7	10
Недоступные склоны гор, скалы, утесы и т.п.	3	3,5	4	4,5	5	7,5

\*) в числителе – при нормальных атмосферных температурных условиях; в знаменателе – при гололеде.

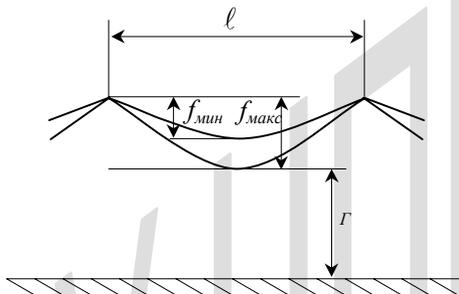


Рис. 1.8. Кривые провисания и стрелы провеса проводов при одинаковой высоте точек подвеса проводов

Изменение стрелы провеса приводит к изменению напряжения в проводе. Наибольшее напряжение может соответствовать либо наименьшей температуре (наименьшей стреле провеса), либо наибольшей нагрузке на провод.

Изложенное показывает, что задача механического расчета проводов оказывается достаточно сложной. Необходимо выбрать такую стрелу провеса, при которой обеспечивается надежная работа линии в течение достаточного срока. Для сокращения объема вычислений с учетом опыта проектирования и эксплуатации линии в ПУЭ нормированы допустимые механические напряжения  $\sigma_{доп}$  в трех существенно различных режимах работы проводов:

1. При наибольшей нагрузке – гололеде с ветром и температуре  $-5^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_T$ ).
2. При низшей температуре и отсутствии внешних нагрузок (когда стрела провеса минимальна) ( $\sigma_{\text{н}}$ ).
3. При средней годовой температуре в отсутствии внешних нагрузок ( $\sigma_{\text{ср.г}}$ ).

Допустимые механические напряжения в проводах и тросах в этих режимах приведены в табл.1.4.

Таблица 1.4

Провода и тросы	Допустимое напряжение, Н/мм <sup>2</sup> , для проводов из алюминиевой проволоки			
	АТ		АТ <sub>п</sub>	
	При наибольшей нагрузке и низшей температуре	При средней годовой температуре	При наибольшей нагрузке и низшей температуре	При средней годовой температуре
Сталеалюминиевые: $F_{oa} \geq 120 \text{ мм}^2$ при $F_{oc} : F_{oc} = 6,1 \div 6,8$	130	87	135	90
$F_{oa} \geq 120 \text{ мм}^2$ при $F_{oc} : F_{oc} = 4,3 \div 4,4$	149	99	153	102
$F_{oa} \geq 150 \text{ мм}^2$ при $F_{oc} : F_{oc} = 7,7 \div 8,1$	122	81	102	84
Стальные: ПС всех сечений	310	216	–	–
тросы ТК всех сечений	По ГОСТ или ТУ		–	–

Как видно, при увеличении сечения стального сердечника допустимое напряжение значительно увеличивается. Различие допустимых напряжений при наибольшей нагрузке и низшей температуре и при среднегодовой температуре определяется относительной кратковременностью первого режима, когда целесообразно допустить напряжение вплоть до 45% предела прочности при растяжении. Во втором

режиме во избежание усталостного разрушения провода допускается напряжение не более 30% предела прочности при растяжении.

Поскольку заранее не известно, в каком из режимов напряжение окажется близким к допустимому, необходимо принять в качестве исходных все три указанных выше режима при допустимых напряжениях. Далее необходимо рассчитать переход от каждого из этих исходных режимов к режимам с наибольшей стрелой провеса I и II (см. выше).

Необходимая длина провода для обеспечения надежной работы проводов ( $\sigma \leq \sigma_{доп}$ ) определяется исходя из режимов с заданной нагрузкой, а наибольшая стрела провеса провода заданной исходной длины – при переходе к режиму с наибольшей температурой (режим I) и при наибольшей вертикальной нагрузке (режим II). Поскольку исходных режимов три и два режима с возможной наибольшей стрелой провеса, необходимо выполнить шесть расчетов изменения состояния провода (изменения стрелы провеса) при переходе из режима с нормированной нагрузкой в режим с наибольшей стрелой провеса. Наибольшая из шести стрел провеса является определяющей и потому принимается в качестве расчетной  $f_{наиб}$ .

Изменение длины провода при изменении температуры и нагрузки определяется известным уравнением, называемым уравнением состояния провода

$$\ell_{np.k} - \ell_{np.u} = \alpha_t \cdot \ell_{np.u} \cdot (t_k - t_u) + \frac{\sigma_k - \sigma_u}{E} \ell_{np.u}, \quad (1.30)$$

где индекс «u» приписан параметрам пролета в исходном, а индекс «k» – в конечном состоянии;  $\alpha_t$  – температурный коэффициент удлинения провода;  $E$  – модуль упругости. Подставляя  $\ell_{np.u}$  и  $\ell_{np.k}$  согласно выражению (1.29) и (1.30), получаем уравнение, определяющее стрелу провеса в конечном состоянии. Поскольку в исходном состоянии известны нагрузки и напряжение в проводе, то исходя из второго выражения для длины провода (1.28),

$$\ell_{np.u} = \ell + \frac{g^2 \ell^3}{24\sigma_u^2}.$$

Для конечного состояния, напротив, важна стрела провеса и не требуется определять напряжение в проводе, поэтому воспользуемся первым выражением в формуле (1.28)

$$\ell_{np.k} = \ell + \frac{8}{3} \cdot \frac{f_k^2}{\ell}.$$

По этой же причине исключим из уравнения состояния провода  $\sigma_k$

$$\sigma_k = g_k \cdot \frac{\ell^2}{8f_k}. \quad (1.31)$$

Подставляя полученные три выражения в уравнение (1.24), пренебрегая малыми членами и сокращая общий множитель  $\ell$ , получаем уравнение, определяющее стрелу провеса в конечном состоянии

$$\frac{8}{3} \cdot \frac{f_k^2}{\ell^2} - \frac{g_u^2 \cdot \ell^2}{24\sigma_u^2} = \alpha_t \cdot (t_k - t_u) - \frac{\sigma_u}{E} + \frac{g_k \cdot \ell^2}{8E \cdot f_k}. \quad (1.32)$$

Уравнение (1.32) можно рассматривать как уравнение связи между длиной пролета и стрелой провеса в конечном состоянии при заданных начальных условиях. Поэтому для упрощения решения задачи его можно разрешить относительно длины пролета, для которого уравнение (1.32) представляет собой биквадратное уравнение. Действительно, домножая все члены уравнения (1.32) на  $\ell^2$  и группируя члены уравнения по степеням  $\ell$ , получаем

$$\frac{g_k}{8E \cdot f_k} \cdot \left(1 + \frac{g_u^2 \cdot E \cdot f_k}{3\sigma_u^2 \cdot g_k}\right) \cdot \ell^4 - \frac{\sigma_u}{E} \cdot \left[1 - \frac{\alpha_t \cdot E}{\sigma_u} \cdot (t_k - t_u)\right] \cdot \ell^2 - \frac{8}{3} \cdot f_k^2 = 0.$$

Из возможных четырех решений биквадратного уравнения соответствует условиям задачи только одно решение с положительным знаком перед обоими корнями, так как только оно всегда вещественно и положительно

$$\ell = 2 \sqrt{\frac{f_k \cdot \sigma_u}{g_k} \cdot \frac{1 - \frac{\alpha_t \cdot E}{\sigma_u} \cdot (t_k - t_u) + \sqrt{\left[1 - \frac{\alpha_t \cdot E}{\sigma_u} \cdot (t_k - t_u)\right]^2 + \frac{4}{3} \cdot \frac{g_k \cdot E \cdot f_k}{\sigma_u^2} \cdot \left(1 + \frac{g_u^2 \cdot E \cdot f_k}{3\sigma_u^2 \cdot g_k}\right)}}{1 + \frac{g_u^2 \cdot E \cdot f_k}{3\sigma_u^2 \cdot g_k}}}. \quad (1.33)$$

Если температура в исходном и конечном режиме одинакова (исходный режим – гололед с ветром, конечный режим – гололед без ветра, температура –  $-5^{\circ}\text{C}$ ), то формула (1.33) существенно упрощается

$$\ell = 2 \sqrt{\frac{f_k \cdot \sigma_u}{g_k} \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{g_k \cdot E \cdot f_k}{\sigma_u^2} \cdot \left(1 + \frac{g_u^2 \cdot E \cdot f_k}{3\sigma_u^2 \cdot g_k}\right)}}{1 + \frac{g_u^2 \cdot E \cdot f_k}{3\sigma_u^2 \cdot g_k}}}. \quad (1.34)$$

При одинаковых нагрузках в исходном и конечном режимах (например, при переходе от наименьшей температуры к наивысшей, или от среднегодовой – к наивысшей) формула (1.33) упрощается мало – только из-за сокращения множителя  $\sigma_u/\sigma_k$ .

Для того чтобы составить наглядное представление о соотношении нагрузок в различных режимах, они приведены в табл. 1.5 для некоторых расчетных условий. Причем удельная нагрузка от массы проводов  $g_{np} = 9,81 m_{np}/F_0$  и от гололеда  $g_z = 9,81 m_z/F_0$ , где  $9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести;  $m_{np}$  и  $m_z$  – массы проводов и гололеда, отнесенные к единице длины проводов.

Как видно, ветровая нагрузка сравнима с нагрузкой от собственной массы провода, а нагрузка от гололеда может значительно превышать нагрузку от собственной массы провода.

Физико-механические характеристики проводов и тросов, необходимые для вычислений по формулам (1.33), (1.34), приведены в табл.1.6.

Вычисляя длины пролетов при различных значениях стрелы провеса в конечном состоянии  $f_k$  при трех исходных значениях  $\sigma_u$ ,  $t_u$ ,  $g_u$  и двух конечных значениях  $t_k$  и  $g_k$ , получаем шесть зависимостей стрелы провеса  $f_k$  от длины пролета  $\ell$  (рис.1.9). Эти зависимости возрастающие, причем при увеличении длины пролета скорость нарастания стрелы провеса увеличивается.

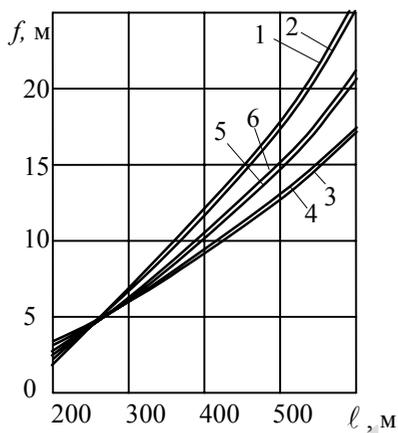
Таблица 1.5

Марка провода	Нагрузка от массы провода $g_{np}F_0$ , Н/м	Нагрузка от массы провода и гололеда, Н/м, при толщине стенки $\Delta$ , мм, равной		Нагрузка от ветра, Н/м, при напоре $550 \text{ Н/м}^2$
		10	20	
АС 150/34	6,75	14,6	27,9	8,7
АС 185/29	7,28	15,4	29,2	9,3
АС 185/43	8,46	16,8	30,8	9,7
АС 205/27	7,74	16,1	30,2	9,8
АС 240/39	9,52	18,4	33,0	9,8
АС 240/56	11,06	20,2	35,0	10,2
АС 300/39	11,32	20,9	36,2	10,9
АС 300/48	11,86	21,5	36,8	10,9
АС 300/66	13,13	22,9	38,2	11,1

Таблица 1.6

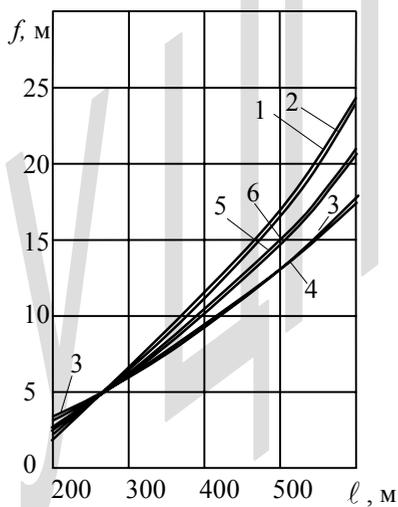
Провода и тросы	Приведенная нагрузка от собственной массы $g_{np}$ , Н/м <sup>2</sup>	Модуль упругости $E$ , Н/мм <sup>2</sup>	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_t$ , К <sup>-1</sup>
Сталеалюминиевые: $F_{oa} \geq 120 \text{ мм}^2$ при $F_{oc}$ : $F_{oc} = 4,29 \div 4,39$	0,0371	$89 \cdot 10^3$	$18,3 \cdot 10^{-6}$
$F_{oa} \geq 1 \text{ мм}^2$ при $F_{oc}$ : $F_{oc} = 6,0 \div 6,25$	0,0346	$82,5 \cdot 10^3$	$19,2 \cdot 10^{-6}$
$F_{oa} \geq 150 \text{ мм}^2$ при $F_{oc}$ : $F_{oc} = 7,71 \div 8,04$	0,0334	$77 \cdot 10^3$	$19,8 \cdot 10^{-6}$
Стальные: ПС всех сечений	0,08	$200 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^{-6}$
тросы ТК всех сечений	0,08	$200 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^{-6}$

АС 240/39



а)

АС 300/39



б)

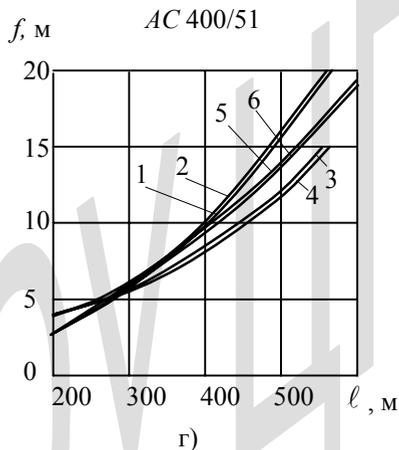
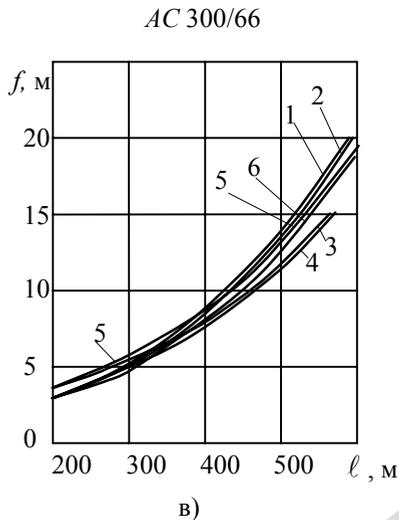


Рис.1.9. Зависимости наибольшей стрелы провеса проводов АС 240/39 (а), АС 300/39 (б), АС 300/66 (в) и АС 400/51 (г) от длины пролета ВЛ для II района по гололеду и расчетной скорости ветра 30 м/с, вычисленные для переходов: 1–I (кривая 1); 1–II (кривая 2); 2–I (кривая 3); 2–II (кривая 4); 3–I (кривая 5) и 3–II (кривая 6). Наивысшая температура  $+40^{\circ}\text{C}$ , среднегодовая температура  $0^{\circ}\text{C}$ , низшая температура  $-40^{\circ}\text{C}$

Наибольшая стрела провеса зависит от конструкции провода: его диаметра и соотношения сечений алюминия и стали. При уменьшении диаметра провода увеличивается отношение удельных нагрузок от гололеда и от собственной массы провода. Поэтому, когда гололедная нагрузка определяет максимальную стрелу провеса провода, она увеличивается при уменьшении его диаметра.

Для иллюстрации влияния конструкции провода и расчетных режимов на рис.1.9 приведены результаты расчетов для проводов различных сечений с различными соотношениями сечения стали к сечению алюминия. Для всех проводов при относительно больших пролетах определяющими являются переходы от режима наибольшей нагрузки I (с гололедом и ветром). Причем от конечного режима (с наибольшей температурой – I или с гололедом без ветра II) наибольшая стрела провеса почти не зависит. Поэтому при больших пролетах увеличение сечения провода приводит к значительному уменьшению наибольшей стрелы его провеса. Однако при уменьшении длины пролета наибольшая стрела провеса начинает определяться переходами от низшей температуры к высшей (2 –1) и от среднегодовой температуры к высшей (3 –1). Согласно вышеизложенному при этом теряется зависимость стрелы провеса от сечения провода, поскольку все провода нагружены собственной массой одинаково.

При увеличении содержания стали наибольшая стрела провеса значительно уменьшается во всех режимах (рис.1.9).

Построенные на рис.1.9 шесть зависимостей наибольших стрел провеса от длины пролета позволяют построить огибающие наибольших стрел провеса для проводов различных марок (рис.1.10). Если для малых длин пролетов различие наибольших стрел провеса очень мало, то при пролетах длиной свыше 400 м различие наибольших стрел провеса составляет уже несколько метров, а при  $\ell > 500$  м приближается к 10 м. Однако следует обратить внимание на то, что кривые наибольших стрел провеса группируются не по сечению алюминия и не по полному сечению, а по сечению стального сердечника. Так, для проводов сечением 240, 300 и 500 мм<sup>2</sup> с сечением стального сердечника 56–66 мм<sup>2</sup> наибольшие стрелы провеса почти совпадают. С другой стороны, для провода сечением  $F_{o,a} = 240$  мм<sup>2</sup>, но с различными сечениями стального

сердечника ( $F_{o,a} = 32, 39$  и  $56 \text{ мм}^2$ ) наибольшие стрелы провеса существенно различны.

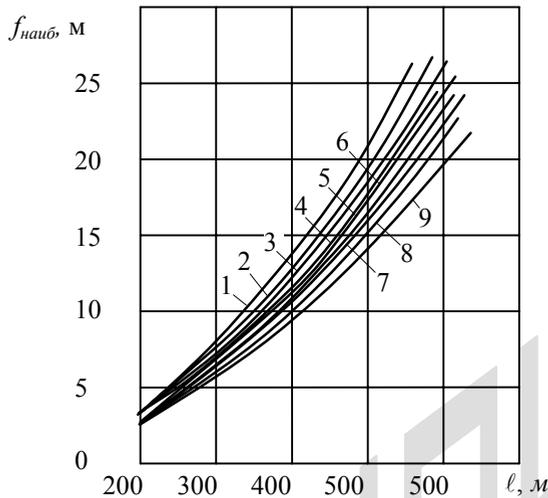


Рис.1.10. Зависимости огибающих наибольших стрел провеса проводов различных марок от длины пролета: 1 – АС 150/24; 2 – АС 185/29; 3 – АС 150/34 и АС 240/32; 4 – АС 240/39; 5 – АС 185/43 и АС 300/48; 6 – АС 400/51; 7 – АС 240/56; 8 – АС 500/64; 9 – АС 300/66

Высота крепления троса на опоре определяется требованием ПУЭ обеспечения нормированного угла молниезащиты [3]. На металлических опорах с горизонтальным расположением проводов (одинаковой высотой проводов трех фаз) угол защиты по отношению к внешним проводам должен быть не более  $20^\circ$ ; в III, IV и особом районах по гололеду, а также в районах с частой «пляской» проводов допускается угол защиты  $30^\circ$ . На железобетонных опорах portalного типа угол защиты по отношению к крайним проводам допускается не более  $30^\circ$ .

Разность высоты подвески троса к опоре и минимальной высоты в середине пролета при температуре  $15^\circ\text{C}$  и отсутствии ветра определяет стрелу провеса троса  $f_{mp} 15^\circ$ . При известной стреле провеса и длине пролета может быть определено напряжение троса по формуле (1.31) при  $g$ , соответствующем нагрузке от собственной массы троса. Далее по

уравнению состояния (1.32) определяем стрелу провеса во всех расчетных режимах и по формуле (1.31) – напряжения в тросе, которые не должны превышать допустимые. Если это условие не соблюдается, необходимо выбрать трос большего сечения.

Отыскание стрелы провеса троса по уравнению (1.32) может быть легко выполнено методом подбора.

### 1.3. Длительно допустимые токовые нагрузки на провода

При протекании тока  $I$  по проводам они нагреваются. Количество тепла, выделяемого в единице длины провода в единицу времени, равно

$$Q = I^2 \cdot R_g = I^2 \cdot \frac{\rho_g}{F_a} = I^2 \cdot \frac{\rho_g}{\pi \cdot r_0^2 \cdot \chi_3}, \quad (1.35)$$

где  $\rho_v$  – удельное сопротивление проводов при температуре провода  $\vartheta$ ,  $F_a$  – их активное сечение,  $\chi_3$  – коэффициент заполнения полного сечения провода активным материалом.

Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) установлена предельно допустимая температура проводов при длительном протекании тока – 70°C. Температура нагрева проводов зависит от температуры окружающей среды и условий отвода тепла. Охлаждение проводов происходит путем излучения и конвекции. Количество тепла, отдаваемого проводом (единичной длины) в окружающую среду в единицу времени, равно

$$Q = \kappa_T \cdot \Pi \cdot (\vartheta - \vartheta_0) = \kappa_T \cdot 2\pi \cdot r_0 \cdot (\vartheta - \vartheta_0), \quad (1.36)$$

где  $\Pi = 2\pi r_0$  – поверхность единицы длины провода,  $\vartheta_0$  – температура окружающей среды,  $\kappa_T$  – коэффициент теплоотдачи, зависящий от температуры провода и его диаметра.

Приравнивая правые части уравнений (1.35) и (1.36), получаем

$$I_{дон} = \pi \cdot r_0^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa_T \cdot \chi_3 \cdot (\vartheta - \vartheta_0)}{\rho_g}}. \quad (1.37)$$

Как видно, при заданном превышении температуры провода над температурой окружающей среды допустимый по нагреву ток в проводе пропорционален радиусу провода в степени 1,5.

При расчетах для территории России рекомендуется принимать  $\vartheta_0=25^\circ\text{C}$ . Поэтому в табл. 1.7 приведены длительно допустимые токи в проводах различных марок при  $\vartheta_0=25^\circ\text{C}$ .

Таблица 1.7

Марка провода	Ток, А	Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	$r_0$ , мм
АС 120/19	390	3,25	7,6
АС 120/27	375	3,125	7,6
АС 150/19	450	3,0	8,4
АС 150/24	450	3,0	8,55
АС 150/34	450	3,0	8,75
АС 185/24	520	2,81	9,45
АС 185/29	510	2,76	9,8
АС 185/43	515	2,78	9,8
АС 240/32	605	2,52	10,8
АС 240/39	610	2,54	10,8
АС 240/50	610	2,54	11,2
АС 300/39	710	2,37	12
АС 300/48	690	2,30	12,05
АС 300/66	680	2,27	12,25
АС 330/27	730	2,21	12,4
АС 400/22	713	1,78	13,3
АС 400/51	705	1,76	13,75
АС 500/27	960	1,92	14,7
АС 500/64	945	1,89	15,3

При отличии температуры окружающей среды от  $\vartheta_0=25^\circ\text{C}$  пересчет длительно допустимых токов может быть произведен с помощью поправочных коэффициентов, не зависящих от размеров проводов.

Температура воздуха, °С	-5	+5	+15	+25	+35	+45	+50
Поправочный коэффициент	1,3	1,2	1,1	1,0	0,88	0,74	0,67

При протекании по проводам длительно допустимых токов увеличиваются потери электрической энергии в проводах. Поэтому такие токи следует допускать только в исключительных случаях (например, в случае аварийного отключения одной из параллельных цепей).

Более наглядный результат получается при анализе допустимой по нагреву плотности тока в проводах (см.табл.1.7). Как видно допустимая плотность тока по нагреву проводов постепенно снижается при увеличении сечения проводов и для наиболее широко применяемых на линиях высокого и сверхвысокого напряжения проводов составляет около 2 А/мм<sup>2</sup>. Такой результат может быть подтвержден аналитически. Действительно, согласно формуле (1.37) допустимая плотность тока в проводах

$$J_{дон} = \frac{I_{дон}}{F_a} = \sqrt{\frac{2\kappa_T \cdot (\vartheta - \vartheta_0)}{r_0 \cdot \chi_3 \cdot \rho_\vartheta}} \quad (1.38)$$

Следует учесть, что при увеличении сечения провода его коэффициент теплоотдачи снижается. Поэтому допустимая плотность тока уменьшается быстрее, чем обратнопропорционально корню из радиуса провода.

## Глава 2. Режимы работы линий электропередачи

### 2.1. Пропускная способность линий электропередачи

Под пропускной способностью линий электропередачи понимается максимальная передаваемая по линии мощность, которая может быть передана без ограничения длительности режима передачи электроэнергии и при соблюдении всех требований эксплуатации:

- ограничения плотности тока в проводах;
- ограничения колебаний напряжения;
- обеспечения устойчивости режима.

Первое требование удовлетворяется соответствующим выбором активного сечения проводов при проектировании линии (см. Главу 1).

Второе требование определяет необходимые параметры линии и состав компенсирующих устройств, обеспечивающих баланс реактивной мощности.

Третье условие определяет дополнительные требования к параметрам линии и компенсирующим устройствам, удовлетворяющим первым двум.

В нормальном режиме работы линии колебания напряжения ограничиваются допустимым повышением напряжения – наибольшим рабочим напряжением  $U_{н.р.}$ . При этом предполагается, что номинальное напряжение является минимальным напряжением нормального режима. Чем выше класс напряжения линии электропередачи, тем меньше различие длительно допустимого и номинального напряжений.

$U_{ном}$ , кВ	35	110	150	220	330	500	750	1150
$U_{н.р.}$ , кВ	40,5	126	172	254	363	525	787	1200

Такая практика сложилась из-за повышения добротности линий (увеличения отношения индуктивного и активного сопротивления линий) при повышении класса напряжения. Однако, значительное увеличение дальности электропередач высших классов напряжения приводит к существенным трудностям обеспечения этого ограничения, что

определяет целесообразность увеличения отношения  $U_{н.р}/U_{ном}$  для сетей высших классов напряжения до 1,1.

В послеаварийных режимах при отключении одной из параллельных линий электропередачи допускается понижение напряжения на приемном конце линии до  $0,9U_{ном}$ .

Третье требование в общем виде соответствует требованию обеспечения положительного значения производной передаваемой мощности  $P$  по углу  $\delta$  между векторами напряжений по концам линии:

$$\frac{dP}{d\delta} > 0 . \quad (2.1)$$

При отсутствии промежуточных присоединений к энергосистемам или компенсирующим устройствам предел передаваемой мощности по устойчивости определяется соотношением (см.ниже)

$$P_{пред} = \frac{3U_1 \cdot U_2}{Z \cdot \sin \lambda} = P_n \cdot \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{1}{\sin \lambda} , \quad (2.2)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – фазные напряжения к началу и в конце линии,  $Z$  и  $\lambda$  – ее волновое сопротивление и волновая длина,  $P_n$  – натуральная мощность линии.

Условия (2.1), (2.2) позволяют определить предельную мощность  $P_{пред}$ , которая может быть передана без потери устойчивости работы электропередачи. Однако в этом режиме небольшой наброс мощности может нарушить устойчивость передачи. Поэтому нормами предусмотрен 20%-ный запас по отношению к предельной мощности  $P_{макс} = P_{пред} / 1,2 = 0,83P_{пред}$ . Это значение передаваемой мощности  $P_{макс}$  и представляет собой пропускную способность нормального режима работы электропередачи.

В послеаварийном режиме работы энергосистемы запас по устойчивости снижается до 8 %. При этом пропускная способность линии  $P_{макс.п.ав} = P_{пред} / 1,08 = 0,93P_{пред}$ .

В последующих параграфах настоящей главы подробно анализируются два последних требования эксплуатации линий и их влияние на технологию передачи электроэнергии.

## 2.2. Режимы напряжения на линиях высокого напряжения

Отличительной особенностью линий электропередачи высокого напряжения являются сравнимость их активного и индуктивного сопротивлений, а также относительно небольшая длина – до 200 – 300 км. В этом случае волновые уравнения линии принимают вид [4]

$$\frac{\dot{U}_1}{U_2} = 1 + \frac{\dot{I}_2}{U_2} R + j \cdot \left( \frac{\lambda^2}{2} \cdot \frac{R}{X} + \frac{\dot{I}_2 \cdot X}{U_2} \right) \approx 1 + \frac{\dot{I}_2}{U_2} R + j \cdot \left( \frac{\dot{I}_2 \cdot X}{U_2} + \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{R}{Z} \right), \quad (2.3)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + j \cdot \left( \frac{U_2}{Z} \cdot \lambda + \dot{I}_2 \cdot \frac{R}{2Z} \cdot \lambda \right) = \dot{I}_2 + j \cdot \frac{U_2 \cdot \lambda}{Z} \cdot \left( 1 + \frac{\dot{I}_2}{2U_2} \cdot R \right), \quad (2.4)$$

где  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  – векторы напряжений в начале и в конце линии, причем вектор  $\dot{U}_2$  совмещен с осью вещественных,  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  – вектора токов в начале и в конце линии,  $\lambda$  – волновая длина линии,  $R$  и  $X$  – ее полное активное и индуктивное сопротивления ( $X \approx Z\lambda$ ).

При передаче чисто активной мощности

$$\dot{I}_2 = I_n \cdot \frac{P}{P_n} = \frac{U_2}{Z} \cdot \frac{P}{P_n}, \quad (2.5)$$

где  $I_n$  и  $P_n$  – натуральный ток и натуральная мощность линии, волновые уравнения упрощаются

$$\frac{\dot{U}_1}{U_2} = 1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} + j \cdot \left( \frac{X}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} + \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{R}{Z} \right) = 1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} + j \cdot \lambda \cdot \left( \frac{P}{P_n} + \frac{R}{2Z} \right), \quad (2.6)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{U_2}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} + j \cdot \frac{U_2 \cdot \lambda}{Z} \cdot \left( 1 + \frac{R}{2Z} \cdot \frac{P}{P_n} \right) = \frac{U_2}{Z} \cdot \left[ \frac{P}{P_n} + j \cdot \lambda \cdot \left( 1 + \frac{R}{2Z} \cdot \frac{P}{P_n} \right) \right]. \quad (2.7)$$

Отношение модулей напряжения в начале и в конце линии равно

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \sqrt{\left( 1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \right)^2 + \lambda^2 \left( \frac{P}{P_n} + \frac{R}{2Z} \right)^2} \approx \\ &\approx \sqrt{1 + 2 \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} + \left[ \left( \frac{R}{Z} \right)^2 + \lambda^2 \right] \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 + \left( \lambda \cdot \frac{R}{Z} \right)^2}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Разрешая полученное квадратное уравнения относительно отношения  $P/P_n$ , получаем предельное отношение  $P/P_n$  при заданном перепаде напряжения  $U_1/U_2$

$$\left(\frac{P}{P_n}\right)_{пред} = \frac{-\frac{R}{Z} + \sqrt{\left(\frac{R}{Z}\right)^2 + \left[\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{дон}^2 - 1 - \left(\lambda \cdot \frac{R}{Z}\right)^2\right] \cdot \left[\left(\frac{R}{Z}\right)^2 + \lambda^2\right]}}{\left[\left(\frac{R}{Z}\right)^2 + \lambda^2\right]} \approx$$

$$\approx \frac{Z}{R} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 + \left[\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - 1\right] \cdot \frac{X^2}{R^2}} - 1}{1 + \frac{X^2}{R^2}} = \frac{Z}{R} \cdot \frac{\sqrt{1,32 + 0,32 \frac{X^2}{R^2}} - 1}{1 + \frac{X^2}{R^2}}, \quad (2.9)$$

поскольку для линий высокого напряжения  $(U_1/U_2)_{дон} = 1,15$ .

