

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

М.А. КУБАТКИН, В.С. ЛАРИН, Д.А. МАТВЕЕВ

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
«ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАХ
ЗА СЧЕТ ЕМКОСТНОГО ЭФФЕКТА»**

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
по курсу
«Техника высоких напряжений»
для студентов, обучающихся по направлению
«Электроэнергетика»

УДК
621.315
К 88

Утверждено учебным управлением МЭИ (ТУ)

*Подготовлено на кафедре техники и электрофизики высоких напряжений
Рецензент: д-р техн. наук, профессор И.П. Верещагин*

Кубаткин М.А., Ларин В.С. , Матвеев Д.А.
К 88 Компьютерная лабораторная работа «Перенапряжения в дальних электропередачах за счет емкостного эффекта»: метод. пособие / М.А. Кубаткин, В.С. Ларин, Д.А. Матвеев. — М.: Издательский дом МЭИ, 2016. — 48 с.

Представлено описание компьютерной лабораторной работы, посвященной изучению перенапряжений, возникающих в дальних электропередачах за счет емкостного эффекта в режимах одностороннего и двухстороннего питания. Емкостный эффект рассмотрен как с позиций волновой теории, так и по теории цепей с сосредоточенными параметрами. Показана взаимосвязь токов в линии с потоками реактивной мощности. Рассматривается влияние на уровень перенапряжений шунтирующих реакторов, установленных в различных точках линии, и установок продольной компенсации. Приведены соотношения для выбора мощности реакторов.

Для студентов электроэнергетических и электромеханических специальностей, изучающих дисциплину «Техника высоких напряжений».

© Московский энергетический институт
(технический университет), 2016

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

В дальних электропередачах высокого напряжения переменного тока в режимах холостого хода и малых нагрузок возникают перенапряжения установившегося режима, причиной которых является *емкостный эффект*, под которым понимают повышение напряжения в линии, обусловленное протеканием емкостного тока по распределенной индуктивности линии и сосредоточенной индуктивности источника.

Для выяснения физической сущности емкостного эффекта следует обратиться к решению дифференциальных уравнений линии электропередачи, которые широко известны под названием *телеграфных уравнений*. Их анализ и решение приведены в Приложении 1.

Наибольшие перенапряжения возникают в режиме одностороннего питания линии (рис. 1, б). Если по длине линии выполнен полный цикл транспозиции, то параметры линии можно считать симметричными. В этом случае анализ режима можно провести в однофазной постановке на схеме замещения с параметрами прямой последовательности (рис. 1, в). Система эквивалентруется источником ЭДС E_1 с входным индуктивным сопротивлением X_1 . Для упрощения анализа активными сопротивлениями пренебрегаем.

На рис. 1, а приведены графики распределения действующего значения напряжения $U(x)$ для источника бесконечной мощности (кривая 1) и конечной мощности (кривая 2). В обоих случаях напряжение вдоль линии растет, а при учете внутреннего сопротивления источника уже в начале линии напряжение U_1 превышает ЭДС источника.

Для объяснения возрастания напряжения в начале линии U_1 рассмотрим схему замещения (рис. 2), на которой линия представлена своим входным сопротивлением $Z_{вх}$. В этой схеме напряжение в начале линии:

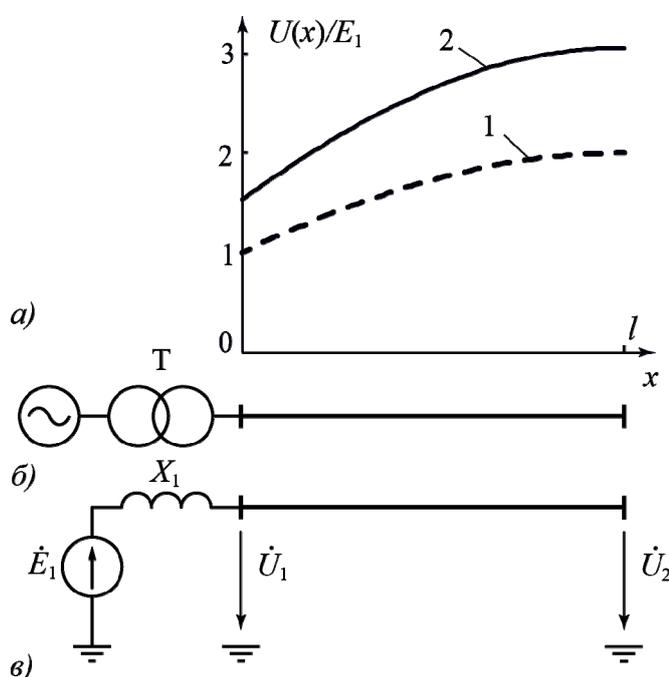


Рис. 1. Распределения напряжений в разомкнутой линии электропередачи длиной $l = 1000$ км

а – графики распределений при сопротивлениях источника:

1) $X_1 = 0$; 2) $X_1 \neq 0$

б – схема электропередачи;

в – схема замещения

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 \frac{\underline{Z}_{\text{BX}}}{jX_1 + \underline{Z}_{\text{BX}}} \quad (1)$$

Входное сопротивление разомкнутой линии без потерь чисто мнимое (П1.23):

$$\underline{Z}_{\text{BX}} = jX_{\text{BX}} = -jZ_c \text{ctg}\beta l, \quad (2)$$

где β и Z_c – коэффициент изменения фазы и волновое сопротивление линии по прямой последовательности.

Зависимость входного сопротивления линии от ее длины приведена на рис. 3. Видно, что для линий, длина которых меньше четверти длины волны ($\lambda/4 = 1500$ км на частоте 50 Гц), входное сопротивление имеет емкостный характер и образует в схеме замещения рис. 2 резонансный контур с индуктивным сопротивлением источника. При этом

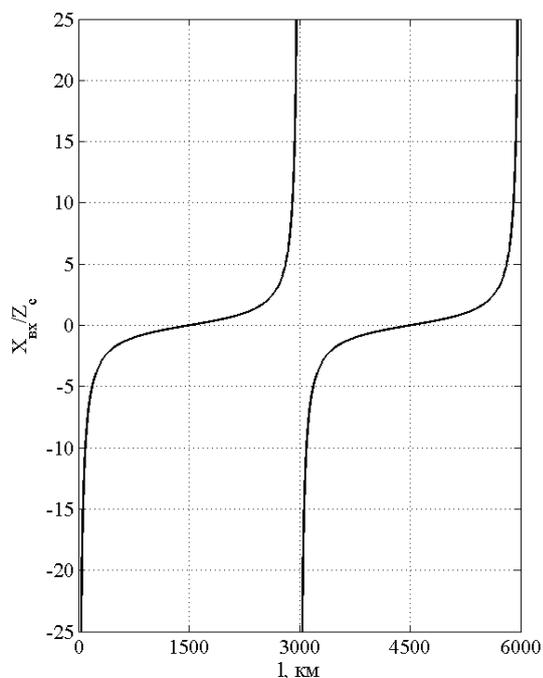
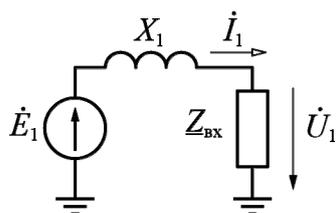


Рис. 3. Входное сопротивление разомкнутой линии ($f = 50$ Гц)

Характер тока (емкостный или индуктивный) в некоторой точке линии определяется ее входным сопротивлением в этой точке. Для пояснения рассмотрим общий случай разомкнутой линии (рис. 4, а), длина которой находится в диапазоне $\lambda/4 < l < \lambda/2$.

Выделим две точки линии x_1 и x_2 . Проанализируем изменение напряжения в окрестности Δx точки x_1 , которая удалена от конца линии на

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 \frac{-jZ_c \text{ctg}\beta l}{jX_1 - jZ_c \text{ctg}\beta l} = \dot{E}_1 k \quad (3)$$

где $k = \frac{Z_c \text{ctg}\beta l}{Z_c \text{ctg}\beta l - X_1}$ – коэффициент

повышения напряжения в начале линии.

При $Z_c \text{ctg}\beta l > X_1/2$, что имеет место в большинстве практических случаев, выполняется условие $|k| > 1$. Это проявление емкостного эффекта, обусловленное протеканием емкостного тока линии по индуктивности источника.

Повышение напряжения вдоль линии, показанное на рис. 1, а, обусловлено протеканием емкостного тока по распределенной индуктивности линии.

расстояние, превышающее четверть длины волны $(l - x_1) > \lambda/4$. В соответствии со схемой рис. 4, б):

$$\dot{U}(x_1 - \Delta x) = \Delta \dot{U} + \dot{U}(x_1), \quad (4)$$

где $\Delta \dot{U}$ – падение напряжения на индуктивном сопротивлении $L' \Delta x$.

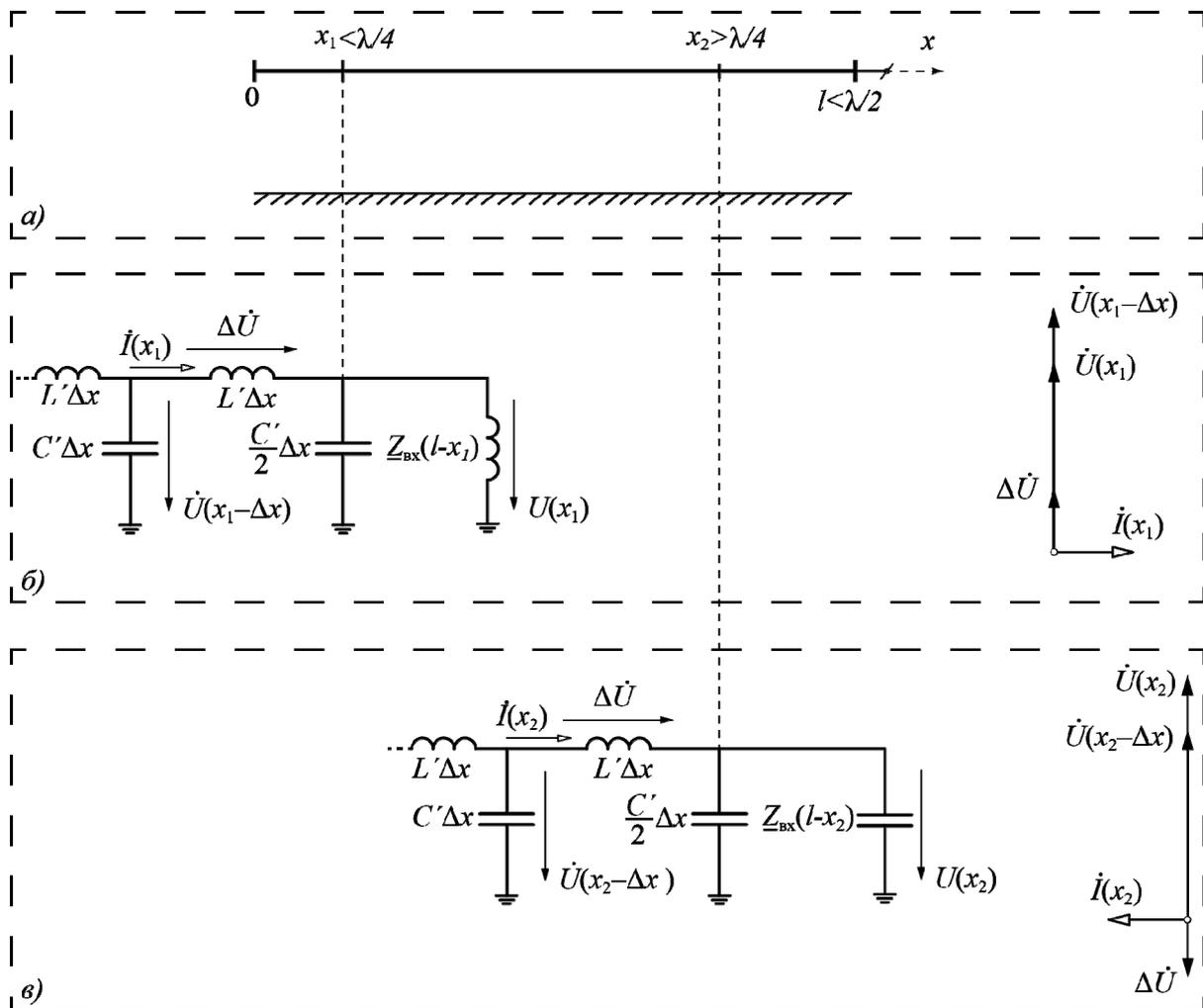


Рис. 4. К объяснению изменения напряжения в разомкнутой линии
 а – координаты рассматриваемых точек линии;
 б, в – схемы замещения и векторные диаграммы для участков линии
 в окрестности точек x_1 и x_2

Отложим на векторной диаграмме (рис. 4, б) напряжение $\dot{U}(x_1)$. Ток $\dot{I}(x_1)$, протекающий по участку Δx , определяется входным сопротивлением оставшейся части линии $Z_{\text{вх}}(l - x_1)$. Влиянием емкости $C' \Delta x/2$ можно пренебречь в силу малости ее значения. Так как $(l - x_1) > \lambda/4$, сопротивление $Z_{\text{вх}}(l - x_1)$ имеет индуктивный характер (см. рис. 3), поэтому ток

$\dot{I}(x_1)$ отстает от напряжения $\dot{U}(x_1)$ на 90° . Падение напряжения на индуктивности $\Delta\dot{U}$ опережает ток $\dot{I}(x_1)$ на 90° . Отложив на векторной диаграмме напряжение $\dot{U}(x_1 - \Delta x)$ в соответствии с формулой (4), делаем вывод: в окрестности точек, для которых входное сопротивление оставшейся части линии имеет индуктивный характер, напряжение вдоль линии убывает:

$$U(x_1) < U(x_1 - \Delta x). \quad (5)$$

В точке x_2 выполняется аналогичное (4) соотношение

$$\dot{U}(x_2 - \Delta x) = \Delta\dot{U} + \dot{U}(x_2). \quad (6)$$

Сопротивление $Z_{\text{вх}}(l - x_2)$ имеет емкостный характер, поэтому ток $\dot{I}(x_2)$ опережает напряжение $\dot{U}(x_2)$ (рис. 4, в). Падение напряжения $\Delta\dot{U}$ оказывается в противофазе с $\dot{U}(x_2)$, и, как следствие:

$$U(x_2) > U(x_2 - \Delta x). \quad (7)$$

Таким образом, в окрестности точек, для которых входное сопротивление оставшейся части линии имеет емкостный характер, напряжение вдоль линии возрастает. Это – проявление емкостного эффекта, обусловленное протеканием емкостного тока по распределенной индуктивности линии.

Сделанные выводы справедливы не только для разомкнутых линий, но и в случае произвольной реактивной нагрузки.

Математически, условие возрастания напряжения в линии подтверждается формулами теории длинных линий (Приложение 1). Так, для разомкнутой линии без потерь распределение напряжения на основании формулы (П1.20) при $I_2 = 0$ и с учетом $\beta = 2\pi/\lambda$:

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_2 \cos \frac{2\pi}{\lambda}(l - x), \quad (8)$$

откуда следует, что в точках линии, удаленных от ее конца на расстояние не большее, чем $\lambda/4$, напряжение возрастает.

В точке x , для которой $(l - x) = \lambda/4$, напряжение равно нулю. Это можно объяснить с позиций волновой теории. Результирующее напряжение в линии определяется суммой напряжений прямой и обратной волн. В точке x прямая волна отстает по фазе от обратной за счет времени, затрачиваемого обратной волной на пробег двойного расстояния $2(l - x)$ между точкой x и концом линии. Так как волна отражается от разомкнутого конца линии с коэффициентом отражения, равным единице, то на удалении $\lambda/4$ от конца линии прямая и обратная волны находятся в противофазе, образуя узел стоячей волны (Приложение 2).

