

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Кафедра электроснабжения горных и промышленных предприятий

Составители  
Р. В. Беляевский  
В. А. Воронин

## **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

**Методические указания к практическим занятиям  
для студентов всех форм обучения**

Рекомендованы учебно-методической комиссией направления  
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в качестве  
электронного издания для использования в учебном процессе

Кемерово 2017

## Рецензенты

Захаров С. А. – доцент кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий

Семькина И. Ю. – председатель учебно-методической комиссии направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

**Беляевский Роман Владимирович**

**Воронин Вячеслав Андреевич**

**Современные методы управления режимами передачи и распределения электроэнергии:** методические указания к практическим занятиям [Электронный ресурс]: для студентов направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиля «Электроэнергетика», всех форм обучения / сост.: Р. В. Беляевский, В. А. Воронин; КузГТУ. – Кемерово, 2017. – Систем. требования : Pentium IV ; ОЗУ 8 Мб ; Windows XP; мышь. – Загл. с экрана.

Составлено в соответствии с рабочей программой дисциплины «Современные методы управления режимами передачи и распределения электроэнергии» для студентов профиля «Электроэнергетика».

Предназначено для проведения практических занятий по изучению вопросов, связанных с расчетом и управлением режимов электропередач. Приведено содержание практических занятий, задачи и последовательность их выполнения, а также примерные оценочные средства для текущего контроля.

© КузГТУ, 2017

© Беляевский, Р. В.,  
Воронин, В. А.,  
составление, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ПАРАМЕТРЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ .....	3
2. РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ .....	11
3. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ .....	15
4. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	21

# 1. ПАРАМЕТРЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

## 1.1. ЦЕЛИ ЗАНЯТИЯ

1. Ознакомиться с параметрами компенсированных и некомпенсированных линий электропередачи.
2. Изучить методы определения параметров компенсированных и некомпенсированных линий электропередачи.

## 1.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Сопротивления и проводимости трехфазных линий определяются по известным формулам при учете погонных параметров:  $r_0$  – активное сопротивление, Ом/км;  $x_0$  – индуктивное сопротивление, Ом/км;  $b_0$  – емкостная проводимость, 1/(Ом/км);  $g_0$  – проводимость, связанная с потерями на корону и потерями в изоляции, 1/(Ом/км).

Линия представляется четырехполюсником с обобщенными постоянными  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  (рис. 1). Распределение напряжений и токов линии в нормальном режиме характеризуется уравнениями:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 l + \sqrt{3} \dot{I}_2 \underline{Z}_C \operatorname{sh} \gamma_0 l, \quad (1)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_2 \frac{1}{\sqrt{3} \underline{Z}_C} \operatorname{sh} \gamma_0 l + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 l, \quad (2)$$

где  $\gamma_0 = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)} = \alpha_0 + j\beta_0$ .

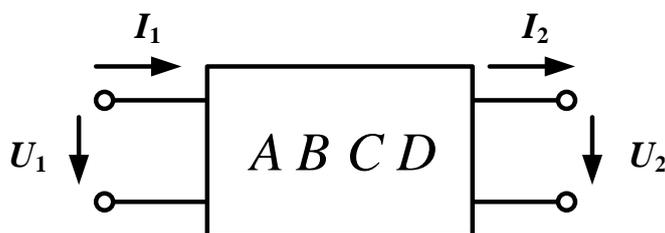


Рис. 1. Четырехполюсник

Величина  $\gamma_0$  называют коэффициентом распространения волны,  $\alpha_0$  – коэффициентом затухания,  $\beta_0$  – коэффициентом фазы. Для определения  $\alpha_0$  и  $\beta_0$  могут использоваться упрощенные формулы:

$$\alpha_0 = \frac{r_0}{2} \sqrt{\frac{b_0}{x_0}},$$

$$\beta_0 = \sqrt{x_0 b_0} \left( 1 + \frac{r_0^2}{8x_0^2} \right).$$

Для воздушных линий  $\alpha_0$  лежит в пределах  $3 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ ;  $\beta_0$  – в пределах 0,06...0,065.

Комплексная величина:

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} = z_C e^{j\xi},$$

имеет размерность сопротивления и называется волновым сопротивлением. При  $r_0 = g_0 = 0$ ;  $Z_C = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}}$  становится действительной величиной.