Следовательно, предельная передаваемая по линии ВН мощность с учетом выражения для натуральной мощности линии (1.27)

$$P_{пред} = \frac{U_{ном}^2}{R} \cdot \frac{\sqrt{1,32 + 0,32 \left(\frac{X}{R}\right)^2} - 1}{1 + \frac{X^2}{R^2}}. \quad (2.10)$$

Для линий ВН традиционного исполнения (с одним проводом в фазе)  $Z \approx 400$  Ом. Тогда подставляя значения

$$R = \frac{\rho \cdot \ell}{F_a} = 28,3 \frac{\ell}{F_a}, \text{ Ом}; \quad X = Z \cdot \lambda \approx 0,42 \ell, \text{ Ом},$$

где  $\ell$  – длина линии в км,  $F_a$  – активное сечение проводов фазы, мм<sup>2</sup>, получаем

$$P_{пред} = \frac{U_{ном}^2 \cdot F_a}{28,3 \cdot \ell} \cdot \frac{\sqrt{1,32 + 0,32 \left(\frac{0,42 \cdot F_a}{28,3}\right)^2} - 1}{1 + \left(\frac{0,42 \cdot F_a}{28,3}\right)^2} = \frac{U_{ном}^2}{\ell} \Phi(F_a). \quad (2.11)$$

Таким образом, предельная мощность, которая может быть передана по линии ВН, пропорциональна квадрату номинального напряжения, обратно пропорциональна длине линии и увеличивается при увеличении активного сечения проводов (см. рис.2.1). При увеличении сечения проводов свыше 240 мм<sup>2</sup> предельная передаваемая мощность увеличивается мало из-за определяющего влияния индуктивного сопротивления линии (см. рис.2.2). Поэтому при сечениях проводов свыше 240 мм<sup>2</sup> эффективно повышение пропускной способности линии за счет уменьшения индуктивного сопротивления линии путем расщепления проводов фазы (см. рис.2.1). Кривая 2 на рис.2.1 получена при уменьшенном вдвое волновом (и индуктивном) сопротивлении линии  $Z = 200$  Ом. Как видно, чем больше активное сечение проводов фазы, тем эффективнее оказывается расщепление проводов для увеличения пропускной способности линии (рис.2.1, кривая 3). При сечении проводов фазы до 200 мм<sup>2</sup> расщепление проводов мало эффективно.

Влияние длины линии на ее пропускную способность иллюстрируется рис. 2.3. При длине линий свыше 100 – 50 км ограничивающее влияние перепада напряжения становится весьма существенным.

При наличии реактивной составляющей в токе ситуация резко изменяется. При токе в конце линии

$$I_2 = \frac{U_2}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \cdot (1 - j \cdot \operatorname{tg} \varphi), \quad (2.12)$$

согласно (2.3)

$$\begin{aligned} \frac{\dot{U}_1}{U_2} &= 1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} - j \cdot \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \operatorname{tg} \varphi + j \cdot \frac{X}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{X}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \operatorname{tg} \varphi = \\ &= 1 + \left( \frac{R}{Z} + \lambda \cdot \operatorname{tg} \varphi \right) \cdot \frac{P}{P_n} + j \frac{P}{P_n} \cdot \left( -\frac{R}{Z} \operatorname{tg} \varphi + \lambda \right). \end{aligned} \quad (2.13)$$

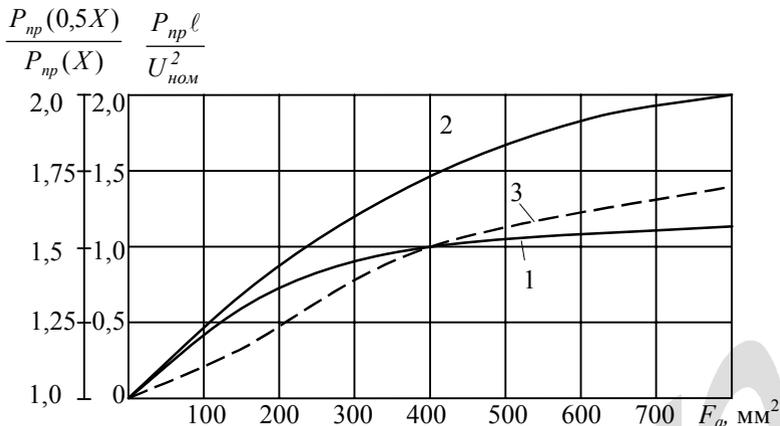


Рис. 2.1. Зависимости от активного сечения проводов линий ВН относительной величины предельной передаваемой мощности по условию ограничения перепада напряжения при  $Z=400$  Ом (кривая 1) и  $Z=200$  Ом (кривая 2), а также отношение предельных мощностей при  $Z=200$  Ом и  $Z=400$  Ом (кривая 3)

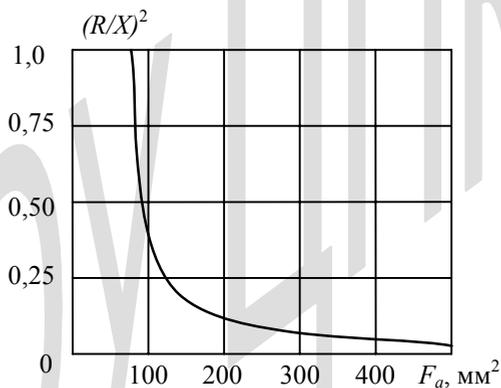


Рис. 2.2. Зависимости квадрата отношения активного и индуктивного сопротивления линий ВН от активного сечения проводов

В этом случае отношение модулей напряжений  $U_1/U_2$

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \sqrt{\left[1 + \left(\frac{R}{Z} + \lambda \cdot \operatorname{tg}\varphi\right) \cdot \frac{P}{P_n}\right]^2 + \left(\frac{P}{P_n}\right)^2 \cdot \left(-\frac{R}{Z} \cdot \operatorname{tg}\varphi + \lambda\right)^2} = \\ &= \sqrt{1 + 2\left(\frac{R}{Z} + \lambda \cdot \operatorname{tg}\varphi\right) \cdot \frac{P}{P_n} + \left(\frac{P}{P_n}\right)^2 \cdot \frac{1}{\cos^2\varphi} \cdot \left[\left(\frac{R}{Z}\right)^2 + \lambda^2\right]}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

откуда

$$\begin{aligned} \left(\frac{P}{P_n}\right)_{\text{пред}} &= \frac{-\left(\frac{R}{Z} + \lambda \cdot \operatorname{tg}\varphi\right) + \sqrt{\left(\frac{R}{Z} + \lambda \cdot \operatorname{tg}\varphi\right)^2 + \left[\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - 1\right] \cdot \left[\left(\frac{R}{Z}\right)^2 + \lambda^2\right] \cdot \frac{1}{\cos^2\varphi}}}{\left(\frac{R}{Z}\right)^2 + \lambda^2} \cdot \cos^2\varphi = \\ &= \frac{\sqrt{\left(\frac{R}{Z} \cos\varphi + \lambda \cdot \sin\varphi\right)^2 + \left[\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - 1\right] \cdot \left[\left(\frac{R}{Z}\right)^2 + \lambda^2\right]} - \left(\frac{R}{Z} \cos\varphi + \lambda \cdot \sin\varphi\right)}{\left(\frac{R}{Z}\right)^2 + \lambda^2} \cdot \cos\varphi = \\ &= \frac{Z}{R} \cdot \frac{\sqrt{\left(\cos\varphi + \frac{X}{R} \sin\varphi\right)^2 + \left[\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - 1\right] \cdot \left[1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2\right]} - \left(\cos\varphi + \frac{X}{R} \sin\varphi\right)}{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2} \cdot \cos\varphi. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Соответственно предельная мощность при подстановке натуральной мощности

$$P_{\text{пред}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{R} \cdot \frac{\sqrt{\left(\cos\varphi + \frac{X}{R} \sin\varphi\right)^2 + \left[\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - 1\right] \cdot \left[1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2\right]} - \left(\cos\varphi + \frac{X}{R} \sin\varphi\right)}{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2} \cdot \cos\varphi. \quad (2.16)$$

Результаты расчетов по формуле (2.15) при  $Z=400$  Ом,  $F_a = 240$  мм<sup>2</sup> и  $\cos\varphi = 0,95$  приведены на рис.2.3. Как видно, наличие даже небольшой реактивной составляющей в токе приводит к резкому уменьшению пропускной способности линии. Поэтому следует избегать

такого режима, компенсируя реактивную составляющую на месте ее потребления.

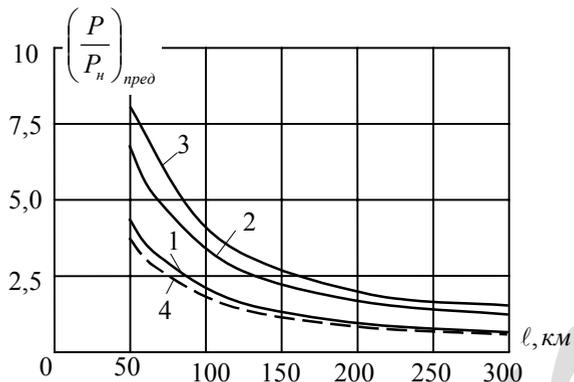


Рис. 2.3. Зависимости относительной величины предельной передаваемой по линии ВН мощности от длины при  $Z=400$  Ом и при различных сечениях проводов  $F$ : при  $\cos\varphi=1$  и  $F=120$  мм<sup>2</sup> (кривая 1),  $F=240$  мм<sup>2</sup> (кривая 2),  $F=400$  мм<sup>2</sup> (кривая 3),  $\cos\varphi=0,95$  и  $F=240$  мм<sup>2</sup> (кривая 4)

Ток в начале линии в режиме ее холостого хода согласно (2.4)

$$I_1 = j \cdot \frac{\dot{U}_2}{Z} \cdot \lambda. \quad (2.17)$$

Э.д.с. генераторов за синхронной реактивностью  $X_s$  с учетом (2.3) в режиме холостого хода линии

$$E = \dot{U}_1 + j \cdot I_1 \cdot X_s = \dot{U}_1 - \frac{U_2}{Z} \cdot X_s \cdot \lambda = U_2 \cdot \left( 1 + j \cdot \frac{\lambda^2}{2} \cdot \frac{R}{X} - \frac{X_s}{Z} \cdot \lambda \right), \quad (2.18)$$

откуда отношение модулей  $E$  и  $U_2$

$$\frac{E}{U_2} = \sqrt{\left( 1 - \frac{X_s}{Z} \cdot \lambda \right)^2 + \frac{\lambda^4}{4} \cdot \left( \frac{R}{X} \right)^2} \approx 1 - \frac{X_s}{Z} \cdot \lambda. \quad (2.19)$$

С учетом соотношения (2.8)

$$\frac{E}{U_1} = \frac{1 - \frac{X_s}{Z} \cdot \lambda}{1 + \frac{\lambda^2}{8} \cdot \left( \frac{R}{Z} \right)^2} \approx 1 - \frac{X_s}{Z} \cdot \lambda. \quad (2.20)$$

Поскольку  $X_s / Z = 1 \div 2$  (для гидрогенераторов  $X_s \approx Z$ ; для турбогенераторов  $X_s = 2Z$ )

$$\frac{E}{U_1} = 1 - (1 \div 2) \cdot \lambda \quad (2.21)$$

Таким образом, в режиме холостого хода линий генераторы работают в очень неблагоприятных условиях при  $E < U_1$ , когда перегреваются лобовые части обмоток статора, что приводит к ускоренному старению изоляции обмоток и повреждению лобовых частей железа статора.

При увеличении передаваемой мощности э.д.с.  $E$  увеличивается согласно соотношению (см.(2.6), (2.7))

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{U}_1 + j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_s = \\ &= U_2 \cdot \left[ 1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} + j \cdot \lambda \cdot \left( \frac{P}{P_n} + \frac{R}{2Z} \right) + j \cdot \frac{X_s}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} - \frac{X_s \cdot \lambda}{Z} \left( 1 + \frac{R}{2Z} \cdot \frac{P}{P_n} \right) \right] = \\ &= U_2 \cdot \left\{ 1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} - \frac{X_s \cdot \lambda}{Z} \left( 1 + \frac{R}{2Z} \cdot \frac{P}{P_n} \right) + j \cdot \left[ \frac{P}{P_n} \left( \frac{X_s}{Z} + \lambda \right) + \frac{\lambda \cdot R}{2Z} \right] \right\}. \quad (2.22) \end{aligned}$$

Отношение модулей  $E$  и  $U_1$  согласно (2.8), (2.22) равно

$$\frac{E}{U_1} = \sqrt{\frac{\left[ 1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} - \frac{X_s \cdot \lambda}{Z} \left( 1 + \frac{R}{2Z} \cdot \frac{P}{P_n} \right) \right]^2 + \left[ \frac{P}{P_n} \cdot \left( \frac{X_s}{Z} + \lambda \right) + \frac{\lambda \cdot R}{2Z} \right]^2}{\left( 1 + \frac{R}{2Z} \cdot \frac{P}{P_n} \right)^2 + \lambda^2 \cdot \left( \frac{P}{P_n} + \frac{R}{2Z} \right)^2}}. \quad (2.23)$$

Результаты расчетов по формуле (2.23) при различных длинах линий ВН при  $Z = 400$  Ом, сечении провода  $F_a = 240$  мм<sup>2</sup> и  $X_s = 2Z$  приведены на рис.2.4. Как видно, при увеличении длины линии расширяется область значений  $P/P_n$ , при которых  $E < U_1$ , что ухудшает условия работы генераторов.

Полностью исключить этот неблагоприятный режим работы генераторов можно путем подключения в начале линии реактора, поглощающего ток холостого хода линии

$$\dot{I}_1 = j \cdot \frac{U_2}{Z} \cdot \lambda = j \cdot I_n \cdot \lambda \quad (2.24)$$

Мощность такого реактора

$$Q_p = \frac{3U_1 \cdot U_2}{Z} = P_n \cdot \lambda, \quad (2.25)$$

где  $P_n \cdot \lambda$  – зарядная мощность линии.

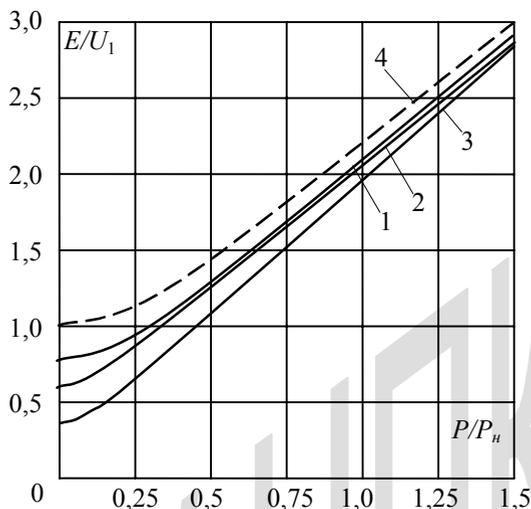


Рис. 2.4. Зависимости отношения  $E/U_1$  от отношения  $P/P_n$  при передаче мощности по линиям ВЛ при  $Z=400$  Ом;  $F=240$  мм<sup>2</sup>, при синхронном импедансе генераторов  $X_s=2Z$ , при различных длинах линий  $l=100$  км (кривая 1), 200 км (кривая 2), 300 км (кривая 3) без шунтирующего реактора (кривые 1-3) и при наличии шунтирующего реактора мощностью  $P_n \cdot \lambda$  (кривая 4).

Чем больше длина линии, тем больше требуется мощность реактора для разгрузки генераторов от емкостного тока. При наличии реактора такой мощности полностью компенсируется емкостный ток линии, и в режиме холостого хода  $I_1 = 0$  и  $E = U_1$ . При увеличении передаваемой по линии мощности э.д.с.  $E$  увеличивается согласно (2.22) без емкостной составляющей тока  $\dot{I}_1$

$$\frac{E}{U_1} = \sqrt{\frac{\left[1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \left(1 - \frac{X_s}{Z} \cdot \frac{\lambda}{2}\right)\right]^2 + \left[\frac{P}{P_n} \cdot \left(\frac{X_s}{Z} + \lambda\right) + \frac{\lambda \cdot R}{2Z}\right]^2}{\left(1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n}\right)^2 + \lambda^2 \cdot \left(\frac{P}{P_n} + \frac{R}{2Z}\right)^2}} \quad (2.26)$$

Результаты расчетов по последней формуле также приведены на рис.2.4 (кривая 4). Поскольку емкостный ток линии полностью компенсирован, длина линии практически не влияет на отношение  $E/U_1$ . Во всем диапазоне изменения  $P/P_n \geq 0$  отношение  $E/U_1 \geq 1$ , причем при увеличении отношения  $P/P_n$  различие значений  $E/U_1$  уменьшается. Тем не менее, чем больше длина линии, тем больше различие отношения  $E/U_1$  при наличии и отсутствии реактора. Таким образом, для обеспечения приемлемых условий работы генераторов на станциях независимо от длины линий необходима установка шунтирующих реакторов, мощность которых равна зарядной мощности линий.

### 2.3. Режимы напряжения на длинных линиях

Распределение напряжения вдоль длинных линий можно получить исходя из волновых уравнений [4]

$$\frac{\dot{U}_x}{U_2} = \cos \lambda_x + \frac{\dot{I}_2}{U_2} \cdot \frac{R_0 \cdot x}{2} \cdot \left( \cos \lambda_x + \frac{\sin \lambda_x}{\lambda_x} \right) + j \cdot \left( \frac{R_0 \cdot x}{2Z} + \frac{\dot{I}_2 \cdot Z_0}{U_2} \right) \cdot \sin \lambda_x, \quad (2.27)$$

где вектор  $\dot{U}_2$  совмещен с вещественной осью, текущая координата вдоль линии  $x$  ( $\lambda_x$ ) отсчитывается от конца линии.

При чисто активной нагрузке приемного конца линии

$$I_2 = \frac{U_2}{Z} \frac{P}{P_n}$$

и

$$\frac{\dot{U}_x}{U_2} = \cos \lambda_x + \frac{P}{P_n} \cdot \frac{R}{2Z} \cdot \left( \cos \lambda_x + \frac{\sin \lambda_x}{\lambda_x} \right) + j \cdot \left( \frac{R_0 \cdot x}{2Z} + \frac{P}{P_n} \right) \cdot \sin \lambda_x \quad (2.28)$$

Соответственно согласно (2.28) распределение модулей напряжения вдоль линии определяется формулой

$$\frac{U_x}{U_2} = \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 - 1 \right] \sin^2 \lambda_x + \frac{R_0 \cdot x}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda_x}{2\lambda_x} \right) + \left( \frac{R_0 \cdot x}{2Z} \right)^2 \cdot \left[ \sin^2 \lambda_x + \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 \left( \cos^2 \lambda_x + \frac{\sin 2\lambda_x}{\lambda_x} + \frac{\sin^2 \lambda_x}{\lambda_x^2} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (2.29)$$

При  $x = \ell$  ( $\lambda_x = \lambda$ ) формула (2.29) определяет соотношение напряжений на отправном и приемном концах линии.

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 - 1 \right] \sin^2 \lambda + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right) + \left( \frac{R}{2Z} \right)^2 \cdot \left[ \sin^2 \lambda + \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 \left( \cos^2 \lambda + \frac{\sin 2\lambda}{\lambda} + \frac{\sin^2 \lambda}{\lambda^2} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \approx \\ &\approx \sqrt{1 + \left[ \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 - 1 \right] \sin^2 \lambda + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right)}. \end{aligned} \quad (2.29a)$$

Множитель

$$\left[ \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 - 1 \right] = \frac{Q}{P_n \lambda} \quad (2.30)$$

определяет относительную величину реактивной мощности  $Q/P_n \cdot \lambda$ , потребляемой (при положительном значении) или генерируемой (при отрицательном значении) линией. Поэтому второй член в фигурных скобках определяет реактивную составляющую падения напряжения, а остальные члены - активную составляющую.

Для упрощения анализа полученного соотношения выполним его без учета активного сопротивления линии (линия без потерь). При этом из (2.29) получаем

$$\frac{U_x}{U_2} = \sqrt{1 + \left[ \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda_x} . \quad (2.31)$$

В режиме передачи натуральной мощности ( $P = P_n$ ) согласно (2.31) напряжение вдоль линии не изменяется при любой длине линии  $U_x = U_2$ . При отклонении передаваемой мощности от натуральной в сторону уменьшения либо увеличения напряжения различие напряжений вдоль линии возрастает, причем тем в большей степени, чем больше длина линии (см.рис.2.5). Если для относительно коротких линий при волновой длине линий  $\lambda < 0,3$  рад (длина линии до 300 км) разность напряжений по концам линий в режиме холостого хода незначительна, то при  $\lambda > 0,3$  рад это различие быстро увеличивается.

В режиме холостого хода ( $P = 0$ ) напряжение на линии согласно (2.31)

$$\frac{U_x}{U_2} = \sqrt{1 - \sin^2 \lambda_x} = \cos \lambda_x \quad (2.32)$$

изменяется вдоль линии и тем в большей степени, чем больше длина линии. Соответственно отношение напряжений на отправном и приемном конце линий

$$\frac{U_1}{U_2} = \cos \lambda . \quad (2.33)$$

При фиксированном напряжении в начале линии, подключенной к источнику напряжения, напряжение на втором конце линии  $U_2$  повышается

$\lambda$ , рад	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$U_2/U_1$	1,005	1,02	1,046	1,085	1,14	1,21

С учетом приведенных в §2.1 ограничений на повышение напряжения на линиях по отношению к номинальному напряжению можно определить предельную длину линии (см.табл.2.1).

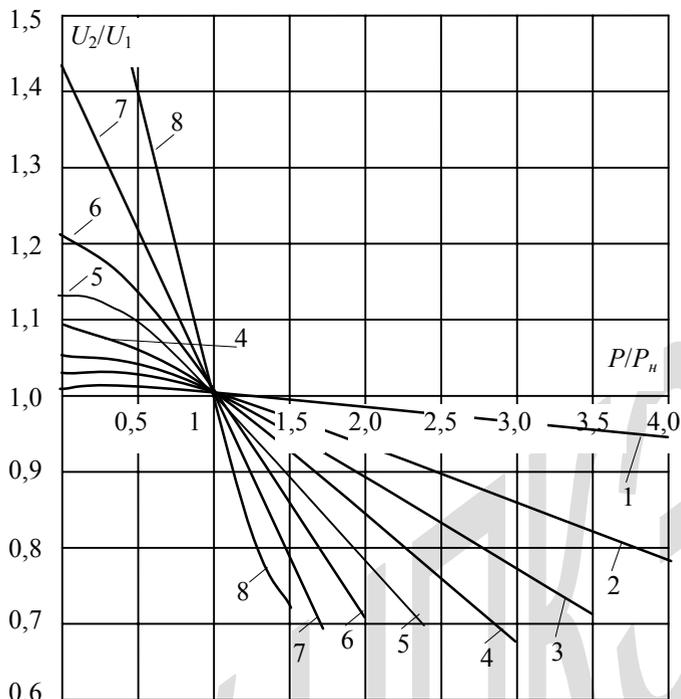


Рис. 2.5. Зависимости отношения напряжений в конце и начале линии от отношения  $P/P_n$  при различных волновых длинах линий:  $\lambda=0,1$  рад (кривая 1),  $0,2$  рад (кривая 2),  $0,3$  рад (кривая 3),  $0,4$  рад (кривая 4),  $0,5$  рад (кривая 5),  $0,6$  рад (кривая 6),  $0,8$  рад (кривая 7) и  $1$  рад (кривая 8).

Таблица 2.1

$(U_2/U_1)_{\text{доп}}$	$\lambda_{\text{нр}}$ , рад	Предельная длина линии, км	
		без реактора	с реактором
1,05	0,314	300/250 <sup>*)</sup>	600/500
1,10	0,4	410/342	820/683
1,15	0,52	500/417	1000/833

<sup>\*)</sup> В числителе - при  $f=50$  Гц, в знаменателе - при  $f=60$  Гц.

При волновых длинах линий  $\lambda > \lambda_{\text{нр}}$  необходимо принятие мер, ограничивающих напряжение на линии в режиме холостого хода. Компенсация емкостного тока линии может быть обеспечена

шунтирующим реактором. Подставляя в уравнение (2.27) ток в конце линии, соответствующий мощности шунтирующего реактора в конце линии  $Q_2$

$$\dot{I}_2 = -j \frac{Q_2}{3U_2} \quad (2.34)$$

и, пренебрегая активным сопротивлением линии, получаем отношение

$$\frac{U_x}{U_2} = \cos \lambda_x + \frac{Z \cdot Q_2}{3U_2^2} \cdot \sin \lambda_x = \cos \lambda_x + \frac{Q_2}{P_n} \cdot \sin \lambda_x. \quad (2.35)$$

Необходимо отметить, что в режиме холостого хода линия генерирует реактивную мощность, которая должна потребляться источником напряжения или сетью.

Волновое уравнение токов для длинной линии можно записать в виде [4]:

$$\dot{I}_1 = \frac{U_2}{Z} \cdot \frac{R}{2Z} \left( \cos \lambda - \frac{\sin \lambda}{\lambda} \right) + \dot{I}_2 \cos \lambda + j \cdot \left( \frac{U_2}{Z} + \dot{I}_2 \frac{R}{2Z} \right) \cdot \sin \lambda. \quad (2.36)$$

На холостом ходу линии  $I_2 = 0$  и

$$\dot{I}_1 = \frac{U_2}{Z} \left[ j \cdot \sin \lambda + \frac{R}{2Z} \left( \cos \lambda - \frac{\sin \lambda}{\lambda} \right) \right]. \quad (2.37)$$

Подставляя в последнюю формулу выражение для  $U_2$  согласно (2.33) и пренебрегая активным сопротивлением линии, получаем

$$\dot{I}_1 = j \cdot \frac{\dot{U}_1}{Z} \cdot \operatorname{tg} \lambda \quad (2.38)$$

и модуль тока в начале линии

$$I_1 = \frac{U_1}{Z} \cdot \operatorname{tg} \lambda, \quad (2.39)$$

то есть он возрастает пропорционально тангенсу волновой длины линии. Требуемая мощность компенсирующего этот ток устройства равна

$$Q_k = 3U_1 \cdot I_1 = \frac{3U_1^2}{Z} \cdot \operatorname{tg} \lambda = P_n \cdot \operatorname{tg} \lambda \quad (2.40)$$

и возрастает пропорционально  $\operatorname{tg} \lambda$ .

$\lambda$ , рад	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$Q_R/P_n$	0,1	0,203	0,309	0,423	0,546	0,684	0,842	1,03

Потреблять эту мощность должны либо генераторы, для которых режим потребления реактивной мощности чрезвычайно неблагоприятен (см. §2.2), либо шунтирующие реакторы, установленные в месте подсоединения линии к сети.

Перепад напряжения вдоль линии получаем согласно (2.35) при  $\lambda_x = \lambda$ , откуда необходимая мощность реактора для обеспечения заданного перепада напряжения равна

$$\frac{Q_2}{P_n} = \frac{1}{\sin \lambda} \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} - \cos \lambda \right). \quad (2.41)$$

Результаты вычислений по формуле (2.41) приведены в табл.2.2 при различных волновых длинах линий и различных допустимых перепадах напряжения.

Таблица 2.2

$\lambda$ , рад	0,314	0,4	0,52	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$U_2/U_1$								
1,05	0	0,08	0,17	0,22	0,29	0,36	0,42	0,49
1,10		0	0,082	0,15	0,22	0,30	0,37	0,44
1,15			0	0,08	0,16	0,24	0,32	0,39

Необходимо обеспечить ограничение не только перепада напряжения вдоль линии, но и возможного повышения напряжения во всех точках линии. Подставляя необходимую для ограничения перепада напряжения  $U_2/U_1$  мощность реактора согласно (2.41) в формулу (2.35), получаем

$$\frac{U_x}{U_2} = \cos \lambda_x + \frac{\sin \lambda_x}{\sin \lambda} \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} - \cos \lambda \right). \quad (2.42)$$

Максимум напряжения на линии найдем, приравнявая нулю производную  $U_x / U_2$  по  $\lambda_x$

$$\frac{d(U_x/U_2)}{d\lambda_x} = -\sin \lambda_x + \left( \frac{U_1}{U_2} - \cos \lambda \right) \cdot \frac{\cos \lambda_x}{\sin \lambda} = 0,$$

откуда координата  $\lambda_{x.экс}$ , соответствующая максимуму  $U_x/U_2$ , определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \lambda_{x.экс} = \frac{1}{\sin \lambda} \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} - \cos \lambda \right) = \frac{Q_2}{P_n}, \quad (2.43)$$

что соответствует относительной мощности реактора на конце линии. Это означает, что чем больше мощность реактора на конце линии, тем дальше от него располагается максимум напряжения. Следовательно, напряжение в конце линии при наличии реактора не максимально. Подставляя (2.43) в (2.42), получаем

$$\frac{U_{x.макс}}{U_2} = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \lambda_{x.экс}} = \sqrt{1 + \frac{\left( \frac{U_1}{U_2} - \cos \lambda \right)^2}{\sin^2 \lambda}} = \sqrt{1 + \left( \frac{Q_2}{P_n} \right)^2}. \quad (2.44)$$

В табл.2.3 приведены результаты расчетов по формуле (2.44) для тех же условий, для которых определялись необходимые значения  $Q_2/P_n$ .