Если линия нагружена на активное сопротивление, численно равное волновому (режим согласованной нагрузки), то обратная волна не возникает. Напряжение в линии определяется только прямой волной $\dot{U}(x) = \dot{U}_{\text{пр}} e^{-\gamma x} = \dot{U}_{\text{пр}} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x}$ (Приложение 1). Для линии без потерь коэффициент затухания $\alpha = 0$, поэтому действующее значение напряжения не изменяется вдоль линии, а фазовый сдвиг напряжения линейно убывает $\psi(x) = -\beta x$. Это подтверждается векторной диаграммой, построенной на рис. 5. В режиме согласованной нагрузки входное сопротивление в любой точке линии $Z_{\text{вх}}(l-x) = Z_c$, и по индуктивности участка Δx протекает ток $\dot{I}(x)$, равный сумме токов через сопротивление Z_c и емкость $C'\Delta x/2$. Вектор $\dot{U}(x)$ отстает от $\dot{U}(x-\Delta x)$ на угол $\beta\Delta x = \frac{\omega}{v}\Delta x = \omega\Delta t$, где Δt – время пробега электромагнитной волны по участку линии длиной Δx .

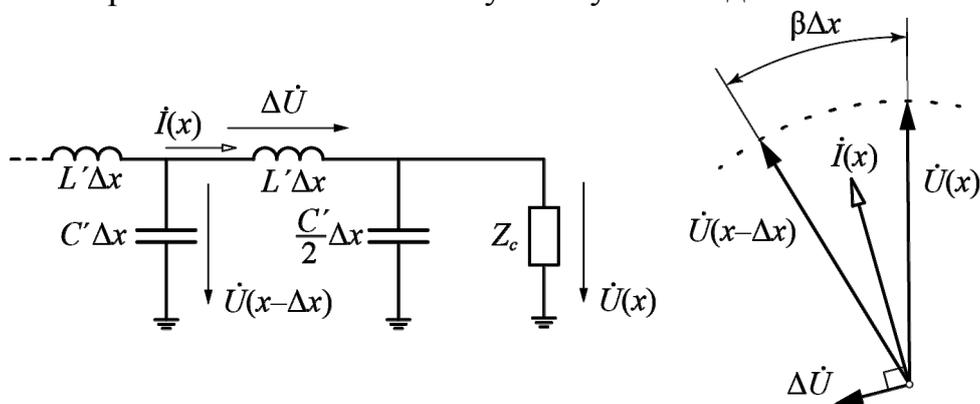


Рис. 5. Схема замещения участка линии и векторная диаграмма в режиме согласованной нагрузки

В режиме согласованной нагрузки по линии передается активная мощность, равная натуральной мощности линии (Приложение 4)

$$P_{\text{нат}} = \frac{U^2}{Z_c}, \quad (9)$$

где U – напряжение в линии.

Обратимся снова к режиму холостого хода. Напряжение в конце линии выражается через напряжение в ее начале из (8):

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{\cos\beta l}. \quad (10)$$

Согласно (10) напряжение в конце линии длиной 1500 км стремится к бесконечности. На практике же, бесконечное повышение напряжения невозможно в силу существования в линии активных потерь.

Для начала рассмотрим влияние активного продольного сопротивления линии r' , с учетом которого коэффициент распространения равен:

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(r' + j\omega L') j\omega C'} = \alpha + j\beta,$$

а напряжение в конце разомкнутой линии, где ток равен нулю, согласно (П1.13):

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{\operatorname{ch} \gamma l}. \quad (11)$$

Зависимости напряжения в конце линии 500 кВ от ее длины при различных сопротивлениях источника, построенные по формулам (10) и (11), изображены на рис. 6.

В случае подключения линии к источнику конечной мощности максимум зависимости $U(l)$ сдвигается влево от точки $x = 1500$ км, максимальное значение достигается на длине линии, при которой ее входное сопротивление равно сопротивлению источника.

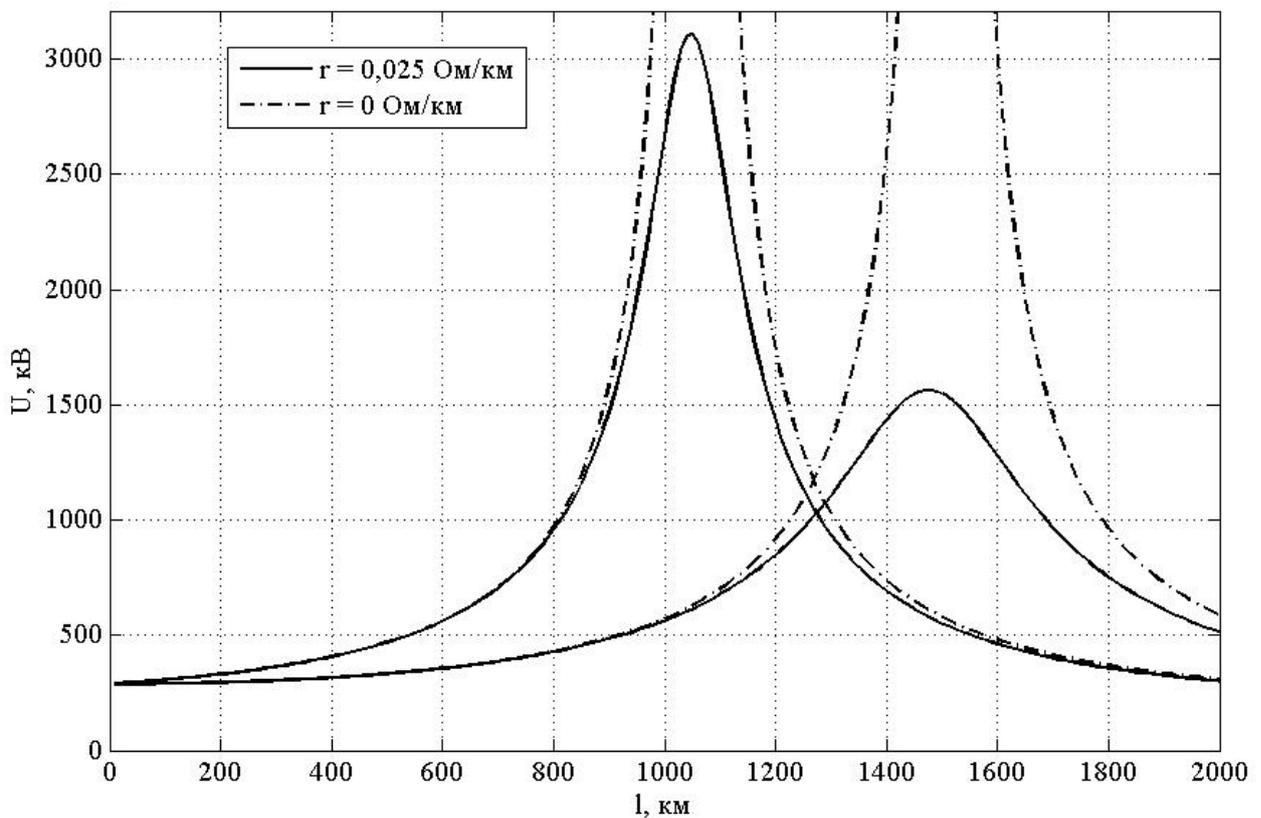


Рис. 6. Зависимость напряжения на конце разомкнутой линии от её длины при $X_1 = 0$ и $X_1 = Z_c$

На практике столь большие напряжения, соответствующие резонансным областям кривых, построенных на рис. 6, в установившихся режимах на линиях электропередачи не достигаются. Это объясняется влиянием коронного разряда на проводах линии, при возникновении которого активная

поперечная проводимость линии g' резко возрастает. На практике зависимости $U_2(l)$ ограничиваются на уровне $3U_\phi$.

Ограничение перенапряжений вдоль разомкнутой линии шунтирующими реакторами

Распространенным способом ограничения перенапряжений является установка между фазами линии и землей реакторов поперечной компенсации (шунтирующих реакторов). Индуктивные токи, потребляемые реакторами, компенсируют емкостные токи линии, устраняя перенапряжения и снижая потери.

Конструктивно шунтирующие реакторы выполняются трехфазными или однофазными. Номинальная мощность реактора составляет:

$$Q_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном,р}}^2}{X_{\text{р}}}, \quad (12)$$

где $X_{\text{р}}$ – индуктивное сопротивление реактора; $U_{\text{ном,р}}$ – номинальное напряжение реактора, обычно принимаемое равным наибольшему рабочему напряжению сети. Для реакторов трехфазного и однофазного исполнения под номинальным понимают линейное и фазное напряжение соответственно.

На рис. 7 показана типовая схема электропередачи СВН с шунтирующими реакторами, установленными в начале, в середине и в конце линии.

Рассмотрим влияние шунтирующих реакторов на перенапряжения в режиме одностороннего питания линии. Этот режим может возникнуть внезапно или быть заранее запланированным. Внезапное возникновение такого режима возможно в результате неправильной работы устройств защиты и автоматики или ошибочных действий персонала в процессе оперативных переключений. Режим одностороннего питания может быть запланирован при выводе линии в ремонт и последующем ее включении или в синхронизационных режимах электропередачи [1]. Рассмотрим частные случаи установки реактора в различных точках линии.

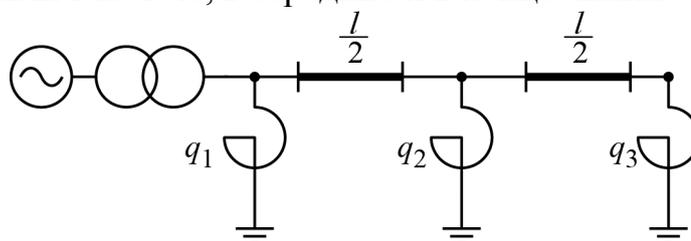


Рис. 7. Типовая схема дальней электропередачи в режиме одностороннего питания

Реактор в начале линии

Реактор, установленный в начале линии, компенсирует емкостный ток, протекающий по внутреннему сопротивлению источника. На станциях

происходит компенсация емкостного тока, протекающего по обмоткам генераторов и блочных трансформаторов, на подстанциях компенсируются токи в подходящих линиях и в трансформаторах, в результате чего перенапряжения в начале линии снижаются.

Для полной компенсации емкостного тока в начале линии индуктивное сопротивление реактора должно равняться ее входному емкостному сопротивлению:

$$X_p = X_{вх} = Z_c \operatorname{ctg} \beta l. \quad (13)$$

Введем понятие относительной мощности реактора, приняв в качестве базовой натуральную мощность линии при наибольшем рабочем напряжении:

$$q = \frac{Q_{\text{ном}}}{P_{\text{нат}}} = \frac{U_{\text{н.р.}}^2}{X_p} \frac{Z_c}{U_{\text{н.р.}}^2} = \frac{Z_c}{X_p}, \quad (14)$$

тогда из (13) следует условие компенсации:

$$q = \operatorname{tg} \beta l. \quad (15)$$

При $\beta l = 45^\circ$, что соответствует $l = 750$ км, для полной компенсации емкостного тока через источник требуется мощность реактора, равная натуральной мощности линии. При этом напряжение во всех точках линии будет превышать напряжение в ее начале.

Реактор в конце линии

Ток в конце линии с реактором имеет индуктивный характер. Для анализа распределения напряжения в данном случае можно воспользоваться методом эквивалентных длин. Входное сопротивление короткозамкнутой линии (П1.24):

$$\underline{Z}_{вх} = jX_{вх} = jZ_c \operatorname{tg} \beta l. \quad (16)$$

Если длина линии меньше $\lambda/4$, сопротивление имеет индуктивный характер. Это позволяет заменить реактор эквивалентной короткозамкнутой линией, длина которой l_3 находится из условия равенства сопротивления реактора X_p входному сопротивлению эквивалентной линии (16), являющейся продолжением реальной линии:

$$X_p = Z_c \operatorname{tg} \beta l_3 \longrightarrow l_3 = \frac{1}{\beta} \operatorname{arctg} \left(\frac{X_p}{Z_c} \right) = \frac{1}{\beta} \operatorname{arctg} \frac{1}{q}. \quad (17)$$

Относительная мощность реактора согласно (14)

$$q = \frac{Z_c}{Z_c \operatorname{tg} \beta l_3} = \operatorname{ctg} \beta l_3. \quad (18)$$

Распределение напряжения вдоль короткозамкнутой линии длиной $(l + l_3)$ представляет собой стоячую волну с узлом напряжения в конце и удовлетворяет формуле (П2.1)

$$\dot{U}(x') = \frac{\dot{U}_1}{\sin\beta(l + l_3)} \sin\beta x', \quad (19)$$

в которой $x' = (l + l_3 - x)$ – координата оси, выходящей из узла напряжения и направленная к началу линии.

Рассмотрим, как и в случае с реактором в начале, линию длиной 750 км. Распределение напряжения вдоль этой линии при отсутствии реактора показано на рис. 8 (кривая 1). Пусть в конце линии установлен реактор мощностью, равной натуральной мощности линии ($q = 1$). Длина эквивалентной ему линии по формуле (17) $l_3 = \frac{1}{\beta} \operatorname{arctg}(1) = \frac{\pi}{4\beta}$. Знаменатель выражения (19) $\sin\beta(l + l_3) = \sin(45^\circ + 45^\circ) = 1$, следовательно, напряжение имеет максимальное значение в начале линии и убывает вдоль линии. Соответствующая эпюра приведена на кривой 3 рис. 8, пунктиром показано распределение напряжения вдоль эквивалентной линии. Входное сопротивление линии в ее начале бесконечно велико $X_{\text{вх}} = \operatorname{tg}\beta(l + l_3) = \operatorname{tg}(45^\circ + 45^\circ) = \infty$, а значит, происходит полная компенсация емкостного тока через источник.