Вычисление гиперболических функций  $\text{ch}\gamma_0 l$ ,  $\text{sh}\gamma_0 l$  производится по известным соотношениям:

$$\text{ch}\gamma_0 l = \text{ch}\alpha_0 l \cdot \cos\beta_0 l + j \text{sh}\alpha_0 l \cdot \sin\beta_0 l,$$

$$\text{sh}\gamma_0 l = \text{sh}\alpha_0 l \cdot \cos\beta_0 l + j \text{ch}\alpha_0 l \cdot \sin\beta_0 l,$$

где  $\beta_0 l$  – волновая длина линии.

Для линий длиной до 1000 км можно принять, что  $\text{ch}\alpha_0 l \approx 1$ ;  $\text{sh}\alpha_0 l \approx \alpha_0 l$ .

Линия представляется симметричным четырехполюсником с обобщенными постоянными:

$$\underline{A} = \text{ch}\gamma_0 l, \quad (3)$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_C \text{sh}\gamma_0 l, \quad (4)$$

$$\underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_C} \text{sh}\gamma_0 l, \quad (5)$$

$$\underline{D} = \text{ch}\gamma_0 l, \quad (6)$$

при этом

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1,$$

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{B}}{\underline{C}}},$$

$$\text{sh}\gamma_0 l = \sqrt{\underline{BC}},$$

$$\operatorname{ch}\gamma_0 l = \sqrt{AD}.$$

Обобщенные параметры четырехполюсников (линий, трансформаторов, реакторов, батарей конденсаторов) находятся из данных T-образных и П-образных схем их замещения.

Для П-образной схемы замещения (рис. 2) найдем обобщенные постоянные.

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \underline{Z}_\Pi (\dot{i}_2 + \dot{U}_2 \underline{Y}_{\Pi 2}) + \dot{U}_2 = (1 + \underline{Y}_{\Pi 2} \underline{Z}_\Pi) \dot{U}_2 + \underline{Z}_\Pi \dot{i}_2, \\ \dot{i}_1 &= \dot{U}_1 \underline{Y}_{\Pi 1} + \dot{U}_2 \underline{Y}_{\Pi 2} + \dot{i}_2 = \\ &= (\underline{Y}_{\Pi 1} + \underline{Y}_{\Pi 2} + \underline{Y}_{\Pi 1} \underline{Y}_{\Pi 2} \underline{Z}_\Pi) \dot{U}_2 + (1 + \underline{Y}_{\Pi 1} \underline{Z}_\Pi) \dot{i}_2. \end{aligned}$$

Следовательно

$$\begin{aligned} \underline{A} &= 1 + \underline{Y}_{\Pi 2} \underline{Z}_\Pi, \\ \underline{B} &= \underline{Z}_\Pi, \\ \underline{C} &= \underline{Y}_{\Pi 1} + \underline{Y}_{\Pi 2} + \underline{Y}_{\Pi 1} \underline{Y}_{\Pi 2} \underline{Z}_\Pi, \\ \underline{D} &= 1 + \underline{Y}_{\Pi 1} \underline{Z}_\Pi, \end{aligned}$$

и обратно

$$\underline{Z}_\Pi = \underline{B}, \quad (7)$$

$$\underline{Y}_{\Pi 1} = \frac{\underline{D} - 1}{\underline{B}}, \quad (8)$$

$$\underline{Y}_{\Pi 2} = \frac{\underline{A} - 1}{\underline{B}}. \quad (9)$$

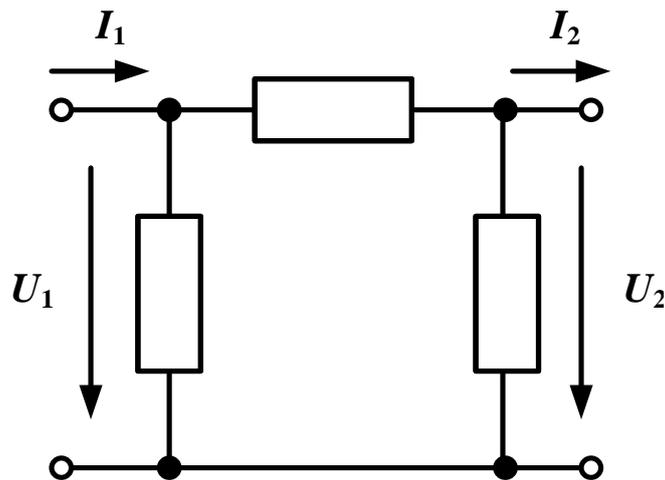


Рис. 2. П-образная схема замещения

Итак, если известны обобщенные параметры линии, то сосредоточенные параметры П-образной схемы замещения определяются по (7), (8), (9).