Таблица 2.3

$\lambda$ , рад	0,314	0,4	0,52	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$U_2/U_1$								
1,05	1	1,003	1,014	1,024	1,04	1,06	1,085	1,11
1,10		1	1,003	1,011	1,024	1,044	1,066	1,09
1,15			1	1,003	1,013	1,028	1,05	1,073

При наличии реактора в конце линии ток в начале линии изменяется. Подставляя в уравнение (2.36) ток

$$\dot{I}_2 = -j \cdot \frac{Q_2}{3U_2} = -j \cdot \frac{P_n}{3U_2 \cdot \sin \lambda} \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} - \cos \lambda \right) = -j \cdot \frac{U_1 \cdot U_1}{U_2 \cdot Z \cdot \sin \lambda} \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} - \cos \lambda \right) \text{ и}$$

пренебрегая активным сопротивлением линии, получаем

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= -j \cdot \frac{U_1^2}{U_2 \cdot Z} \cdot \frac{\cos \lambda}{\sin \lambda} \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} - \cos \lambda \right) + j \cdot \frac{U_2}{Z} \cdot \sin \lambda = \\ &= j \cdot \frac{U_1}{U_2 Z} \cdot \frac{U_1}{\sin \lambda} \cdot \left[ -\cos \lambda \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} - \cos \lambda \right) + \frac{U_2^2}{U_1^2} \cdot \sin^2 \lambda \right]. \end{aligned} \quad (2.45)$$

В частном случае при  $U_1=U_2=U_{ном}$

$$\dot{I}_1 = j \cdot \frac{U_{ном}}{Z \sin \lambda} \cdot \left[ -\cos \lambda + \cos^2 \lambda + \sin^2 \lambda \right] = j \cdot \frac{U_{ном}}{Z} \cdot \frac{1 - \cos \lambda}{\sin \lambda} = j \cdot I_n \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}, \quad (2.46)$$

$$\dot{I}_2 = -j \cdot I_n \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}. \quad (2.47)$$

Таким образом, при равенстве напряжений по концам линии необходимая мощность реакторов по концам линии одинакова, а суммарная их мощность минимальна и равна

$$Q_p = 2P_n \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}. \quad (2.48)$$

В этом случае согласно (2.43) положение максимума напряжения определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \lambda_{x.экс} = \frac{1 - \cos \lambda}{\sin \lambda} = \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}, \quad (2.49)$$

откуда  $\lambda_{x.экс} = \lambda/2$ , а максимальное напряжение согласно (2.44) равно

$$\frac{U_{x.max}}{U_2} = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\lambda}{2}} = \frac{1}{\cos \frac{\lambda}{2}} \quad (2.50)$$

и является минимально возможным при заданной волновой длине линии  $\lambda$ . По этой причине в дальнейшем следует рассматривать только такую компенсацию зарядной мощности линии, когда мощности реакторов по обоим концам линии одинаковы. В этом случае предельные длины линий по условию ограничения напряжения в середине компенсированного участка линии вдвое больше, чем при отсутствии реактора на конце линии (см. табл. 2.1, четвертый столбец).

Таким образом, максимальная длина участка линии между двумя реакторами определяется условием ограничения повышения напряжения на линии в режиме холостого хода и при промышленной частоте  $f = 50$  Гц

составляет 600 км при допустимом повышении напряжения сверх номинального на 5%, 820 км при  $U_{\max} / U_{\text{ном}} = 1,1$  и 1000 км при  $U_{\max} / U_{\text{ном}} = 1,15$ .

Необходимо отметить, что принятое в нашей стране 5%-ное ограничение на повышение напряжения сверх номинального для линий сверхвысокого напряжения не оправдано. Целесообразно увеличить для этих линий отношение наибольшего рабочего напряжения к номинальному по крайней мере до 1,10, как для линий класса 330 кВ. Ведь чем выше класс напряжения, тем длиннее линии и тем длиннее могут быть участки между двумя подстанциями, на которых могут быть установлены реакторы.

Из изложенного следует принципиальное отличие коротких и длинных линий. На коротких линиях необходима установка реакторов на отправном конце линии для обеспечения приемлемых условий работы генераторов, что не оказывает влияния на пропускную способность линий. На длинных линиях необходима установка реакторов и на другом конце линии, что определяет существенное их влияние на пропускную способность линий.

При учете активного сопротивления линий точки пересечения оси абсцисс кривыми  $U_2 / U_1 = f(P/P_n)$  немного смещаются в сторону меньших значений  $P/P_n$  в соответствии с падением напряжения на активном сопротивлении линий, причем это смещение различно для линий разной длины.

При передаче по линии мощности с  $\cos\varphi < 1$  необходимо учесть реактивную составляющую тока

$$\dot{I}_2 = \frac{P}{P_n} \cdot \frac{U_2}{Z} \cdot (1 - j \cdot \operatorname{tg}\varphi). \quad (2.51)$$

При подстановке этого выражения в формулу (2.27) при  $\lambda_x = \lambda$  и при пренебрежении активным сопротивлением линии получаем напряжение в начале линии

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \cdot \cos \lambda + j \cdot \dot{I}_2 \cdot Z \cdot \sin \lambda = \\ &= U_2 \cdot \left( \cos \lambda + \frac{P}{P_n} \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \sin \lambda + j \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \sin \lambda \right), \end{aligned} \quad (2.52)$$

откуда модуль напряжения в начале линии

$$U_1 = U_2 \cdot \sqrt{\left(\cos \lambda + \frac{P}{P_H} \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \lambda\right)^2 + \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \cdot \sin^2 \lambda} =$$

$$= U_2 \cdot \sqrt{1 + \left[\left(\frac{P}{P_H}\right)^2 - 1\right] \cdot \sin^2 \lambda + \frac{P}{P_H} \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \left(\frac{P}{P_H} \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin^2 \lambda + \sin 2\lambda\right)}. \quad (2.53)$$

Как видно, в этом случае второй член под корнем аналогичен второму члену под корнем в формуле (2.29), определяющему реактивную составляющую перепада напряжения вдоль линии. Но появляется третий член, определяющий дополнительную реактивную составляющую перепада напряжения, определяемую потреблением реактивной мощности на конце линии.

Результаты расчетов по формуле (2.53) приведены на рис.2.6.

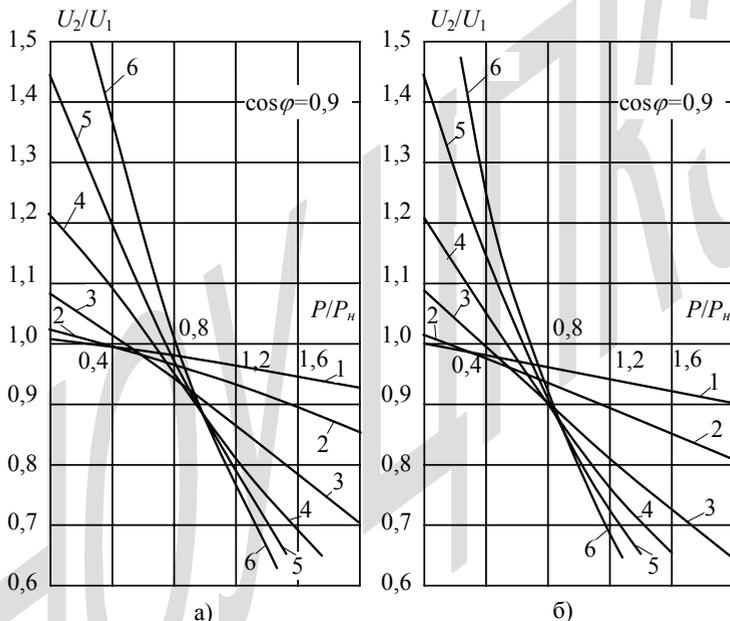


Рис. 2.6. Зависимости отношения напряжений в конце и начале линии от отношения  $P/P_H$  при различных волновых длинах линий:  $\lambda=0,1$  рад (кривая 1),  $0,2$  рад (кривая 2),  $0,4$  рад (кривая 3),  $0,6$  рад (кривая 4),  $0,8$  рад (кривая 5),  $1$  рад (кривая 6) при  $\cos=0,95$  (а) и  $\cos=0,9$  (б)

Их сравнение с данными рис.2.5 показывает, что все зависимости сдвинуты в сторону меньших отношений  $P/P_H$  и меньших отношений

$U_2/U_1$ , причем при уменьшении коэффициента мощности этот сдвиг увеличивается. Это смещение кривых приводит к тому, что пересечение их с уровнем  $U_2/U_1 = 1$  происходит при меньшем отношении  $P/P_n$ , и чем меньше длина линии, тем при меньшем отношении  $P/P_n$  происходит это пересечение. Соответственно резко снижается отношение  $U_2/U_1$  в нижней части графиков при  $P/P_n \geq 1$ , что свидетельствует о нецелесообразности передачи мощности сверх натуральной при их волновой длине свыше 0,2 рад.

#### 2.4. Передача электроэнергии по линиям с шунтирующими реакторами

В §2.3 показано, что для обеспечения режима напряжений на холостом ходу линий длиной свыше 300 км необходима установка шунтирующих реакторов по обоим концам линии. С другой стороны при передаче натуральной мощности по линии шунтирующие реакторы не нужны, поскольку при этом ( $P = P_n$ ) распределение напряжения вдоль линии определяется только падением напряжения от тока в линии на ее активном сопротивлении (см. формулу (2.29))

$$\begin{aligned} \frac{U_x}{U_2} &= \sqrt{1 + \frac{R_0 x}{Z} \cdot \left(1 + \frac{\sin 2\lambda_x}{2\lambda_x}\right) + \left(\frac{R_0 x}{2Z}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{\sin 2\lambda_x}{\lambda_x} + \frac{\sin^2 \lambda_x}{\lambda_x^2}\right)} \approx \\ &\approx 1 + \frac{R_0 x}{2Z} \cdot \left(1 + \frac{\sin 2\lambda_x}{2\lambda_x}\right). \end{aligned} \quad (2.54)$$

Поэтому при увеличении передаваемой по линии мощности шунтирующие реакторы следовало бы отключать. Однако, многочисленные попытки во многих странах обеспечить отключение шунтирующих реакторов окончилось неудачно. Дело в том, что по условиям ведения режимов включение и отключение шунтирующих реакторов необходимо производить не реже одного раза в неделю, а в большинстве случаев и чаще вплоть до ежедневного. При каждой такой операции срабатывает ресурс выключателей, а реактор подвергается воздействию коммутационных перенапряжений. В результате изоляция реактора быстро повреждается. Кроме того, отключение шунтирующих

реакторов опасно для всей линии и связанной с ней электрической сети, поскольку при внезапном отключении линии вынужденная составляющая перенапряжений без шунтирующих реакторов оказывается значительно выше допустимой. Принимая во внимание все эти соображения, практически во всех странах отказались от коммутации шунтирующих реакторов, что определяет необходимость анализа режима передачи электроэнергии по линиям при наличии шунтирующих реакторов.

В общем виде такую задачу можно решить в предположении равномерного распределения поперечной компенсации зарядной мощности линии, используя волновые уравнения линии. При этом необходимо физические параметры линий заменить эквивалентными

$$\left. \begin{aligned} C_3 &= C \cdot (1 - \beta); \\ Z_3 &= \sqrt{\frac{L}{C_3}} = \sqrt{\frac{L}{C \cdot (1 - \beta)}} = \frac{Z}{\sqrt{1 - \beta}}; \\ \lambda_3 &= \omega \sqrt{L \cdot C_3} \cdot \ell = \omega \sqrt{L \cdot C \cdot (1 - \beta)} \cdot \ell = \lambda \sqrt{1 - \beta}; \\ P_{н.э} &= \frac{3U_{\phi, ном}^2}{Z_3} = \frac{3U_{\phi, ном}^2}{Z} \sqrt{1 - \beta} = P_n \sqrt{1 - \beta}; \end{aligned} \right\} \quad (2.55)$$

где  $\beta = \frac{Q_p}{P_n \lambda}$  - степень поперечной компенсации зарядной мощности линии. При этом предполагается отсутствие продольной емкостной компенсации и индуктивность  $L$  принимается соответствующей ее физической величине.

Как видно, при увеличении  $\beta$  в пределах  $0 \leq \beta \leq 1$  волновое сопротивление линии возрастает, волновая длина линии уменьшается, как и эквивалентная натуральная мощность линии. При 100%-ной поперечной компенсации зарядной мощности линии ( $\beta = 1$ ) она полностью теряет волновые свойства, так как при этом

$$C_3 = 0; \quad Z_3 = \infty; \quad \lambda_3 = 0; \quad P_{н.э} = 0.$$

При этом линия представляет собой распределенную индуктивность и распределенное активное сопротивление (см.рис.2.7), причем

$$X = \omega \cdot L \cdot \ell = \frac{\omega \cdot \ell}{v} \cdot Z = \lambda \cdot Z.$$

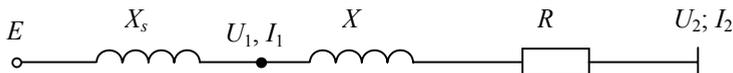


Рис. 2.7. Эквивалентная схема электропередачи при 100%-ной компенсации ее зарядной мощности

При  $\beta < 1$  волновое уравнение напряжения при передаче чисто активной мощности принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{\dot{U}_1}{U_2} = & \cos \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{P}{P_H} \cdot \frac{R}{2Z} \cdot \left( \cos \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{\sin \lambda \sqrt{1-\beta}}{\lambda \cdot \sqrt{1-\beta}} \right) + \\ & + j \left( \frac{R}{2Z} \cdot \sqrt{1-\beta} + \frac{P}{P_H} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta}} \right) \cdot \sin \lambda \sqrt{1-\beta} \end{aligned} \quad (2.56)$$

и

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} = & \left\{ \cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \cdot \frac{1}{1-\beta} \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \right. \\ & \left. + \frac{P}{P_H} \cdot \frac{R}{Z} \cdot \left( \cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{2\lambda \sqrt{1-\beta}} + \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} = \\ = & \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \cdot \frac{1}{1-\beta} - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{P}{P_H} \cdot \frac{R}{Z} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{2\lambda \sqrt{1-\beta}} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} = \\ = & \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{P}{P_{H,Э}} \right)^2 - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda_э + \frac{P}{P_H} \cdot \frac{R}{Z} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda_э}{2\lambda_э} \right) \right\}^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (2.57)$$

В последней формуле второй член соответствует падению напряжения от некомпенсированной реактивной нагрузки линии, как и в случае линии без компенсации (см. формулу (2.29)). Однако, здесь натуральная мощность понижена ( $P_{H,Э} < P_H$ ). Поэтому перепад напряжений по концам линии определяется только ее активным сопротивлением при условии

$$\frac{P}{P_H} = \sqrt{1 - \beta}. \quad (2.58)$$

И чем больше степень компенсации зарядной мощности линии, тем меньше отношение  $P/P_H$ , соответствующее равенству напряжений по концам линии. В частности, при  $\beta = 1$  напряжения по концам линии одинаковы только на холостом ходу линии, а при увеличении нагрузки отношение  $U_2 / U_1$  уменьшается

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \sqrt{1 + \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \cdot \lambda^2 + \frac{P}{P_H} \cdot \frac{2R}{Z}}. \quad (2.59)$$

На рис.2.8 приведены зависимости  $U_2 / U_1 = f(P / P_H)$  при различной степени компенсации  $\beta$ . Как видно, компенсация зарядной мощности линии приводит к уменьшению повышения напряжения при  $P/P_{н.э} < 1$  вплоть до  $U_2 / U_1 = 1$  при  $\beta = 1$ . Однако при этом понижение напряжения при  $P/P_{н.э} > 1$  увеличивается и тем в большей степени, чем больше  $\beta$ . Все кривые смещаются в сторону меньших отношений  $P/P_H$  и в сторону понижения  $U_2/U_1$ . Соответственно уменьшается пропускная способность линии, определяемая допустимым перепадом напряжения.

Для наглядности на рис.2.9 сопоставлены зависимости  $U_2 / U_1 = f(P/P_H)$  при заданной волновой длине линии и при различной степени компенсации  $\beta$ . Как видно, при увеличении  $\beta$  все зависимости смещаются в сторону меньших значений отношения  $U_2/U_1$ . Однако, диапазон изменения отношения  $U_2 / U_1$  при изменении отношения  $P/P_H$  в пределах  $0 \leq P/P_H \leq 1$  изменяется незначительно. Во всех случаях при увеличении  $\beta$  уменьшается повышение напряжения в режиме малых нагрузок и увеличивается снижение напряжения при больших нагрузках. Очевидно, что при использовании шунтирующих реакторов с фиксированными параметрами обеспечить приемлемый режим напряжения невозможно.

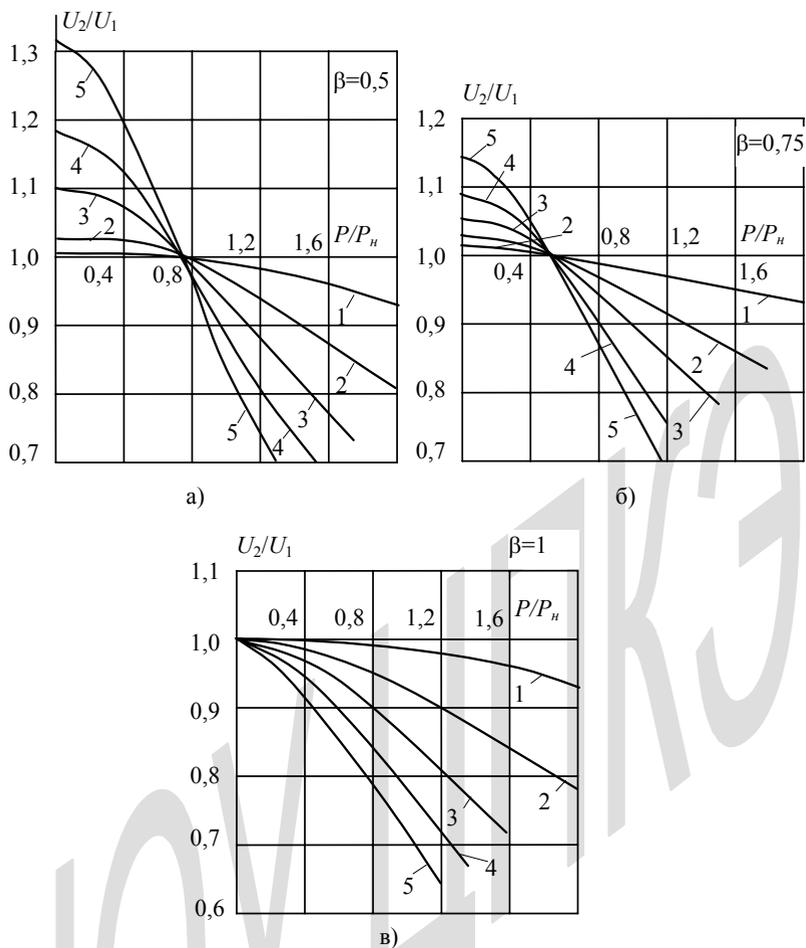


Рис. 2.8. То же, что и на рис.2.5 при  $\lambda=0,2$  рад (кривая 1),  $0,4$  рад (кривая 2),  $0,6$  рад (кривая 3),  $0,8$  рад (кривая 4),  $1$  рад (кривая 5) при различной степени компенсации зарядной мощности линии  $\beta=0,5$  (а),  $\beta=0,75$  (б), и  $\beta=1$  (в)

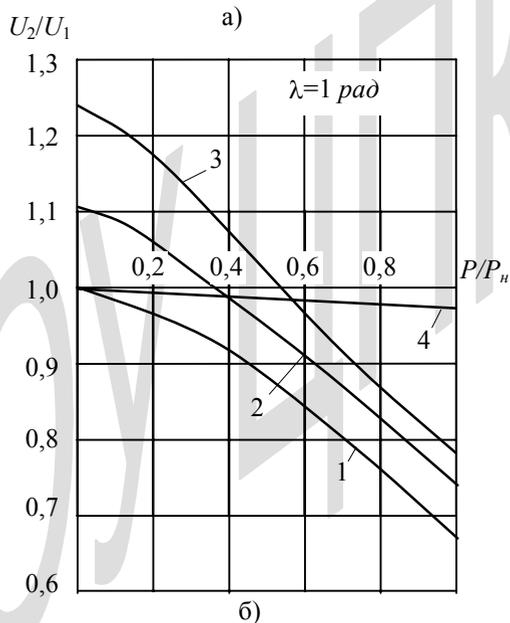
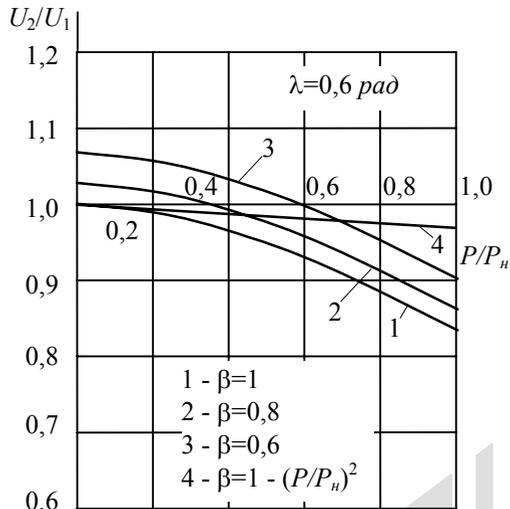


Рис. 2.9. Зависимости отношения  $U_2/U_1$  от отношения  $P/P_n$  для линий с волновой длиной 0,6 рад (а) и 1 рад (б) при  $\beta=1$  (кривая 1), 0,75 (кривая 2), 0,5 (кривая 3), а также при  $\beta=1 - (P/P_n)^2$  (кривая 4)

При передаче по линии мощности с  $\cos\varphi < 1$  волновые уравнения

компенсированной линии усложняются. Поэтому целесообразно проанализировать влияние коэффициента мощности при пренебрежении активным сопротивлением линии. В этом случае при подстановке тока в конце линии согласно (2.12) в волновое уравнение (2.27) получаем

$$\dot{U}_1 = U_2 \cdot \left[ \cos \lambda \sqrt{1-\beta} + \left( \frac{P}{P_H} \right) \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1-\beta}} \cdot \sin \lambda \sqrt{1-\beta} + j \cdot \frac{P}{P_H} \cdot \frac{\sin \lambda \sqrt{1-\beta}}{1-\beta} \right], \quad (2.60)$$

куда

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 \cdot \sqrt{\left( \cos \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{P}{P_H} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1-\beta}} \cdot \sin \lambda \sqrt{1-\beta} \right)^2 + \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \cdot \frac{\sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}}{1-\beta}} = \\ &= U_2 \cdot \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \cdot \frac{1}{1-\beta} - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{P}{P_H} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1-\beta}} \times \right. \\ &\times \left. \left( \frac{P}{P_H} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1-\beta}} \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \sin 2\lambda \sqrt{1-\beta} \right) \right\}^{1/2} = \\ &= U_2 \cdot \sqrt{1 + \left[ \left( \frac{P}{P_{H.Э}} \right)^2 - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda_{\text{Э}} + \frac{P}{P_{H.Э}} \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \left( \frac{P}{P_{H.Э}} \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin^2 \lambda_{\text{Э}} + \sin 2\lambda_{\text{Э}} \right)}. \quad (2.61) \end{aligned}$$

Как видно и в этом случае структура формулы для перепада напряжения сохраняется при добавлении члена, определяющего составляющую перепада напряжения от реактивного тока, потребляемого на конце линии.

В качестве примера на рис.2.10 приведены результаты расчетов по формуле (2.61) при степени компенсации зарядной мощности линии  $\beta = 0,5$  и  $\cos \varphi = 0,95$ . Сравнение данных рис.2.10 и рис.2.8, а показывает, что при  $\cos \varphi < 1$  все кривые сдвигаются в сторону меньших значений  $P/P_H$  и  $U_2/U_1$ , причем в отличие от случая  $\cos \varphi = 1$  пересечение всех кривых с уровнем  $U_2/U_1 = 1$  происходит при разных отношениях  $P/P_H$ . Важно отметить, что это смещение кривых происходит без изменения отношения  $U_2/U_1$  в режиме холостого хода линии, определяемом только степенью компенсации зарядной мощности линии.

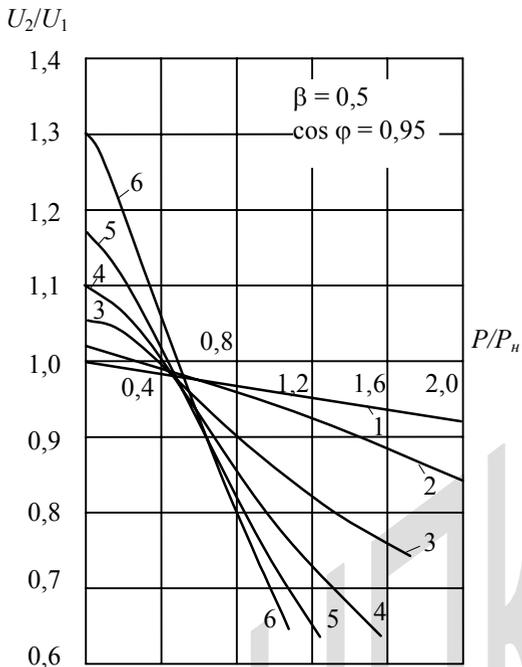


Рис. 2.10. Зависимости отношения  $U_2/U_1$  от отношения  $P/P_n$  линий заданной волновой длины  $\lambda=0,1$  рад (кривая 1),  $0,2$  рад (кривая 2),  $0,4$  рад (кривая 3),  $0,6$  рад (кривая 4),  $0,8$  рад (кривая 5) и  $1$  рад (кривая 6) при  $\beta=0,5$  и  $\cos\varphi = 0,95$

Очевидно, что даже небольшая реактивная составляющая в токе линии приводит к резкому ухудшению условий передачи электроэнергии по линии.

## 2.5. Пропускная способность электропередач, обусловленная ограничением перепада напряжения вдоль линии

Из приведенных в §§2.3 и 2.4 данных следует, что ограничение перепада напряжения вдоль линии приводит к ограничению пропускной способности линий, которая может быть оценена аналитически.

Обычно передача электрической энергии производится при оптимальной плотности тока  $J$ , которая составляет около  $1 \text{ А/мм}^2$ . Поэтому, оценивая пропускную способность линий электропередачи, будем учитывать изменение ее активного сопротивления при изменении передаваемой мощности

$$R = \frac{\rho \ell}{F_a},$$

тогда отношение

$$\frac{R}{Z} = \frac{\rho \ell J I_H}{U_2 \cdot I_2} = \frac{\rho \ell J}{U_2} \cdot \frac{P_H}{P},$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление проводов, Ом·мм<sup>2</sup>/км;  $\ell$  - длина линии, км;  $F_a = I_2/J$  - активное сечение проводов, мм<sup>2</sup>;  $I_2 = I_H \cdot (P/P_H)$ .

Подставляя это отношение  $R/Z$  в уравнение (2.29а), получаем перепад напряжения вдоль линии

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{1 + \left[ \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda + \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{U_2} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right)}. \quad (2.62)$$

Разрешая полученное уравнение относительно отношения  $P/P_H$ , получаем предельное отношение  $P/P_H$  при заданном допустимом перепаде напряжения  $(U_1/U_2)_{\text{доп}}$

$$\left( \frac{P}{P_H} \right)_{\text{пр}} = \frac{1}{\sin \lambda} \cdot \sqrt{\left( \frac{U_1}{U_2} \right)_{\text{доп}}^2 - \cos^2 \lambda - \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{U_2} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{\lambda} \right)}. \quad (2.63)$$

При увеличении волновой длины линии предельное отношение  $P/P_H$  уменьшается, а при увеличении  $(U_1/U_2)_{\text{доп}}$  - увеличивается (см.рис.2.11). В частности, при  $\lambda = \pi/2$

$$\left( \frac{P}{P_H} \right)_{\text{пр}} = \sqrt{\left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 - \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{U_2}} \approx \frac{U_1}{U_2} - \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{2U_2} \cdot \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_1}{U_2} - \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{2U_1}. \quad (2.64)$$

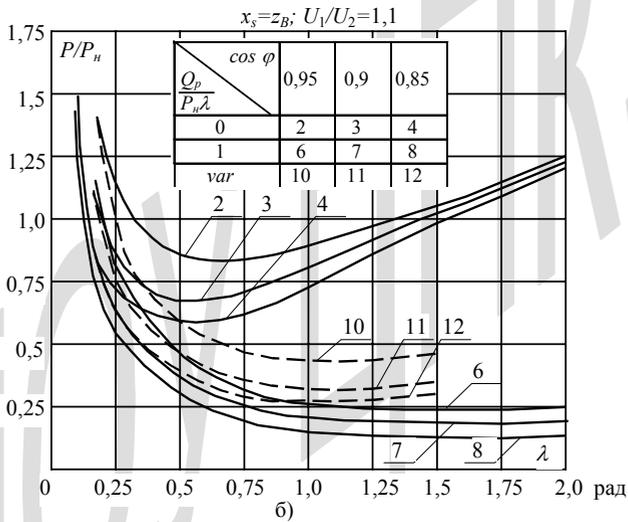
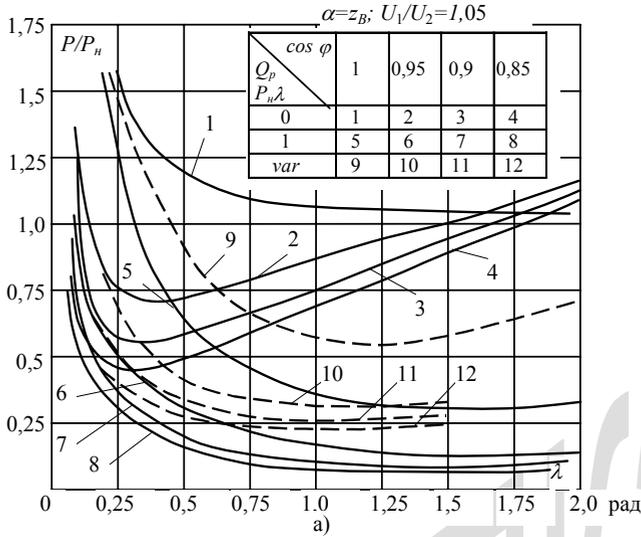


Рис.2.11. Зависимости от волновой длины линий предельного отношения передаваемой мощности к натуральной по условию ограничения перепада напряжения вдоль линии  $(U_1/U_2)_{дон} = 1,05$  (а) и  $(U_1/U_2)_{дон} = 1,10$  (б) при различной степени компенсации зарядной мощности линий  $\beta=0$  (кривые 1–4),  $\beta=1$  (кривые 5-8),  $\beta=var$ , обеспечивающее отношение  $E/U_1=0,85$  при  $P=0$  (кривые 9-12), при различных значениях  $\cos \varphi=1$  (кривые 1, 5 и 9)  $\cos \varphi=0,95$  (кривые 2, 6 и 10),  $\cos \varphi=0,9$  (кривые 3, 7 и 11),  $\cos \varphi=0,85$  (кривые 4, 8 и 12)

некомпенсированной линии (без шунтирующих реакторов) ограничения по перепаду напряжения не лимитируют передаваемую мощность в пределах натуральной мощности и несколько более.

При передаче мощности с  $\cos\varphi < 1$  ситуация резко изменяется. В этом случае, разрешая квадратное уравнение (2.53) относительно  $P/P_n$ , получаем предельное отношение  $P/P_n$  при заданном допустимом перепаде напряжения  $(U_1/U_2)_{дон}$

$$\left(\frac{P}{P_n}\right)_{np} = \frac{\cos\varphi}{\sin\lambda} \left[ \sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{дон}^2 - \cos^2\lambda \cdot \cos^2\varphi - \cos\lambda \cdot \sin\varphi} \right]. \quad (2.64)$$

Для линий с волновой длиной  $\lambda=0,3\div 0,4$  рад снижение предельной передаваемой мощности при  $\cos\varphi = 0,95$  по сравнению со случаем передачи чисто активной мощности ( $\cos\varphi = 1$ ) составляет около 50%, а при  $\cos\varphi = 0,9$  – еще больше – около 60% (см.рис.2.11). При этом пропускная способность линий при  $\cos\varphi = 0,95$  составляет около  $0,7P_n$  и при  $\cos\varphi = 0,9$  – около  $0,55P_n$ .