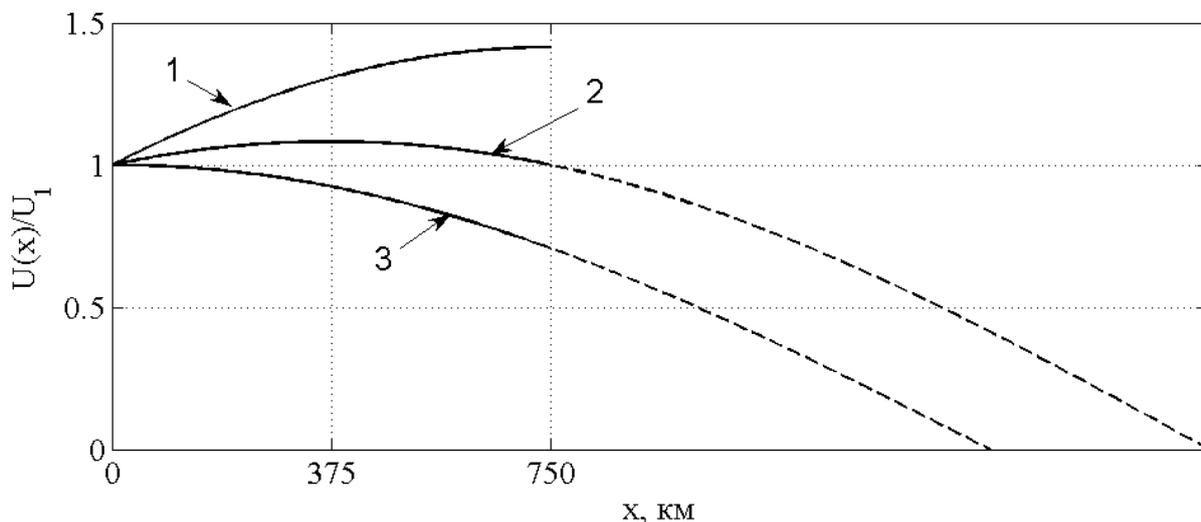


Рис. 8. Распределения напряжения вдоль линии длиной 750 км при значениях мощности реактора в конце линии:

1) $q = 0$; 2) $q = 0,41$; 3) $q = 1$

Напряжение в конце линии ($x' = l_3$) согласно (19):

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{\sin 90^\circ} \sin 45^\circ = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{2}}.$$

Если режим одностороннего питания линии предшествует синхронизации, то напряжение U_2 необходимо поддерживать близким к номинальному [1]. Определим из (19) условие, при котором установка реактора в конце линии обеспечит равенство напряжений в конце и начале линии:

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\sin \beta l_3}{\sin \beta (l + l_3)} = 1.$$

Это равенство выполняется при $\beta l + \beta l_3 = \pi - \beta l_3$. По формуле (18):

$$q = \operatorname{ctg} \frac{\pi - \beta l}{2} = \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2}. \quad (20)$$

В рассматриваемом случае $q = 0,41$; $\beta l_3 = 3\pi/8$; $l_3 = 1125$ км. Соответствующий график напряжения приведен рис. 8 (кривая 2). Функция (19) принимает максимальное значение в точке $x = l + l_3 - \lambda/4 = 750 + 1125 - 1500 = 375$ м, то есть ровно в середине линии. Согласно (19) максимальное значение напряжения в линии составляет

$$\dot{U}_m = \frac{\dot{U}_1}{\sin \beta (l + l_3)} = \frac{\dot{U}_1}{\sin (\pi/4 + 3\pi/8)} = 1,08\dot{U}_1.$$

К тому же результату можно прийти иначе. Известно, что рассматриваемый режим сопровождается появлением в линии стоячих волн (см. Приложение 2). Тогда в середине линии, где наблюдается пучность напряжения, ток равен нулю, и из формулы (П1.13) следует:

$$\dot{U}(l/2) = \frac{\dot{U}_1}{\cos(\beta l/2)} = \frac{\dot{U}_1}{\cos(\pi/8)} = 1,08\dot{U}_1.$$

Входное сопротивление рассматриваемой линии согласно (16) равно

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = jX_{\text{вх}} = jZ_c \operatorname{tg} \beta (l + l_3).$$

Поскольку $l + l_3 = 750 + 1125 = 1875 > 1500$ км, то $X_{\text{вх}}$ получается отрицательным, и $\underline{Z}_{\text{вх}}$ имеет емкостный характер, а напряжение U_1 превышает ЭДС E_1 . Добиться равенства $U_1 = E_1$ можно, установив в начало линии реактор с сопротивлением $X_p = -X_{\text{вх}}$, которому соответствует мощность

$$q = \frac{Z_c}{X_p} = \frac{Z_c}{-Z_c \operatorname{tg} \beta (l + l_3)} = -\operatorname{ctg} \left(\frac{\beta l}{2} + \underbrace{\frac{\beta l}{2} + \beta l_3}_{\pi/2} \right) = \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2} = 0,41.$$

Установка в конце и начале линии реакторов мощностью $q = \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2}$, приводит к равенству напряжений в этих точках и полной компенсации емкостного тока через источник. Однако напряжение в промежуточных точках линии превышает E_1 .

Реакторы в начале, середине и конце линии

Рассмотрим электропередачу, схема которой показана на рис. 9. Если в соответствии с формулой (20) выбрать мощность реактора в конце электропередачи $q_3 = \text{tg}(\beta l/4)$, то напряжения в середине и конце линии будут равны между собой. Если принять $q_{22} = q_3 = \text{tg}(\beta l/4)$, то входное сопротивление второго участка электропередачи с реакторами будет бесконечно большим. Поэтому первый участок электропередачи можно рассматривать как ненагруженную линию. Следовательно, равенство напряжений по концам первого участка электропередачи можно обеспечить, установив $q_{21} = \text{tg}(\beta l/4)$, а полная компенсация емкостного тока в начале электропередачи достигается выбором $q_1 = \text{tg}(\beta l/4)$.

Таким образом, если в начале и конце электропередачи установлены реакторы мощностью $q_1 = q_3 = \text{tg}(\beta l/4)$, в середине электропередачи – реактор мощностью $q_2 = q_{21} + q_{22} = 2\text{tg}(\beta l/4)$, то напряжения в начале, середине и конце линии равны между собой, а входное сопротивление электропередачи бесконечно велико.

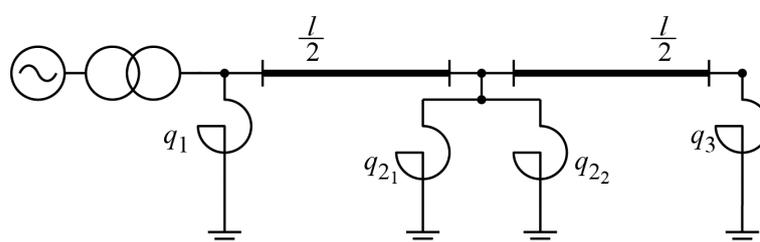


Рис. 9. Типовая схема дальней электропередачи в режиме одностороннего питания

Максимальное напряжение в середине каждого участка

$$U_m = \frac{E}{\cos(\beta l/4)}.$$

Для линии длиной $l = 750$ км $U_m = 1,02E$.

При разбиении электропередачи на n участков длиной l/n , для обеспечения равенства напряжений во всех узловых точках необходимо по концам электропередачи установить реакторы мощностью $\text{tg}(\beta l/2n)$, а на промежуточных подстанциях – $2\text{tg}(\beta l/n)$. Суммарная мощность реакторов составит $q_\Sigma = 2n\text{tg}(\beta l/2n)$. В пределе, при большом числе реакторов, распределенных вдоль электропередачи, получим

$$\lim_{n \rightarrow \infty} q_\Sigma = \frac{2n\beta l}{2n} = \beta l.$$

Суммарная проводимость реакторов, при этом, оказывается равной емкостной проводимости ВЛ:

$$\sum \frac{1}{X_p} = \frac{\beta l}{Z_c} = \omega C' l.$$

Параметры режима в линиях с двухсторонним питанием

На рис. 10 приведена схема замещения электропередачи СВН. Системы 1 и 2, представленные эквивалентными генераторами \dot{E}_1, jX_1 и \dot{E}_2, jX_2 , связаны линией длиной l . Активные потери не учитываются, в результате чего волновое сопротивление линии по прямой последовательности Z_c – величина действительная.



Рис. 10. Схема замещения электропередачи СВН

В качестве параметров установившихся режимов двухстороннего питания линии обычно используют напряжение U и передаваемые по линии активную мощность P и реактивную мощность Q (Приложение 3).

В Приложении 5 выведены следующие соотношения между U_1, P_1 и Q_1 в начале линии и U_2, P_2 и Q_2 в конце линии:

$$P_1 = P_2 = P; \quad (21)$$

$$P = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \beta l} \sin \delta; \quad (22)$$

$$Q_1 = -\frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \beta l} \cos \delta + \frac{U_1^2}{Z_c} \operatorname{ctg} \beta l; \quad (23)$$

$$Q_2 = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \beta l} \cos \delta - \frac{U_2^2}{Z_c} \operatorname{ctg} \beta l, \quad (24)$$

где $\delta = \psi_1 - \psi_2$ – фазовый сдвиг между напряжениями \dot{U}_1 и \dot{U}_2 .

Угол δ является режимным параметром, определяющим величину передаваемой по линии активной мощности, а формула (22) называется *угловой характеристикой мощности* $P(\delta)$. При этом, если $\psi_1 > \psi_2$, активная мощность передается из системы 1 в систему 2.

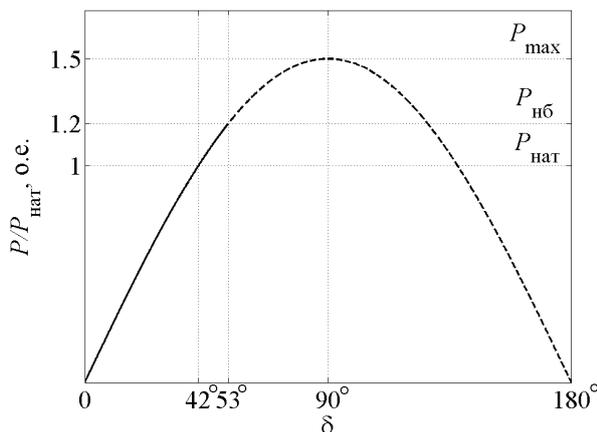


Рис. 11. Угловая характеристика мощности для электропередачи 700 км

Угловая характеристика мощности для линии длиной 700 км приведена на рис. 11. С зависимостью $P(\delta)$ тесно связано понятие *статической устойчивости*. Статически устойчивым режимам отвечает возрастающая часть характеристики. P_{nb} — *наибольшая мощность*, которую можно передать по линии по условию сохранения статической устойчивости связываемых систем

$$P_{nb} = P_{max} (1 - k_3), \quad (25)$$

где k_3 — *коэффициент запаса статической устойчивости*, характерное значение которого составляет 0,2 [1]; P_{max} — максимально возможная передаваемая мощность. Значение δ , соответствующее P_{nb} , рассчитывается из (22) и (25):

$$\delta_{nb} = \arcsin(1 - k_3) = \arcsin(0,8) = 53^\circ.$$

Значение реактивной мощности в каждой точке линии равно произведению действующих значений напряжения и тока на синус фазового сдвига в рассматриваемой точке:

$$Q(x) = U(x)I(x)\sin\varphi(x). \quad (26)$$

Таким образом, реактивная мощность изменяется вдоль линии, что позволяет говорить о существовании направленного *потока реактивной мощности*. Этот поток направлен по оси выбранной системы координат на тех участках линии, где $Q(x) > 0$, и в противоположном направлении, если $Q(x) < 0$. Точка линии, где $Q(x) = 0$, называется *точкой потокораздела* реактивной мощности. Таким образом, в соответствии с формулами (21–24), передача по линии активной мощности сопровождается потоками реактивной мощности.

В Приложении 3 получено распределение реактивной мощности $Q(x)$ вдоль линии (ПЗ.6), которое представляет собой синусоиду с периодом $\lambda/2$. Это значит, что две точки потокораздела на линии (при отсутствии промежуточных отборов мощности и средств компенсации на ее протяжении) не могут располагаться ближе, чем на расстоянии четверти длины волны $\lambda/4$. Большинство линий СВН имеет меньшую длину и, следовательно, одну точку потокораздела реактивной мощности.

Проведем анализ режима двухстороннего питания линии, приняв для простоты выкладок допущение о равенстве напряжений по концам линии

$U_1 = U_2$. Выражение передаваемой по линии активной мощности (22) преобразуется к виду:

$$P(\delta) = P_{\text{нат}} \frac{\sin \delta}{\sin \beta l}, \quad (27)$$

где $P_{\text{нат}} = U_1^2 / Z_c$ – натуральная мощность линии. Формулы реактивной мощности на концах линии (23) и (24) тоже упростятся:

$$Q_1 = \frac{P_{\text{нат}}}{\sin \beta l} (\cos \beta l - \cos \delta), \quad (28)$$

$$Q_2 = -Q_1. \quad (29)$$

Из (27) следует, что для передачи по линии натуральной мощности, необходимо соблюдение условия $\delta = \beta l$. В режиме $P = P_{\text{нат}}$ действующее значение напряжения и реактивная мощность не изменяются вдоль линии (см. Приложение 4).

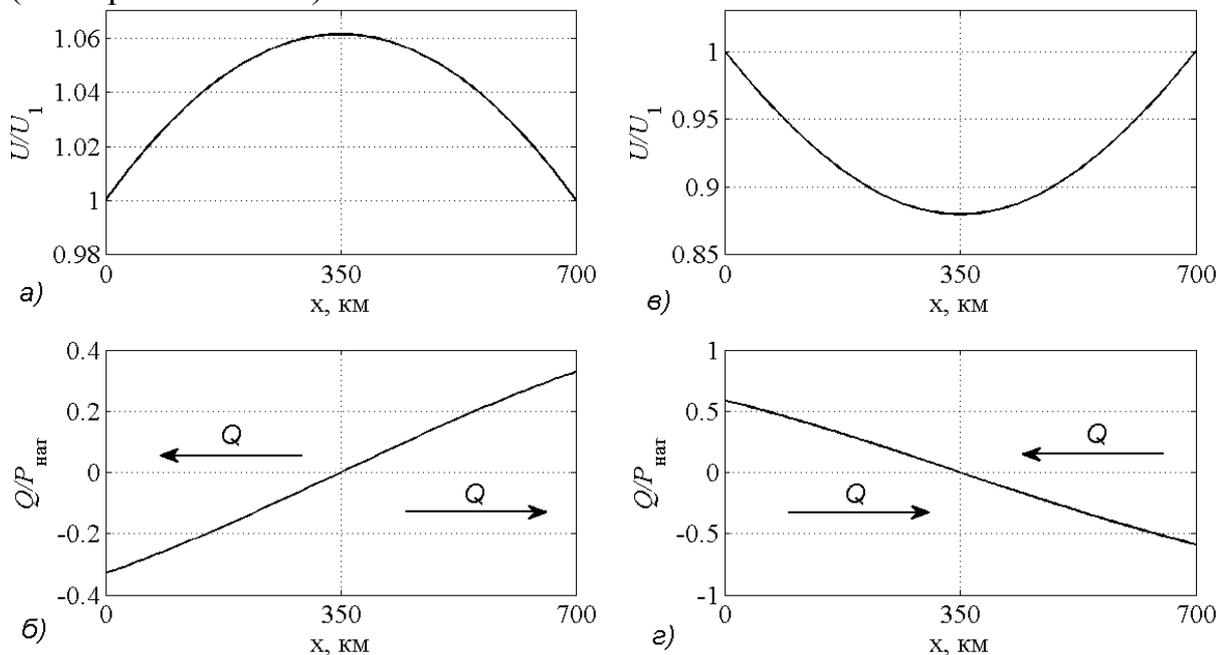


Рис. 12. Распределения напряжения и реактивной мощности в линии с двусторонним питанием

а, б – режим малых нагрузок $k_p = 0,4$; *в, г* – режим больших нагрузок $k_p = 1,4$

Для передачи по линии мощности большей, чем натуральная $P > P_{\text{нат}}$, в соответствии с (27) необходимо выполнение условия $\delta > \beta l$. Тогда из (28) и (29) следует, что реактивная мощность в начале линии положительна, а в конце – отрицательна. Эпюра $Q(x)$ вдоль линии длиной 700 км в режиме $P = 1,4P_{\text{нат}}$ приведена на рис. 12, г. По причине равенства напряжений по концам линии, точка потокораздела реактивной мощности располагается в середине линии. В первой половине линии реактивная мощность положительна, следовательно, $\sin \varphi > 0$. Это значит, что ток в первой половине линии отстает от напряжения, то есть имеет индуктивный характер. Индук-

тивный ток, проходя по распределенной индуктивности первой половины линии, вызывает уменьшение напряжения на этом участке. Это подтверждается эпюрой напряжения на рис. 12, в, которая соответствует рассматриваемому режиму больших нагрузок $P = 1,4P_{\text{нат}}$. На втором участке линии происходит рост напряжения, причиной которого является емкостный эффект. Действительно, во второй половине линии $Q(x) < 0$, $\sin\varphi < 0$, ток опережает напряжение (имеет емкостный характер) и, проходя по распределенной индуктивности линии, вызывает рост напряжения.

Иначе обстоят дела в режиме малых нагрузок. Эпюры напряжения и реактивной мощности вдоль линии 700 км при $P = 0,4P_{\text{нат}}$ приведены на рис. 12, а, б. Потоки реактивной мощности направлены из линии в питающие системы. Рост напряжения, обусловленный емкостным эффектом, происходит в первой половине линии. Возникающий, таким образом, максимум напряжения, может превосходить допустимые значения.