Воспользовавшись соотношениями (3), (4), (5), (6), связывающими волновые параметры линии  $\underline{Z}_C$  и  $\gamma_0 l$  с обобщенными постоянными, можно любую четырехполюсную схему, по аналогии с линией, характеризовать некоторыми параметрами: характеристическим сопротивлением  $\underline{Z}_B$  (аналогом  $\underline{Z}_C$ ) и постоянной  $g = b + ja$  (аналогом  $\gamma_0 l = \alpha_0 l + j\beta_0 l$ ), которые называются вторичными параметрами эквивалентного четырехполюсника. При этом

$$\begin{aligned}\underline{A} &= \text{ch}(b + ja), \\ \underline{B} &= \underline{Z}_B \text{sh}(b + ja), \\ \underline{C} &= \frac{1}{\underline{Z}_B} \text{sh}(b + ja), \\ \underline{D} &= \text{ch}(b + ja).\end{aligned}$$

Постоянная передачи  $g = b + ja$  связана с обобщенными постоянными следующим образом:

$$\begin{aligned}\text{sh}g &= \sqrt{\underline{BC}}, \\ \text{ch}g &= \sqrt{\underline{AD}}.\end{aligned}$$

Гиперболические функции определяются уравнениями:

$$\begin{aligned}\text{sh}g &= \frac{1}{2}(e^g - e^{-g}), \\ \text{ch}g &= \frac{1}{2}(e^g + e^{-g}),\end{aligned}$$

тогда очевидно

$$\text{sh}g + \text{ch}g = e^g,$$

и можно написать:

$$e^g = e^b + e^{ja} = \sqrt{\underline{BC}} + \sqrt{\underline{AD}}.$$

По формуле Эйлера

$$\sqrt{\underline{BC}} + \sqrt{\underline{AD}} = e^b (\cos a + j \sin a) = p + jq,$$

что позволяет определить

$$\text{tga} = \frac{q}{p} = \sqrt{\frac{|B||C|}{|A||D|}}.$$

В случае последовательного соединения звеньев электропередачи матрица обобщенных постоянных эквивалентного четырехполюсника равна произведению матриц четырехполюсников, замещающих отдельные звенья:

$$[\mathbf{M}] = [\mathbf{M}_1][\mathbf{M}_2] \dots [\mathbf{M}_n], \quad (10)$$

где  $[\mathbf{M}_i] = \begin{vmatrix} \mathbf{A}_i & \mathbf{B}_i \\ \mathbf{C}_i & \mathbf{D}_i \end{vmatrix}_{i=1,2,\dots,n}$ .

При этом матрицы, подлежащие перемножению, записываются в порядке следования соответствующих четырехполюсников, так как умножение матриц не подчиняется переместительному закону.

Если известны обобщенные параметры линии, то сосредоточенные определяются по (7), (8), (9). Когда известны равномерно распределенные параметры линии:  $\underline{Z} = \underline{Z}_0 l$  – сопротивление,  $\underline{Y} = \underline{Y}_0 l$  – проводимость, то ее сосредоточенные параметры определяются путем умножения  $\underline{Z}$  и  $\underline{Y}$  соответственно на поправочные коэффициенты  $K_Z, K_Y$ . С достаточной степенью точности эти коэффициенты определяются по выражениям:

$$K_Z = 1 + \frac{\underline{ZY}}{6},$$

$$K_Y = 1 - \frac{\underline{ZY}}{12}.$$

В практике расчетов применяют также поправочные коэффициенты в отдельности для активных и реактивных сопротивлений и проводимости. Эти коэффициенты определяются выражениями:

$$K_b = 0,5 \frac{3 + K_r}{1 + K_r},$$

$$K_r = 1 - \frac{l^2}{3} x_0 b_0,$$

$$K_x = 1 - \frac{l^2}{6} \left( x_0 b_0 - r_0^2 \frac{b_0}{x_0} \right).$$

При сравнительно небольшой длине каждого их участков линии (порядка 200–250 км) все поправочные коэффициенты могут быть приняты равными единице.

Расчеты режимов электропередач могут проводиться с использованием собственных ( $\underline{Z}_{11}, \underline{Z}_{22}$ ) и взаимных ( $\underline{Z}_{12}$ ) сопротивлений. При этом:

$$\underline{Z}_{11} = \frac{1}{\underline{Y}_{11}} = \frac{B}{D},$$

$$\underline{Z}_{22} = \frac{1}{\underline{Y}_{22}} = \frac{\underline{B}}{\underline{A}},$$

$$\underline{Z}_{12} = \underline{B}.$$

В общем случае удельное индуктивное сопротивление фаз воздушной линии для расчета симметричных режимов можно определить по выражению:

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{D_{\text{cp}}}{r_{\text{пр}}} + 0,016, \quad (11)$$

где  $r_{\text{пр}}$  – радиус провода;  $D_{\text{cp}}$  – среднегеометрическое расстояние между фазами, определяемое по выражению:

$$D_{\text{cp}} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}},$$

где  $D_{ab} D_{bc} D_{ca}$  – расстояние между проводами фаз  $a, b, c$ .