При увеличении волновой длины линии пропускная способность линии увеличивается, приближаясь к натуральной мощности линии. Например, при  $\lambda=\pi/2$

$$\left(\frac{P}{P_n}\right)_{np} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{дон} \cdot \cos\varphi.$$

При  $(U_1/U_2)_{дон} = 1,05$  и  $\cos\varphi = 0,95$   $(P/P_n)_{np} = 1$ .

При увеличении допустимого перепада напряжения до  $(U_1/U_2)_{дон}=1,10$  пропускная способность линий повышается (рис.2.11,б) и при  $\lambda = 0,3\div 0,4$  рад составляет  $0,85P_n$  при  $\cos\varphi = 0,95$  и  $0,7P_n$  при  $\cos\varphi = 0,90$ . При увеличении  $\lambda$  сверх  $0,5$  рад пропускная способность линии увеличивается.

При наличии шунтирующих реакторов на линии ( $0 < \beta \leq 1$ ) при подстановке отношения  $R/Z$  согласно (2.62) в уравнение (2.57) получаем выражение для перепада напряжения в виде

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \sqrt{1 + \left[ \left( \frac{P}{P_{HЭ}} \right)^2 - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda_{\varnothing} + \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{U_2} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda_{\varnothing}}{2\lambda_{\varnothing}} \right)} = \\ &= \sqrt{1 + \left[ \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \cdot \frac{1}{1-\beta} - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{U_2} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{2\lambda \sqrt{1-\beta}} \right)}, \quad (2.65) \end{aligned}$$

откуда предельное отношение  $P/P_H$  при заданном перепаде напряжения  $(U_1/U_2)_{дон}$  получается равным

$$\left( \frac{P}{P_H} \right)_{пр} = \frac{\sqrt{1-\beta}}{\sin \lambda \sqrt{1-\beta}} \sqrt{\left( \frac{U_1}{U_2} \right)_{дон}^2 - \cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} - \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{U_2} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{2\lambda \sqrt{1-\beta}} \right)}. \quad (2.66)$$

В частности, при  $U_1/U_2=1$

$$\begin{aligned} \left( \frac{P}{P_H} \right)_{пр} &= \sqrt{1-\beta} \cdot \sqrt{1 - \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{U_2 \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{2\lambda \sqrt{1-\beta}} \right)} \approx \\ &\approx \sqrt{1-\beta} \cdot \left[ 1 - \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{2U_2 \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{2\lambda \sqrt{1-\beta}} \right) \right]. \quad (2.67) \end{aligned}$$

В этом случае при  $\beta=1$  передача электрической энергии невозможна. При  $U_1/U_2 > 1$  и  $\beta=1$  предельное отношение  $P/P_H$  согласно (2.66)

$$\left( \frac{P}{P_H} \right)_{пр} = \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{\left( \frac{U_1}{U_2} \right)_{дон}^2 - 1 - \frac{2\rho \cdot J \cdot \ell}{U_2}}, \quad (2.68)$$

поскольку при  $\beta \rightarrow 1$   $\sin \lambda \cdot \sqrt{1-\beta} \rightarrow \lambda \sqrt{1-\beta}$ . Как видно, при 100%-ной компенсации зарядной мощности линии предельная передаваемая мощность уменьшается обратнопропорционально волновой длине линии (см.рис.2.11). При увеличении допустимого перепада напряжения  $U_1/U_2$  пропускная способность линии увеличивается.

При передаче по линии активной мощности ( $\cos \varphi = 1$ ) пропускная способность линии при  $\beta = 1$  значительно меньше, чем при  $\beta$

= 0. Так при  $\lambda = 0,4$  рад пропускная способность линии уменьшается в 1,8 раза, а при  $\lambda = 1$  рад – в 3,1 раза (см.рис.2.11).

При  $\cos\varphi < 1$  пропускная способность линии снижается еще больше. Разрешая уравнение (2.61) относительно  $P/P_H$ , получаем в этом случае

$$\left(\frac{P}{P_H}\right)_{np} = \frac{\sqrt{1-\beta} \cdot \cos\varphi}{\sin\lambda\sqrt{1-\beta}} \cdot \left[ \sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - \cos^2\lambda\sqrt{1-\beta} \cdot \cos^2\varphi - \cos\lambda\sqrt{1-\beta} \cdot \sin\varphi} \right].$$

(2.69)

В частности при  $\beta = 1$

$$\left(\frac{P}{P_H}\right)_{np} = \frac{\cos\varphi}{\lambda} \cdot \left[ \sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - \cos^2\varphi} - \sin\varphi \right]. \quad (2.70)$$

Результаты расчетов по этой формуле также приведены на рис.2.11. Как видно, чем больше длина линии, тем больше расхождение пропускной способности при  $\beta = 1$  и при  $\beta = 0$ .

Из этих данных следует, что передача электрической энергии на большие расстояния при  $\cos\varphi < 1$  нецелесообразна.

Изложенное позволяет сделать вывод о существенной зависимости пропускной способности линий от условий их эксплуатации и, в частности, от степени компенсации их зарядной мощности и от коэффициента мощности  $\cos\varphi$ .

## 2.6. Передача электрической энергии по линиям с управляемыми реакторами

Анализ формул (2.30) и (2.57) для перепада напряжения при передаче по линии чисто активной мощности позволяет установить оптимальный закон регулирования степени компенсации зарядной мощности линий, при котором реактивная составляющая перепада напряжения полностью компенсируется во всех режимах работы линий:

$$\beta = 1 - \left( \frac{P}{P_n} \right)^2. \quad (2.71)$$

Такой закон регулирования обеспечивают управляемые шунтирующие реакторы [4, 5]. При этом эквивалентные параметры линии согласно (2.55) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{э}} &= C \left( \frac{P}{P_n} \right)^2; & Z_{\text{э}} &= Z \frac{P_n}{P}; \\ \lambda_{\text{э}} &= \lambda \frac{P}{P_n}; & P_{n,\text{э}} &= P \end{aligned} \right\}. \quad (2.72)$$

При такой компенсации линия сохраняет волновые свойства при любой передаваемой мощности  $P$ , и любая передаваемая мощность является натуральной для линии со всеми вытекающими последствиями, как будет показано ниже. Для того, чтобы отличить рассматриваемые режимы передачи электроэнергии от естественного натурального режима линии введем термин «квазинатуральный режим».

Подставляя эквивалентные волновые параметры линии в волновые уравнения (2.27), (2.36), получаем в случае передачи чисто активной мощности перепад напряжений

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \left\{ 1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \left( 1 + \frac{P_n}{P} \cdot \frac{\sin 2\lambda \frac{P}{P_n}}{2\lambda} \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{R^2}{4Z^2} \cdot \left[ \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 \cos^2 \lambda \frac{P}{P_n} + \frac{P}{P_n} \cdot \frac{\sin 2\lambda \frac{P}{P_n}}{\lambda} + \frac{\sin^2 \lambda \frac{P}{P_n}}{\lambda^2} \right] \right\}^{1/2} \approx \\ &\approx \sqrt{1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} + \frac{\sin 2\lambda \frac{P}{P_n}}{2\lambda}} \approx 1 + \frac{R}{2Z} \cdot \left( \frac{P}{P_n} + \frac{\sin 2\lambda \frac{P}{P_n}}{2\lambda} \right) \end{aligned} \quad (2.73)$$

и ток на отправном конце линии

$$I_1 \approx \frac{U_2}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} = I_2.$$

Отсюда следует, что при любой передаваемой по линии мощности перепад напряжений вдоль линии определяется только падением напряжения на ее активном сопротивлении (назовем этот перепад естественным, см.рис.2.9), а ток вдоль линии не изменяется (по величине). Это обстоятельство определяет возможность регулирования передаваемой по линии мощности путем регулирования перепада напряжений вдоль линии. Действительно, согласно (2.73) отношение  $P/P_n$  равно

$$\frac{P}{P_n} = \frac{2Z}{R} \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right) - \frac{\sin 2\lambda \cdot \frac{P}{P_n}}{2\lambda}, \quad (2.74)$$

а передаваемая по линии мощность

$$\begin{aligned} P &= \frac{6U_1 \cdot U_2}{R} \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right) - \frac{3U_1 \cdot U_2}{Z} \cdot \frac{\sin 2\lambda \frac{P}{P_n}}{2\lambda} = \\ &= 3U_1 \cdot \left[ \frac{2(U_1 - U_2)}{R} - \frac{U_2}{Z} \cdot \frac{\sin 2\lambda \frac{P}{P_n}}{2\lambda} \right]. \end{aligned} \quad (2.75)$$

Поскольку при увеличении длины линии ее активное сопротивление  $R = R_0 \ell$  увеличивается пропорционально, перепад напряжений  $U_1/U_2$  должен также увеличиваться. При очень длинных линиях

( $\ell > 1000$  км) 5%-ный допуск на перепад напряжений может оказаться недостаточным. По этой причине также целесообразно увеличить допустимый перепад напряжений вдоль линий СВН до 10%.

Однако имеется и другой способ ограничения перепада напряжений с помощью управляемых реакторов (УШР), работающих в режиме генерации реактивной мощности за счет подключения к компенсационной обмотке конденсаторов (батарей конденсаторов). В зависимости от соотношения мощностей конденсаторов и трансформаторной части реактора можно получить отношение

емкостного и индуктивного номинальных токов от 0,045 (определяется фильтрами высших гармонических) до 1. Это означает, что максимальный диапазон изменения параметра  $\beta$  в формуле (2.70) составляет  $-1 \leq \beta \leq 1$ .

На рис.2.12 приведены результаты вычислений по формуле (2.67) зависимостей  $(P/P_H)_{np} = f(-\beta)$  при заданных длинах линий. Эти зависимости практически линейны. При этом видно, что при отрицательных значениях  $\beta$  без перепада напряжения может быть передана мощность не только в пределах натуральной мощности линий, но и значительно больше.

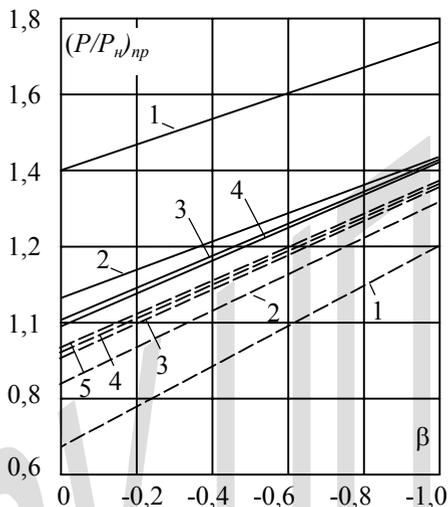


Рис.2.12. Зависимости допустимого отношения  $P/P_H$  от параметра  $-\beta = \frac{Q_p}{P_H \lambda}$  при различных длинах линий класса 500 кВ: 1 – 250 км; 2 – 500 км; 3 – 750 км 4 – 1000 км 5 – 1500 км, - без перепада напряжения (-----) и с перепадом напряжения  $U_1/U_2 = 1,05$  (—) при  $f = 50$  Гц

Зависимости  $(P/P_H)_{np}$  от длины линии также имеют нарастающий характер (рис.2.13). Но для линий длиной свыше 750 км допустимое отношение  $P/P_H$  изменяется незначительно.

Совершенно иной характер зависимостей  $(P/P_H)_{np}$  от длины линий при допустимом 5%-ном перепаде напряжения. Эти зависимости,

полученные по формуле (2.66), падающие (рис.2.13). Однако, при длинах линий  $\ell > 750$  км допустимое отношение  $P/P_H$  также практически неизменно, но больше, чем при  $U_1/U_2=1$ .

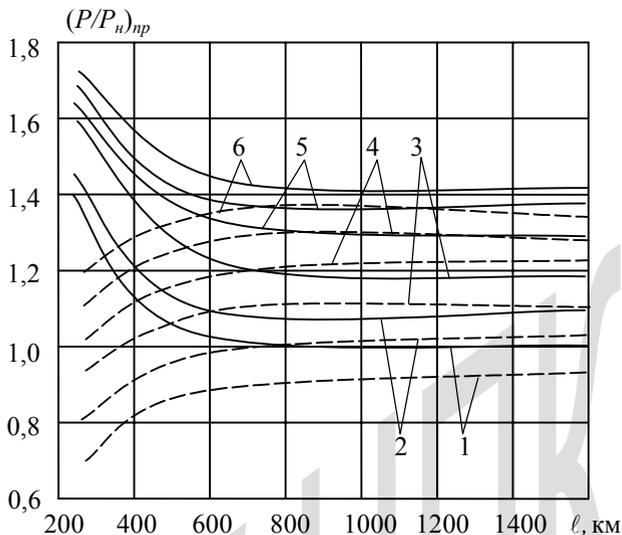


Рис. 2.13. Зависимости допустимого отношения  $P/P_H$  от длины линий класса 500 кВ при различных значениях  $\beta = -\frac{Q_p}{P_H \lambda}$ : 1 - 0; 2 - -0,2; 3 - -0,4; 4 - -0,6; 5 - -0,8; 6 - -1,0 для частоты  $f = 50$  Гц

Зависимости  $(P/P_H)_{np} = f(-\beta)$  при  $U_1/U_2=1,05$  имеют такой же характер, и при  $U_1/U_2=1$ , но все они проходят выше, чем без перепада напряжения. Таким образом управляемые шунтирующие реакторы обеспечивают передачу мощности по линиям произвольной длины, как меньше, так и больше натуральной мощности вплоть до  $1,4P_H$  при минимальном перепаде напряжения и даже без перепада напряжения.

Следует заметить, что установка шунтирующих реакторов в отдельных точках линии приводит к увеличению их мощности по сравнению с рассмотренным вариантом равномерно распределенной компенсации избыточной зарядной мощности из-за повышения напряжения на линии сверх напряжения в точке подключения реакторов. При этом необходимая для компенсации избыточной реактивной мощности участка линии длиной  $\lambda$  мощность управляемых реакторов равна

$$Q_P = 2P_n \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 \right] \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}. \quad (2.76)$$

В соответствии с формулой (2.75) линия с управляемыми реакторами представляет для генерирующего узла чисто активную нагрузку. Причем характерной особенностью такой линии является увеличение угла между векторами напряжений по ее концам пропорционально передаваемой мощности (см. формулу (2.72))

$$\delta = \lambda_{\varphi} = \lambda \frac{P}{P_n},$$

а производная передаваемой мощности по углу  $\delta$  всегда положительна независимо от длины линии

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{P_n}{\lambda}. \quad (2.77)$$

Это означает, что при любой длине линии с управляемыми реакторами режим передачи мощности устойчив. Отмечаемые в литературе возможности потери устойчивости дальних электропередач вследствие самовозбуждения или самораскачивания в рассматриваемом случае полностью исключены.

При передаче по линии мощности с  $\cos \varphi < 1$  ситуация усложняется, поскольку появляется дополнительный потребитель реактивной мощности, определяющий третий член под корнем в формуле (2.61). Поэтому условием компенсации реактивной мощности на линии в данном случае будет равенство нулю суммы второго и третьего членов под корнем

$$\left[ \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 \cdot \frac{1}{1-\beta} - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{P}{P_n} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1-\beta}} \left( \frac{P}{P_n} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1-\beta}} \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \right. \\ \left. + \sin 2\lambda \sqrt{1-\beta} \right) = 0,$$

откуда разрешая квадратное уравнение относительно  $\frac{P}{P_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta}}$

получаем

$$\frac{P}{P_n} = \sqrt{1-\beta} \cdot \frac{\sqrt{1-\cos^2\varphi \cdot \cos^2\lambda\sqrt{1-\beta}} - \sin\varphi \cdot \cos\lambda\sqrt{1-\beta}}{\sin\lambda\sqrt{1-\beta}} \cdot \cos\varphi. \quad (2.78)$$

Эта формула дает зависимость необходимой степени компенсации зарядной мощности от отношения  $P/P_n$  при произвольной длине линии

$$\beta = 1 - \left(\frac{P}{P_n}\right)^2 \cdot \frac{\sin^2\lambda\sqrt{1-\beta}}{\left(\sqrt{1-\cos^2\varphi \cdot \cos^2\lambda\sqrt{1-\beta}} - \sin\varphi \cdot \cos\lambda\sqrt{1-\beta}\right)^2 \cdot \cos^2\varphi}. \quad (2.79)$$

Структура этой формулы аналогична структуре формулы (2.71), определяющей зависимость необходимой степени компенсации  $\beta$  при  $\cos\varphi = 1$ . Однако, имеется поправочный множитель, определяемый дополнительной реактивной нагрузкой линии. Наличие  $\beta$  в обеих частях формулы (2.79) определяет необходимость вычисления  $\beta$  методом последовательных приближений. Поэтому для вычислений лучше пользоваться формулой (2.78). Результаты расчетов по этой формуле приведены на рис.2.14. Для сравнения на рис.2.14 приведена также зависимость  $\beta = 1 - \left(\frac{P}{P_n}\right)^2$ , обеспечивающая компенсацию избыточной зарядной мощности линий при  $\cos\varphi = 1$ . Как видно, при уменьшении  $\cos\varphi$  необходимая степень компенсации  $\beta$  резко снижается и тем в большей степени, чем меньше длина линии.

Реализация необходимого закона регулирования УШР ( $\beta = f(P/P_n)$ ) может быть обеспечена путем минимизации угла сдвига тока и напряжения системой управления УШР.

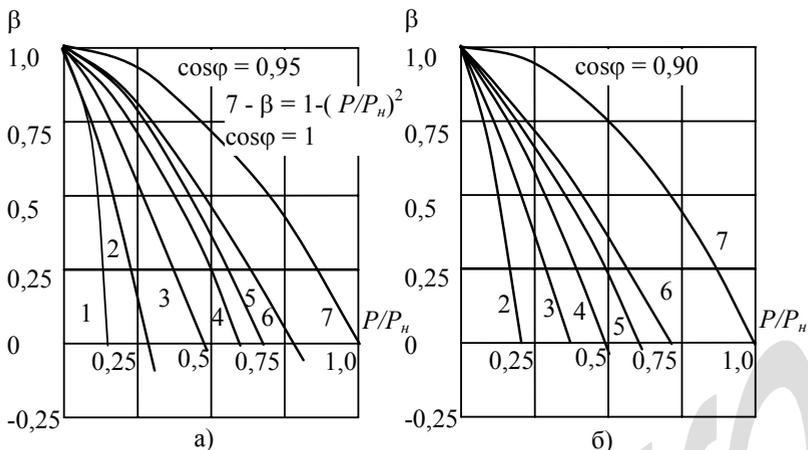


Рис.2.14. Зависимости необходимой степени компенсации зарядной мощности линии  $\beta$  от отношения  $P/P_n$  при различных волновых длинах линий  $\lambda=0,1$  рад (кривая 1), 0,2 рад (кривая 2), 0,4 рад (кривая 3), 0,6 рад (кривая 4), 0,8 рад (кривая 5) и 1 рад (кривая 6) при  $\cos\varphi=0,95$  (а) и  $\cos\varphi=0,9$  (б). Кривая 7 при  $\beta=1-(P/P_n)^2$  и  $\cos\varphi=1$

## 2.7. Передача электрической энергии по линиям с управляемыми реакторами при перепаде напряжений, меньше естественного

В большой энергосистеме может возникнуть ситуация, при которой окажется невозможным поддержание естественного перепада напряжений на каждой из длинных линий. В связи с этим необходимо выяснить возможность обеспечения режима электропередачи с перепадом напряжений, меньшим естественного при отсутствии конденсатора, подключенного к компенсационной обмотке реактора ( $0 \leq \beta \leq 1$ ).

Запишем волновое уравнение напряжений при  $\beta < 1$  и передаче чисто активной мощности. В этом случае согласно (2.55) и (2.57) перепад напряжений равен

$$\frac{U_1}{U_2} = \left\{ \cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{2\lambda \sqrt{1-\beta}} \right) + \frac{R^2}{4Z^2} \cdot (1-\beta) \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 \left[ \frac{\sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}}{1-\beta} + \frac{R^2}{4Z^2} \cdot \left[ \cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{\lambda \sqrt{1-\beta}} + \frac{\sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}}{\lambda^2 \cdot (1-\beta)} \right] \right] \right\}^{1/2}. \quad (2.80)$$

Полученное квадратное уравнение относительно отношения  $P/P_n$  разрешим при

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{1 + \frac{KR}{Z} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right)}, \quad (2.81)$$

где  $K$  - произвольное число в пределах  $(0 \leq K \leq 1)$ .

При этом получаем

$$\frac{P}{P_n} = \frac{-\frac{R}{Z} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{\lambda \sqrt{1-\beta}} \right) + \sqrt{\frac{R^2}{Z^2} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{\lambda \sqrt{1-\beta}} \right)^2 + 4 \left[ \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{KR}{Z} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right) \right] \cdot B(\lambda; \beta)}}{2 \cdot \left[ \frac{\sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}}{1-\beta} + \frac{R^2}{4Z^2} \cdot A(\lambda; \beta) \right]}, \quad (2.82)$$

где

$$B(\lambda; \beta) = \frac{\sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}}{1-\beta} + \frac{R^2}{4Z^2} A(\lambda; \beta)$$

и

$$A(\lambda; \beta) = \cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{\lambda \sqrt{1-\beta}} + \frac{\sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}}{\lambda^2 (1-\beta)}.$$

При  $\beta = 0$  и  $\lambda = \pi/2$

$$A(\lambda; \beta) = \left( \frac{2}{\pi} \right)^2, \quad B(\lambda; \beta) = 1 + \frac{R^2}{4Z^2} \cdot \left( \frac{2}{\pi} \right)^2 = 1 + \frac{R^2}{Z^2 \pi^2},$$

и отношение

$$\begin{aligned}
 \frac{P}{P_n} &= \frac{-\frac{R}{Z} + \sqrt{\left(\frac{R}{Z}\right)^2 + 4 \cdot \left(1 + \frac{KR}{Z}\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{R}{Z\pi}\right)^2\right]}}{2 \cdot \left[1 + \left(\frac{R}{Z\pi}\right)^2\right]} \approx \\
 &\approx \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{KR}{Z}\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{R}{Z\pi}\right)^2\right]} - \frac{R}{2Z}}{1 + \left(\frac{R}{Z\pi}\right)^2} \approx \frac{1 + \frac{KR}{2Z} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R}{Z\pi}\right)^2 - \frac{R}{2Z}}{1 + \left(\frac{R}{Z\pi}\right)^2} \approx 1 - \frac{R}{2Z} \cdot (1 - K).
 \end{aligned}
 \tag{2.83}$$

Как следует из последней формулы, в этом случае при естественном перепаде напряжений ( $K=1$ ) по линии можно передать натуральную мощность, а без перепада ( $K=0$ ) можно передать только меньшую мощность

$$P = \left(1 - \frac{R}{2Z}\right) \cdot P_n. \tag{2.84}$$

Совершенно иной результат получается при  $\lambda=\pi$  и  $\beta=0$ . В этом случае

$$A(\lambda; \beta) = 1, \quad B(\lambda; \beta) = \left(\frac{R}{2Z}\right)^2$$

и

$$\frac{P}{P_n} = \frac{-\frac{R}{Z} + \sqrt{\left(\frac{R}{Z}\right)^2 + \frac{KR}{Z} \cdot \frac{R^2}{Z^2}}}{\frac{R^2}{2Z^2}} = \frac{2Z}{R} \left( \sqrt{1 + \frac{KR}{Z}} - 1 \right) \approx K. \tag{2.85}$$

Это означает, что при  $K=1$  можно передать по линии натуральную мощность, а при  $K=0$  нельзя ничего передать. С одной стороны, это обстоятельство обеспечивает возможность регулирования перетоков мощности по линиям за счет изменения перепада напряжения. Но с другой стороны, это обстоятельство предъявляет очень жесткие требования к режиму напряжений в связываемых длинной линией энергосистемах.

Отмеченная критическая волновая длина линии может быть искусственно сокращена путем регулирования мощности управляемых реакторов.

На рис.2.15 приведены зависимости отношения  $P/P_n$  от степени компенсации  $\beta$  при различных волновых длинах линий  $\lambda$ . Как видно, при волновых длинах линий в диапазоне  $0,5\pi < \lambda < 0,75\pi$  увеличение  $\beta$  приводит к уменьшению отношения  $P/P_n$  из-за увеличения эквивалентного волнового сопротивления. Однако, при  $\lambda=0,9\pi$  искусственное уменьшение эквивалентной волновой длины линии приводит к повторному увеличению передаваемой мощности, максимум которой достигается при  $\beta \approx 0,20$ . При  $\lambda=\pi$  рад максимальная передаваемая мощность увеличивается с нуля до  $0,75P_n$  при  $\beta \approx 0,3$ . И чем больше волновая длина линии, тем больше снижается максимум передаваемой мощности по сравнению с натуральной мощностью линии, и при  $\lambda>1,13$  рад он становится меньше, чем при  $\beta=0$ .

Таким образом, линии электропередачи с управляемыми реакторами обладают замечательным свойством: способностью передавать мощность, близкую к натуральной, без перепада напряжения за счет искусственного сокращения эквивалентной длины линии. Тем не менее следует иметь в виду, что при этом ограничивается пропускная способность линии из-за увеличения ее эквивалентного волнового сопротивления. Поэтому использовать эту возможность следует только в крайних случаях, когда нет другого способа обеспечить режим напряжения в энергосистеме.

## **2.8. Режим работы линий при передаче мощности сверх натуральной**

При передаче мощности сверх натуральной мощности линии потребляется реактивная мощность (см.формулу (2.30)). Более точные соотношения для потребляемой линией реактивной мощности получаются при учете реального распределения напряжения вдоль линии. Если на приемном конце линии поддерживается номинальное напряжение

формулы для потребляемой реактивной мощности на отправном ( $Q_1$ ) и приемном ( $Q_2$ ) конце линии имеют вид [4]

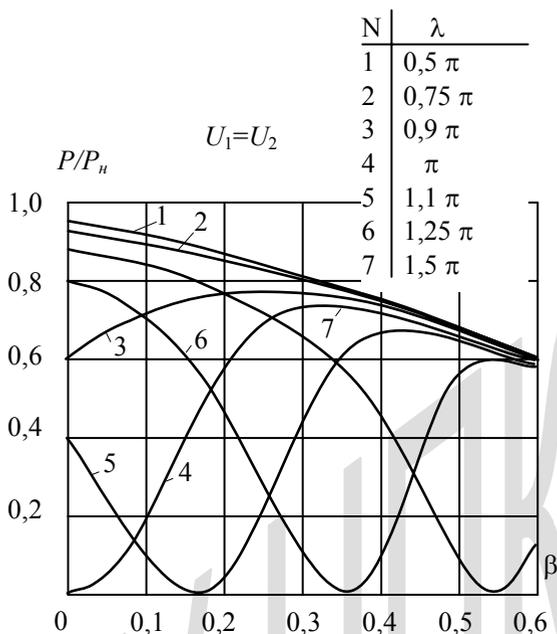


Рис.2.15. Зависимости отношения максимальной передаваемой мощности к натуральной мощности линии 1150 кВ от степени компенсации ее зарядной мощности УШРТ при равенстве напряжений по концам линии разной волновой длины  $\lambda=0,5\pi$  рад (1);  $0,75\pi$  рад (2);  $0,9\pi$  рад (3);  $\pi$  рад (4);  $1,1\pi$  рад (5);  $1,25\pi$  рад (6);  $1,5\pi$  рад (7).

$$Q_1 = P_n \left\{ \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 \operatorname{ctg} \lambda - \sqrt{\left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 \frac{1}{\sin^2 \lambda} - \left( \frac{P}{P_n} \right)^2} \right\}, \quad (2.86)$$

$$Q_2 = P_n \left\{ \sqrt{\left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 \frac{1}{\sin^2 \lambda} - \left( \frac{P}{P_n} \right)^2} - \operatorname{ctg} \lambda \right\}. \quad (2.87)$$

Следовательно, такой режим электропередачи возможен только в том случае, если на обоих концах линии имеются источники реактивной мощности ИРМ, отвечающие формулам (2.86) и (2.87). При этом ток в конце линии равен

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_в} \left( \frac{P}{P_n} - j \cdot \frac{Q_2}{P_n} \right)$$

и согласно (2.27) при пренебрежении активным сопротивлением линии

$$\begin{aligned} \frac{\dot{U}_x}{U} &= \cos \lambda_x + j \cdot \left( \frac{P}{P_n} - j \cdot \frac{Q_2}{P_n} \right) \cdot \sin \lambda_x = \\ &= \cos \lambda_x + \frac{Q_2}{P_n} \cdot \sin \lambda_x + j \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \sin \lambda_x = \\ &= \cos \lambda_x + \left[ \sqrt{\left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^2 \lambda} - \left( \frac{P}{P_n} \right)^2} - \operatorname{ctg} \lambda \right] \cdot \sin \lambda_x + j \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \sin \lambda_x. \quad (2.88) \end{aligned}$$

При равенстве напряжений по концам линии экстремальное значение напряжения соответствует середине линии ( $\lambda_x = \lambda/2$ ). При этом

$$\frac{\dot{U}_{\lambda/2}}{U_2} = \cos \frac{\lambda}{2} + \left[ \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \lambda} - \left( \frac{P}{P_n} \right)^2} - \operatorname{ctg} \lambda \right] \cdot \sin \frac{\lambda}{2} + j \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \sin \frac{\lambda}{2}. \quad (2.89)$$

Отношение модулей напряжений в середине линии и по концам равно

$$\begin{aligned}
\frac{U_{\frac{1}{2}}}{U_2} &= \left\{ \cos^2 \cdot \frac{\lambda}{2} + \sin \lambda \cdot \left[ \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \lambda} - \left(\frac{P}{P_H}\right)^2} - \operatorname{ctg} \lambda \right] + \right. \\
&+ \left[ \operatorname{ctg}^2 \lambda - 2 \operatorname{ctg} \lambda \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \lambda} - \left(\frac{P}{P_H}\right)^2} + \frac{1}{\sin^2 \lambda} - \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \right] \cdot \sin^2 \frac{\lambda}{2} + \\
&+ \left. \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \cdot \sin^2 \frac{\lambda}{2} \right\}^{\frac{1}{2}} = \\
&= \left\{ \cos^2 \frac{\lambda}{2} - \cos \lambda + \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \cdot \sin^2 \lambda} + \frac{\cos^2 \lambda}{4 \cdot \cos^2 \frac{\lambda}{2}} - \right. \\
&- \left. \frac{\cos \lambda}{2 \cos^2 \frac{\lambda}{2}} \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \cdot \sin^2 \lambda} + \frac{1}{4 \cdot \cos^2 \frac{\lambda}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} = \\
&= \left\{ \frac{1}{2 \cos^2 \frac{\lambda}{2}} + \left(1 - \frac{\cos \lambda}{2 \cos^2 \frac{\lambda}{2}}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \sin^2 \lambda} \right\}^{\frac{1}{2}} = \\
&= \frac{1}{\sqrt{2} \cos \frac{\lambda}{2}} \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \sin^2 \lambda} \right\}^{\frac{1}{2}}. \tag{2.90}
\end{aligned}$$

Возводя в квадрат обе стороны полученного уравнения и разрешая его относительно отношения  $P/P_H$ , получаем

$$\left(\frac{P}{P_H}\right)_{\max} = \frac{1}{\sin \lambda} \sqrt{1 - \left[ 2 \cos^2 \cdot \frac{\lambda}{2} \left(\frac{U_{\frac{1}{2}}}{U_2}\right)^2 - 1 \right]^2}. \tag{2.91}$$

Задавая допустимое снижение напряжения в середине линии, получаем предельную передаваемую мощность в этих условиях. Результаты расчетов по формуле (2.91) приведены в табл.2.4.