Наибольшие перенапряжения возникают в режиме *холостого хода*, когда активная мощность по линии не передается. При этом в точке потокораздела реактивной мощности в середине линии нулю равна полная мощность, что в рассматриваемом режиме может быть вызвано только равенством нулю значения тока в середине линии $\dot{I}(l/2)$. Тогда из (П1.13) следует

$$\dot{U}(l/2) = \frac{\dot{U}_1}{\cos(\beta l/2)}, \quad (30)$$

то есть напряжение в середине линии в режиме холостого хода равно напряжению в конце разомкнутой линии длиной $l/2$.

Шунтирующий реактор в середине линии для ограничения перенапряжений в режимах малых нагрузок

В качестве средства, ограничивающего недопустимое повышение напряжения, как и в режимах одностороннего питания, может быть использован шунтирующий реактор. Рассмотрим линию с реактором в середине. Сопротивление реактора выбрано таким образом, что выполняется равенство

$$U_1 = U_p = U_2, \quad (31)$$

U_p – напряжение на реакторе, установленном в середине линии.

Формула (27) не может быть использована для линии с реактором, однако её можно применить для каждого из участков в отдельности:

$$P_1 = \frac{U_1 U_p}{Z_c \sin \frac{\beta l}{2}} \sin \delta_1,$$

$$P_2 = \frac{U_p U_2}{Z_c \sin \frac{\beta l}{2}} \sin \delta_2.$$

Так как реактор в первом приближении активной мощности не потребляет, то

$$P_1 = P_2.$$

Из равенства напряжений и мощностей следует равенство углов

$$\delta_1 = \delta_2 = \frac{\delta}{2}.$$

Выражение для передаваемой по линии мощности принимает вид

$$P_1 = \frac{U_1^2}{Z_c \sin \frac{\beta l}{2}} \sin \frac{\delta}{2}. \quad (32)$$

Распределение напряжения и реактивной мощности вдоль линии с реактором изображено на рис. 13.

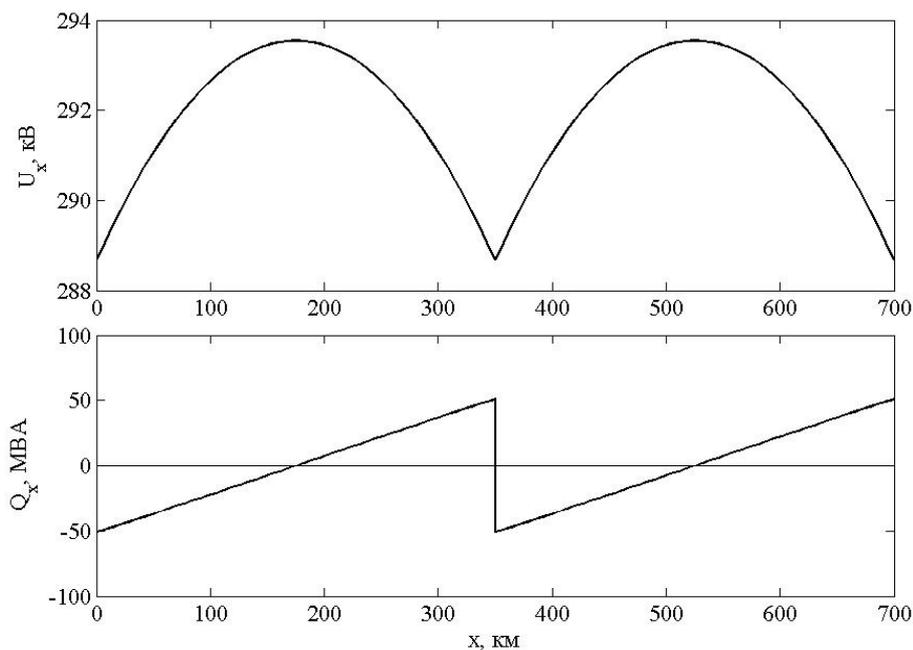


Рис. 13. Распределения $U(x)$ и $Q(x)$ вдоль линии с реактором в режиме малых нагрузок

В середине линии происходит скачок $Q(x)$ на величину реактивной мощности, потребляемой реактором. При выполнении условия (31), абсолютные значения реактивных мощностей по концам каждого из участков в соответствии с формулами (28) и (29) равны и удовлетворяют выражению

$$Q = \frac{P_{\text{нат}}}{\sin \frac{\beta l}{2}} \left(\cos \delta_1 - \cos \frac{\beta l}{2} \right).$$

Тогда мощность, потребляемая реактором в середине линии:

$$Q_p = Q - (-Q) = 2Q.$$

Для осуществления режима индуктивное сопротивление реактора должно быть равно $X_p = \frac{U_1^2}{2Q}$.

Перенапряжения при установке на линии устройства продольной компенсации

Для нахождения режимных параметров по концам линии вместо гиперболических или тригонометрических уравнений могут использоваться схемы замещения. П-образная схема замещения линии без потерь приведена на рис. 14. Следует отметить, что токи и мощности в элементах приведенной схемы (\dot{I} и \dot{S} через jX_L и $-jX_C$) не являются отражением параметров режима и не могут быть измерены на реальной линии электропередачи.

Схема замещения включает продольное индуктивное $X_L = Z_c \sin \beta l$ и поперечные емкостные сопротивления $X_C = Z_c \operatorname{ctg} \frac{\beta l}{2}$. Можно заметить, что знаменатель в угловой характеристике мощности (22) – это не что иное, как индуктивное сопротивление X_L схемы замещения линии. С учетом этого, перепишем угловую характеристику мощности:

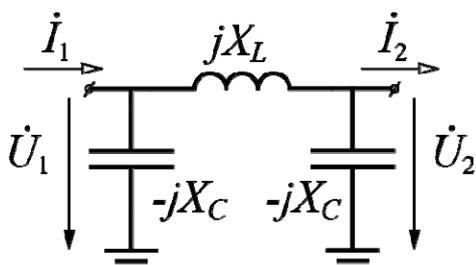


Рис. 14. П-образная схема замещения длинной линии

$$P(\delta) = \frac{U_1 U_2}{X_L} \sin \delta. \quad (33)$$

С этой зависимостью связан способ увеличения пропускной способности линии, направленный на уменьшение ее продольного индуктивного сопротивления. Данный способ реализуется путем установки устройств продольной компенсации (УПК), представляющих собой батареи конденсаторов, в одной или нескольких точках линии. С точки зрения передаваемой мощности желательна возможно большая степень продольной компенсации. Под степенью компенсации понимается отношение суммарного емкостного сопротивления батарей конденсаторов,

включенных последовательно в линию, к ее полному индуктивному сопротивлению [1]:

$$k_K = \frac{\sum X_{BK}}{X_L}.$$

Однако в действительности степень продольной компенсации имеет определенные пределы. При степени компенсации $k_K = 0,5$ и установке конденсаторов приблизительно в середине линии короткое замыкание в непосредственной близости от конденсаторов привело бы к возникновению очень больших токов, так как реактивное сопротивление между местом короткого замыкания и источником напряжения было бы равно нулю.

При расположении УПК в середине линии без потерь с равными напряжениями по концам вырабатываемая батареей конденсаторов реактивная мощность Q_{BK} растекается по линии в разные стороны в равных долях [1]. Это означает, что в месте установки УПК существует точка потокоораздела реактивной мощности.

На рис. 15 представлены схема замещения половины линии, каждый элементарный участок которой представлен П-образной схемой замещения, и питающая эту линию система. Батарея конденсаторов не изображена, но её наличие учтено потоком мощности $Q_{BK}/2$, поступающим в рассматриваемую половину линии из УПК. Реактивная мощность Q_{C1} поступает из системы 1 в линию (в зависимости от режима может иметь обратное направление). U_1 – напряжение на шинах системы 1, U_{BK1} – напряжение на зажиме батареи конденсаторов. На схеме показаны направления потоков реактивной мощности в соответствии с общепринятым правилом: из емкости в индуктивность (см. Приложение 3).

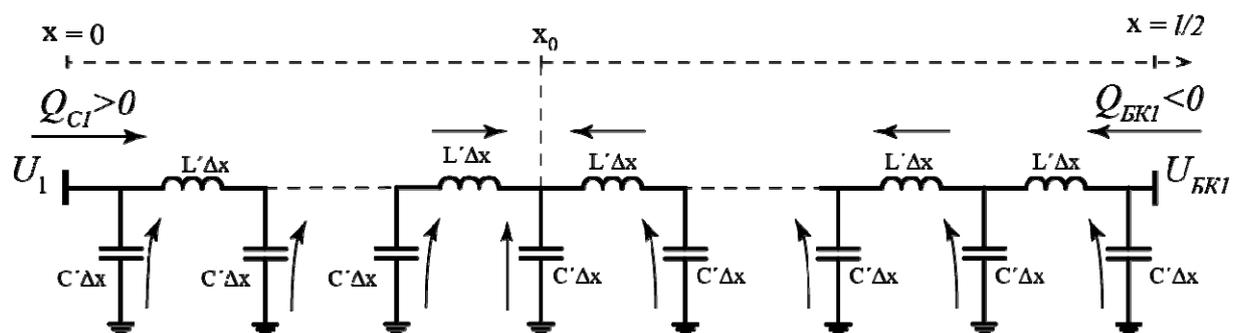


Рис. 15. Потоки реактивной мощности на схеме замещения половины линии с УПК в середине

Мощность $Q_{BK}/2$ намного превышает реактивную мощность, потребляемую индуктивностью $L'\Delta x$. Это означает, что на участке линии, прилегающем к УПК функция $Q(x)$ отрицательна, а ток имеет емкостный

характер. На этом участке в результате емкостного эффекта будет происходить повышение напряжения, максимальное значение которого будет в конце половины линии в точке подключения УПК.

Характер тока сменится на индуктивный в некоторой точке x_0 (см. рис. 15) в том случае, если реактивная мощность, генерируемая УПК и распределенной емкостью участка линии между x_0 и УПК, будет полностью потребляться распределенной индуктивностью того же участка. В режимах малых нагрузок точки x_0 не существует, рост напряжения происходит вдоль всей половины линии, мощность Q_{C1} направлена из линии в питающую систему. При передаче по линии больших мощностей точка экстремума x_0 существует, в ней наблюдается минимум напряжения. Однако и в этом случае в окрестности УПК напряжение может достигать недопустимых значений за счет последующего повышения напряжения на участке от x_0 до УПК за счет емкостного эффекта.

Если при рассмотрении второй половины линии направление тока и оси x изменить на обратное, все качественные выводы, сделанные для первой половины, будут также справедливы и для второй.

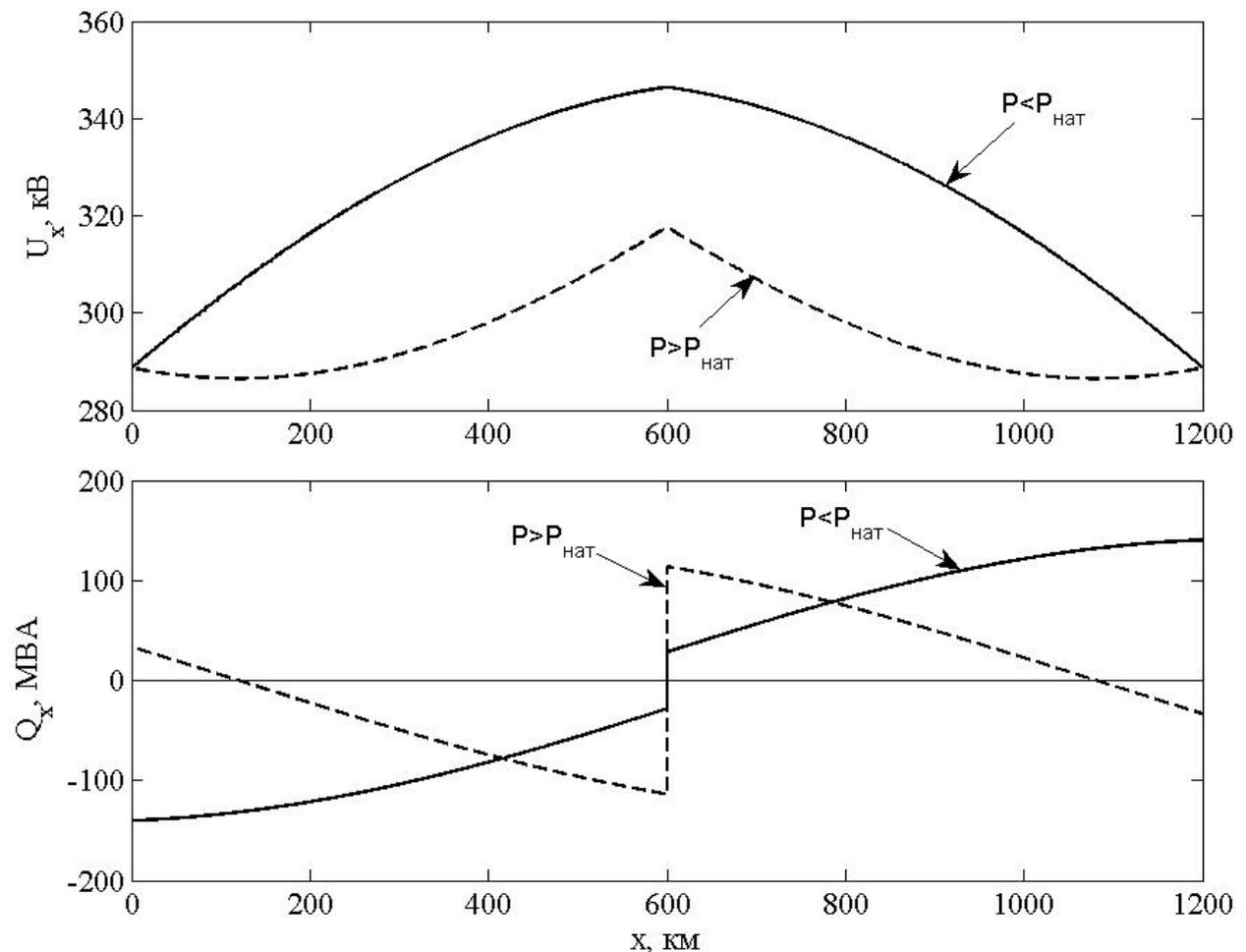


Рис. 16. Распределения напряжения и реактивной мощности вдоль линии с УПК

Распределения напряжения и реактивной мощности вдоль линии 500 кВ длиной 1200 км с УПК в середине приведены на рис. 16. Сплошная кривая соответствует случаю передачи по линии мощности меньше натуральной, пунктирная – режиму больших нагрузок. Примечательно то, что в случае равенства напряжений по концам линии напряжения на выводах батареи конденсаторов, установленной в середине линии равны. Справедливость утверждения отражена на рис. 16, где графики распределения напряжения вдоль линии не делают в середине линии скачок.

Для снижения напряжения до допустимых значений на выводах УПК необходимо компенсировать реактивную мощность $Q_{\text{БК}}$. С этой целью на выводы УПК включаются реакторы, желательно регулируемые, что необходимо для уменьшения их отрицательного влияния на пропускную способность линии. Для относительно коротких линий эта проблема менее остра, так как напряжение на выводах УПК слабо зависит от передаваемой мощности, и поэтому в этих случаях могут использоваться неуправляемые реакторы [1].

ЗАДАНИЕ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНУЮ ПОДГОТОВКУ

При выполнении предварительной подготовки использовать следующие значения погонных параметров линии по прямой последовательности: $L' = 1$ мГн/км; $C' = 11,11$ нФ/км; существованием в линии активных потерь везде, кроме п. 1, пренебречь.

Пункт 5 задания выполняется по специальному указанию преподавателя.