Например, при расположении проводов фаз по вершинам равностороннего треугольника со стороной  $D$ :  $D_{\text{cp}} = D_{ab} = D_{bc} = D_{ca} = D$ ; при горизонтальном расположении проводов фаз среднегеометрическое расстояние равно:

$$D_{\text{cp}} = \sqrt[3]{D \cdot D \cdot 2D} \approx 1,26D,$$

где  $D$  – расстояние между средней и крайними фазами.

При расщеплении фаз на несколько проводов вместо  $r_{\text{пр}}$  в выражении (11) следует использовать эквивалентный радиус провода  $r_{\text{эк}}$ :

$$r_{\text{эк}} = \sqrt[n]{r_{\text{пр}} a_{\text{cp}}^{n-1}},$$

где  $a_{\text{cp}}$  – среднегеометрическое расстояние между проводами одной фазы;  $n$  – число проводов в одной фазе.

В этом случае выражение для удельного индуктивного сопротивления можно записать в виде:

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{D_{\text{cp}}}{r_{\text{эк}}} + \frac{0,016}{n}.$$

Для определения удельной емкостной проводимости  $b_0$ , обусловленной емкостями между проводами разных фаз и емкостью провод-земля можно воспользоваться выражением:

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_{\text{cp}}}{r_{\text{пр}}}} 10^{-6}, \quad (12)$$

В случае расщепления проводов в выражение (12) вместо  $r_{\text{пр}}$  следует подставить  $r_{\text{эк}}$ .

### 1.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические положения.
2. Решить задачи:

#### Задача №1

Воздушная линия электропередачи напряжением 500 кВ имеет одноцепные опоры с горизонтальным расположением проводов, расстояние между которыми  $D = 12$  м; сечение фазного провода составляет  $1446 \text{ мм}^2$ , активное сопротивление  $r_0 = 0,021$  Ом/км; активная проводимость  $g_0$  принимается равной нулю.

Требуется вычислить коэффициент распространения  $\gamma_0$ , волновое сопротивление  $\underline{Z}_C$  и натуральную мощность линии  $P_C$  в двух случаях: 1) линия выполнена одиночным проводом диаметром 50 мм; 2) линия выполнена проводами марки 3хАСО-500 в фазе с диаметром каждого из проводов, равным 30,2 мм. Провода в фазе расположены по вершинам равностороннего треугольника со стороной  $a = 40$  см.

#### Задача №2

Одноцепная линия электропередачи напряжением 500 кВ длиной 1000 км выполнена проводами марки 3хАСО-500 и характеризуется следующими параметрами:  $r_0 = 0,021$  Ом/км,  $x_0 = 0,296$  Ом/км,  $b_0 = 3,84 \cdot 10^{-6}$  1/(Ом·км),  $g_0 \approx 0$ .

Требуется представить линию четырехполюсником и найти обобщенные постоянные  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$  с учетом и без учета потерь.

#### Задача №3

Линия электропередачи напряжением 500 кВ, выполненная проводами марки 3хАСО-500, состоит из двух участков по 500 км. В середине линии установлено компенсирующее устройство, состоящее из трех шунтирующих реакторов одинаковой мощности. Сопротивления и проводимости линии, отнесенные к 1 км длины составляют:  $r_0 = 0,021$  Ом/км,  $x_0 = 0,296$  Ом/км,  $b_0 = 3,84 \cdot 10^{-6}$  1/(Ом·км),  $g_0 \approx 0$ .

Требуется определить параметры схемы замещения линии и выбрать мощность реакторов по условию выравнивания напряжения в режиме холостого хода.

#### **Задача №4**

Линия электропередачи напряжением 500 кВ, выполненная проводами марки 3хАСО-500, состоит из двух участков длиной по 500 км. В середине линии имеется установка продольной емкостной компенсации без шунтирующих реакторов.

Требуется определить обобщенные постоянные электропередачи, вторичные волновые параметры ( $Z_g$ ,  $g = b + ja$ ), собственные и взаимные сопротивления и проводимости П-образной схемы замещения для различных степеней продольной компенсации. При решении задачи активными сопротивлениями пренебречь.