Таблица 2.4

$\lambda$ , рад	$U_{l/2}/U_2$	$(P/P_n)_{\max}$	$Q/P_n$	$Q/P_{\max}$	$\Delta P/\Delta P_a$	$(P/P_n)_{np}$
0,314	1	1	0	0	1	
	0,95	2,1	1,21	0,58	1,11	3,2
	0,90	2,62	2,35	0,90	1,24	
0,628	1	1	0	0	1	
	0,95	1,3	0,6	0,46	1,12	1,7
	0,90	1,5	1,16	0,77	1,23	

Как видно из таблицы 2.4, при увеличении длины линии допустимая передаваемая мощность уменьшается, а при увеличении допустимого снижения напряжения в середине линии - увеличивается. Суммарная мощность ИРМ, отнесенная к  $P_n$ , на обоих концах электропередачи для обеспечения такого режима согласно формулам (2.86), (2.87) также приведена в табл.2.4.

Как видно, для обеспечения режима электропередачи сверх натуральной мощности требуются достаточно мощные ИРМ по концам линий. Более рационально повысить натуральную мощность линии и передавать электроэнергию без установки ИРМ.

Оценим потери мощности в этих режимах. Согласно [4] отношение полных потерь в линии от активного и реактивного токов при равенстве напряжений по концам линии равно

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_a} = \left( \frac{P_n}{P_2} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^2 \lambda} \cdot \left[ 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} - \left( \cos \lambda + \frac{\sin \lambda}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{P_2}{P_n} \right)^2 \sin^2 \lambda} \right) \right] + \frac{1}{2} \cdot \frac{P_n}{P_2} \cdot \frac{R_0}{X_0} \cdot \left( \lambda + \frac{\sin^2 \lambda}{\lambda} \right). \quad (2.92)$$

Таким образом, при передаче мощности сверх натуральной значительно увеличиваются потери на нагрев проводов за счет реактивной составляющей тока (см.табл.2.4). Этот неблагоприятный факт также необходимо принимать во внимание при выборе параметров линии. Он также свидетельствует в пользу увеличения натуральной мощности линии при необходимости передачи по линии мощности, сверх натуральной мощности обычных линий.

Необходимо отметить, что передаваемая по линии мощность сверх натуральной ограничивается не только из-за снижения напряжения посередине линии и увеличения потерь мощности. Ограничивающим фактором является также перепад напряжения, о чем свидетельствует обращение в нуль квадратного корня в формуле (2.88), откуда следует

$$\left(\frac{P_2}{P_n}\right)_{np} = \frac{1}{\sin \lambda} \left(\frac{U_1}{U_2}\right). \quad (2.93)$$

Эти величины также приведены в табл.2.4 при  $U_1/U_2 = 1$ . Выше этих значений передача мощности невозможна. Увеличение отношения  $U_1/U_2$  мало влияет на предельную передаваемую мощность.

## 2.9. Неполнофазные режимы работы линий электропередачи

При аварийном отключении одной из фаз линий электропередачи (участка линии между двумя подстанциями (переключательными пунктами) на длинных линиях) возникает неполнофазный режим передачи мощности - по двум неповрежденным фазам. Необходимость ведения такого неполнофазного режима может возникнуть для обеспечения ремонтных работ на одной из фаз линии. В связи с этим целесообразно проанализировать такой режим с целью выяснения возможных его последствий и пропускной способности линий в неполнофазном режиме. При этом будем исходить из симметричной системы напряжений на отправном конце линии при передаче по линии активной мощности.

В этом случае схема электропередачи имеет вид, изображенный на рис.2.15, а, а вектора токов в фазах  $I_1$  и  $I_2$  расположены под углом  $120^\circ$ . Эти токи стекают в нейтраль трансформатора на приемном конце линии, причем их сумма

$$\dot{I}_{1,П} + \dot{I}_{2,П} = \dot{I}_{\Sigma,П} \quad (2.94)$$

равна по величине каждому из фазных токов. Этот суммарный ток течет по земле к источнику напряжения, образуя симметричную звезду с фазными токами (см. рис.2.16, в)

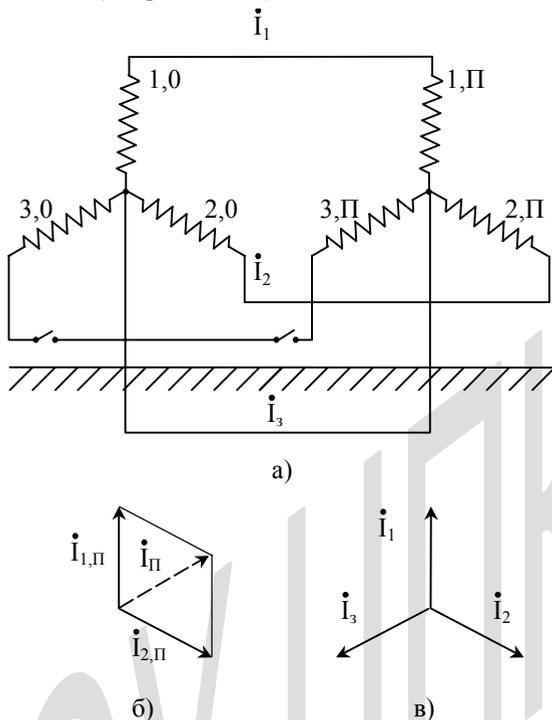


Рис.2.16. Схема (а) и векторные диаграммы токов линии при отключении одной фазы: б – на приемном конце линии, в – на линии

Эквивалентная глубина возврата суммарного тока (расстояние от провода с током до положения эквивалентного обратного провода в земле в метрах) определяется формулой [6, 7]

$$H_3 = \frac{2,085}{\sqrt{10f \cdot g}}, \quad (2.95)$$

где  $f$  - промышленная частота,  $g$  - удельная проводимость земли.

При сырой земле  $H_3 \approx 935$  м. Обычно при расчетах принимается  $H_3 \approx 1000$  м.

Индуктивность фазного провода длиной  $\ell$  с эквивалентным радиусом  $r_3$  определяется формулой

$$L \cdot \ell = \frac{\mu_0 \cdot \ell}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{2\ell}{r_3} - 1 \right), \quad (2.96)$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м),  $r_3$  - эквивалентный радиус расщепленного провода фазы, (см. формулу (1.1)).

Взаимная индуктивность проводов двух неповрежденных фаз равна

$$M_{1-2} \cdot \ell = \frac{\mu_0 \cdot \ell}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{2\ell}{D} - 1 \right), \quad (2.97)$$

где  $D$  - расстояние между неповрежденными фазами.

Взаимная индуктивность провода неповрежденной фазы и эквивалентного обратного провода в земле равна

$$M_{1-3} \cdot \ell = \frac{\mu_0 \cdot \ell}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{2\ell}{H_3} - 1 \right). \quad (2.98)$$

С учетом векторной диаграммы токов рис.2.16 падение напряжения на участке проводов неповрежденных фаз длиной  $\ell$  равны ( $R_0$ -погонное активное сопротивление)

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= (R_0 + j \cdot \omega \cdot L) \cdot \ell \cdot \dot{I}_1 + j \cdot \omega \cdot M_{12} \cdot \ell \cdot \dot{I}_2 + j \cdot \omega \cdot M_{13} \cdot \ell \cdot \dot{I}_3 = \\ &= \left\{ R_0 + j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left[ \ln \frac{2\ell}{r_3} - 1 - \left( \frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \left( \ln \frac{2\ell}{D} - 1 \right) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \left( \frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \left( \ln \frac{2\ell}{H_3} - 1 \right) \right] \right\} \cdot I_1 \cdot \ell = \\ &= \left[ R_0 + j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{\sqrt{D \cdot H_3}}{r_3} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \frac{H_3}{D} \right) \right] \cdot I_1 \cdot \ell = \\ &= \left[ R_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{H_3}{D} + j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{\sqrt{D \cdot H_3}}{r_3} \right] \cdot I_1 \cdot \ell, \quad (2.99) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta U_2 &= (R_0 + j \cdot \omega \cdot L) \cdot \ell \cdot \dot{I}_2 + j \cdot \omega \cdot M_{13} \cdot \ell \cdot \dot{I}_3 + j \cdot \omega \cdot M_{21} \cdot \ell \cdot \dot{I}_1 = \\
 &= \left\{ R_0 + j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left[ \ln \frac{2\ell}{r_3} - 1 - \left( \frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \left( \ln \frac{2\ell}{H_3} - 1 \right) - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \left( \frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \left( \ln \frac{2\ell}{D} - 1 \right) \right] \right\} \cdot I_2 \cdot \ell = \\
 &= \left[ R_0 + j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{\sqrt{D \cdot H_3}}{r_3} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \frac{H_3}{D} \right) \right] \cdot I_2 \cdot \ell = \\
 &= \left[ R_0 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{H_3}{D} + j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{\sqrt{D \cdot H_3}}{r_3} \right] \cdot I_2 \cdot \ell. \quad (2.100)
 \end{aligned}$$

В последних выражениях для падений напряжения в неповрежденных фазах содержатся добавочные вещественные члены кроме физического активного сопротивления  $R_0$ . Эти члены противоположного знака в формулах (2.99) и (2.100), т. е. в сумме добавочное активное сопротивление в линии отсутствует. В опережающей фазе добавочное активное сопротивление положительно, а в отстающей - отрицательное. Это означает, что в опережающей фазе имеются дополнительные потери напряжения, а в отстающей - напротив: приращение, т. е. происходит обмен энергией между фазами. Сопоставим добавочные активные сопротивления линии в неполнофазном режиме с активным сопротивлением проводов и индуктивным сопротивлением линии

$$\begin{aligned}
 \Delta R_1 &= -\Delta R_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot \ell}{2\pi} \cdot \ln \frac{H_3}{D} = \\
 &= 2\pi \cdot f \cdot \ell \cdot \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{H_3}{D} = 1,088 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot \ell \cdot \ln \frac{H_3}{D}. \quad (2.101)
 \end{aligned}$$

Применительно к линии 500 кВ с расстоянием между фазами 12 м, при частоте 50 Гц

$$\Delta R_1 = -\Delta R_2 = 5,44 \cdot 10^{-5} \cdot \ell \cdot \ln \frac{1000}{12} = 0,241 \cdot 10^{-3} \cdot \ell.$$

Активное сопротивление проводов этой линии с тремя проводами АС 300/39 в фазе равно:

$$R_0 = \frac{\rho \cdot \ell}{F_a} = \frac{28,3 \cdot 10^{-3} \cdot \ell}{3 \cdot 300} = 0,031 \cdot 10^{-3} \cdot \ell, \text{ Ом.}$$

Следовательно, отношение

$$\frac{\Delta R_1}{R_0} = \frac{0,241}{0,031} = 7,65.$$

Т.е., добавочное активное сопротивление почти на порядок больше погонного активного сопротивления проводов.

Мнимые члены в формулах (2.99), (2.100) определяют индуктивные сопротивления линии в двухфазном режиме:

$$X_1 = X_2 = \omega \cdot \ell \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{\sqrt{D \cdot H_3}}{r_3} \quad (2.102)$$

или погонные индуктивности фаз:

$$L_1 = L_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{\sqrt{D \cdot H_3}}{r_3}. \quad (2.103)$$

Для рассматриваемой линии 500 кВ

$$X_1 = X_2 = 314 \cdot \ell \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{\sqrt{12 \cdot 1000}}{0,13} = 0,426 \cdot 10^{-3} \cdot \ell.$$

Т.е., добавочные активные сопротивления в неповрежденных фазах (положительное и отрицательное) сравнимы с погонным индуктивным сопротивлением линии

$$\frac{\Delta R_1}{X_1} = \frac{\Delta R_2}{X_2} = \frac{0,241}{0,426} = 0,557.$$

При наличии грозозащитных тросов на линии часть обратного тока течет по тросам. Взаимная индуктивность между проводом неповрежденной фазы и каждым из двух тросов определяется формулой:

$$M_{1-T} \ell = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left( \ln \frac{2\ell}{D_{П-Т}} - 1 \right), \quad (2.104)$$

где:  $D_{П-Т}$  – расстояние между проводом и тросом.

Индуктивность контура провод-трос равна:

$$L_{П-Т} = (L_n - M_{П-Т}) \ell = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \ln \frac{D_{П.Т.1}}{r_3} \quad (2.105)$$

Для рассматриваемой линии 500 кВ расстояние от крайней фазы

до ближнего провода составляет около  $D_{П.Т.1}=12$  м, а от провода до дальнего троса  $D_{П.Т.2}=20$  м. При этих данных

$$L_{П-Т.1} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \ln \frac{12}{0,13} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} 4,56,$$

$$L_{П-Т.2} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \ln \frac{20}{0,13} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} 5,07,$$

тогда как для контура провод - обратный ток в земле

$$L_{П-З} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \ln \frac{1000}{0,13} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} 9,$$

т.е примерно вдвое больше.

Поэтому ток распределяется практически поровну на три части: в земле и в двух тросах.

Падение напряжения на участке линии длиной  $\ell$  равно: на опережающей фазе

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= (R_0 + j\omega L)\ell \dot{I}_1 + j\omega M_{12}\ell \dot{I}_2 + \frac{1}{3}j\omega \ell \dot{I}_3(M_{13} + M_{1Т.1} + M_{1Т.2}) = \\ &= \left[ R_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt[3]{H_3 \cdot D_{П.Т.1} \cdot D_{П.Т.2}}}{D} + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{D^3 \sqrt[3]{H_3 \cdot D_{П.Т.1} \cdot D_{П.Т.2}}}}{r_g} \right] I_1 \ell \end{aligned} \quad (2.106)$$

и на отстающей фазе

$$\begin{aligned} \Delta U_2 &= (R_0 + j\omega L)\ell \dot{I}_2 + j\omega M_{21}\ell \dot{I}_1 + \frac{1}{3}j\omega \ell \dot{I}_3(M_{23} + M_{2Т.1} + M_{2Т.2}) = \\ &= \left[ R_0 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt[3]{H_3 \cdot D_{П.Т.1} \cdot D_{П.Т.2}}}{D} + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{D^3 \sqrt[3]{H_3 \cdot D_{П.Т.1} \cdot D_{П.Т.2}}}}{r_g} \right] I_2 \ell \end{aligned} \quad (2.107)$$

Следовательно дополнительное активное сопротивление проводов в двухфазном режиме линии 500 кВ с двумя тросами равно:

$$\begin{aligned} \Delta R &= \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\omega \mu_0 \ell}{2\pi} \ln \frac{\sqrt[3]{H_3 \cdot D_{П.Т.1} \cdot D_{П.Т.2}}}{D} = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\omega \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \ln \frac{\sqrt[3]{1000 \cdot 12 \cdot 20}}{12} = 0,09 \cdot 10^{-3} \ell. \end{aligned}$$

Оно втрое превышает погонное активное сопротивление проводов,

но также втрое меньше, чем на линии без тросов.

Индуктивные сопротивления фаз линии с двумя тросами в неполнофазном режиме согласно (2.106), (2.107) равны:

$$X_1 = X_2 = \omega \ell \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{D^3 \sqrt{H_3} \cdot D_{П.Т.1} \cdot D_{П.Т.2}}}{r_3} \quad (2.108)$$

Для рассматриваемой линии 500 кВ

$$X_1 = X_2 = \omega \ell 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{\sqrt{12^3 \sqrt{1000} \cdot 12 \cdot 20}}{0,13} = 0,338 \cdot 10^{-3}, \text{ Ом/м,}$$

что немного превосходит погонное индуктивное сопротивление линии в трехфазном режиме.

Рабочие емкости неповрежденных фаз определяются из решения потенциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \alpha_{11} \cdot \dot{q}_1 + \alpha_{12} \cdot \dot{q}_2 = U_1 \\ \dot{U}_2 &= \alpha_{11} \cdot \dot{q}_1 + \alpha_{22} \cdot \dot{q}_2 = U_1 \cdot \left( -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (2.109)$$

где собственные потенциальные коэффициенты:

$$\alpha_{11} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{2H_{Э.1}}{r_3}; \quad \alpha_{22} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{2H_{Э.2}}{r_3}, \quad (2.110)$$

причем  $H_{Э.1}$  и  $H_{Э.2}$  – это эквивалентные высоты подвески проводов.

Взаимный потенциальный коэффициент в общем случае равен:

$$\alpha_{12} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \sqrt{1 + \left( \frac{H_{Э.1} + H_{Э.2}}{D} \right)^2} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \sqrt{1 + \left( \frac{2H_{Э.1.2}}{D} \right)^2}, \quad (2.111)$$

где:  $D$  - расстояние между осями проводов неповрежденных фаз,  
 $H_{Э.1.2} = 0,5(H_{Э.1} + H_{Э.2})$ .

Разрешая систему уравнений (2.109) относительно заряда опережающей фазы, получаем

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 &= U_1 \cdot \frac{\alpha_{22} + \alpha_{12} \cdot \left( \frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right)}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2} = \\ &= U_1 \cdot \left[ \frac{\alpha_{22} + \frac{1}{2} \alpha_{12}}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2} \right]. \end{aligned} \quad (2.112)$$

Аналогично из системы уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \alpha_{11} \cdot \dot{q}_1 + \alpha_{12} \cdot \dot{q}_2 = U_2 \cdot \left( -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ \dot{U}_2 &= \alpha_{21} \cdot \dot{q}_1 + \alpha_{22} \cdot \dot{q}_2 = U_2 \end{aligned} \quad (2.113)$$

получаем заряд:

$$\begin{aligned} \dot{q}_2 &= U_2 \cdot \frac{\alpha_{11} + \alpha_{12} \cdot \left( \frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right)}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2} = \\ &= U_2 \cdot \left[ \frac{\alpha_{11} + \frac{1}{2} \alpha_{12}}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2} \right]. \end{aligned} \quad (2.114)$$

Вещественные части полученных выражений для зарядов (2.112) и (2.113) определяют рабочие емкости фаз в двухфазном режиме

$$C_1 = \frac{Re \cdot \dot{q}_1}{U_1} = \frac{\alpha_{22} + \frac{1}{2} \cdot \alpha_{12}}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2} = \frac{1}{\alpha_{11}} \cdot \frac{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{22}}}{1 - \frac{\alpha_{12}^2}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22}}}; \quad (2.115)$$

$$C_2 = \frac{Re \cdot \dot{q}_2}{U_2} = \frac{\alpha_{11} + \frac{1}{2} \cdot \alpha_{12}}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2} = \frac{1}{\alpha_{22}} \cdot \frac{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}}}{1 - \frac{\alpha_{12}^2}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22}}}. \quad (2.116)$$

При равенстве высот подвески проводов рабочие емкости неповрежденных фаз

$$C_1 = C_2 = \frac{\alpha_{11} + \frac{1}{2} \cdot \alpha_{12}}{\alpha_{11}^2 - \alpha_{12}^2} = \frac{\alpha_{22} + \frac{1}{2} \cdot \alpha_{12}}{(\alpha_{11} - \alpha_{12}) \cdot (\alpha_{11} + \alpha_{12})} =$$

$$= 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{\ln \frac{2H_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}} \cdot \sqrt[4]{1 + \left(\frac{2H_{\text{Э}}}{D}\right)^2}}{\ln \frac{2H_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}} \sqrt{1 + \left(\frac{2H_{\text{Э}}}{D}\right)^2} \cdot \ln \frac{2H_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2H_{\text{Э}}}{D}\right)^2}}} \quad (2.117)$$

Мнимые части решений (2.114), (2.115) для зарядов определяют активные проводимости неповрежденных фаз

$$g_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\omega \cdot \alpha_{12}}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2} = -g_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2H_{\text{Э}}}{D}\right)^2}}{\ln \frac{2H_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}} \sqrt{1 + \left(\frac{2H_{\text{Э}}}{D}\right)^2} \cdot \ln \frac{2H_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2H_{\text{Э}}}{D}\right)^2}}} \quad (2.118)$$

Соответствующие токи проводимости равны:

$$I_{np.1} = g_1 \cdot U_1 \quad \text{и} \quad I_{np.2} = g_2 \cdot U_2, \quad (2.119)$$

и находятся в фазе ( $I_2$ ) и в противофазе ( $I_1$ ) с напряжением.

Поэтому в фазе 1 теряется часть мощности, которая передается фазе 2 и возвращается источнику напряжения.

Волновое сопротивление линии с одинаковым расстоянием фаз до земли в двухфазном режиме линии без тросов:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{\mu_0}}{\sqrt{\varepsilon_0}} \cdot \frac{\ln \frac{\sqrt{D \cdot H_{\text{Э}}}}{r_{\text{Э}}} \cdot \ln \frac{2H_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2H_{\text{Э}}}{D}\right)^2} \cdot \ln \frac{2H_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2H_{\text{Э}}}{D}\right)^2}}}{\ln \frac{2H_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}} \cdot \sqrt[4]{1 + \left(\frac{2H_{\text{Э}}}{D}\right)^2}} \quad (2.120)$$

Скорость распространения электромагнитной волны вдоль линии:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{\ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2} \cdot \ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2}}}{\ln \frac{\sqrt{D \cdot H_3}}{r_3} \cdot \ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2}}} \quad (2.121)$$

Волновая длина линии:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot \ell}{v} = \omega \cdot \ell \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0} \cdot \sqrt{\frac{\ln \frac{\sqrt{D \cdot H_3}}{r_3} \cdot \ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2}}{\ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2} \cdot \ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2}}} \quad (2.122)$$

При двух грозозащитных тросах на линии:

Волновое сопротивление линии согласно (2.108), (2.116)

$$z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{\ln \frac{\sqrt{D^2 H_3 \cdot D_{ПТ.1} \cdot D_{ПТ.2}}}{r_3} \cdot \ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2} \cdot \ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2}}}{\ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2}}} \quad (2.123)$$

Скорость распространения электромагнитной волны вдоль линии:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{\ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2} \cdot \ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2}}}{\ln \frac{\sqrt{D^2 H_3 \cdot D_{ПТ.1} \cdot D_{ПТ.2}}}{r_3} \cdot \ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2}}} \quad (2.124)$$

Волновая длина линии:

$$\lambda = \omega \cdot \ell \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0} \cdot \sqrt{\frac{\ln \frac{\sqrt{D^2 H_3 \cdot D_{ПТ.1} \cdot D_{ПТ.2}}}{r_3} \cdot \ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2}}{\ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2} \cdot \ln \frac{2H_3}{r_3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2H_3}{D}\right)^2}}} \quad (2.125)$$

Оценим волновые параметры рассматриваемой линии 500 кВ с двумя тросами в двухфазном режиме:

$$Z = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{(4\pi)^2 \cdot 9 \cdot 10^2} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{\ln \frac{\sqrt{12^2 \cdot 1000 \cdot 12 \cdot 20}}{0,13} \cdot \ln \frac{2 \cdot 13}{0,13} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 13}{12}\right)^2} \cdot \ln \frac{2 \cdot 13}{0,13} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 13}{12}\right)^2}}}{\ln \frac{2 \cdot 13}{0,13} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 13}{12}\right)^2}}} = 305,5 \text{ Ом};$$

$$v = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}{4\pi \cdot 10^{-7}}} \cdot \sqrt{\frac{\ln \frac{2 \cdot 13}{0,13} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 13}{12}\right)^2} \cdot \ln \frac{2 \cdot 13}{0,13} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 13}{12}\right)^2}}}{\ln \frac{\sqrt{12^2 \cdot 1000 \cdot 12 \cdot 20}}{0,13} \cdot \ln \frac{2 \cdot 13}{0,13} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 13}{12}\right)^2}}} =$$

$$= 2,83 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 2,83 \cdot 10^5 \text{ м/с};$$

$$\lambda = \frac{\omega \cdot \ell}{2,83 \cdot 10^8} = 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot \ell = 1,11 \cdot 10^{-3} \cdot \ell (\text{км}).$$

Для трехфазной линии 500 кВ с теми же проводами:  $Z=277 \text{ Ом}$ ;  
 $v=2,95 \cdot 10^5 \text{ км/с}$ ;  $\lambda=1,05 \cdot 10^{-3} \cdot \ell (\text{км})$ .

Следовательно волновое сопротивление линии 500 кВ в двухфазном режиме в 1,1 раза больше, чем в трехфазном; скорость распространения электромагнитной волны меньше на 5%, а волновая длина линии больше на 5%.

Принимая пропускную способность длинной линии в двухфазном режиме равной натуральной мощности, получаем

$$P_{н.нел} = \frac{2U_{ном}^2}{Z} = \frac{2 \cdot 500^2 \cdot 10^6}{305,5} = 545,15 \text{ МВт}$$

против 900 МВт в трехфазном режиме. Следовательно в двухфазном режиме пропускная способность длинной линии составляет примерно 0,61 натуральной мощности трехфазного режима линии.

Для относительно короткой линии ( $\ell \leq 300 \text{ км}$ ) снижение натуральной мощности не ограничивает её пропускную способность, которая в данном случае определяется сечением проводов. В двухфазном режиме пропускная способность такой линии составляет 2/3 пропускной

способности трехфазного режима.

Выполним анализ влияния добавочного активного сопротивления в неповрежденных фазах с использованием волнового уравнения для напряжений (2.29, а). Если активное сопротивление проводов  $R_0=0,031\ell$ , то суммарное сопротивление неповрежденных фаз:  $\Sigma R_1=0,121\ell$  Ом;  $\Sigma R_2=0,059\ell$  Ом, где  $\ell$  в километрах. В итоге получаем отношения напряжений отправного и приемного концов неповрежденных фаз линии:

$$\frac{U_{1.0}}{U_{1.П}} = \sqrt{1 + \left[ \left( \frac{P}{P_{н.неп.}} \right)^2 - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda + \frac{P}{P_{н.неп.}} \frac{0,121\ell}{305,5} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right)}; \quad (2.126)$$

$$\frac{U_{2.0}}{U_{2.П}} = \sqrt{1 + \left[ \left( \frac{P}{P_{н.неп.}} \right)^2 - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda - \frac{P}{P_{н.неп.}} \frac{0,059\ell}{305,5} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right)}. \quad (2.127)$$

При передаче натуральной мощности в двухфазном режиме ( $P/P_{н.неп.}=1$ ), эти соотношения принимают вид:

$$\frac{U_{1.0}}{U_{1.П}} = \sqrt{1 + 0,40 \cdot 10^{-3} \cdot \ell \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right)}; \quad (2.128)$$

$$\frac{U_{2.0}}{U_{2.П}} = \sqrt{1 - 0,19 \cdot 10^{-3} \cdot \ell \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right)}. \quad (2.129)$$

Результаты расчета по формулам (2.128), (2.129) приведены в табл.1.2.1 (строки 3 и 4).

Таблица 2.5

1	$\ell$ , км	100	200	300	400	500	600
2	$\lambda$ , рад	0,115	0,230	0,345	0,46	0,576	0,691
3	$U_{1.П}/U_{1.0}$	0,96	0,93	0,90	0,88	0,86	0,84
4	$U_{2.П}/U_{2.0}$	1,02	1,04	1,06	1,08	1,10	1,11
5	$U_{1.П}/U_{1.0}$	0,96	0,93	0,90	0,90	0,90	0,90
6	$\beta$	0	0	0	-0,31	-0,39	-0,45
7	$U_{2.П}/U_{2.0}$	1,02	1,04	1,05	1,05	1,05	1,05
8	$\beta$	1,0	1,0	0,12	0,25	0,30	0,25

Двухфазный режим следует относить к аварийному, допуская снижение напряжения на приемном конце линии до  $0,9 U_{ф.н.}$ . Предполагая, что на отправном конце линии напряжение поддерживается на уровне номинального, можно допустить повышение напряжения на отстающей фазе до  $1,05 U_{ф.н.}$ . Тогда на участке до 300 км двухфазный режим линии

возможен без каких-либо специальных мероприятий. При длине участка линии свыше 300 км УШР должны регулировать мощность в индуктивном диапазоне для отстающей фазы ( $\beta > 0$ ) и в емкостном диапазоне ( $\beta < 0$ ) для опережающей фазы.

Необходимая степень компенсации зарядной мощности линии может быть определена исходя из волнового уравнения линии (2.57) при  $P/P_H = 1$ :

для определяющей фазы

$$\frac{U_{1.0}}{U_{1.П}} \approx \sqrt{\cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{\sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}}{1-\beta} + \frac{R_0 \ell + \Delta R_1}{z} \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{2\lambda \sqrt{1-\beta}} \right)} =$$

и

$$= \sqrt{\cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{\sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}}{1-\beta} + \frac{\ell}{z} \left[ R_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{2\lambda \sqrt{1-\beta}} \right) \right]}, \quad (2.130)$$

для отстающей фазы

$$\frac{U_{2.0}}{U_{2.П}} \approx \sqrt{\cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \frac{\sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}}{1-\beta} + \frac{\ell}{z} \left[ R_0 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta}}{2\lambda \sqrt{1-\beta}} \right) \right]}, \quad (2.131)$$

Результаты расчетов по (2.130), (2.131) методом подбора величин  $\beta$  приведены в табл.1.2.1 (6-ая и 8-ая строки). Очевидно, что достаточно относительно небольшой степени поперечной компенсации чтобы обеспечить приемлемый уровень напряжений в двухфазном режиме линии.

При проектировании линии с учетом двухфазного режима необходимо допускать возможность протекания обратного тока по тросам, а также учитывать плотность тока по условию ограничения нагрева проводов.