1. Рассчитать и построить зависимости напряжения в конце разомкнутой линии от ее длины при сопротивлениях источника $X_1 = 0$ и $X_1 = 90$ Ом. Расчеты и построения провести без учета активного продольного сопротивления линии и с учетом, приняв $r' = 0,025$ Ом/км.

Все четыре зависимости построить на одном графике в виде $\frac{U(l)}{E} \cdot 100\%$ (в процентах от напряжения источника). Длину линии изменять от 0 до 2000 км.

2. Рассчитать и построить распределения напряжения $\frac{U(x)}{E} \cdot 100\%$ вдоль разомкнутой линии длиной $l = 1000$ км, присоединенной к источнику с напряжением E , для случаев $X_1 = 0$ и $X_1 = 90$ Ом.

3. Линия 500 кВ длиной $l = 1000$ км подключена к источнику с $E = U_{\text{н.р}}$. Рассчитать минимальную мощность установленного на линии

реактора, при которой перенапряжения отсутствуют вдоль всей линии. Рассмотреть следующие случаи:

а) реактор установлен в начале линии, индуктивное сопротивление источника $X_1 = 90 \text{ Ом}$;

б) реактор установлен в конце линии, $X_1 = 0$;

в) реактор установлен в середине линии, $X_1 = 0$.

Построить распределения напряжения и реактивной мощности вдоль линии, нанеся кривые для каждого случая на одну систему координат.

В начале решения задачи качественно рассмотреть характер распределения напряжения вдоль линии.

4. Линия 500 кВ длиной $l = 1000 \text{ км}$ соединяет две системы бесконечной мощности. На шинах систем поддерживается номинальное напряжение. Рассчитать фазовый сдвиг δ между напряжениями на шинах систем, соответствующий режиму малых нагрузок ($P_{\min} = 0,4P_{\text{нат}}$), и максимальное напряжение на линии в этом режиме.

Рассчитать наибольшую активную мощность, которую можно передать по линии без реактора по условию сохранения статической устойчивости, и соответствующий угол δ (коэффициент запаса $k_3 = 0,2$).

Рассчитать индуктивное сопротивление X_p установленного в середине линии шунтирующего реактора, при котором напряжение на нем равно номинальному.

На одном рисунке качественно построить распределения напряжения и реактивной мощности для режима с реактором и без него.

5. В середину линии из п. 4 устанавливается устройство продольной компенсации. Рассчитать емкость УПК, необходимую для степени компенсации $k_K = 0,4$. Рассчитать мощность, которая будет передаваться по такой линии, и напряжения на зажимах УПК для значений угла δ из п.4.

ЗАДАНИЕ НА ИЗМЕРЕНИЯ

При выполнении задания на измерения параметры линии задать как в предварительной подготовке, учесть продольное активное сопротивление линии $r' = 0,025 \text{ Ом/км}$.

Пункт 6 задания выполняется по специальному указанию преподавателя.

1. Измерить и построить распределения напряжения и реактивной мощности вдоль разомкнутой линии 500 кВ длиной $l = 1000 \text{ км}$ при сопротивлениях источника $X_1 = 0$ и $X_1 = 90 \text{ Ом}$. Зависимости построить в относительных единицах и сопоставить с результатами из п.2 предварительной подготовки.

Измерить активную мощность, потребляемую линией. Чем вызвано потребление линией активной мощности?

2. Повторить опыт п.1 для линии длиной $l = 2000$ км. Чем обусловлен провал напряжения на удалении 500 км от источника?

3. Используя минимальное число шунтирующих реакторов устранить перенапряжения в разомкнутой линии электропередачи 500 кВ длиной $l = 1000$ км. Реакторы имеют однофазное исполнение с номинальной мощностью $Q_{\text{ном}} = 60000$ кВАр при номинальном напряжении $525/\sqrt{3}$ кВ. ЭДС источника принять равной $E = 525/\sqrt{3}$ кВ, внутреннее сопротивление источника $X_1 = 90$ Ом.

Задачу решить при условии, что возможность установки реакторов предусмотрена:

- а) только в конце линии;
- б) по концам линии;
- в) по концам и в середине линии;
- г) на протяжении линии, но не ближе чем на 200 км друг от друга.

Для всех случаев измерить и построить распределения напряжения и реактивной мощности вдоль линии. Измерить потребляемую линией активную мощность.

4. Линия 500 кВ длиной $l = 1000$ км соединяет две системы бесконечной мощности с номинальным напряжением на шинах. Измерить и построить распределения напряжения и реактивной мощности вдоль линии в режиме холостого хода. Измерить потребляемую линией активную мощность. Чем обусловлены перенапряжения в этом режиме?

5. В модели из п. 4 выставить значение угла $\delta = 30^\circ$.

а) Измерить и построить распределения напряжения и реактивной мощности вдоль линии. Измерить значения активной мощности по концам линии. В чем причина отличия от результатов п.4?

б) Установить шунтирующий реактор в середину линии. Подобрать минимальную мощность реактора, при которой перенапряжения отсутствуют вдоль всей линии. Построить распределения напряжения и реактивной мощности вдоль линии.

в) Ограничить существующие в модели из п. 5а перенапряжения, используя минимально возможное число шунтирующих реакторов однофазной мощностью $Q_{\text{ном}} = 60000$ кВАр, устанавливаемых в середине линии. Построить распределения напряжения и реактивной мощности вдоль линии.

6. В середину линии 500 кВ длиной $l = 1000$ км с номинальным напряжением на шинах питающих систем (угол $\delta = 20^\circ$) установить устройство продольной компенсации (УПК) ёмкостью 30,6 мкФ.

а) Измерить и построить распределения напряжения и реактивной мощности вдоль линии. Измерить значения активной мощности по концам линии.

б) Ограничить существующие вдоль линии перенапряжения шунтирующим реактором, подключенным к выводу УПК со стороны питающей системы, при условии, что номинальная мощность реактора должна быть минимальна. Измерить и построить распределения напряжения и реактивной мощности вдоль линии. Измерить значения активной мощности по концам линии.

в) Повторить п. бб, подбирая необходимую мощность реактора, подключенного к выводу УПК со стороны приемной системы.

г) Ограничить существующие вдоль линии перенапряжения минимальным числом ШР мощностью $Q_{\text{ном}} = 60000$ кВАр, рассматривая возможность установки реакторов с обеих сторон от УПК. Измерить и построить распределения напряжения и реактивной мощности вдоль линии. Измерить значения активной мощности по концам линии.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими основными параметрами характеризуется линия электропередачи? Какой физический смысл этих параметров?

2. Что является причиной повышения напряжения вдоль разомкнутой на конце или малонагруженной линии?

3. Какой вид имеет распределение напряжения вдоль разомкнутой на конце линии при длине меньше 1500 км, больше 1500 км?

4. Что такое входное сопротивление линии? Чем определяется значение и характер входного сопротивления линии?

5. Каким образом индуктивное внутреннее сопротивление источника влияет на уровень перенапряжений?

6. При каких условиях возникают резонансные перенапряжения в линии дальней электропередачи? Какими параметрами определяется максимальное значение напряжения в конце разомкнутой линии в режиме резонанса?

7. Каковы условия возникновения резонанса для линии, присоединенной к источнику с нулевым внутренним сопротивлением и с индуктивным внутренним сопротивлением?

8. Определить значение мощности шунтирующего реактора, необходимой для полной компенсации емкостного тока в начале линии при включении реактора в начале, конце и середине линии.

9. Что такое точка потокораздела реактивной мощности?

10. Какой вид имеют распределения напряжения вдоль линии электропередачи с двусторонним питанием в режимах передачи натуральной мощности и холостого хода?

УКАЗАНИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ МОДЕЛИ И ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ

Предварительные сведения о работе со стендом

Лабораторный стенд «Компьютерная высоковольтная лаборатория (КВЛ)» создан на базе программы **EMTLab**, разработанной на кафедре ТЭВН МЭИ. Расчетная модель дальней электропередачи в КВЛ приведена на рис. 17.

Для проведения численного эксперимента на лабораторном компьютерном стенде следует собрать расчетную модель в главном окне программы. Блоки элементов (источники, сопротивления, линии и т. д.) расположены в закладке **Элементы** окна **Навигатор**. Для удобства работы элементы разделены на группы по своему функциональному назначению (источники, измерители и т. д.). Закладка **Элементы** разделена на две части: в верхней части имеется дерево, содержащее список основных групп элементов и предназначенное для быстрой навигации по библиотеке элементов; в нижней части содержится список элементов для выбранной функциональной группы.

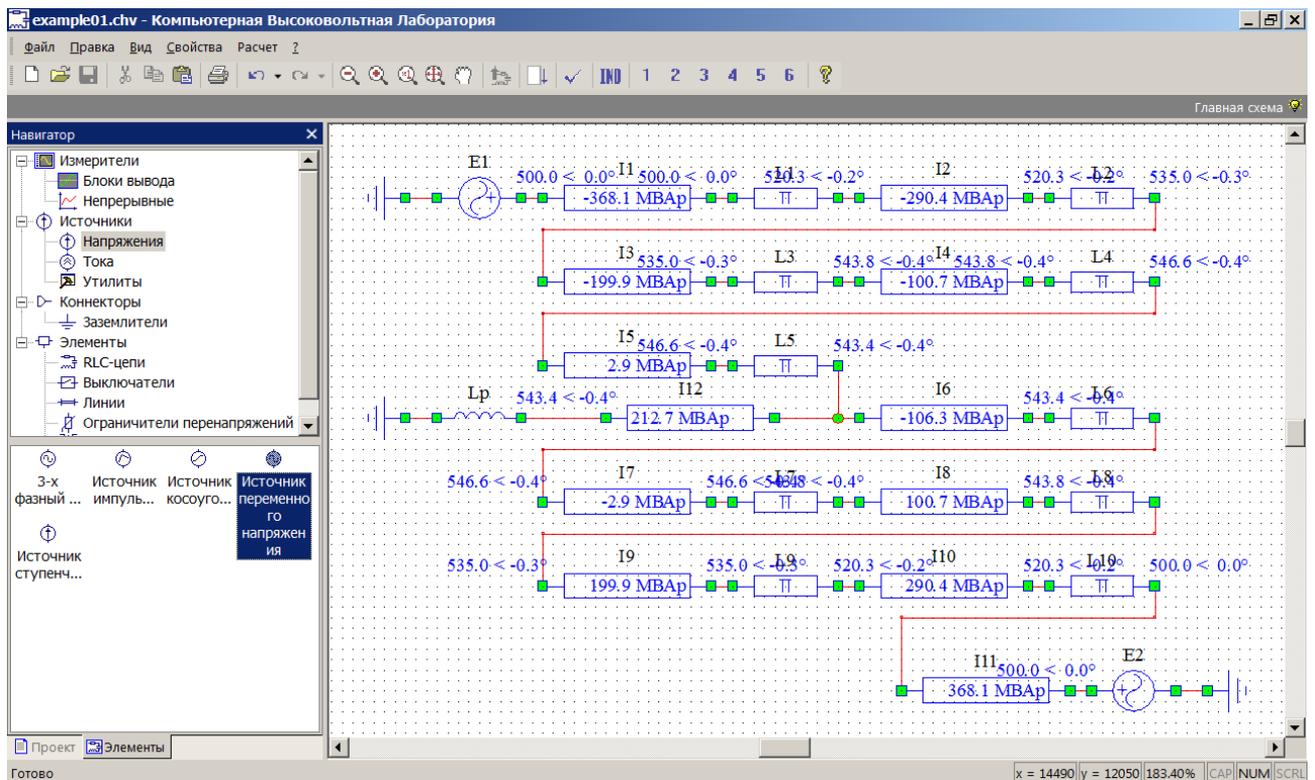


Рис. 17. Расчетная модель линии дальней электропередачи в программе «Компьютерная высоковольтная лаборатория»

Для того, чтобы добавить требуемый элемент в схему, необходимо сначала выбрать в дереве функциональную группу, к которой он относится, найти этот элемент в нижнем списке, затем зажать левую кнопку мыши и перетащить его в главное окно, после чего отпустить левую кнопку мыши. В процессе добавления в схему нового элемента по нажатию правой кнопки мыши производится его поворот на 90°. Для окончательной вставки добавляемого элемента в схему необходимо нажать левую кнопку мыши.

Для добавления соединений необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по узлу элемента или общему узлу нескольких соединений, что автоматически переводит программу в режим рисования соединений. При последующих щелчках мыши будет выполняться добавление промежуточных точек в создаваемое соединение. Для завершения рисования нового соединения необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по требуемому конечному узлу. Для завершения можно воспользоваться пунктом «Остановить соединение» контекстного меню по правой кнопке мыши. Отменить добавление нового соединения во время его рисования можно нажатием клавиши **Esc**.

Для удаления элементов или соединений из схемы необходимо сначала выделить их, а затем нажать клавишу **Delete**. Для копирования элементов и соединений также необходимо сначала выделить их, а затем воспользоваться кнопкой «Копировать» **Панели инструментов** или горячей клавишей **Ctrl + C**. Копировать можно не только отдельные элементы, но и целые куски схемы. Для удаления объектов из схемы и помещения их в буфер для последующей вставки можно воспользоваться кнопкой «Вырезать» **Панели инструментов** или горячей клавишей **Ctrl + X**. Вставка скопированных (или «вырезанных») ранее объектов выполняется с помощью кнопки «Вставить» **Панели инструментов** или горячей клавишей **Ctrl + V**.

Для масштабирования схемы и быстрой навигации по ней можно воспользоваться соответствующими кнопками («Увеличить», «Уменьшить», «Показать все» и «Перетасовать») в **Панели инструментов** или контекстного меню по правой кнопке мыши. Для удобства работы с программой эти режимы масштабирования также доступны с помощью колеса мыши. Так, увеличение и уменьшение схемы производится при прокрутке колеса мыши. При нажатии на колесо мыши возможно перетаскивание схемы. В свою очередь, автомасштаб «Показать все», позволяющий отобразить на экране целиком всю схему, осуществляется двойным щелчком по колесу мыши.

Запуск схемы на расчет осуществляется по нажатию кнопки «Расчет» в **Панели инструментов** или горячей клавиши **F5**. По завершению расчета вычисленные значения напряжений для установившегося режима отобра-

жаются рядом с узлами элементов схемы.

Указания по составлению схемы и выполнению расчетов

При воспроизведении установившихся режимов в КВЛ участки линий электропередачи моделируются с помощью элемента «**П-звено**». Питающие системы представляются источниками синусоидального напряжения. Если мощность системы конечна, то к источнику подключается последовательно индуктивность, обеспечивающая внутреннее сопротивление источника. По завершению расчета в узлах схемы появляются комплексные значения напряжения в киловольтах, запись вида « $303.1 < 30^\circ$ » означает, что напряжение в узле имеет действующее значение 303,1 кВ и начальную фазу 30° .

Для определения тока в интересующую ветвь схемы необходимо подключить блок «**Индикатор тока**». По завершению расчета в прямоугольнике индикатора появляется действующее значение тока в килоамперах и его фаза в градусах. На индикаторе тока также могут отображаться проходящие через него активная и реактивная мощности. Чтобы выбрать параметр, который будут выводить все индикаторы тока на схеме, необходимо нажать на кнопку «**IND**», расположенную на **Панели инструментов**. Появится диалоговое окно, показанное на рис. 18.

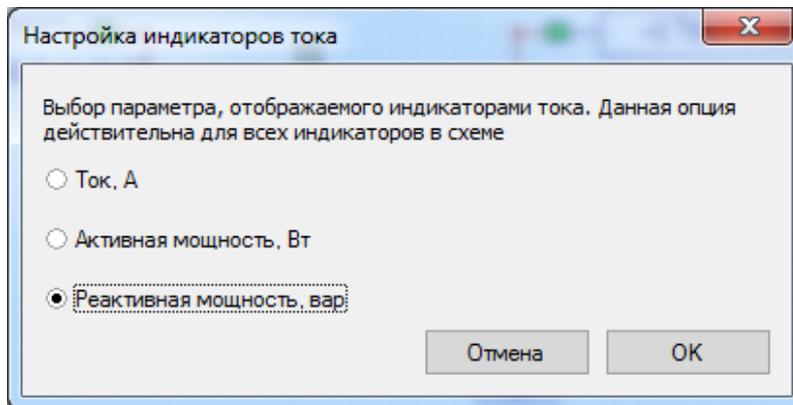


Рис. 18. Диалог выбора параметра для отображения в блоках «Индикатор тока»

После выбора в диалоге интересующего параметра необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши в любом месте схемы, чтобы обновить показания в индикаторах.

При выполнении пунктов расчетного задания с разомкнутой линией рекомендуется нагрузить линию на большое сопротивление (1 ГОм), включенное между концом линии и землей.

Поскольку все элементы в модели линейные, в качестве фазного напряжения источника допустимо задать линейное напряжение 500 кВ,

при этом будут рассчитаны трехфазные мощности.

Блоки, используемые в лабораторной работе, сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Элемент	Описание
	<p><i>Источник синусоидального напряжения.</i> <i>Параметры:</i> – действующее значение напряжения, кВ; – частота, Гц; – начальная фаза, град. <i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Источники → Неуправляемые.</p>
	<p><i>Индуктивность</i> для представления внутреннего сопротивления источника и шунтирующего реактора. <i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Элементы → RLC-цепи.</p>
	<p><i>Π-звено</i> для моделирования линии с распределенными параметрами. <i>Параметры:</i> – длина линии, км; – активное сопротивление на единицу длины, Ом/км; – индуктивность на единицу длины, Гн/км; – емкость на единицу длины, Ф/км. <i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Элементы → Линии.</p>
	<p><i>Заземлитель.</i> <i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Коннекторы → Заземлители.</p>
	<p><i>Индикатор тока</i> для измерения потоков мощностей. <i>Параметр:</i> – выводимая величина: ток, активная мощность, реактивная мощность. Задается для всех индикаторов нажатием на кнопку «IND» Панели инструментов. <i>Местонахождение блока в библиотеке элементов:</i> Измерители → Непрерывные.</p>

Для удобства обработки результатов для каждого пункта задания в программе имеется своя табличная форма, вызываемая путем нажатия

кнопки с номером пункта задания в **Панели инструментов**. Найденные значения напряжений следует ввести в таблицу, и по окончании ее заполнения нажать кнопку *«Построить график»*. Там, где это требуется, следует задать базисные значения напряжения и реактивной мощности.

По итогам выполнения работы, полученные табличные формы и графики нужно сохранить путем их копирования и вставки в доступный на компьютере текстовый редактор (**WordPad** или **MS Word**). Для копирования в буфер обмена табличных форм можно воспользоваться стандартным сочетанием клавиш **Alt + Print Screen**. Графики можно скопировать в буфер обмена или сохранить в файл с помощью меню **Правка** окна графопостроителя **XYGraph** (пункты *«Копировать рисунок»* или *«Сохранить рисунок»* соответственно).

Приложение 1

Телеграфные уравнения длинной линии и их решение

Будем предполагать, что источник и линия симметричны, тогда задачу можно рассмотреть в однофазной постановке с параметрами прямой последовательности (рис. П1.1).

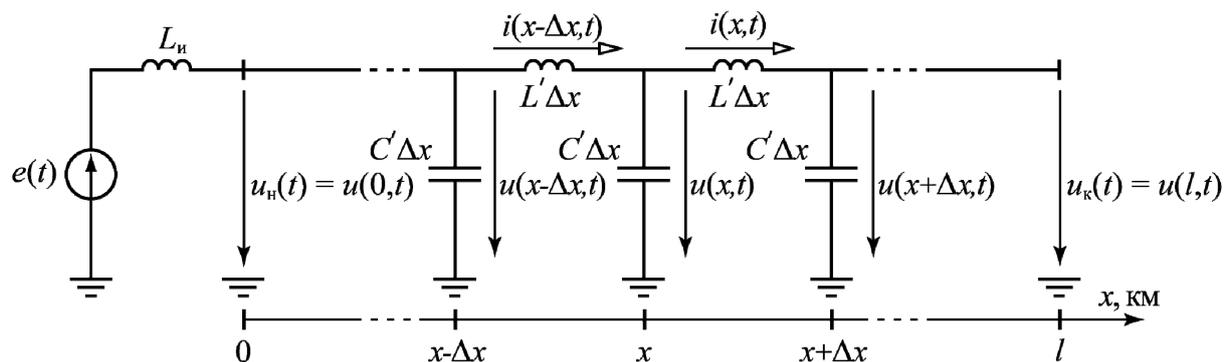


Рис. П1.1. Напряжения и токи в длинной линии

Телеграфные уравнения линии имеют следующий вид:

$$-\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = r' i(x, t) + L' \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (\text{П1.1})$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = g' u(x, t) + C' \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \quad (\text{П1.2})$$

Здесь $u(x, t)$ – напряжение в линии, то есть разность потенциалов между точкой линии, удаленной от ее начала на расстояние x , и землей, в момент времени t , а $i(x, t)$ – ток, протекающий через эту точку линии; r' – продольное активное сопротивление линии на единицу длины, определяемое в первую очередь сопротивлением проводов (влияние земли на параметры прямой последовательности незначительно); g' – активная поперечная проводимость

линии на единицу длины, которая в отсутствие коронирования проводов может быть принята равной нулю (сопротивление утечки по гирляндам изоляции и по воздуху очень велико); L' и C' – погонные индуктивность и емкость по прямой последовательности.

Смысл уравнений (П1.1) и (П1.2) легко понять, рассмотрев связь между напряжением и током на малом участке линии длиной Δx (рис. П1.1). Переноса приращение координаты в правые части уравнений, получим:

$$-\Delta u(x,t) = r' \Delta x i(x,t) + L' \Delta x \frac{di(x,t)}{dt}, \quad (\text{П1.3})$$

$$-\Delta i(x,t) = g' \Delta x u(x,t) + C' \Delta x \frac{du(x,t)}{dt}. \quad (\text{П1.4})$$

Уравнение (П1.3) говорит о том, что убыль напряжения в линии на участке Δx обусловлена падением напряжения на активном сопротивлении $r' \Delta x$ и ЭДС самоиндукции, возникающей под действием переменного магнитного потока $L' \Delta x i(x,t)$, пронизывающего петлю «провод-земля» на участке Δx .

В соответствии с уравнением (П1.4) убыль тока вызвана стеканием его по поперечной проводимости $g' \Delta x$ и емкостным током (током смещения), обусловленным наличием переменного электрического поля между проводом и землей.

Если в электрической сети источники напряжения синусоидальны, то, при отсутствии нелинейных элементов, напряжения и токи в линии в установившемся режиме будут также синусоидальны. Воспользовавшись символическим методом, поставим в соответствие мгновенному значению напряжения $u(x,t)$ в любой точке линии комплексное число:

$$u(x,t) = U_m(x) \sin(\omega t + \psi(x)) \rightarrow \dot{U}(x) = U(x) e^{j\psi(x)} = U(x) \angle \psi(x),$$

где $U(x)$ и $\psi(x)$ – действующее значение напряжения и начальная фаза переменного синусоидального напряжения в точке x линии. Производной $u(x,t)$ по времени соответствует комплексное число:

$$\begin{aligned} \frac{du(x,t)}{dt} &= \frac{d(U_m(x) \sin(\omega t + \psi(x)))}{dt} = \omega U_m(x) \cos(\omega t + \psi(x)) = \\ &= \omega U_m(x) \sin\left(\omega t + \psi(x) + \frac{\pi}{2}\right) \rightarrow \omega U(x) e^{j\psi(x) + \frac{\pi}{2}} = j\omega U(x) e^{j\psi(x)} = j\omega \dot{U}(x) \end{aligned}$$

Аналогично в символическом виде представляются функции тока и производной тока по времени. Тогда уравнения (П1.1) и (П1.2) сводятся к системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$-\frac{d\dot{U}(x)}{dx} = r' \dot{I}(x) + j\omega L' \dot{I}(x) = \underline{Z} \dot{I}(x), \quad (\text{П1.5})$$

$$-\frac{d\dot{I}(x)}{dx} = g' \dot{U}(x) + j\omega C' \dot{U}(x) = \underline{Y} \dot{U}(x). \quad (\text{П1.6})$$

В уравнениях (П1.5) и (П1.6) \underline{Z} и \underline{Y} представляют собой полные погонные продольное сопротивление и поперечную проводимость линии. Продифференцировав (П1.5) по x , и подставив в него (П1.6), получим волновое уравнение для напряжения:

$$\frac{d^2 \dot{U}(x)}{dx^2} = \underline{ZY} \dot{U}(x) = \dot{\gamma}^2 \dot{U}(x), \quad (\text{П1.7})$$

где $\dot{\gamma} = \sqrt{\underline{ZY}} = \sqrt{(r' + j\omega L') j\omega C'} = \alpha + j\beta$ – коэффициент распространения.

Уравнению (П1.7) удовлетворяют экспоненциальные функции, и его общим решением является их линейная комбинация:

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_{\text{пр}} e^{-\dot{\gamma}x} + \dot{U}_{\text{обр}} e^{\dot{\gamma}x}. \quad (\text{П1.8})$$

В последнем уравнении слагаемые в правой части имеют смысл двух волн, распространяющихся в прямом и обратном направлении вдоль линии. Действительно, если в первом слагаемом перейти от комплексного представления к функциональной зависимости от времени, получим для экспоненциальной функции:

$$e^{-\dot{\gamma}x} = e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \rightarrow e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x) = e^{-\alpha x} \sin(-\beta(x - vt)), \quad (\text{П1.9})$$

то есть, функцию вида $f(x - vt)$, которая с математической точки зрения представляет собой волну, распространяющуюся в прямом направлении вдоль линии со скоростью $v = \omega / \beta$.

Из соотношения (П1.9) явно следует смысл коэффициентов α и β . Коэффициент затухания α определяет снижение амплитуды (затухание) волны по экспоненциальному закону при пробеге ее по линии. Коэффициент β , называемый коэффициентом изменения фазы, определяет фазовый сдвиг напряжения волны, возникающий вследствие временной задержки, обусловленной конечной скоростью ее распространения. За полный цикл колебаний источника волна пройдет расстояние λ так, что $\beta\lambda = 2\pi$, откуда $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi v}{\omega} = \frac{v}{f}$. Расстояние λ называют длиной волны. Для промышленной частоты ($f = 50$ Гц), с учетом того, что скорость распространения волны для прямой последовательности равна скорости света ($3 \cdot 10^8$ м/с), длина волны составляет 6000 км.

Второе слагаемое в (П1.8), очевидно, является волной, распространяющейся в обратном направлении.

Продифференцировав (П1.8) по x и подставив в (П1.5), получим выражение для тока в линии:

$$\begin{aligned} \dot{I}(x) &= \frac{\dot{\gamma}}{\underline{Z}} (\dot{U}_{\text{пр}} e^{-\dot{\gamma}x} - \dot{U}_{\text{обр}} e^{\dot{\gamma}x}) = \frac{\sqrt{\underline{Z}\underline{Y}}}{\underline{Z}} (\dot{U}_{\text{пр}} e^{-\dot{\gamma}x} - \dot{U}_{\text{обр}} e^{\dot{\gamma}x}) = \\ &= \frac{1}{\underline{Z}_c} (\dot{U}_{\text{пр}} e^{-\dot{\gamma}x} - \dot{U}_{\text{обр}} e^{\dot{\gamma}x}) = \dot{I}_{\text{пр}} e^{-\dot{\gamma}x} - \dot{I}_{\text{обр}} e^{\dot{\gamma}x}. \end{aligned} \quad (\text{П1.10})$$

Сопоставляя (П1.8) и (П1.10), видно, что волны напряжения и тока пропорциональны, и коэффициентом пропорциональности является *волновое сопротивление* $\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}/\underline{Y}}$.

Неизвестные множители перед экспонентами в выражениях (П1.8) и (П1.10) находятся в результате подстановки граничных условий – значений напряжения или тока по концам линии.

Если отсчет системы координат производится из начала линии:

$$\begin{aligned} U(x=0) &= \dot{U}_1 = \dot{U}_{\text{пр}} + \dot{U}_{\text{обр}}, \\ \dot{I}(x=0) &= \dot{I}_1 = \dot{I}_{\text{пр}} - \dot{I}_{\text{обр}} = \frac{\dot{U}_{\text{пр}}}{\underline{Z}_c} - \frac{\dot{U}_{\text{обр}}}{\underline{Z}_c}, \end{aligned}$$

где \dot{U}_1 и \dot{I}_1 – напряжение и ток в начале линии. Искомые множители выражаются через напряжения и ток в начале линии:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{пр}} &= \frac{\dot{U}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_c}{2}, \\ \dot{U}_{\text{обр}} &= \frac{\dot{U}_1 - \dot{I}_1 \underline{Z}_c}{2}. \end{aligned}$$

Подставляя полученные выражения в (П1.8) получаем уравнение

$$\dot{U}(x) = \frac{\dot{U}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_c}{2} e^{-\dot{\gamma}x} + \frac{\dot{U}_1 - \dot{I}_1 \underline{Z}_c}{2} e^{\dot{\gamma}x},$$

которое упрощается после представления экспонент через гиперболические функции по формулам $e^{-\dot{\gamma}x} = \text{ch } \dot{\gamma}x - \text{sh } \dot{\gamma}x$ и $e^{\dot{\gamma}x} = \text{ch } \dot{\gamma}x + \text{sh } \dot{\gamma}x$:

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_1 \text{ch } \dot{\gamma}x - \dot{I}_1 \underline{Z}_c \text{sh } \dot{\gamma}x. \quad (\text{П1.11})$$

Аналогично получается функция изменения комплексного значения тока вдоль линии:

$$\dot{I}(x) = -\frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_c} \text{sh } \dot{\gamma}x + \dot{I}_1 \text{ch } \dot{\gamma}x. \quad (\text{П1.12})$$

Следует отметить, что положительное направление тока совпадает с направлением оси x . Со знаком напряжения трудностей возникнуть не может: положительное направление напряжения всегда от провода к земле. Если за начало координатной оси взять конец линии и направить ее в

начало, таким образом, что $x' = l - x$, то в выражения (П1.11) и (П1.12) вместо \dot{U}_1 и \dot{I}_1 следует поставить \dot{U}_2 и $-\dot{I}_2$. Ток \dot{I}_2 направлен против оси x' , поэтому берется со знаком минус:

$$\dot{U}(x') = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma} x' + \dot{I}_2 \underline{Z}_c \operatorname{sh} \dot{\gamma} x', \quad (\text{П1.13})$$

$$\dot{I}(x') = -\frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_c} \operatorname{sh} \dot{\gamma} x' - \dot{I}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma} x' \quad (\text{П1.14})$$

Ток, получаемый из последнего равенства, имеет совпадающее с осью x' направление. Для того чтобы получать ток, направленный от источника в нагрузку, необходимо последнее равенство умножить на (-1):

$$\dot{I}(x') = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_c} \operatorname{sh} \dot{\gamma} x' + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma} x' \quad (\text{П1.15})$$

Рассмотрим некоторую точку линии длиной l с координатой x на оси, направленной от источника в нагрузку $\underline{Z}_н$. Отношение напряжения между этой точкой и землей к проходящему через нее и направленному в нагрузку току – это $\underline{Z}_{\text{вх}}(l-x)$ – входное сопротивление линии длиной $(l-x)$ с сопротивлением $\underline{Z}_н$ на конце. Таким образом, выражением для входного сопротивления в точке x будет являться отношение выражений (П1.13) и (П1.15):

$$\underline{Z}_{\text{вх}}(x) = \frac{\dot{U}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma} x' + \dot{I}_2 \underline{Z}_c \operatorname{sh} \dot{\gamma} x'}{\frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_c} \operatorname{sh} \dot{\gamma} x' + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma} x'}. \quad (\text{П1.16})$$