Далее оценим относительную величину тока активной проводимости согласно (2.118), (2.119), приняв за базисную величину натуральный ток линии:

$$\frac{I_{\text{ПР.1}}}{I_H} = \frac{g \cdot U_\phi}{U_\phi} \cdot Z = g \cdot Z = \frac{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega \cdot Z \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2H_{\text{Э.1,2}}}{D}\right)^2}}{\ln \frac{2H_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2H_{\text{Э.1,2}}}{D}\right)^2} \cdot \ln \frac{2H_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}} \frac{1}{\ln \sqrt{1 + \left(\frac{2H_{\text{Э.1,2}}}{D}\right)^2}}} \quad (2.132)$$

Подставляя в полученное выражение параметры рассматриваемой линии 500 кВ, получаем:

$$\frac{I_{\text{ПР.1}}}{I_H} = \frac{\sqrt{3} \cdot 314 \cdot 305,5 \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 13}{12}\right)^2}}{4 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot \ln \frac{2 \cdot 13}{0,13} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 13}{12}\right)^2} \cdot \ln \frac{2 \cdot 13}{0,13} \frac{1}{\ln \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 13}{12}\right)^2}}} =$$

$$= 0,146 \cdot 10^{-6} \cdot \ell = 0,146 \cdot 10^{-3} \cdot \ell (\text{км}).$$

При  $\ell=100$  км  $I_{\text{пр.1}}/I_H=0,015$ ; при  $\ell=1000$  км  $I_{\text{пр.1}}/I_H=0,15$ .

Результаты расчетов показывают, что активный ток проводимости в двухфазном режиме линии длиной до 400 км составляет несколько процентов натурального тока, поэтому им можно пренебречь.

При длине линии, приближающейся к 1000 км и более, активный ток проводимости сравним с натуральным током линии. Это необходимо учитывать при анализе двухфазного режима дальних электропередач.

Значительно упрощается анализ неполнофазного режима длинной линии при одновременном отключении двух фаз (аварийном или плановом).

В этом случае в нейтрали трансформатора на приемном конце линии протекает ток только одной фазы, который по земле возвращается к нейтрали трансформатора на отправном конце линии (рис.2.17, а).

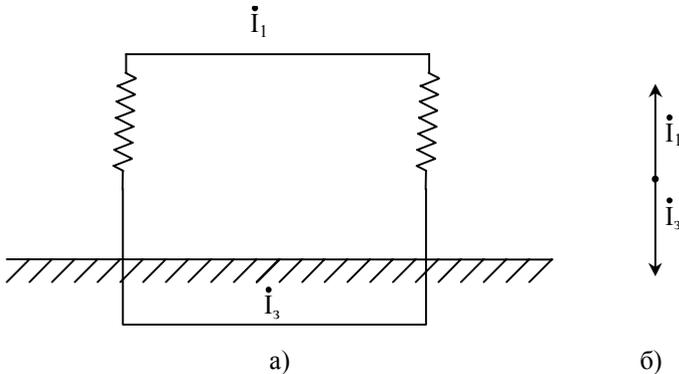


Рис. 2.17. Схема (а) и векторная диаграмма токов (б) линии при отключении двух ее фаз

Исходя из векторной диаграммы токов (рис.2.17 б) рабочая индуктивность  $L_I$  неповрежденной фазы определяется соотношением:

$$L_I \cdot \ell = L \cdot \ell - M_{1,3} \cdot \ell = \frac{\mu_0 \cdot \ell}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{2\ell}{r_\varepsilon} - 1 - \ln \frac{2\ell}{H_{3,\varepsilon}} + 1 \right) = \frac{\mu_0 \cdot \ell}{2\pi} \cdot \ln \frac{H_{3,\varepsilon}}{r_\varepsilon}, \quad (2.133)$$

откуда:

$$L_I = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{H_{3,\varepsilon}}{r_\varepsilon} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \sqrt{\frac{D^2 H_3 \cdot D_{ПТ.1} \cdot D_{ПТ.2}}{r_\varepsilon}}, \quad (2.134)$$

а эквивалентное активное сопротивление однофазной линии равно погонному активному сопротивлению проводов.

Рабочая емкость однофазной линии определяется емкостью её фазы относительно земли:

$$C_1 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{2H_{3,\varepsilon}}{r_\varepsilon}}, \quad (2.135)$$

где:  $H_\varepsilon$  - эквивалентная высота подвески проводов над землей.

*Волновое сопротивление однофазной линии:*

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\ln \frac{H_{3,\varepsilon}}{r_\varepsilon} \cdot \ln \frac{2H_\varepsilon}{r_\varepsilon}}. \quad (2.136)$$

Скорость распространения электромагнитной волны вдоль

однофазной линии:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} \cdot \frac{\ln \frac{2H_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}}}{\ln \frac{H_{3, \text{Э}}}{r_{\text{Э}}}}. \quad (2.137)$$

Волновая длина однофазной линии:

$$\lambda_{\text{Э}} = \frac{\omega \cdot \ell}{v} = \omega \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{\ln \frac{H_{3, \text{Э}}}{r_{\text{Э}}}}{\ln \frac{2H_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}}}. \quad (2.138)$$

Применительно к рассмотренной выше линии 500 кВ ( $H_3=13$  м;  $r_3=0,13$  м) получаем

$$Z_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{\mu_0}}{\sqrt{\varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\ln \frac{\sqrt[3]{1000 \cdot 12 \cdot 20}}{0,13} \cdot \ln \frac{2 \cdot 13}{0,13}} = 343,1 \text{ Ом};$$

$$v = 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{\sqrt{\ln \frac{2 \cdot 13}{0,13}}}{\sqrt{\ln \frac{\sqrt[3]{1000 \cdot 12 \cdot 20}}{0,13}}} = 2,78 \cdot 10^8 \text{ км/с};$$

$$\lambda_{\text{Э}} = \frac{\omega \cdot \ell}{2,78 \cdot 10^8} = 1,13 \cdot 10^{-3} \cdot \ell (\text{км}).$$

При таких параметрах натуральная мощность линии равна:

$$P_{H,1} = \frac{U_{\phi}^2}{Z} = \frac{500^2}{3 \cdot 343,1} = 243 \text{ МВт}.$$

Это значит, что в однофазном режиме на одном из участков длинной линии по электропередаче можно передавать свыше 30% мощности трехфазного режима.

При этом в отличие от двухфазного режима не возникает проблем с регулированием напряжения на линии как на холостом ходу, так и при максимальной нагрузке, если на линии установлены УШРТ.

\* \* \*

Таким образом, отличительная особенность работы длинной линии в неполнофазном режиме является изменение канала тока поврежденной фазы: переход его с поврежденной фазы в тросы и в землю на значительную глубину.

При этом значительная часть энергии магнитного поля (около 10% в двухфазном режиме и 20% в однофазном) оказывается сосредоточенной в земле на огромном пространстве, вертикальный размер которого превышает 1 км. С другой стороны электрическое поле линии ограничено поверхностью земли (в земле электрическое поле линии отсутствует). Поэтому электромагнитное поле линии оказывается несбалансированным, что приводит к уменьшению скорости распространения электромагнитной волны вдоль линии и увеличению волнового сопротивления неповрежденных фаз линии. Несбалансированность электромагнитного поля линии приводит к значительному увеличению влияния линии электропередачи на линии связи. Ограничивающими факторами являются продольные э.д.с. на проводах линии связи, индуцированные магнитным полем линии.

Отсутствие тока в одной из фаз трансформаторов или АТ по концам ЛЭП, работающей в неполнофазном режиме, приводит к несимметрии нагрузки генераторов питающих линию станций. Несимметрия нагрузки генераторов вызывает появление токов обратной последовательности в обмотках статора генераторов. Поле токов обратной последовательности индуцирует токи двойной частоты в обмотке ротора, которые могут вызвать его перегрев.

Поэтому допускается длительная работа с неравенством токов в фазах не более 12% от номинального для турбогенераторов и 20% для гидрогенераторов с системой косвенного воздушного охлаждения обмотки статора, если мощность генераторов не превышает 125 МВА, и 15%, если их мощность свыше 125 МВА.

Для гидрогенераторов с непосредственным водяным охлаждением обмотки статора допускается разность токов в фазах до 10%.

Если различие фазных токов превышает указанные пределы,

необходимо увеличить число параллельно работающих генераторов либо применить меры, ограничивающие проникновения в генераторы токов обратной последовательности.

Рекомендуемые мероприятия по обеспечению неполнофазных режимов работы трехфазных ЛЭП приведены в [8].

## 2.10. Учет системного фактора при анализе режима напряжений на линиях электропередачи

Линии электропередачи работают не изолированно, а являются частью электроэнергетической системы. Поэтому необходимо рассмотреть влияние индуктивного сопротивления  $X_S$ , включенного между отправным концом линии и источником электроэнергии (в общем случае – между отправным концом линии и энергосистемой см.рис. 2.18).

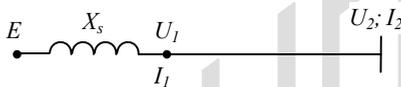


Рис.2.18. Однолинейная эквивалентная схема электропередачи

Волновое уравнение токов при чисто активной нагрузке линии имеет вид [4]

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \cos \lambda + j \cdot \frac{U_2}{Z} \cdot \sin \lambda = \frac{U_2}{Z} \cdot \left( \frac{P}{P_H} \cdot \cos \lambda + j \cdot \sin \lambda \right). \quad (2.139)$$

С учетом волнового уравнения напряжений (2.28) при  $\lambda_x = \lambda$  получаем э.д.с. за индуктивным сопротивлением системы. Следовательно, согласно рис. 2.18 при пренебрежении активным сопротивлением линии

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{U}_1 + \dot{I}_1 \cdot X_S = U_2 \cdot \left[ \cos \lambda + j \cdot \frac{P}{P_H} \cdot \sin \lambda + j \cdot \frac{X_S}{Z} \cdot \left( \frac{P}{P_H} \cdot \cos \lambda + j \cdot \sin \lambda \right) \right] = \\ &= U_2 \cdot \left[ \cos \lambda - \alpha \cdot \sin \lambda + j \cdot \frac{P}{P_H} \cdot (\sin \lambda + \alpha \cdot \cos \lambda) \right], \end{aligned} \quad (2.140)$$

де обозначено  $\alpha = X_S/Z$ .

Модуль  $E$  равен

$$\begin{aligned}
 E &= U_2 \cdot \sqrt{(\cos\lambda - \alpha \cdot \sin\lambda)^2 + \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \cdot (\sin\lambda + \alpha \cdot \cos\lambda)^2} = \\
 &= U_2 \cdot \sqrt{\cos^2\lambda - 2\alpha \cdot \sin\lambda \cdot \cos\lambda + \alpha^2 \cdot \sin^2\lambda + \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \cdot (\sin^2\lambda + 2\alpha \cdot \sin\lambda \cdot \cos\lambda + \alpha^2 \cdot \cos^2\lambda)} = \\
 &= U_2 \cdot \sqrt{1 + \left[\left(\frac{P}{P_H}\right)^2 - 1\right] \cdot \sin^2\lambda + 2\alpha \cdot \left[\left(\frac{P}{P_H}\right)^2 - 1\right] \cdot \sin\lambda \cdot \cos\lambda + \alpha^2 + \alpha^2 \cdot \left[\left(\frac{P}{P_H}\right)^2 - 1\right] \cdot \cos^2\lambda} = \\
 &= U_2 \cdot \sqrt{1 + \alpha^2 + \left[\left(\frac{P}{P_H}\right)^2 - 1\right] \cdot (\sin\lambda + \alpha \cdot \cos\lambda)^2} . \tag{2.141}
 \end{aligned}$$

При использовании (2.29, а) получаем отношение  $E/U_1$

$$\frac{E}{U_1} = \sqrt{\frac{1 + \alpha^2 + \left[\left(\frac{P}{P_H}\right)^2 - 1\right] \cdot (\sin\lambda + \alpha \cdot \cos\lambda)^2}{1 + \left[\left(\frac{P}{P_H}\right)^2 - 1\right] \cdot \sin^2\lambda}} . \tag{2.142}$$

Как видно из последней формулы, отношение  $E/U_1$  зависит от трех переменных  $\alpha$ ,  $\lambda$  и  $P/P_H$ . Причем при отношении  $P/P_H > 1$  отношение  $E/U_1 > 1$  при любых значениях  $\alpha$  и  $\lambda$ . При  $P/P_H < 1$  отношение  $E/U_1$  может быть больше и меньше единицы в зависимости от значений  $P/P_H$ ,  $\alpha$  и  $\lambda$ . Чем больше  $\alpha$  и  $\lambda$ , тем при меньшем отношении  $P/P_H$  происходит переход  $E/U_1$  через единицу.

При передаче по линии натуральной мощности ( $P=P_H$ ) реактивная составляющая отсутствует и отношение  $E/U_1$  равно

$$\frac{E}{U_1} = \sqrt{1 + \alpha^2} , \tag{2.143}$$

и, следовательно, напряжение в начале линии меньше напряжения в системе. Если линия примыкает к мощной системе, индуктивное

сопротивление  $X_S$  соответствует сопротивлению трансформаторов и составляет  $X_S \approx (0,12 \div 0,15)Z$ . При этом отношение  $E/U_1$  близко к единице

$$\frac{E}{U_1} \approx 1 + \frac{1}{2} \cdot \alpha^2 = 1,005 \div 1,0113.$$

Однако, при передаче мощности меньше натуральной или сверх натуральной ситуация резко изменяется (см.рис.2.19, а). Как видно, чем больше длина линии, тем больше отклонение напряжения  $U_1$  от э.д.с. системы. Эти отклонения направлены в ту же сторону, что и отклонения напряжения в конце линии по сравнению с напряжением в начале линии, что приводит к увеличению колебаний напряжения в конце линии.

Для ограничения этого дополнительного отклонения напряжения, определяемого реактивной составляющей тока, применяются регуляторы напряжения под нагрузкой у трансформаторов, изменяющие число витков в обмотке высшего напряжения и соответственно коэффициент трансформации. Таким путем обычно компенсируется отклонение напряжения от номинального в пределах 15%. Как видно из рис.2.19, а, для линий длиной до 0,6 рад, примыкающих к мощным энергосистемам, колебания напряжения могут быть компенсированы таким образом. Однако, при больших длинах линий таким образом проблема не может быть решена.

При примыкании линий к системам ограниченной мощности индуктивное сопротивление системы больше сопротивления трансформаторов  $X_S > X_T$  и отклонения напряжения увеличиваются (см.рис.2.19, б), как при малых нагрузках линий, так и при передаче мощности сверх натуральной.

Формула (2.142) может быть использована для оценки максимальной волновой длины линии в зависимости от относительного индуктивного сопротивления системы  $\alpha$  при заданном ограничении отношения  $E/U_1$  при холостом ходе линии

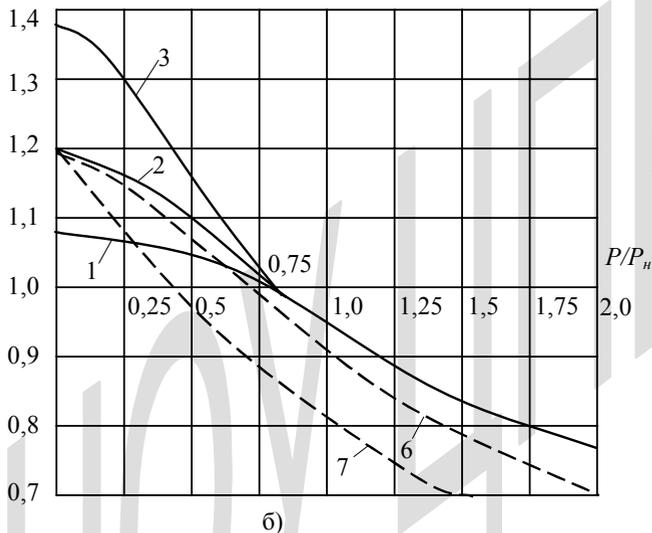
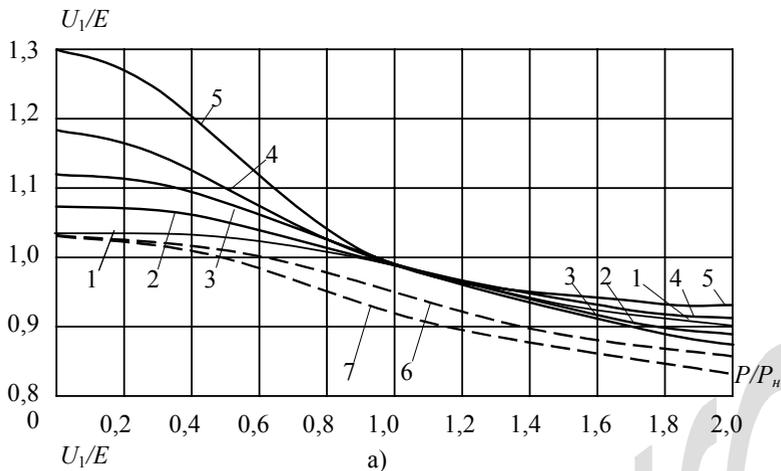


Рис. 2.19. Зависимости отношения  $E/U_1$  от отношения  $P/P_n$  для линий с различной волновой длиной  $\lambda=0,2$  рад (кривая 1),  $0,4$  рад (кривые 2, 7),  $0,6$  рад (кривая 3),  $0,8$  рад (кривая 4) и  $1$  рад (кривая 5) при  $\cos\varphi=1$  (1÷5), а также при  $\lambda=0,2$  рад и  $\cos\varphi=0,95$  (6);  $\cos\varphi=0,9$  (7) и при  $\alpha=0,15$  (а) и  $\alpha=0,4$  (б)

$$\left(\frac{E}{U_1}\right)_{\text{дон}} = \sqrt{\frac{1 + \alpha^2 - (\sin \lambda + \alpha \cdot \cos \lambda)^2}{\cos^2 \lambda}} = \sqrt{\frac{1 + \alpha^2}{\cos^2 \lambda} - (\alpha + \operatorname{tg} \lambda)^2} = \quad (2.144)$$

$$= \sqrt{(1 + \alpha^2) \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \lambda) - (\alpha + \operatorname{tg} \lambda)^2} = 1 - \alpha \cdot \operatorname{tg} \lambda,$$

откуда

$$\lambda_{np} = \arctg \frac{1}{\alpha} \cdot \left(1 - \frac{E}{U_1}\right). \quad (2.145)$$

Результаты расчетов по формуле (2.145) приведены на рис. 2.20 при заданном допустимом отношении  $U_1/E=1,10$  (с учетом возможностей регулирования напряжения под нагрузкой). Как видно предельная длина линии быстро уменьшается при увеличении  $\alpha$ .

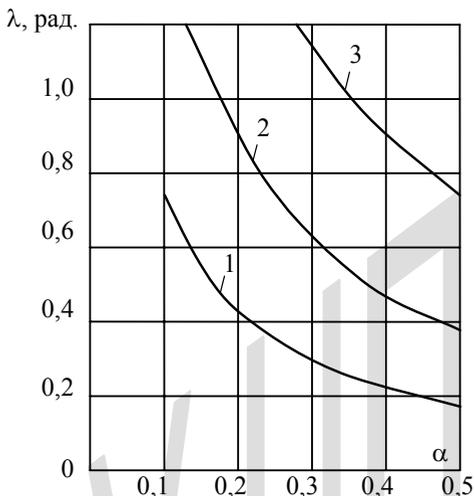


Рис.2.20. Зависимости предельных волновых длин линий по условию ограничения колебаний напряжения в начале линий на холостом ходу от относительной величины индуктивного сопротивления системы при различной степени компенсации зарядной мощности линий  $\beta=0$  (кривая 1), 0,5 (кривая 2), 0,75 (кривая 3)

Формула (2.142) может быть использована также для определения предельной передаваемой мощности по условию ограничения отклонения напряжения в начале линии от напряжения в питающей сети

$$\left(\frac{P}{P_H}\right)_{np} = \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{E}{U_1}\right)_{дон}^2 - 1 - \alpha^2}{(\sin \lambda + \alpha \cdot \cos \lambda)^2 - \left(\frac{E}{U_1}\right)_{дон}^2 \cdot \sin^2 \lambda}}. \quad (2.146)$$

Как видно из этой формулы, при  $\alpha^2 < \left(\frac{E}{U_1}\right)_{дон}^2 - 1$  допустимая передаваемая по линии мощность больше натуральной мощности линии ( $P/P_n > 1$ ). Напротив при  $\alpha^2 > \left(\frac{E}{U_1}\right)_{дон}^2 - 1$  она меньше натуральной мощности линии (см. рис. 2.21).

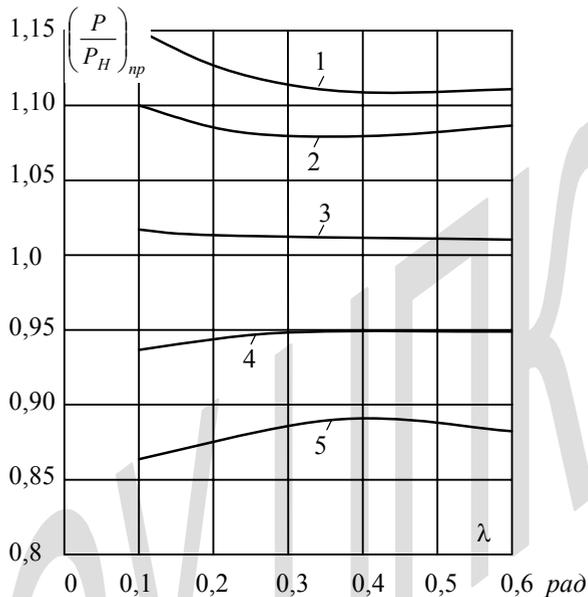


Рис. 2.21. Зависимости предельных передаваемых мощностей по линиям от их волновой длины при ограничении снижения напряжения в начале линии на 5% и при различных относительных величинах импеданса системы:  $\alpha=0,15$  (кривая 1),  $0,2$  (кривая 2),  $0,3$  (кривая 3),  $0,4$  (кривая 4),  $0,5$  (кривая 5)

При коэффициенте мощности  $\cos\varphi < 1$  передаваемая мощность и длина линии ограничиваются еще больше. В этом случае при пренебрежении активным сопротивлением линии и подстановке в волновое уравнение (2.139) тока  $\dot{I}_2$  согласно (2.51) получаем

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{U_2}{Z} \cdot \left[ \frac{P}{P_H} \cdot (1 - j \cdot \operatorname{tg}\varphi) \cdot \cos \lambda + j \cdot \sin \lambda \right] = \\ &= \frac{U_2}{Z} \cdot \left[ \frac{P}{P_H} \cdot \cos \lambda + j \cdot \left( \sin \lambda - \frac{P}{P_H} \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \cos \lambda \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.147)$$

Подставляя этот ток в уравнение для э.д.с. аналогично (2.140) с использованием выражения (2.52) для напряжения  $U_1$ , получаем

$$\begin{aligned} E &= \dot{U}_1 + j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_S = U_2 \cdot \left\{ \left[ \cos \lambda + \frac{P}{P_H} \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \sin \lambda + j \cdot \frac{P}{P_H} \cdot \sin \lambda \right] + \right. \\ &+ j \cdot \alpha \cdot \left. \left[ \frac{P}{P_H} \cdot \cos \lambda + j \cdot \left( \sin \lambda - \frac{P}{P_H} \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \cos \lambda \right) \right] \right\} = \\ &= U_2 \cdot \left[ \cos \lambda + \frac{P}{P_H} \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \sin \lambda - \alpha \cdot \left( \sin \lambda - \frac{P}{P_H} \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \cos \lambda \right) + \right. \\ &+ j \cdot \frac{P}{P_H} \cdot (\sin \lambda + \alpha \cdot \cos \lambda) \left. \right], \end{aligned} \quad (2.148)$$

откуда абсолютное значение  $E$  равно

$$\begin{aligned} E &= U_2 \cdot \left\{ 1 + \alpha^2 + \left[ \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 - 1 \right] \cdot (\sin \lambda + \alpha \cdot \cos \lambda)^2 + \frac{P}{P_H} \cdot \operatorname{tg}\varphi \times \right. \\ &\times \left. \left[ \frac{P}{P_H} \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot (\sin \lambda + \alpha \cdot \cos \lambda) + (1 - \alpha^2) \cdot \sin 2\lambda + 2\alpha \cdot \cos 2\lambda \right] \right\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (2.149)$$

В режиме холостого хода линии ( $P = 0$ ) согласно (2.149), (2.53) отношение  $E/U_1$  равно

$$\frac{E}{U_1} = \frac{\cos \lambda - \alpha \cdot \sin \lambda}{\cos \lambda} = 1 - \alpha \cdot \operatorname{tg} \lambda, \quad (2.150)$$

что полностью совпадает с выражением (2.144). Отсюда следует, что реактивная нагрузка линии не оказывает влияния на отношение  $E/U_1$  в

режиме ее холостого хода. Однако при увеличении нагрузки это влияние возрастает (см.рис. 2.19).

Ограничения длины линии по условию ограничения повышения напряжения в начале линии могут быть сняты при компенсации зарядной мощности линии реакторами. В этом случае волновые уравнения напряжения и тока изменяются в соответствии с изменением эквивалентных параметров линии согласно соотношениям (2.55). При этом волновое уравнение токов при передаче активной мощности имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 \cdot \cos \lambda_3 + j \cdot \frac{U_3}{Z_3} \cdot \sin \lambda_3 = \frac{U_2}{Z} \cdot \left( \frac{P}{P_H} \cdot \cos \lambda_3 + j \cdot \frac{Z}{Z_3} \cdot \sin \lambda_3 \right) = \\ &= \frac{U_2}{Z} \cdot \left( \frac{P}{P_H} \cdot \cos \lambda \sqrt{1-\beta} + j \cdot \sqrt{1-\beta} \cdot \sin \lambda \sqrt{1-\beta} \right), \end{aligned} \quad (2.151)$$

поскольку ток нагрузки определяется согласно соотношению (2.5).

При использовании (2.151) и (2.56) получаем волновое уравнение для э.д.с. системы

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{U}_1 + \dot{I}_1 \cdot X_S = U_2 \cdot \left[ \cos \lambda \sqrt{1-\beta} + j \cdot \frac{P}{P_H} \cdot \frac{\sin \lambda \sqrt{1-\beta}}{\sqrt{1-\beta}} \right] + \\ &+ j \cdot \frac{U_2}{Z} \cdot \left[ \frac{P}{P_H} \cdot \cos \lambda \sqrt{1-\beta} + j \cdot \sqrt{1-\beta} \cdot \sin \lambda \sqrt{1-\beta} \right] \cdot X_S = \\ &= U_2 \cdot \left[ \cos \lambda \sqrt{1-\beta} - \alpha \cdot \sqrt{1-\beta} \cdot \sin \lambda \sqrt{1-\beta} + \right. \\ &\left. + j \cdot \frac{P}{P_H} \cdot \left( \frac{\sin \lambda \sqrt{1-\beta}}{\sqrt{1-\beta}} + \alpha \cdot \cos \lambda \sqrt{1-\beta} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.152)$$

и модуль э.д.с.

$$\begin{aligned}
E &= U_2 \cdot \left\{ \left( \cos \lambda \sqrt{1-\beta} - \alpha \cdot \sqrt{1-\beta} \cdot \sin \lambda \sqrt{1-\beta} \right)^2 + \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sin \lambda \sqrt{1-\beta}}{\sqrt{1-\beta}} + \alpha \cdot \cos \lambda \sqrt{1-\beta} \right)^2 \right\}^{1/2} = \\
&= U_2 \cdot \left\{ \cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} - 2\alpha \cdot \sqrt{1-\beta} \cdot \sin \lambda \sqrt{1-\beta} \cdot \cos \lambda \sqrt{1-\beta} + \alpha^2 \cdot (1-\beta) \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \right. \\
&+ \left. \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}}{1-\beta} + 2\alpha \cdot \frac{\sin \lambda \sqrt{1-\beta} \cdot \cos \lambda \sqrt{1-\beta}}{\sqrt{1-\beta}} + \alpha^2 \cdot \cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} \right) \right\}^{1/2} = \\
&= U_2 \cdot \left\{ 1 - \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} - 2\alpha \cdot \sqrt{1-\beta} \cdot \sin \lambda \sqrt{1-\beta} \cdot \cos \lambda \sqrt{1-\beta} + \alpha^2 \cdot (1-\beta) - \alpha^2 \cdot (1-\beta) \times \right. \\
&\times \cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + \left. \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta}}{1-\beta} + 2\alpha \cdot \frac{\sin \lambda \sqrt{1-\beta} \cdot \cos \lambda \sqrt{1-\beta}}{\sqrt{1-\beta}} + \alpha^2 \cdot \cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} \right) \right\}^{1/2} = \\
&= \left\{ 1 + \alpha^2 \cdot (1-\beta) + \left[ \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \cdot \frac{1}{1-\beta} - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\beta} + 2\alpha \cdot \sqrt{1-\beta} \cdot \left[ \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \cdot \frac{1}{1-\beta} - 1 \right] \cdot \sin \lambda \sqrt{1-\beta} \times \right. \\
&\times \left. \cos \lambda \sqrt{1-\beta} + \alpha^2 \cdot (1-\beta) \cdot \left[ \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \cdot \frac{1}{1-\beta} - 1 \right] \cdot \cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta} \right\}^{1/2} = \\
&= U_2 \cdot \sqrt{1 + \alpha^2 \cdot (1-\beta) + \left[ \left( \frac{P}{P_H} \right)^2 \cdot \frac{1}{1-\beta} - 1 \right] \cdot \left( \sin \lambda \sqrt{1-\beta} + \alpha \cdot \sqrt{1-\beta} \cdot \cos \lambda \sqrt{1-\beta} \right)^2} = \\
&= U_2 \cdot \sqrt{1 + \alpha^2 \cdot (1-\beta) + \left[ \left( \frac{P}{P_{H,\text{э}}} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left( \sin \lambda_{\text{э}} + \alpha \cdot \sqrt{1-\beta} \cdot \cos \lambda_{\text{э}} \right)^2}. \quad (2.153)
\end{aligned}$$

В этом случае, как и при отсутствии компенсации зарядной мощности линии (см. формулу (2.141)), модуль  $E$  определяется относительной величиной  $\alpha$ , отнесенной в данном случае к эквивалентному волновому сопротивлению  $Z_{\text{э}} = \frac{Z}{\sqrt{1-\beta}}$ , и реактивной составляющей, определяемой реактивной мощностью линии.

Отношение модулей э.д.с. системы и напряжения в начале линии согласно (2.153) и (2.57) равно

$$\frac{E}{U_1} = \sqrt{\frac{1 + \alpha^2 \cdot (1-\beta) + \left[ \left( \frac{P}{P_{H,\text{э}}} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left( \sin \lambda_{\text{э}} + \alpha \cdot \sqrt{1-\beta} \cdot \cos \lambda_{\text{э}} \right)^2}{1 + \left[ \left( \frac{P}{P_{H,\text{э}}} \right)^2 - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda_{\text{э}}}}. \quad (2.154)$$

При 100%-ой компенсации зарядной мощности линии ( $\beta=1$ )

$$\frac{E}{U_1} = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{P}{P_{H,\text{Э}}}\right)^2 \cdot (\lambda + \alpha)^2}{1 + \left(\frac{P}{P_{H,\text{Э}}}\right)^2 \cdot \lambda^2}},$$

(2.154a)

$$\text{т.к. } \frac{\sin^2 \lambda_{\text{Э}}}{P_{H,\text{Э}}^2} \approx \frac{\lambda_{\text{Э}}^2}{P_{H,\text{Э}}^2} = \frac{\lambda^2 \cdot (1 - \beta)}{P_H^2 \cdot (1 - \beta)} = \frac{\lambda^2}{P_H^2}.$$

На холостом ходу линии ( $P=0$ ) отношение  $\frac{E}{U_1} = 1$  при любой

длине линии.

Таким образом, в этом случае ( $\beta = 1$ ) повышение напряжения на линии по сравнению с э.д.с. системы полностью отсутствует. Однако, в этом случае ограничивается передаваемая по линии мощность по условию ограничения перепада напряжения вдоль линии (см. §2.5). Поэтому обычно в электрических сетях не допускается 100%-ная компенсация зарядной мощности линии, и она ограничивается на уровне 50-60%. В этом случае ( $\beta < 1$ ) может быть определена допустимая волновая длина линии по условию ограничения повышения напряжения в ее начале на холостом ходу. При  $P=0$  согласно (2.154)

$$\frac{E}{U_1} = \sqrt{\frac{1 + \alpha^2 \cdot (1 - \beta) - \left(\sin \lambda \sqrt{1 - \beta} + \alpha \cdot \sqrt{1 - \beta} \cdot \cos \lambda \sqrt{1 - \beta}\right)^2}{\cos^2 \lambda \sqrt{1 - \beta}}} =$$

$$= 1 - \alpha \cdot \sqrt{1 - \beta} \cdot \operatorname{tg} \lambda \sqrt{1 - \beta}, \quad (2.155)$$

откуда

$$\lambda_{np} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{1 - \left(\frac{E}{U_1}\right)_{\text{дон}}}{\alpha \cdot \sqrt{1 - \beta}}. \quad (2.156)$$

Результаты расчетов по этой формуле также приведены на рис.2.20. Как видно, при увеличении  $\beta$  предельная волновая длина линии значительно увеличивается.

Совершенно другая ситуация складывается на линиях, примыкающих к электростанциям. Мощность генераторов, как правило, соответствует пропускной способности примыкающих линий, а их синхронный импеданс зависит от типа генераторов. У гидрогенераторов он примерно равен волновому сопротивлению линий ( $X_S=Z$ ), а у турбогенераторов он вдвое превосходит волновое сопротивление линий ( $X_S=2Z$ ). При этом согласно формуле (2.143) при передаче натуральной мощности по линии э.д.с. за синхронной реактивностью генераторов превышает напряжение на зажимах генераторов на 40% у гидрогенераторов и до 2,2 раза у турбогенераторов.

Однако это не опасно, т. к. регуляторы генераторов поддерживают напряжение на их зажимах на уровне номинального напряжения, а э.д.с.  $E$  представляет собой некоторую условную расчетную величину, физически несуществующую.

При снижении передаваемой по линии мощности в соответствии с формулой (2.142) отношение  $\frac{E}{U_1}$  понижается (см. рис.2.22), достигая

единицы и меньших значений. Отношение  $\frac{E}{U_1} = 1$  критично для всех

типов генераторов. Перераспределение магнитного потока в магнитной системе генераторов по мере приближения  $\frac{E}{U_1}$  к единице приводит к

перегреву лобовых частей обмоток статора и лобовых частей стали статора, ускоренному старению ее изоляции. Поэтому обычно отношение

$\frac{E}{U_1}$  генераторов ограничивается снизу  $\frac{E}{U_1} \geq 0,85$ , а для генераторов

атомных электростанций - более жестко:  $\frac{E}{U_1} \geq 1$ . По достижении этого

отношения в результате снижения нагрузки линии регулятор возбуждения генератора перестает поддерживать напряжение на его зажимах, сохраняя неизменным ток возбуждения и соответственно э.д.с. на соответствующем уровне (0,85 или 1,0) по отношению к номинальному напряжению. При этом дальнейшее снижение нагрузки приводит к повышению напряжения на зажимах генераторов и на отправном конце линии (см. рис.2.22),

превышая допустимые значения. Отношение  $\frac{E}{U_1}$  достигает единицы, когда относительная величина передаваемой мощности снижается до значений (см. формулу (2.154))

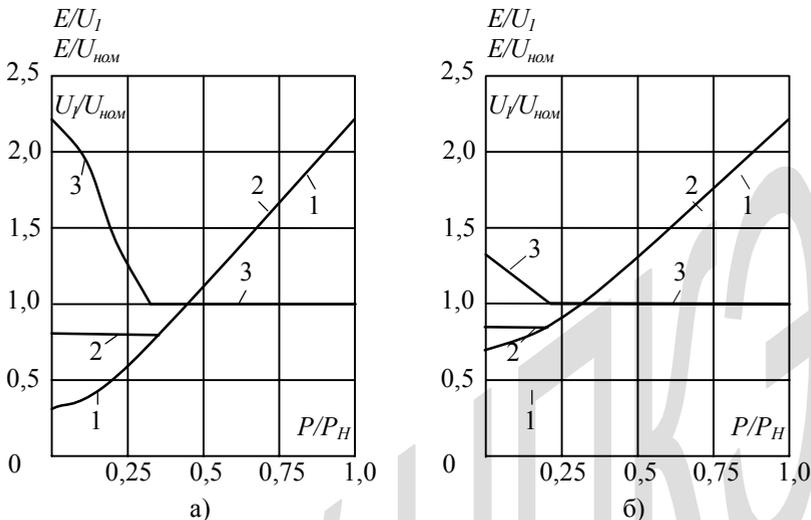


Рис. 2.22. Зависимости отношений  $E/U_1$  (кривая 1),  $E/U_{ном}$  (кривая 2) и  $U_1/U_{ном}$  (кривая 3) от отношения  $P/P_H$  для линий с волновой длиной 0,3 рад при  $\alpha=2$  и при  $\beta=0$  (а),  $\beta=0,5$  (б)

$$\frac{P}{P_{H.э}} = \sqrt{1 - \frac{\alpha \cdot \sqrt{1-\beta}}{\sin 2\lambda \sqrt{1-\beta} + \alpha \cdot \sqrt{1-\beta} \cdot \cos^2 \lambda \sqrt{1-\beta}}} \quad (2.157)$$

На рис. 2.23 приведены зависимости отношения  $\frac{P}{P_H}$ , соответствующего переходу отношения  $\frac{E}{U_1}$  через единицу, от волновой длины линии при различных значениях  $\alpha$ . Как видно, при отсутствии шунтирующих реакторов ( $\beta = 0$ ) этот переход происходит при относительно больших отношениях  $\frac{P}{P_H}$ , что создает опасные условия

работы трансформаторов и изоляции линии. Для того, чтобы исключить

чрезмерное повышение напряжения на линии после достижения предельного значения  $\frac{E}{U_1}$  необходимо обеспечить компенсацию зарядной мощности линии шунтирующими реакторами. При увеличении степени компенсации  $\beta$  переход отношения  $\frac{E}{U_1}$  через единицу происходит при меньших отношениях  $\frac{P}{P_n}$ , хотя при очень длинных линиях эта тенденция нарушается.

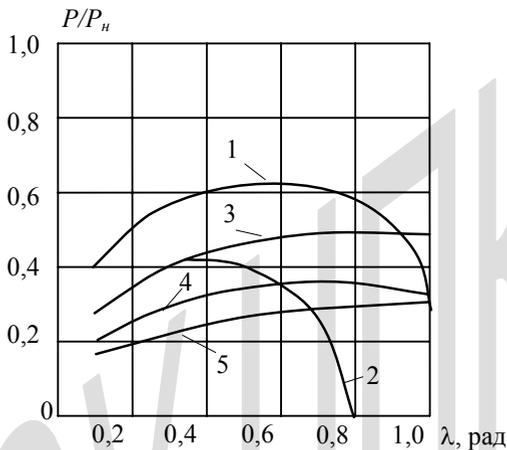


Рис. 2.23. Зависимости отношения  $P/P_n$ , соответствующего переходу  $E/U_1$  через 1, от волновой длины линии  $\lambda$  при  $\alpha=1$  (кривые 1,3) и  $\alpha = 1$  (кривые 1,3) (кривые 2, 4, 5) при  $\beta = 0$  (1, 2) и при  $\beta = 0,5$  (3, 4) и  $\beta = 0,75$  (5)

При 100%-ной компенсации зарядной мощности линии ( $\beta = 1$ ) и  $P = 0$  согласно (2.154) и (2.15

5) отношение  $\frac{E}{U_1} = 1$  независимо от длины линии и величины  $\alpha$ .

При увеличении отношения  $\frac{P}{P_n}$  отношение  $\frac{E}{U_1}$  увеличивается и при

$\frac{P}{P_n} = 1$  ( $\beta = 0$ ) согласно (2.154) равно

$$\frac{E}{U_1} = \sqrt{\frac{1 + (\lambda + \alpha)^2}{1 + \lambda^2}}. \quad (2.158)$$

При увеличении  $\lambda$  это отношение сначала увеличивается, а потом начинает уменьшаться. Максимум отношения  $\frac{E}{U_1}$  найдем, приравнявая

нулю производную  $\frac{E}{U_1}$  по  $\lambda$ . В результате получаем экстремальное

значение  $\lambda$ , соответствующее максимуму отношения  $\frac{E}{U_1}$

$$\lambda_{\text{экстр}} = \frac{\sqrt{\alpha^2 + 4} - \alpha}{2}. \quad (2.159)$$

Подставляя это значение  $\lambda_{\text{экстр}}$  в формулу (2.158), получаем максимальное отношение  $\frac{E}{U_1}$ :

$$\left(\frac{E}{U_1}\right)_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{1 + 0,25\alpha \cdot (\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4})}{1 + 0,25\alpha \cdot (\alpha - \sqrt{\alpha^2 + 4})}}. \quad (2.160)$$

Чем больше  $\alpha$ , тем меньше экстремальная длина линии и тем больше максимальное отношение  $\frac{E}{U_1}$  (см. таб.2.6)

Таблица 2.6.

$\alpha$		1,0	1,5	2,0
$\lambda_{\text{экстр.}} \text{ рад}$		0,618	0,5	0,414
$\left(\frac{E}{U_1}\right)_{\text{макс}}$	ФШР	1,62	2	2,41
	УШР	1,41	1,8	2,23

В §2.5 показано, что при 100%-ной компенсации зарядной мощности линий их пропускная способность значительно снижается по сравнению с естественной. Поэтому степень компенсации  $\beta$  неуправляемыми реакторами (ФШР) ограничивают. Из формулы (2.155) можно получить необходимую степень компенсации  $\beta$  для обеспечения заданного минимального значения  $\frac{E}{U_1}$  на холостом ходу линии (см.

рис.2.24). Как видно, при увеличении длины линии необходимая степень компенсации быстро увеличивается, приближаясь к единице при больших длинах линий. При таких значениях  $\beta$  пропускная способность линий несколько повышается по сравнению со 100%-ой компенсацией, но все же остается значительно ниже естественной (см. рис.2.11).

$$Q_p/P_n\lambda$$

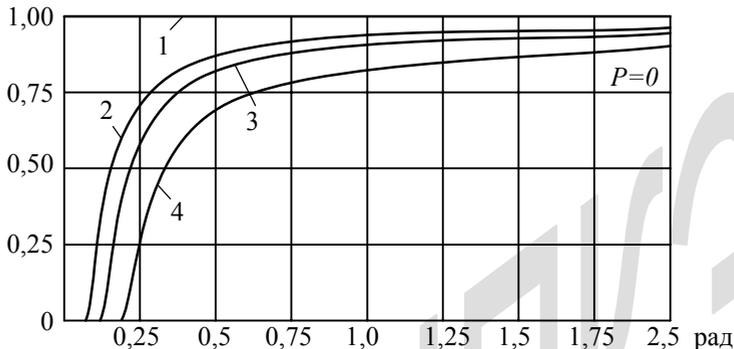


Рис.2.24. Зависимости от волновой длины линии необходимой степени компенсации зарядной мощности линий электропередачи для обеспечения на холостом ходу линии отношения  $E/U_1=1$  (1) и  $E/U_1=0,85$  (кривые 2 - 4) при различных относительных значениях синхронного импеданса генераторов  $\alpha = 2$  (2);  $\alpha = 1,5$  (3);  $\alpha = 1$  (4).

В связи с этим обычно в энергосистемах для линий класса 330-800 кВ степень компенсации их зарядной мощности не превышает  $\beta = 0,6$ . При этом в режиме холостого хода линий согласно формуле (2.155) вплоть до волновой длины линии  $\lambda=0,19$  рад отношение  $\frac{E}{U_1} > 0,85$ , и напряжение на зажимах турбогенераторов поддерживается на уровне номинального (см. рис.2.25). Однако, при длинах линий

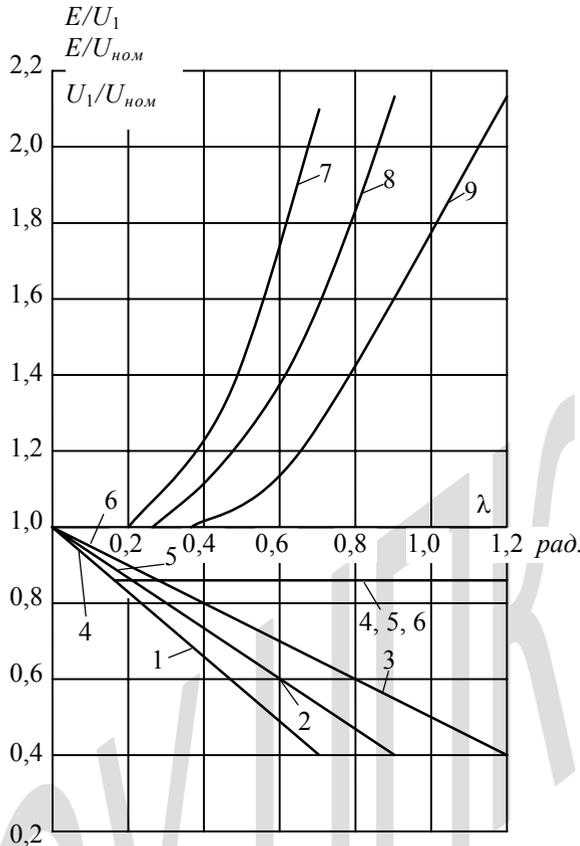


Рис.2.25. Зависимости отношений  $E/U_1$  (кривые 1, 2, 3),  $E/U_{ном}$  (кривые 4, 5, 6) и  $U_1/U_{ном}$  (кривые 7, 8, 9) от волновой длины линий в режиме их холостого хода при различных значениях синхронного импеданса генераторов  $X_S=2Z$  (кривые 1, 4, 7);  $X_S=1,5Z$  (кривые 2, 5, 8);  $X_S=Z$  (кривые 3, 6, 9) при  $\beta=0,6$

свыше 0,19 рад ситуация резко изменяется. Отношение  $\frac{E}{U_1}$  продолжает снижаться, э.д.с.  $E$  поддерживается на уровне  $0,85U_{ном}$ , а напряжение на зажимах генераторов возрастает, достигая недопустимых значений при  $\lambda = 0,35 \div 0,4$  рад и более. Возникают временные перенапряжения промышленной частоты, длительность которых соответствует периоду сниженной нагрузки линии.

Для линий, примыкающих к гидростанциям ( $\alpha = 1$ ), такая ситуация наступает при больших волновых длинах линий ( $\lambda > 0,4$  рад).

Кардинальным решением проблемы ограничения колебаний напряжения на зажимах генераторов при обеспечении естественной пропускной способности линий является применение управляемых шунтирующих реакторов, когда степень компенсации зарядной мощности линий изменяется в зависимости от передаваемой мощности таким образом, чтобы относительная величина реактивной мощности линии всегда была равна нулю.

$$\left(\frac{P}{P_{H.э}}\right)^2 - 1 = \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \frac{1}{1-\beta} - 1 = 0.$$

При этом необходимая степень компенсации зарядной мощности линии

$$\beta = 1 - \left(\frac{P}{P_H}\right)^2. \quad (2.161)$$

Подставляя это значение  $\beta$  в формулу (2.147), получаем

$$\frac{E}{U_1} = \sqrt{1 + \alpha^2 \left(\frac{P}{P_H}\right)^2}. \quad (2.162)$$

Как видно, в этом случае минимальное отношение  $\frac{E}{U_1}$  равно единице, как и в случае 100 %-ной компенсации зарядной мощности неуправляемыми реакторами при любых значениях  $\alpha$ . Но при увеличении передаваемой по линии мощности степень компенсации  $\beta$  снижается, достигая нуля при  $P=P_H$ . Таким образом обеспечиваются наиболее благоприятные условия работы генераторов ( $\frac{E}{U_1} \geq 1$ , см. рис.2.26) и не снижается естественная пропускная способность линий электропередачи. При этом сравнение формул (2.158) и (2.162) показывает, что при

передаче натуральной мощности отношение  $\frac{E}{U_1}$  меньше, чем в случае применения неуправляемых реакторов при  $\beta = 1$ . Это означает, что в режиме максимальных нагрузок токи в обмотке статора и в обмотке возбуждения значительно меньше. Соответственно уменьшаются тепловые нагрузки генераторов и в номинальном режиме их работы.

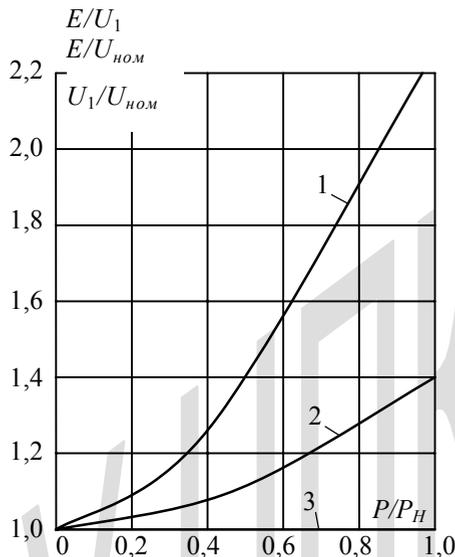


Рис.2.26. Зависимости отношений  $E/U_j$ ;  $E/U_{ном}$  (кривые 1, 2) и  $U_1/U_{ном}$  (кривая 3) от отношения  $P/P_H$  при  $\beta=1-(P/P_H)^2$  и  $\alpha=1$  (кривая 1) и  $\alpha=2$  (кривая 2)

Таким образом, применение управляемых реакторов позволяет обеспечить наиболее благоприятные условия работы генераторов во всех возможных режимах при обеспечении естественной (максимальной) пропускной способности линий. Следовательно, управляемые реакторы позволяют полностью разрешить основную проблему энергосистем переменного тока, определяемую противоречивыми требованиями к компенсирующим устройствам для обеспечения приемлемых условий работы генераторов и максимальной пропускной способности линий электропередачи.

## Глава 3. Искусственные способы повышения пропускной способности линий электропередачи

### 3.1. Общие соображения

Из предыдущего раздела следует, что ограничение пропускной способности по перепаду напряжения определяется в основном падением напряжения от протекающего тока на индуктивном сопротивлении линии. Поэтому все искусственные методы повышения пропускной способности линий электропередачи основаны на идее уменьшения перепада напряжения. Один из этих методов предусматривает уменьшение индуктивного сопротивления линии за счет продольной емкостной компенсации (ПЕК) индуктивного сопротивления линии (см. рис. 3.1). При том же токе, что и без ПЕК перепад напряжений уменьшается, что позволяет увеличить ток в линии.

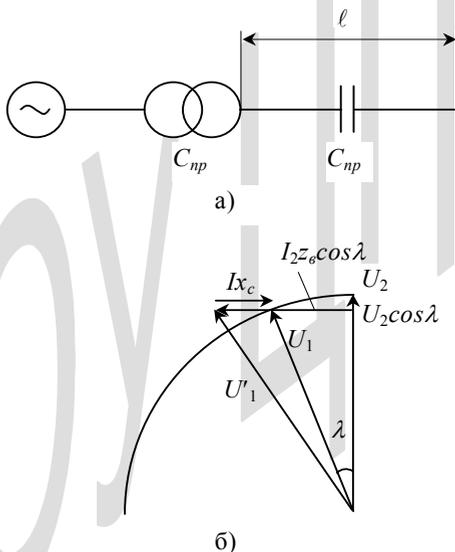


Рис. 3.1. Принципиальная схема продольной емкостной компенсации и векторная диаграмма напряжений



передаваемой мощности, определяемой только падением напряжения на активном сопротивлении линии (см. формулу (2.29, а)) при  $\lambda=\pi$ . При этом передача мощности по такой линии в пределах ее натуральной мощности не вызывает никаких затруднений, связанных с обеспечением устойчивости передачи.

### 3.2. Увеличение пропускной способности линий за счет источников реактивной мощности на потребляющем конце линии

В качестве источника реактивной мощности используются:

- батареи конденсаторов, включаемые параллельно потребителю;
- синхронные компенсаторы;
- статические тиристорные компенсаторы.

Во всех этих случаях ток в конце линии определяется выражением

$$\dot{I}_2 = I_n \frac{P}{P_n} (1 + j \operatorname{tg} \varphi), \quad (3.1)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}$  представляет соотношение реактивной и активной мощностей в конце линии. Подставляя это выражение для тока  $\dot{I}_2$  в волновое уравнение напряжений (2.27) при  $\lambda_x = \lambda$ , получаем

$$\begin{aligned} \frac{\dot{U}_1}{U_2} &= \cos \lambda - \frac{P}{P_n} \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \lambda + \frac{P}{P_n} \cdot \frac{R}{2Z} \left( \cos \lambda + \frac{\sin \lambda}{\lambda} \right) + \\ &j \cdot \left\{ \frac{P}{P_n} \sin \lambda + \frac{R}{2Z} \left[ \sin \lambda + \frac{P}{P_n} \operatorname{tg} \varphi \left( \cos \lambda + \frac{\sin \lambda}{\lambda} \right) \right] \right\} \approx \\ &\approx \cos \lambda - \frac{P}{P_n} \left[ \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \lambda - \frac{R}{2Z} \cdot \left( \cos \lambda + \frac{\sin \lambda}{\lambda} \right) \right] + j \frac{P}{P_n} \cdot \sin \lambda \end{aligned} \quad (3.2)$$

Перепад напряжений в этом случае

$$\begin{aligned}
\frac{U_1}{U_2} &= \sqrt{\left\{ \cos \lambda - \frac{P}{P_n} \left[ \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \lambda - \frac{R}{2Z} \left( \cos \lambda + \frac{\sin \lambda}{\lambda} \right) \right] \right\}^2 + \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 \sin^2 \lambda} \approx \\
&\approx \left\{ \cos^2 \lambda + \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 \sin^2 \lambda + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \left( \cos^2 \lambda + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right) - \right. \\
&- \frac{P}{P_n} \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin 2\lambda \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{P_n} \left[ \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \lambda - \frac{R}{Z} \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\lambda} \right) \right] \right] \left. \right\}^{\frac{1}{2}} = \\
&= \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 - 1 \right] \cdot \sin^2 \lambda + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \left( \cos^2 \lambda + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right) - \right. \\
&- \frac{P}{P_n} \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin 2\lambda \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{P_n} \cdot \left[ \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \lambda - \frac{R}{Z} \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\lambda} \right) \right] \right] \left. \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (3.3)
\end{aligned}$$

При передаче натуральной мощности последнее выражение несколько упрощается

$$\frac{U_1}{U_2} = \left\{ 1 + \frac{R}{Z} \cdot \left( \cos^2 \lambda + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right) - \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin 2\lambda \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \lambda - \frac{R}{Z} \cdot \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\lambda} \right) \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (3.4)$$

Разрешая полученное квадратное уравнение (3.3) относительно  $\operatorname{tg} \varphi$  и пренебрегая активным сопротивлением линии, получаем относительную величину необходимой мощности ИРМ

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_n}{P} \left[ \operatorname{ctg} \lambda \pm \sqrt{\left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^2 \lambda} - \left( \frac{P}{P_n} \right)^2} \right] = \frac{Q}{P}. \quad (3.5)$$

Эта формула определяет максимальную мощность, которая может быть передана по линии при использовании ИРМ на ее конце

$$\frac{P}{P_n} = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{1}{\sin \lambda}, \quad (3.6)$$

поскольку при  $\frac{P}{P_n} > \frac{U_1}{U_2} \cdot \sin \lambda$  решение отсутствует.

При увеличении передаваемой мощности сверх натуральной необходимая мощность ИРМ возрастает (рис.3.3) вплоть до

максимального значения, соответствующего предельной передаваемой мощности

$$\frac{Q_{\text{макс}}}{P} = \frac{U_2}{U_1} \cos \lambda . \quad (3.7)$$

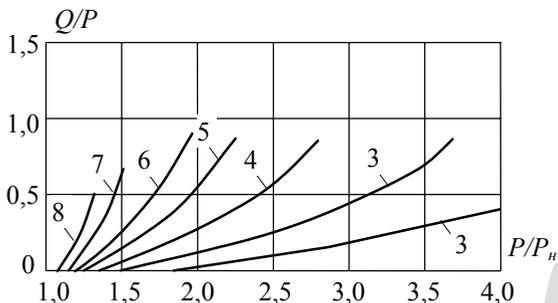


Рис. 3.3. Зависимости необходимого отношения  $Q/P$  от отношения  $P/P_n$  при  $U_1/U_2=1,05$  и при различных волновых длинах линий (рад):  $\lambda=0,2$  (кривая 2),  $0,3$  (кривая 3),  $0,4$  (кривая 4),  $0,5$  (кривая 5),  $0,6$  (кривая 6),  $0,8$  (кривая 7),  $1,0$  (кривая 8)

Как видно из рис.3.3, при увеличении длины линий предельная передаваемая мощность уменьшается, а относительная величина максимальной мощности ИРМ медленно уменьшается вплоть до  $\lambda=0,6$  рад, после чего темп уменьшения резко возрастает.

Данные рис.3.3 позволяют судить о необходимых затратах для обеспечения передачи мощности сверх натуральной, поскольку необходимая мощность ИРМ  $Q$  сравнима с передаваемой мощностью  $P$ .

Следует отметить, что предельная мощность, определяемая формулой (3.6), соответствует неустойчивому режиму передачи мощности, когда небольшой наброс мощности приводит к потере устойчивости передачи. Поэтому обычно вводится 20%-ый запас по отношению к предельной величине, выше которого передача мощности в нормальном режиме не допускается.

Изложенное позволяет сделать весьма важный вывод о том, что нарушение устойчивости электропередачи в основном определяется нарушением режима напряжения - несоответствия режима напряжения заданным условиям эксплуатации, реализуемым посредством уставок автоматических систем управления. Поэтому до проверок на

устойчивость необходимо обеспечить соответствие режима напряжения заданным условиям эксплуатации.

Сверхнатуральный режим передачи мощности имеет ряд недостатков.

Источник реактивной мощности поддерживает напряжение на уровне номинального, но при мощности  $P > P_n$  напряжение на линии опускается ниже номинального и тем в большей степени, чем больше отношение  $P/P_n$  и длина линии (см. рис.3.4). Это проседание напряжения в середине линии можно оценить с помощью формулы

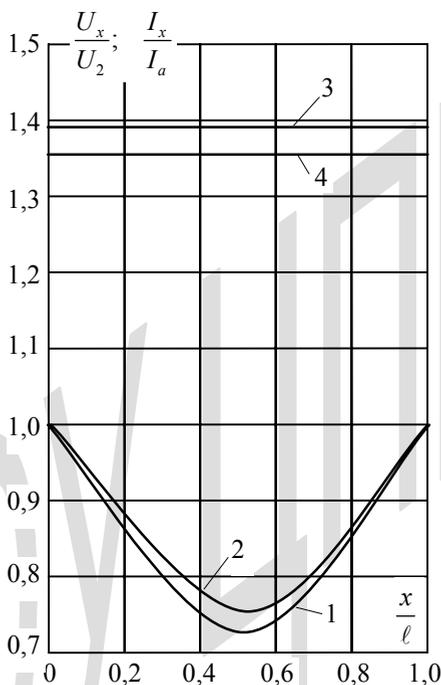


Рис. 3.4. Распределение вдоль линии напряжения (1, 2) и полного тока (3, 4) в предельном режиме линий с волновыми длинами 0,314 рад (1, 3) и 0,628 рад (2, 4), что при  $f=50$  Гц соответствует длинам линий 300 км и 600 км

$$\frac{U_{\phi/2}}{U_2} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos \frac{\lambda}{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_n}\right)^2 \sin^2 \lambda}}, \quad (3.8)$$

полученной из (2.27) путем несложных преобразований (см[4]). В частности, при предельном значении передаваемой мощности  $P/P_n = 1/\sin \lambda$

$$\frac{U_{\phi/2}}{U_2} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos \frac{\lambda}{2}}. \quad (3.9)$$

Например, при  $\lambda=0,628$  рад  $U_{\phi/2}/U_2=0,743$ .

Кроме посадки напряжения в середине линии передача мощности сверх натуральной приводит к повышенным потерям мощности в линии из-за протекания дополнительного реактивного тока, увеличивающего среднеквадратичный ток в линии, который в предельном режиме равен

$$I_{\text{ср.кв}} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{2} \cdot Z \sin \frac{\lambda}{2}}. \quad (3.10)$$

Например, при длине линии 600 км ( $\lambda=0,628$  рад)  $I_{\text{ср.кв}}=2,28I_n$ , тогда как предельная мощность в этом случае согласно (3.6)  $P=1,7P_n$ .

Таким образом, повышение пропускной способности линий за счет использования ИРМ имеет следующие недостатки:

- необходимость дополнительных капитальных вложений на установку ИРМ;
- посадка напряжения на линии по сравнению с напряжением по концам линии,
- увеличение тока в линии по сравнению с передаваемым активным током и как следствие
- увеличение потерь мощности в линии.