Напряжение и ток в конце линии связаны через сопротивление нагрузки $\dot{U}_2 = \underline{Z}_н \dot{I}_2$. Подставив это соотношение в (П1.16), получим:

$$\underline{Z}_{\text{вх}}(x) = \underline{Z}_c \frac{\underline{Z}_н + \underline{Z}_c \operatorname{th} \dot{\gamma} (l-x)}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_н \operatorname{th} \dot{\gamma} (l-x)}. \quad (\text{П1.17})$$

При отсутствии потерь в линии, волны не затухают, и коэффициент распространения $\dot{\gamma}$ становится чисто мнимым и равным $j\beta$. Волновое сопротивление становится чисто активным: $Z_c = \sqrt{L'/C'}$. Гиперболическая функция, аргумент которой чисто мнимый, является тригонометрической. Имея это в виду, все полученные выше уравнения с гиперболическими функциями можно переписать, используя тригонометрические функции. Так, из уравнений (П1.11) и (П1.12) следует:

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_1 \cos \beta x - j \dot{I}_1 Z_c \sin \beta x, \quad (\text{П1.18})$$

$$\dot{I}(x) = -j \frac{\dot{U}_1}{Z_c} \sin \beta x + \dot{I}_1 \cos \beta x. \quad (\text{П1.19})$$

Формулы (П1.13) и (П1.15) в случае линии без потерь преобразуются к виду:

$$\dot{U}(x') = \dot{U}_2 \cos \beta x' + j \dot{I}_2 Z_c \sin \beta x', \quad (\text{П1.20})$$

$$\dot{I}(x') = j \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \sin \beta x' + \dot{I}_2 \cos \beta x'. \quad (\text{П1.21})$$

Выражение входного сопротивления в точке из (П1.17) преобразуется к виду:

$$\underline{Z}_{\text{вх}}(x) = Z_c \frac{\underline{Z}_{\text{н}} + j Z_c \operatorname{tg} \beta (l - x)}{Z_c + j \underline{Z}_{\text{н}} \operatorname{tg} \beta (l - x)}. \quad (\text{П1.22})$$

Входное сопротивление в начале идеальной разомкнутой линии ($\underline{Z}_{\text{н}} \rightarrow \infty$) приобретает вид

$$\underline{Z}_{\text{вх}}^{(\text{xx})} = -j Z_c \operatorname{ctg} \beta l. \quad (\text{П1.23})$$

Входное сопротивление короткозамкнутой линии ($\underline{Z}_{\text{н}} = 0$):

$$\underline{Z}_{\text{вх}}^{(\text{кз})} = j Z_c \operatorname{tg} \beta l. \quad (\text{П1.24})$$

При согласованной нагрузке ($\underline{Z}_{\text{н}} = Z_c$), соответствующей режиму передачи натуральной мощности, входное сопротивление линии равно ее волновому сопротивлению

$$\underline{Z}_{\text{вх}}^{(\text{согл})} = Z_c, \quad (\text{П1.25})$$

что объясняется отсутствием в линии отраженных волн.

Приложение 2

Стоячие волны в длинных линиях

Стоячей волной называется процесс, получающийся от наложения прямой и обратной волн с одинаковыми амплитудами [2].

Это явление имеет место в длинной линии **без потерь**, на конце которой чисто реактивное сопротивление, холостой ход или короткое замыкание. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно подставить граничные условия в выражения (П1.8), в котором в силу отсутствия в линии активных потерь коэффициент распространения будет чисто мнимым $\dot{\gamma} = j\beta$, а волновое сопротивление чисто действительным $\underline{Z}_c = Z_c$.

Рассмотрим линию с коротким замыканием на конце, примем систему координат x' , выходящую из конца линии в её начало. Напряжение в конце линии равно нулю:

$$\begin{aligned} \dot{U}(x' = 0) &= \dot{U}_{\text{пр}} e^{-j\beta x'} + \dot{U}_{\text{обр}} e^{j\beta x'} = 0, \\ \dot{U}_{\text{пр}} &= -\dot{U}_{\text{обр}}, \end{aligned}$$

$$\dot{U}(x') = \dot{U}_{\text{пр}} (\cos \beta x' - j \sin \beta x' - \cos \beta x' - j \sin \beta x') = -j2\dot{U}_{\text{пр}} \sin \beta x'.$$

Напряжение обратной волны равно напряжению прямой. Число неизвестных постоянных интегрирования свелось до одной. Выразим ее через напряжение в начале линии $\dot{U}(x' = l) = \dot{U}_1$:

$$\dot{U}_{\text{пр}} = j \frac{\dot{U}_1}{2 \sin \beta l}.$$

Таким образом, распределение напряжения вдоль разомкнутой линии принимает вид:

$$\dot{U}(x') = \frac{\dot{U}_1}{\sin \beta l} \sin \beta x'. \quad (\text{П2.1})$$

Учитывая (П1.10) и равенство $\dot{U}_{\text{пр}} = -\dot{U}_{\text{обр}}$, получаем распределение тока вдоль короткозамкнутой линии:

$$\begin{aligned} \dot{i}(x') &= \frac{\dot{U}_{\text{пр}}}{\underline{Z}_c} (e^{-j\beta x'} + e^{j\beta x'}) = 2 \frac{\dot{U}_{\text{пр}}}{\underline{Z}_c} \cos \beta x', \\ \dot{i}(x') &= j \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_c \sin \beta l} \cos \beta x', \end{aligned} \quad (\text{П2.2})$$

ток сонаправлен с осью x' .

Из (П2.1) и (П2.2) следует, что действующие значения напряжения и тока изменяются вдоль линии по синусоиде, фаза напряжения принимает значения 0 и π , а фаза тока $\pm\pi/2$. Графики, построенные по этим формулам, приведены на рис. П2.1, а. Значения напряжения и тока на графиках даны в процентах от значений U_1 и I_1 в начале линии, ось координат x' направлена из конца линии в начало, длина линии 7000 км.

Характерные точки на графиках стоячих волн, в которых напряжение или ток принимают максимальное значение, называются *пучностями* напряжения или тока. Точки нулевого значения напряжения или тока называются *узлами*.

Функция входного сопротивления вдоль разомкнутой линии равна отношению (П2.1) к (П2.2), взятому с обратным знаком, поскольку ток $\dot{i}(x')$ направлен из нагрузки в источник:

$$\underline{Z}_{\text{вх}}(x) = -\frac{\underline{Z}_c \sin \beta x'}{-j \cos \beta x'} = jZ_c \operatorname{tg} \beta(l - x). \quad (\text{П2.3})$$

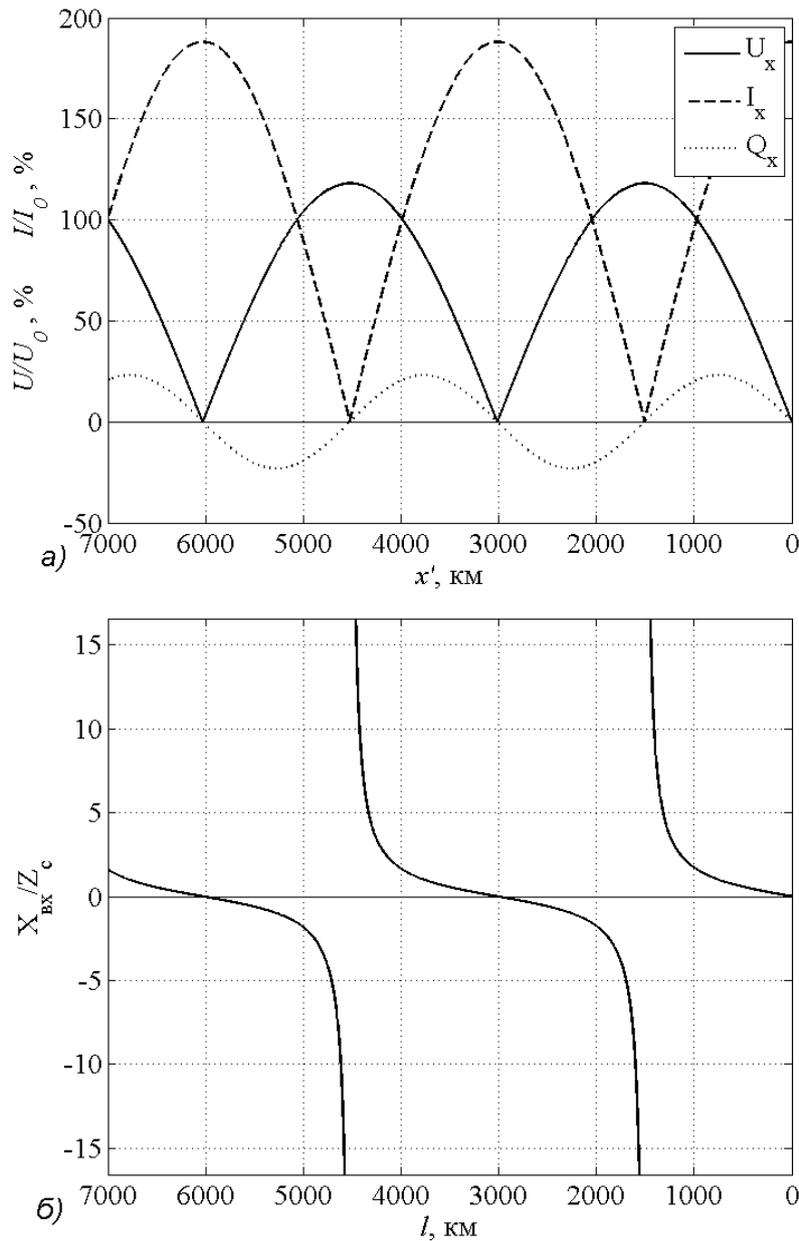


Рис. П2.1. Изменение вдоль линии параметров, характеризующих установившийся режим, $f = 50$ Гц

a – напряжение, ток и реактивная мощность;

b – входное сопротивление оставшейся части линии

Тот же результат можно получить, подставив $Z_n = 0$ в формулу (П1.22), что подтверждает правильность полученных выражений.

Через (П2.1) и (П2.2) можно выразить комплексную мощность в любой точке. Примем, что напряжение \dot{U}_1 в начале линии величина действительная, тогда:

$$\dot{S}(x') = \dot{U}(x') \tilde{I}(x') = -j \frac{U_1^2}{Z_c \sin^2 \beta l} \sin \beta x' \cos \beta x'.$$

В режимах, которые сопровождаются появлением стоячих волн, активная мощность в линии равна нулю. Это можно объяснить тем, что фазовое соотношение между напряжением и током в любой точке линии равно 90° или -90° . Изменение реактивной мощности вдоль линии представляет собой синусоиду с периодом $T = \frac{2\pi}{2\beta} = \frac{\lambda}{2}$:

$$Q(x') = \frac{U_1^2}{2Z_c \sin^2 \beta l} \sin 2\beta x'. \quad (\text{П2.4})$$

Графики $Z_{\text{вх}}(x)$ и $Q(x')$ приведены на рис. П2.1. Пучности напряжения наблюдаются в точках, где входное сопротивление принимает бесконечно большое значение. Пучности тока распложены в точках, в которых входное сопротивление «оставшейся части линии» равно нулю. При этом пучностям напряжения соответствуют узлы тока, а пучностям тока – узлы напряжения. Узлы и пучности на графиках стоячих волн расположены друг от друга на расстоянии четверти длины волны $\lambda/4 \approx 1500$ км.

На участках линии между пучностями и узлами фазовое соотношение между током и напряжением не изменяется. На участках, где напряжение опережает ток, реактивная мощность положительна, напряжение уменьшается, а ток увеличивается. Если ток имеет емкостный характер и опережает напряжение, реактивная мощность отрицательна, а напряжение вдоль линии увеличивается.

Приложение 3

Потоки мощности в линиях электропередачи

Мощность – это величина, которая характеризует интенсивность процессов генерации, передачи или потребления энергии $p(t) = dW/dt$. Когда речь идет об электрической цепи, то мгновенную мощность определяют по следующей формуле

$$p(t) = u(t)i(t).$$

Термин «реактивная мощность» вводится в теории применительно к установившимся режимам симметричных цепей синусоидального переменного тока, и только в этих условиях закономерно пользоваться этим понятием.

Рассмотрим принципиальную схему замещения электропередачи. От источника синусоидального напряжения через линию получает энергию нагрузка.

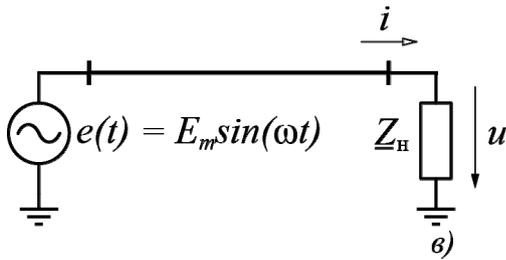


Рис. ПЗ.1. Принципиальная схема электропередачи

Выражение мгновенной мощности, передаваемой в нагрузку, принимает вид

$$p(t) = U_m \sin(\omega t) I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Используя тригонометрическое тождество $\sin\alpha \cdot \sin\beta = 0,5(\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta))$, перепишем равенство в виде:

$$p(t) = U_m I_m \frac{\cos\varphi - \cos(2\omega t - \varphi)}{2} \quad (\text{ПЗ.1})$$

учитывая также $\cos(\alpha - \beta) = \cos\alpha \cdot \cos\beta + \sin\alpha \cdot \sin\beta$, в итоге получаем

$$p(t) = UI(1 - \cos 2\omega t)\cos\varphi - UI \sin 2\omega t \sin\varphi = p_a(t) + p_r(t) \quad (\text{ПЗ.2})$$

где $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ и $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ – действующие значения напряжения и тока.

Выражение (ПЗ.2) позволяет выделить две составляющие мгновенной мощности в нагрузке, графики которых вместе с результирующей функцией $p(t)$ изображены на рис. ПЗ.2. Одна из них $p_a(t)$ представляет собой строго положительную величину, тогда как другая $p_r(t)$ колеблется около нулевого значения.

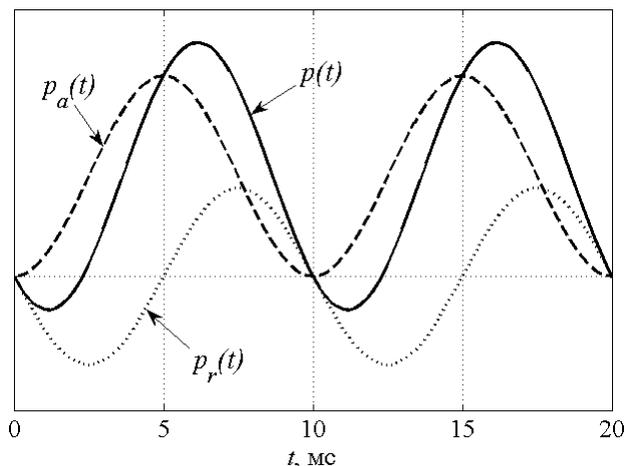


Рис. ПЗ.2. Изменение мгновенной мощности и её составляющих в нагрузке с $\cos\varphi = 0,75$

Процессы в линии пока оставим без внимания. Приемник электроэнергии представлен линейным комплексным сопротивлением Z_n . Тогда напряжение и ток приемника будут изменяться синусоидально с фазовым сдвигом φ друг относительно друга. Зададимся активно-индуктивным характером нагрузки: напряжение опережает ток, $\varphi > 0$.

Нетрудно видеть, что в течение периода мгновенная мощность приобретает положительные и отрицательные значения. Поставим в соответствие знак мгновенной мощности и направление передачи электроэнергии. При этом очевидно положительным мощностям должна соответствовать передача мощности из сети в нагрузку.

Тогда относительно кратковременные периоды

времени, в течение которых мгновенная мощность принимает отрицательные значения, должны рассматриваться как периоды передачи определенных количеств энергии из нагрузки в сеть.

Определим общее количество энергии, полученной приемником за период $T = 2\pi/\omega$ с учетом (ПЗ.2):

$$W = \int_0^T \underbrace{UI(1 - \cos 2\omega t) \cos \varphi dt}_{p_a(t)} + \int_0^T \underbrace{-UI \sin 2\omega t \sin \varphi dt}_{p_r(t)} \quad (\text{ПЗ.3})$$

Интеграл от второго слагаемого за период равен нулю. Энергия, полученная нагрузкой за период, равна

$$W = \int_0^T UI \cos \varphi dt = PT. \quad (\text{ПЗ.4})$$

$P = UI \cos \varphi$ – активная мощность. Активная мощность равна среднему значению мгновенной мощности за период:

$$P = \langle p(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{W}{T}.$$

Амплитуда при другой составляющей мгновенной мощности – $p_r(t)$ – в свою очередь называется реактивной мощностью и обозначается:

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (\text{ПЗ.5})$$

Среднее значение функции $p_r(t)$ равно нулю, поэтому реактивная мощность характеризует только периодический обмен энергией между сетью и потребителем. Возможность такого обмена обусловлена наличием в сети и у потребителя таких элементов, в которых возможно периодическое накопление и последующий возврат определенных порций энергии. В противном случае обмен энергии между сетью и потребителем был бы невозможен.

Источником активной мощности в сети служит только один элемент – генератор, производящий электроэнергию из других видов энергии. В реальности энергия доставляется от генератора к потребителю через линию, имеющую активные потери. Передача электроэнергии от генератора к потребителю сопровождается потерями на нагрев проводов и корону. Потери обуславливают убывающий вид характеристики $P(x)$ – функции изменения активной мощности вдоль линии.

Источник реактивной мощности в сети – это все реактивные элементы на схеме, производящие циклический обмен энергии с нагрузкой. Линии электропередачи имеют схемы замещения с распределенными параметрами, в результате чего циклический обмен энергии происходит не только между сетью и потребителем, но также между отдельными участками линии, между линией и источником напряжения. Поэтому функция $Q(x)$, в отличие от $P(x)$, может, как убывать, так и возрастать вдоль линии.

Распределение мощностей вдоль линии имеет большое значение при решении практических задач. Установим общий вид функции $\dot{S}(x)$, используя выражения (П1.8) и (П1.10). Потери в линии учитывать не будем, это существенным образом упростит выкладку, а главное искомое выражение, что очень важно с точки зрения дальнейшего анализа. Таким образом

$$\begin{aligned}\dot{U}(x) &= \dot{U}_{\text{пр}} e^{-j\beta x} + \dot{U}_{\text{обр}} e^{j\beta x} = U_{\text{пр}} e^{j\psi_{\text{пр}}} e^{-j\beta x} + U_{\text{обр}} e^{j\psi_{\text{обр}}} e^{j\beta x} \\ \dot{U}(x) &= \left[U_{\text{пр}} \cos(\psi_{\text{пр}} - \beta x) + U_{\text{обр}} \cos(\psi_{\text{обр}} + \beta x) \right] + \\ &+ j \left[U_{\text{пр}} \sin(\psi_{\text{пр}} - \beta x) + U_{\text{обр}} \sin(\psi_{\text{обр}} + \beta x) \right] = U_a + jU_r \\ \dot{i}(x) &= \dot{i}_{\text{пр}} e^{-j\beta x} + \dot{i}_{\text{обр}} e^{j\beta x} = \frac{U_{\text{пр}}}{Z_c} e^{j\psi_{\text{пр}}} e^{-j\beta x} - \frac{U_{\text{обр}}}{Z_c} e^{j\psi_{\text{обр}}} e^{j\beta x} \\ \dot{i}(x) &= \frac{1}{Z_c} \left[U_{\text{пр}} \cos(\psi_{\text{пр}} - \beta x) - U_{\text{обр}} \cos(\psi_{\text{обр}} + \beta x) \right] + \\ &+ j \left[U_{\text{пр}} \sin(\psi_{\text{пр}} - \beta x) - U_{\text{обр}} \sin(\psi_{\text{обр}} + \beta x) \right] = I_a + jI_r\end{aligned}$$

Используя полученные выражения, получаем функцию комплекса мощности в виде суммы

$$\dot{S} = (U_a + jU_r)(I_a - jI_r) = U_a I_a - jU_a I_r + jU_r I_a + U_r I_r.$$

После перемножений и сокращений формула комплексной мощности принимает вид:

$$\begin{aligned}\dot{S} &= \frac{1}{Z_c} (U_{\text{пр}}^2 - U_{\text{обр}}^2) + \\ &+ j \frac{U_{\text{пр}} U_{\text{обр}}}{Z_c} (2 \cos(\psi_{\text{пр}} - \beta x) \sin(\psi_{\text{обр}} + \beta x) - 2 \sin(\psi_{\text{пр}} - \beta x) \cos(\psi_{\text{обр}} + \beta x))\end{aligned}$$

Используя тригонометрическое тождество $\sin\alpha \cdot \cos\beta = 0,5(\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta))$, получаем

$$\dot{S} = \frac{1}{Z_c} (U_{\text{пр}}^2 - U_{\text{обр}}^2) + \frac{U_{\text{пр}} U_{\text{обр}}}{Z_c} (\sin(\psi_{\text{обр}} - \psi_{\text{пр}} + 2\beta x) - \sin(\psi_{\text{обр}} - \psi_{\text{пр}} - 2\beta x)),$$

с учетом тождества $\sin\alpha \pm \sin\beta = 2 \sin \frac{\alpha \pm \beta}{2} \cos \frac{\alpha \mp \beta}{2}$ выражение комплексной мощности принимает окончательный вид

$$\dot{S}(x) = \frac{U_{\text{пр}}^2 - U_{\text{обр}}^2}{Z_c} + jU_{\text{пр}} U_{\text{обр}} \sin(\psi_{\text{пр}} - \psi_{\text{обр}} + 2\beta x) \quad (\text{П3.6})$$

Как и следовало ожидать, активная мощность не изменяется вдоль линии без потерь. Формула (П3.6) подтверждает сделанный в

Приложении 2 вывод о чисто реактивном характере передаваемой по линии мощности в режимах, связанных с появлением на линии стоячих волн $\dot{U}_{\text{пр}} = \dot{U}_{\text{обр}}$. Из (П3.6) также видно, что изменение реактивной мощности вдоль линии в любом режиме представляет собой синусоидальную функцию с периодом $T = \frac{2\pi}{2\beta} = \frac{\lambda}{2}$.

Приложение 4

Натуральная мощность

В теоретических основах электротехники натуральной мощностью называется мощность, передаваемая в согласованном режиме. В ТОО это понятие вводится исключительно для длинных линий с односторонним питанием, на конце которых нет источников напряжения или тока. Для передачи по таким линиям натуральной мощности необходимо установить на приемном конце волновое сопротивление. При этом система из уравнений (П1.8) и (П1.10) может быть дополнена граничным условием – соотношением между напряжением U_2 и током I_2 в конце линии. Если ось координат x' направить из конца линии в начало, система уравнений записывается в виде:

$$\begin{cases} \dot{U}(x') = \dot{U}_{\text{пр}} e^{-\dot{\gamma}x'} + \dot{U}_{\text{обр}} e^{\dot{\gamma}x'} \\ \dot{I}(x') = \frac{1}{\underline{Z}_c} (\dot{U}_{\text{пр}} e^{-\dot{\gamma}x'} - \dot{U}_{\text{обр}} e^{\dot{\gamma}x'}) \\ \dot{I}_2 \underline{Z}_c = \dot{U}_2 \end{cases}$$

Откуда следует:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{пр}} + \dot{U}_{\text{обр}} &= \underline{Z}_c \frac{1}{\underline{Z}_c} (\dot{U}_{\text{пр}} - \dot{U}_{\text{обр}}), \\ \dot{U}_{\text{обр}} &= 0. \end{aligned}$$

Таким образом, распределение напряжения вдоль линии будет представлять собой прямую волну:

$$\dot{U}(x') = \dot{U}_{\text{пр}} e^{-\dot{\gamma}x'}. \quad (\text{П4.1})$$

Если на конце линии установлено волновое сопротивление, входное сопротивление линии также равно волновому сопротивлению вне зависимости от её длины (в этом можно убедиться, подставив $\underline{Z}_n = \underline{Z}_c$ в (П1.17)). В таком случае полная мощность, поступающая в линию, равна:

$$\dot{S}_1 = \frac{U_1^2}{\underline{Z}_c}. \quad (\text{П4.2})$$

Поскольку действительная часть величины \underline{Z}_c намного превышает мнимую, мощность S_1 имеет практически активный характер. В этом заключается важнейшее свойство натуральной мощности. В теории электропередач высокого напряжения, натуральной мощностью принято называть мощность, при передаче которой по линии осуществляется взаимная компенсация реактивной мощности на каждом элементарном участке линии на всем ее протяжении [1].

Чтобы определить условия, при которых по линии передается натуральная мощность, обратимся к выражению полной мощности (П3.6)

$$\dot{S}(x) = \underbrace{\frac{U_{\text{пр}}^2 - U_{\text{обр}}^2}{Z_c}}_{P(x)} + j \underbrace{U_{\text{пр}} U_{\text{обр}} \sin(\psi_{\text{пр}} - \psi_{\text{обр}} + 2\beta x)}_{Q(x)}. \quad (\text{П4.3})$$

Условие полной взаимной компенсации реактивной мощности на каждом участке линии означает следующее

$$Q(x) = U_{\text{пр}} U_{\text{обр}} \sin(\psi_{\text{пр}} - \psi_{\text{обр}} + 2\beta x) = \text{const}. \quad (\text{П4.4})$$

Очевидно, условие (П4.4) может быть выполнено только в случае равенства нулю реактивной мощности вдоль всей линии, которое имеет место только при равенстве нулю $U_{\text{пр}}$ или $U_{\text{обр}}$. Следовательно, условием передачи натуральной мощности опять служит (П4.1)

Выражение (П4.3) не учитывает существование в линии активных потерь. Это допущение позволяет переписать (П4.1) в виде:

$$\dot{U}(x') = \dot{U}_{\text{пр}} e^{-j\beta x'}. \quad (\text{П4.5})$$

Из (П4.5) следует, что в режиме передачи натуральной мощности действующее значение напряжения вдоль линии не изменяется. Согласно (П4.3) натуральная мощность имеет чисто активный характер и всюду вдоль линии равна

$$P_{\text{нат}} = \frac{U_{\text{пр}}^2}{Z_c}. \quad (\text{П4.6})$$

Таким образом, формально следуя определению реактивной мощности, делаем вывод: передача натуральной мощности по линии без потерь осуществляется только в том случае, если напряжение вдоль всей линии неизменно и равно $U_{\text{пр}}$.

На практике добиться одинакового значения напряжения вдоль всей линии не представляется возможным. Натуральную мощность вычисляют, используя значение напряжения, характерное для рассматриваемой электропередачи, например, номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$. При этом натуральная мощность – величина комплексная:

$$\dot{S}_{\text{нат}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Z_c}. \quad (\text{П4.7})$$

$$\begin{cases} U_1 \cos \delta = U_2 \cos \beta l + I_2 Z_c \sin \varphi_2 \sin \beta l; \\ U_1 \sin \delta = I_2 Z_c \cos \varphi_2 \sin \beta l; \\ I_1 \cos(\delta - \varphi_1) = I_2 \cos \varphi_2 \cos \beta l; \\ I_1 \sin(\delta - \varphi_1) = \frac{U_2}{Z_c} \sin \beta l - I_2 \sin \varphi_2 \cos \beta l; \\ P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1; \quad Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1; \\ P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2; \quad Q_2 = U_2 I_2 \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (\text{П5.2})$$

Выражая произведение $I_2 \cos \varphi_2$ из предпоследнего уравнения в системе (П5.2) и подставляя его во второе:

$$U_1 \sin \delta = \frac{P_2}{U_2} Z_c \sin \beta l,$$

получаем зависимость

$$P = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \beta l} \sin \delta. \quad (\text{П5.3})$$

По данной формуле вычисляется передаваемая по линии активная мощность.

Для получения выражения реактивной мощности в конце линии умножим на U_2 выражения в левой и правой частях первого уравнения системы (П5.3):

$$U_2 U_1 \cos \delta = U_2^2 \cos \beta l + U_2 I_2 Z_c \sin \varphi_2 \sin \beta l = U_2^2 \cos \beta l + Q_2 Z_c \sin \beta l,$$

откуда

$$Q_2 = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \beta l} \cos \delta - \frac{U_2^2}{Z_c} \operatorname{ctg} \beta l. \quad (\text{П5.4})$$

Формула реактивной мощности в начале линии находится сходным образом из третьего уравнения системы (П5.2), после умножения его на U_1 :

$$U_1 I_1 \cos(\delta - \varphi_1) = U_1 I_1 \cos \delta \cos \varphi_1 + U_1 I_1 \sin \delta \sin \varphi_1 = U_1 I_2 \cos \varphi_2 \cos \beta l,$$

откуда

$$P_1 \cos \delta + Q_1 \sin \delta = P_2 \frac{U_1}{U_2} \cos \beta l.$$

Используя принятое ранее допущение об отсутствии потерь и угловую характеристику мощности, получаем:

$$Q_1 = -\frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \beta l} \cos \delta + \frac{U_1^2}{Z_c} \operatorname{ctg} \beta l. \quad (\text{П5.5})$$

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения:** Учебник для вузов / Ю.П. Рыжов – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.: ил.
2. **Основы теории цепей:** Учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов.– 5-е изд., перераб.–М.: Энергоатомиздат, 1989.–528 с.: ил.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ.....	3
Ограничение перенапряжений вдоль разомкнутой линии.....	9
шунтирующими реакторами	9
Шунтирующий реактор в середине линии для ограничения.....	17
перенапряжений в режимах малых нагрузок	17
Перенапряжения при установке на линии устройства продольной компенсации	19
ЗАДАНИЕ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНУЮ ПОДГОТОВКУ	22
ЗАДАНИЕ НА ИЗМЕРЕНИЯ	23
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	25
УКАЗАНИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ МОДЕЛИ И ВЫПОЛНЕНИЮ	26
РАСЧЕТОВ	26
Предварительные сведения о работе со стендом	26
Указания по составлению схемы и выполнению расчетов	28
Телеграфные уравнения длинной линии и их решение	30
Стоячие волны в длинных линиях.....	35
Потоки мощности в линиях электропередачи.....	38
Натуральная мощность	42
Вывод некоторых соотношений между режимными параметрами по концам линии	44
ЛИТЕРАТУРА.....	46

Учебное издание

**Кубаткин Максим Александрович, Ларин Василий Серафимович,
Матвеев Даниил Анатольевич**

Компьютерная лабораторная работа
«Перенапряжения в дальних электропередачах за счет емкостного эффекта»

Методическое пособие по курсу

«Техника высоких напряжений»
для студентов, обучающихся по направлению
«Электроэнергетика»

Редактор издательства

Темплан издания МЭИ 2013(1),	метод.	Подписано в печать хх.хх.хх
Печать офсетная	Формат 60х84/16	Физ. печ. л. 3,0
Тираж ххх экз.	Изд. № хх	Заказ № ххх

ЗАО «Издательский дом МЭИ», 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14
Отпечатано в типографии ФКП «НИИ «Геодезия», 141292, Московской обл.,
г. Красноармейск, просп. Испытателей, д. 14

© Московский энергетический институт
(технический университет), 2016