### 3.3. Продольная емкостная компенсация индуктивного сопротивления линий

При применении продольной емкостной компенсации индуктивного сопротивления линии волновые параметры линии принимают вид

$$\left. \begin{aligned} X_{\vartheta} &= \omega \cdot L_{\vartheta} \cdot \ell = \omega \cdot L_0 \cdot \ell \cdot (1 - \eta_c); \\ Z_{\vartheta} &= \sqrt{\frac{L_{\vartheta}}{C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} (1 - \eta_c) = Z \sqrt{1 - \eta_c}; \\ V_{\vartheta} &= \frac{1}{\sqrt{L_{\vartheta} C}} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C} (1 - \eta_c)} = \frac{V}{\sqrt{1 - \eta_c}}; \\ \lambda_{\vartheta} &= \frac{\omega \cdot \ell}{V_{\vartheta}} = \omega \ell \sqrt{LC} (1 - \eta_c) = \lambda \sqrt{1 - \eta_c}; \\ P_{нэ} &= \frac{3U_{\phi}^2}{Z_{\vartheta}} = \frac{3U_{\phi}^2}{Z_{\vartheta} \sqrt{1 - \eta_c}} = \frac{P_n}{\sqrt{1 - \eta_c}}; \end{aligned} \right\} (3.11)$$

где  $\eta_c = \frac{X_c}{X_L} = \frac{1}{\omega C_{\Pi} \cdot \omega L} = \frac{1}{\omega^2 L \cdot C_{\Pi}}$  - степень продольной емкостной компенсации индуктивного сопротивления линии,  $X_L = \omega L_0 \ell$  - полное индуктивное сопротивление линии,  $C_{\Pi}$  - результирующая емкость продольной компенсации. Как видно из приведенных параметров, в этом случае эквивалентное волновое сопротивление линии уменьшается, а эквивалентная скорость распространения электромагнитной волны вдоль линии увеличивается, что приводит к сокращению волновой длины линии. Увеличивается и эквивалентная натуральная мощность линии. Воспользовавшись формулой (3.6) можно оценить увеличение предельной мощности по устойчивости

$$P_{2,н.к} = \frac{P_{н.э}}{\sin \lambda_{\vartheta}} \cdot \frac{U_1}{U_2} = \frac{P_n}{\sqrt{1 - \eta_c}} \cdot \frac{1}{\sin \lambda \sqrt{1 - \eta_c}} \cdot \frac{U_1}{U_2}. \quad (3.12)$$

Следовательно, при малых длинах линий, когда

$$\sin \lambda \sqrt{1 - \eta} \approx \lambda \sqrt{1 - \eta},$$

$$P_{2,пр.к} = \frac{P_n}{\lambda} \cdot \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{1}{1-\eta_c}, \quad (3.13)$$

продольная емкостная компенсация обеспечивает значительное увеличение пропускной способности линии, обратнопропорциональное  $(1-\eta_c)$ . При больших длинах линий, когда  $\sin \lambda \sqrt{1-\eta_c} < \lambda \sqrt{1-\eta_c}$  это увеличение возрастает и тем в большей степени, чем больше длина линии.

Допустимая передаваемая мощность по перепаду напряжения также значительно увеличивается. Так для относительно коротких линий высокого напряжения согласно (2.10) она равна

$$P_{дон} = \frac{U_{ном}^2}{R} \cdot \frac{\sqrt{1,32 + 0,32 \left(\frac{X}{R}\right)^2 (1-\eta_c)^2 - 1}}{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2 (1-\eta_c)^2}. \quad (3.14)$$

Результаты расчетов эффективности продольной емкостной компенсации соответствуют данным, приведенным на рис.2.1 при  $\eta_c=0,5$  (кривая 2).

С учетом волновых параметров линий волновое уравнение напряжений принимает вид (см.(2.28), (3.11))

$$\begin{aligned} \frac{\dot{U}_1}{U_2} = & \cos \lambda \sqrt{1-\eta_c} + \frac{P}{P_n} \frac{R}{2Z} \left( \cos \lambda \sqrt{1-\eta_c} + \frac{\sin \lambda \sqrt{1-\eta_c}}{\lambda \sqrt{1-\eta_c}} \right) + \\ & + j \left( \frac{R}{2Z \sqrt{1-\eta_c}} + \frac{P}{P_n} \sqrt{1-\eta_c} \right) \sin \lambda \sqrt{1-\eta_c}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

откуда отношение напряжений в начале и в конце линии при пренебрежении ее активным сопротивлением равно

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} = & \sqrt{\cos^2 \lambda \sqrt{1-\eta_c} + \left(\frac{P}{P_n}\right)^2 (1-\eta_c) \sin^2 \lambda \sqrt{1-\eta_c}} = \\ = & \sqrt{1 + \left[\left(\frac{P}{P_n}\right)^2 - 1\right] \sin^2 \lambda \sqrt{1-\eta_c} - \left(\frac{P}{P_n}\right)^2 \eta_c \sin^2 \lambda \sqrt{1-\eta_c}}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Отличие полученной формулы от приведенной ранее без продольной емкостной компенсации определяется наличием третьего (отрицательного) члена и уменьшением аргумента синуса.

Разрешая уравнение (3.16) относительно  $P/P_n$ , получаем

$$\frac{P}{P_n} = \frac{1}{\sqrt{1-\eta_c} \cdot \sin \lambda \sqrt{1-\eta_c}} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - \cos^2 \lambda \sqrt{1-\eta_c}}. \quad (3.17)$$

Аналогичное решение уравнения (2.29а) при  $R=0$  дает

$$\frac{P}{P_n} = \frac{1}{\sin \lambda} \sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - \cos^2 \lambda}. \quad (3.18)$$

При заданном перепаде напряжений допустимая передаваемая мощность увеличивается в отношении

$$\frac{P_{пр.к}}{P_{пр}} = \frac{\sin \lambda}{\sqrt{1-\eta_c} \cdot \sin \lambda \sqrt{1-\eta_c}} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - \cos^2 \lambda \sqrt{1-\eta_c}}}{\sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - \cos^2 \lambda}}. \quad (3.19)$$

Например, при  $\lambda=0,314$  рад,  $U_1/U_2=1,05$  и  $\eta_c=0,3$  это отношение составляет 1,35. При этом мощность батарей конденсаторов составляет

$$Q_c = \eta_c \cdot P_n \cdot \lambda \cdot \left(\frac{P}{P_n}\right)^2 = \frac{\eta_c \cdot P_n \cdot \lambda}{(1-\eta_c) \cdot \sin^2 \lambda \sqrt{1-\eta_c}} \cdot \left[\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - \cos^2 \lambda \sqrt{1-\eta_c}\right] \quad (3.20)$$

и для приведенного примера равна

$$Q_c = \frac{0,3 \cdot P_n \cdot \lambda}{0,7 \sin^2 0,263} (1,05^2 - \cos^2 0,263) = 0,873 \cdot P_n \cdot \lambda.$$

При этом на холостом ходу линии ( $P=0$ ) согласно (3.16) напряжение на конце линии уменьшается

$$U_2 = \frac{U_1}{\cos \lambda \sqrt{1-\eta_c}}. \quad (3.21)$$

Для длинных линий необходимость ограничения напряжения в режиме холостого хода и исключения потребления генераторами реактивной мощности требует 100%-ной компенсации их зарядной

мощности. При этом передаваемая по линии мощность резко ограничивается, когда используются фиксированные реакторы (см. §2.5). В этом случае продольная емкостная компенсация позволяет увеличить пропускную способность линий [4].

При 100%-ной компенсации зарядной мощности линия полностью теряет свои волновые свойства (см. §2.4). При этом уравнение напряжений на линии при наличии продольной емкостной компенсации принимает вид

$$\dot{U}_1 = U_2 + \dot{I}_2 \cdot R + j \cdot \dot{I}_2 \cdot Z \cdot \lambda \cdot (1 - \eta_c), \quad (3.22)$$

где  $\eta_c = \frac{X_c}{X} = \frac{X_c}{\lambda \cdot Z}$ .

Отношение напряжений на концах линии при передаче чисто активной мощности  $\left( \dot{I}_2 = \frac{U_2}{Z} \frac{P}{P_n} \right)$  равно

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\left(1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n}\right)^2 + \left(\lambda \cdot \frac{P}{P_n}\right)^2 \cdot (1 - \eta_c)^2} \approx \sqrt{1 + \left(\lambda \frac{P}{P_n}\right)^2 \cdot (1 - \eta_c)^2 + 2 \frac{R}{Z} \left(\frac{P}{P_n}\right)}. \quad (3.23)$$

Необходимая степень продольной емкостной компенсации для передачи заданной мощности согласно (3.23)

$$\eta_c = 1 - \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{P_n}{P} \sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - \left(1 + \frac{R}{Z} \cdot \frac{P}{P_n}\right)^2}. \quad (3.24)$$

Как видно из формулы (3.24), при увеличении отношения  $P/P_n$  и волновой длины линии  $\lambda$  необходимая степень продольной емкостной компенсации увеличивается (см. рис. 3.5). При малых длинах линий для передачи натуральной мощности продольная компенсация не требуется. При больших длинах линий достигается 100%-ная компенсация, после чего передача натуральной мощности невозможна.

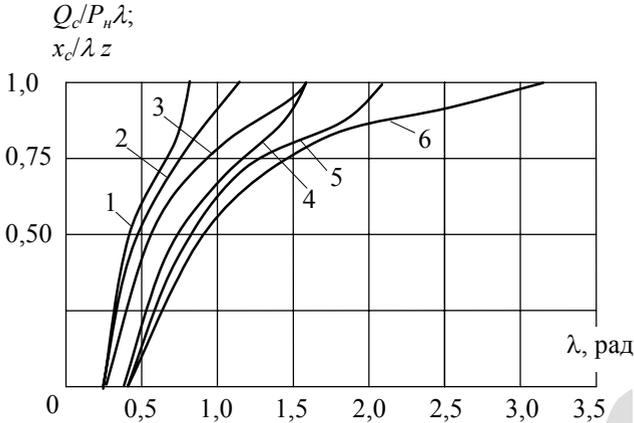


Рис. 3.5. Зависимости от волновой длины линий необходимой степени продольной компенсации для передачи натуральной мощности при заданных перепадах напряжения  $U_1/U_2=1,05$  (кривые 1-3) и 1,10 (кривые 4-6) для разных классов напряжения: 500 кВ (кривые 1 и 4), 800 (кривые 2 и 5), 1200 кВ (кривые 3 и 6)

Уравнение (3.23) позволяет получить зависимость предельного отношения передаваемой мощности к натуральной  $(P/P_H)_{np}$  от длины линии при заданном допустимом перепаде напряжения  $U_1/U_2$  :

$$\left(\frac{P}{P_H}\right)_{np} = \frac{-\frac{R}{Z} + \sqrt{\frac{R^2}{Z^2} + \left[\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{доп}^2 - 1\right] \cdot \left[\frac{R^2}{Z^2} + \lambda^2(1 - \eta_c)^2\right]}}{\lambda^2(1 - \eta_c)^2 + \frac{R^2}{Z^2}}. \quad (3.25)$$

Результаты вычислений по этой формуле при отношении

$$\frac{R}{Z} = \frac{\rho \cdot \ell}{Z \cdot F_a} = \frac{\rho \cdot \ell \cdot I_H \cdot J}{U_2 \cdot I_H} = \frac{\rho \cdot \ell \cdot J}{U_2}$$

для линии класса 500 кВ при  $\rho = 28,3 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{км}$ ,  $J = 0,8 \text{ А}/\text{мм}^2$  и  $(U_1/U_2)_{доп} = 1,05$  приведены на рис.3.6 вместе с данными рис.2.13 для такой же линии при использовании УШРТ в диапазоне изменения параметра  $\beta$  от 0 до -1. Как видно, при одинаковой мощности компенсирующих устройств

$$(\eta_c = X_C/\lambda \cdot Z = I_H^2 X_C/I_H^2 Z \lambda = Q_c/P_H \lambda; \quad \beta = Q_P/P_H \lambda)$$

эффективность продольной емкостной компенсации значительно ниже, причем с увеличением длины линии это различие возрастает.

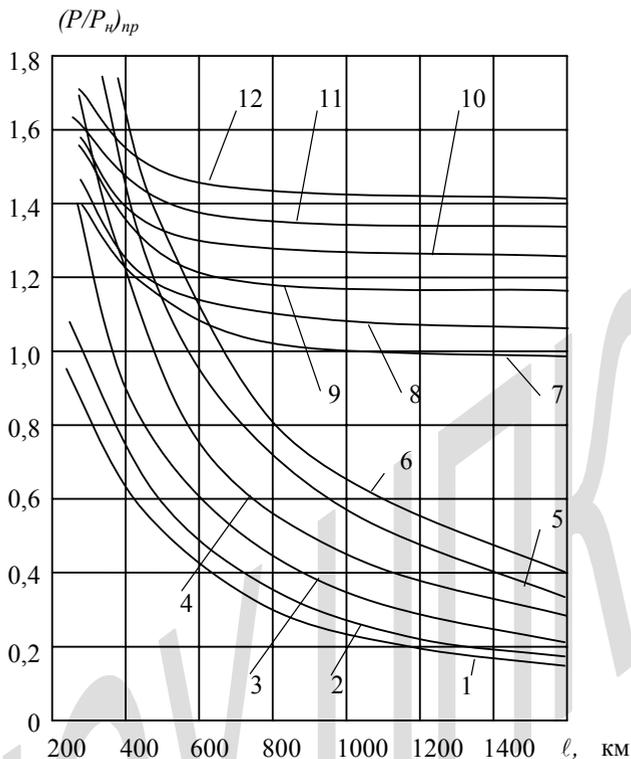


Рис.3.6. Зависимости отношения предельной передаваемой мощности к натуральной мощности линий класса 500 кВ от их длины при 100%-ной компенсации их зарядной мощности ( $\beta = 1$ ) и различных значениях  $\eta_c = 0$  (кривая 1); 0,2 (кривая 2); 0,4 (кривая 3); 0,6 (кривая 4); 0,8 (кривая 5); 1,0 (кривая 6) и при  $\eta_c = 0$  и различных значениях  $\beta = 0$  (кривая 7); -0,2 (кривая 8); -0,4 (кривая 9); -0,6 (кривая 10); -0,8 (кривая 11); -1,0 (кривая 12) при частоте  $f = 50$  Гц

На рис.3.7 приведена зависимость критической длины линии от степени компенсации ее реактивной мощности, при которой эффективность обоих видов компенсации одинакова для линий 500 кВ. При большей длине линий ( $\ell > \ell_{кр}$ ) более эффективна компенсация с

помощью УШРТ; при  $\ell < \ell_{кр}$  более эффективна компенсация с помощью УПК.

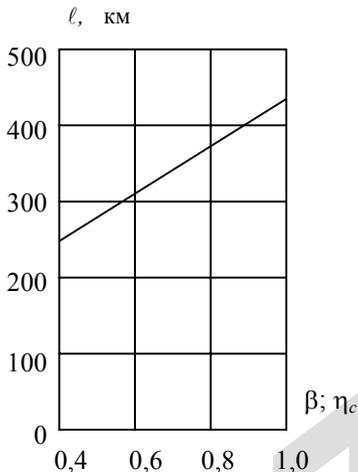


Рис.3.7. Зависимость критической длины линии 500 кВ от степени компенсации  $\beta$  ( $\eta_c$ )

Следует отметить, что комбинированное применение УШРТ с диапазоном регулирования  $0 \leq \beta \leq 1$  и УПК значительно повышает эффективность использования УПК. Действительно, в этом случае в режиме холостого хода линии  $\beta=1$  и напряжение вдоль линии не изменяется ( $U_1/U_2=1$ ). При увеличении передаваемой мощности параметр  $\beta$  уменьшается до нуля, и предельная передаваемая мощность определяется соотношением, полученном из уравнения (3.15) при подстановке отношения

$$\frac{R}{Z} = \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{U_2} \cdot \frac{P}{P_H}$$

$$\left( \frac{P}{P_H} \right)_{пр} = \frac{1}{\sqrt{1 - \eta_c} \cdot \sin \lambda \sqrt{1 - \eta_c}} \times \sqrt{\left( \frac{U_1}{U_2} \right)_{доп}^2 - \cos^2 \lambda \sqrt{1 - \eta_c} - \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{U_2} \cdot \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1 - \eta_c}}{2\lambda \sqrt{1 - \eta_c}} \right)}. \quad (3.26)$$

Результаты вычислений по этой формуле для линий класса 500 кВ приведены на рис.3.8. Сравнение полученных зависимостей  $(P/P_H)_{np} = f(\ell)$  с аналогичными зависимостями рис.3.6 показывает, что в последнем случае предельная передаваемая мощность больше, чем в обоих случаях, соответствующих рис.3.6. Тем не менее можно говорить о преимуществе использования УШРТ в диапазоне регулирования  $-1 \leq \beta \leq 1$ , поскольку в этом случае батареи конденсаторов располагаются на потенциале земли, а не под номинальным напряжением линии, и через конденсаторы не протекает ток нагрузки линии.

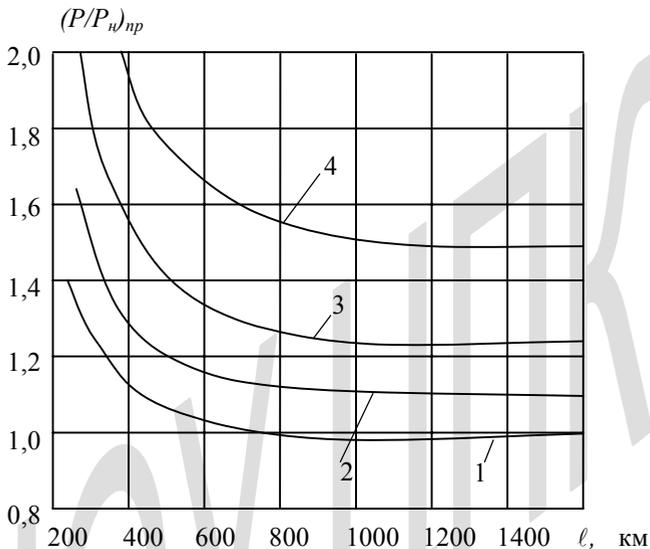


Рис.3.8. Зависимости  $(P/P_H)_{np}$  от длины линии класса 500 кВ при  $\beta = 0$  и различных значениях  $\eta_c = 0$  (кривая 1); 0,2 (кривая 2); 0,4 (кривая 3); 0,6 (кривая 4) при частоте  $f = 50$  Гц

Необходимо отметить, что при выводе формулы (3.26) предполагалось равномерное распределение УПК вдоль линии. В действительности УПК сосредоточены в отдельных пунктах. Поэтому следует выяснить необходимое их количество  $n$ , исходя из ограничения перепада напряжения на них. Перепад напряжения на УПК можно определить исходя из уравнения

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= \dot{U}_1 + j \cdot X_C \cdot \frac{1}{n} = \dot{U}_1 - j \cdot \dot{I}_H \cdot \frac{P}{P_H} \cdot \eta_C \cdot X_L \cdot \frac{1}{n} = \\ &= \dot{U}_1 - j \cdot \dot{I}_H \cdot \frac{P}{P_H} \cdot \eta_C \cdot Z \cdot \lambda \cdot \frac{1}{n} = \dot{U}_1 \cdot \left( 1 - j \cdot \frac{1}{n} \cdot \eta_C \cdot \lambda \cdot \frac{P}{P_H} \right),\end{aligned}$$

откуда при передаче чисто активной мощности и при совмещении вектора  $U_1$  с осью вещественных получаем

$$\left( \frac{U_2}{U_1} \right)_{\text{доп}}^2 = 1 + \left( \eta_C \cdot \lambda \cdot \frac{P}{P_H} \cdot \frac{1}{n} \right)^2$$

или

$$n = \frac{\eta_C \cdot \lambda \cdot \frac{P}{P_H}}{\sqrt{\left( \frac{U_2}{U_1} \right)_{\text{доп}}^2 - 1}}.$$

$$\text{При } \left( \frac{U_2}{U_1} \right)_{\text{доп}} = 1,05$$

$$n = 3,1 \cdot \eta_C \cdot \lambda \cdot \frac{P}{P_H}.$$

Результаты расчетов по этой формуле при  $(P/P_H)_{np}$  согласно рис.3.8 при  $\eta_C=0,6$  приведены в табл.3.1 при частоте  $f=50$  Гц.

В четвертой строке таблицы приведены расчетные значения необходимого количества УПК, а в пятой – реальное их количество с учетом их целочисленности. Как видно, минимальное количество УПК быстро увеличивается при увеличении длины линии. При этом удельное количество УПК (на единицу волновой длины линий  $n/\lambda$ ) сохраняется практически неизменным при  $\lambda > 0,42$  рад. Необходимое большое количество УПК также является недостатком такого способа повышения пропускной способности длинных линий электропередачи.

Таблица 3.1.

$\ell$ , км	400	600	800	1000	1200	1500
$\lambda$ , рад	0,42	0,63	0,84	1,05	1,256	1,57

$(P/P_H)_{пр}$	1,97	1,65	1,55	1,51	1,5	1,5
$n_p$	1,54	1,94	2,44	3,0	3,5	4,5
$n$	2	2	3	3	4	5
$n/\lambda$	4,76	3,2	3,6	2,86	3,2	3,2

### 3.4. Повышение пропускной способности линий путем настройки на полуволновый режим

Если волновая длина линии  $\lambda > \pi/2$ , целесообразно рассмотреть возможность ее настройки на полуволновый режим. Для увеличения волновой длины линии до  $\pi$  рад можно увеличить индуктивное сопротивление линии либо ее рабочую емкость (см. формулу (3.11)), либо увеличить оба эти параметра. Однако, при увеличении индуктивного сопротивления увеличивается волновое сопротивление линии и уменьшается ее натуральная мощность. При увеличении емкости линии волновое сопротивление уменьшается и натуральная мощность увеличивается. Но стоимость шунтирующих батарей конденсаторов чрезвычайно велика. Поэтому рассмотрим частный случай увеличения волновой длины линии путем одинакового увеличения индуктивного сопротивления линии и ее рабочей емкости, когда волновое сопротивление линии сохраняется неизменным. При этом эквивалентная волновая длина линии  $\lambda_s = \pi$ , а эквивалентное волновое сопротивление  $Z_s = Z$ , и согласно уравнению (2.29а) при передаче активной мощности

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{1 + \frac{P}{P_n} \cdot \frac{R}{Z}} \approx 1 + \frac{P}{P_n} \cdot \frac{R}{2Z} . \quad (3.27)$$

Следовательно, напряжение в конце линии мало изменяется при изменении передаваемой по линии мощности. Однако в середине линии ( $\lambda_x = \pi/2$ ) согласно (2.28)

$$\frac{\dot{U}^{\lambda/2}}{U} = \frac{P}{P_n} \cdot \frac{R}{Z \cdot \pi} + j \cdot \left( \frac{R}{2Z} + \frac{P}{P_n} \right) \quad (3.28)$$

и

$$\frac{U_{\lambda/2}}{U} = \sqrt{\left(\frac{P}{P_n} + \frac{R}{2Z}\right)^2 + \left(\frac{P}{P_n}\right)^2 \left(\frac{R}{Z \cdot \pi}\right)^2} \approx \frac{P}{P_n} + \frac{R}{2Z}. \quad (3.29)$$

Следовательно, в середине линии напряжение изменяется линейно при увеличении передаваемой мощности от весьма небольшого до номинального.

Ток в начале линии согласно (2.36) при  $I_2 = \frac{U_2}{Z} \frac{P}{P_n}$  и  $\lambda_3 = \pi$

определяется соотношением

$$\dot{I}_1 = -\frac{U_2}{Z} \cdot \left(\frac{P}{P_n} + \frac{R}{2Z}\right) \quad (3.30)$$

и, как видно, изменяется пропорционально передаваемой мощности с поправкой, связанной с активным сопротивлением линии.

Ток в середине линии ( $\lambda_x = \pi/2$ ) определяется соотношением

$$\dot{I}_{\lambda/2} = -\frac{U_2}{Z} \cdot \frac{R}{\pi \cdot Z} + j \frac{U_2}{Z} \cdot \left(1 + \frac{R}{2Z} \cdot \frac{P}{P_n}\right),$$

и его действующее значение равно

$$I_{\lambda/2} = \frac{U_2}{Z} \sqrt{\left(1 + \frac{R}{2Z} \cdot \frac{P}{P_n}\right)^2 + \left(\frac{R}{\pi \cdot Z}\right)^2} \approx \frac{U_2}{Z} \cdot \left(1 + \frac{R}{2Z} \cdot \frac{P}{P_n}\right). \quad (3.31)$$

Как видно, ток в середине линии практически не зависит от передаваемой мощности и примерно равен натуральному току.

В связи с этим потери мощности на линии с  $\lambda = \pi$  в режиме холостого хода велики. Действительно, в режиме холостого хода ( $P=0$ ) согласно (2.37) распределение тока вдоль линии описывается соотношением

$$I_x = \frac{U_2}{Z} \sqrt{\sin^2 \lambda_x + \left(\frac{R}{2Z}\right)^2 \cdot \left(\cos \lambda_x - \frac{\sin \lambda_x}{\lambda_x}\right)^2} \approx \frac{U_2}{Z} \cdot \sin \lambda_x. \quad (3.32)$$

Потери мощности в режиме холостого тока

$$\Delta P = 3R \int_0^\pi I_x^2 \cdot d\lambda_x = \frac{3U_2^2 \cdot R}{Z^2} \int_0^\pi \sin^2 \lambda_x \cdot d\lambda_x = P_n \frac{R}{2Z}, \quad (3.33)$$

тогда как в режиме передачи натуральной мощности

$$\Delta P = 3I_n^2 \cdot R = \frac{3U_2^2}{Z^2} R = P_n \frac{R}{Z}. \quad (3.34)$$

Таим образом, потери мощности на холостом ходу линии в полуволновом режиме вдвое меньше потерь при передаче натуральной мощности.

Эти два недостатка полуволнового режима линий электропередачи (значительные колебания напряжения на линии при изменении передаваемой мощности и высокие потери мощности при малых нагрузках) снижают эффективность применения настроенных электропередач. Однако экономия на устройствах компенсации реактивной мощности определяет повышение интереса к таким линиям. Действительно, при волновой длине линии  $\lambda = \pi$  не требуется вообще компенсирующих устройств для передачи мощности  $0 < P \leq P_n$ , т. к. напряжение и ток в этом случае совпадают по фазе (см. формулы (2.28), (3.30)).

При волновой длине линии  $\lambda < \pi$  необходимо использование компенсирующих устройств (см. рис. 3.7). В соответствии с вышеизложенным для настройки линии на полуволновый режим необходимо увеличить индуктивность и емкость линии в одинаковом отношении

$$\begin{aligned} L_3 &= K \cdot L_0, \\ C_3 &= K \cdot C, \end{aligned} \quad (3.35)$$

где  $K$  - коэффициент увеличения. При этом волновое сопротивление линии сохраняется неизменным

$$Z_3 = \sqrt{\frac{L_3}{C_3}} = \sqrt{\frac{L_0}{C}},$$

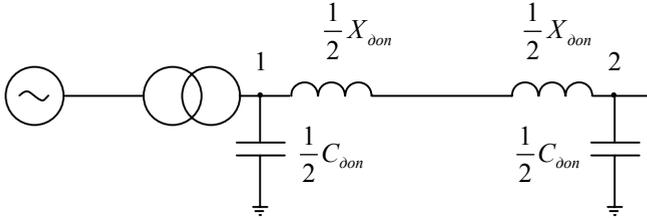


Рис. 3.7. Схема настройки линии на полуволновой режим ее работы

а волновая длина линии пропорционально увеличивается

$$\lambda_3 = \omega \sqrt{L_3 \cdot C_3} \cdot \ell = \omega \cdot K \sqrt{L_0 \cdot C} \cdot \ell = K \cdot \lambda = \pi, \quad (3.36)$$

где  $K = \pi / \lambda$ .

Тогда дополнительное индуктивное сопротивление равно

$$X_{don} = \omega \cdot (L_3 - L_0) \ell = \omega \cdot \ell \cdot L_0 \cdot \left( \frac{\pi}{\lambda} - 1 \right) = \omega \cdot \ell \cdot L_0 \frac{\pi - \lambda}{\lambda} = Z \cdot (\pi - \lambda) \quad (3.37)$$

и дополнительная шунтирующая емкость

$$C_{don} = (C_3 - C) \cdot \ell = C \cdot \ell \left( \frac{\pi}{\lambda} - 1 \right) = C \cdot \ell \frac{\pi - \lambda}{\lambda} = \frac{\ell}{V \cdot Z} \frac{\pi - \lambda}{\lambda}. \quad (3.38)$$

Чем больше разность  $\pi - \lambda$ , тем больше требуется емкость компенсирующих устройств

$$Q_L = 3 \cdot I_n^2 \cdot X_{don} = 3 \cdot \left( \frac{U_\phi}{Z} \right)^2 Z \cdot (\pi - \lambda) = P_n \cdot (\pi - \lambda), \quad (3.39)$$

$$Q_C = \frac{3U_\phi^2}{X_{C_{don}}} \cdot 3\omega \cdot C_{don} \cdot U_\phi^2 = \frac{3\omega \cdot U_\phi^2 \cdot \ell}{V \cdot Z} \cdot \frac{\pi - \lambda}{\lambda} = P_n \cdot (\pi - \lambda). \quad (3.40)$$

Суммарная мощность компенсирующих устройств равна

$$Q_\Sigma = Q_L + Q_C = 2P_n \cdot (\pi - \lambda). \quad (3.41)$$

Очевидно, что когда суммарная стоимость компенсирующих устройств равна или больше стоимости управляемых реакторов при 100%-ной компенсации зарядной мощности линии

$$Q_{УЩР} = P_n \cdot \lambda,$$

тогда нецелесообразно применять настройку линии на полуволновый режим, а следует использовать управляемые шунтирующие реакторы.

Такие реакторы необходимо также использовать во всех случаях когда недопустимы колебания напряжения на линии в широких пределах, как это происходит на линиях, настроенных на полуволновый режим. Таким образом, увеличение пропускной способности линии за счет применения компенсирующих устройств различного типа возможно в широкий предел. Однако, во всех случаях это повышение пропускной способности связано с большими добавочными капитальными вложениями и со сложностями обеспечения режима напряжения. Поэтому наиболее целесообразным путем повышения пропускной способности линий электропередачи является повышение натуральной мощности линий конструктивными мерами и использование управляемых шунтирующих реакторов.

### **Литература**

1. Александров Г.Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. – Л.: Энергоатомиздат, 1989 – 36 с.
2. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения./Под редакцией Г.Н.Александрова. СПб.: Энергоатомиздат, 1993 – 560 с.
3. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 648 с.
4. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током. – М.% Знак, 1998 – 272 с.
5. Александров Г.Н., Лунин В.П. Управляемые реакторы. СПб. Изд. Северо-Западного филиала АО «ГВЦ Энергетики», 2000 – 155 с.
6. Марголин Н.Ф. Токи в земле. ГЭИ, 1947.
7. Ульянов С.А. Короткие замыкания в электрических системах. М.-Л., ГЭИ, 1952 – 280 с.
8. Методические указания по применению неполнофазных режимов работы основного оборудования электроустановок 330-1150 кВ. Авторы Ю.И.Лысков, Н.П.Антонова, О.Ю.Демина и др. РАО «ЕЭС России», СПО ОРГРЭС, 1999.

## **Режимы работы воздушных линий электропередачи**

Учебное пособие

Чл.-кор. РАН, д.т.н., проф. Александров Георгий Николаевич

Издание Центра подготовки кадров энергетики,  
194223, Санкт-Петербург, а/я 44.  
Тираж 500 экз., 2006 г.