3. Подготовить отчет о выполнении практической работы в соответствии с указанными требованиями.

#### **1.4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ**

Отчет о выполнении работы должен содержать:

- наименование и цель работы;
- подробную последовательность расчетов по каждой задаче;
- ответ по каждой задаче.

#### **1.5. ФОРМЫ И СРОКИ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Защиту отчета по практической работе принимает преподаватель, проводящий практические занятия, до пятой контрольной недели. Защита проводится в форме собеседования по контрольным вопросам. Преподавателю предоставляется право задавать обучающимся дополнительные вопросы, а также, помимо теоретических вопросов, давать задачи и примеры, связанные с тематикой практической работы.

Практическая работа считается защищенной, если студент дал полные ответы на все заданные вопросы, не допустив при этом существенных неточностей, а отчет оформлен в соответствии с изложенными требованиями.

## 1.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать понятие о некомпенсированной и компенсированной линии электропередачи.
2. Назовите волновые параметры линии.
3. Как связаны между собой радиус расщепления и радиус эквивалентного провода?
4. Как влияет изменение радиуса расщепления на удельные значения активного и индуктивного сопротивления и емкостной проводимости линии?
5. Поясните влияние расщепления проводов на пропускную способность линии.

## 2. РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

### 2.1. ЦЕЛИ ЗАНЯТИЯ

1. Ознакомиться режимными параметрами линий электропередачи.
2. Изучить метод расчета режимных параметров линий электропередачи.

### 2.2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Выражения симметричного четырехполюсника при заданном напряжении  $\dot{U}_1$  и токе  $\dot{I}_1$  в начале линии имеют вид:

$$\dot{U}_2 = \underline{D}\dot{U}_1 - \sqrt{3}\underline{B}\dot{I}_1, \quad (13)$$

$$\dot{I}_2 = -\frac{\underline{C}\dot{U}_1}{\sqrt{3}} + \underline{A}\dot{I}_1. \quad (14)$$

Используя первое из данных уравнений, получаем выражение для мощности в начале линии:

$$\dot{S}_1 = \sqrt{3}\dot{U}_1 \dot{I}_1^* = \dot{U}_1 \frac{-\dot{U}_2 + \underline{D}\dot{U}_1}{\underline{B}} = -\frac{\dot{U}_1 \dot{U}_2}{\underline{B}} + \frac{\underline{D}\dot{U}_1^2}{\underline{B}}.$$

Из уравнения

$$\dot{S}_1 = P_1 + jQ_1 = -\frac{\dot{U}_1 \dot{U}_2^*}{\underline{B}} + \frac{\underline{D} \dot{U}_1^2}{\underline{B}},$$

нетрудно получить выражение

$$jQ_1 = j \operatorname{Im} \left( \frac{\underline{D} \dot{U}_1^2}{\underline{B}} \right) - \frac{\dot{U}_1 \dot{U}_2^*}{\underline{B}} - \left[ P_1 - \operatorname{Re} \left( \frac{\underline{D} \dot{U}_1^2}{\underline{B}} \right) \right],$$

из которого находим

$$Q_1 = \operatorname{Im} \left( \frac{\underline{D} \dot{U}_1^2}{\underline{B}} \right) - \sqrt{\left( \frac{\dot{U}_1 \dot{U}_2^*}{\underline{B}} \right)^2 - \left[ P_1 - \operatorname{Re} \left( \frac{\underline{D} \dot{U}_1^2}{\underline{B}} \right) \right]^2}. \quad (15)$$

Если заданы параметры  $\dot{U}_2$  и  $\dot{I}_2$ , то из уравнений линии

$$\dot{U}_1 = \underline{A} \dot{U}_2 + \sqrt{3} \underline{B} \dot{I}_2, \quad (16)$$

$$\dot{I}_1 = -\frac{\underline{C} \dot{U}_2}{\sqrt{3}} + \underline{D} \dot{I}_2. \quad (17)$$

можно получить уравнение мощности

$$\dot{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \dot{U}_2 \frac{\dot{U}_1 - \underline{A} \dot{U}_2}{\underline{B}} = \frac{\dot{U}_2 \dot{U}_1}{\underline{B}} - \frac{\underline{A} \dot{U}_2^2}{\underline{B}},$$

из которого определяем

$$Q_2 = -\operatorname{Im} \left( \frac{\underline{A} \dot{U}_2^2}{\underline{B}} \right) + \sqrt{\left( \frac{\dot{U}_1 \dot{U}_2}{\underline{B}} \right)^2 - \left[ P_2 + \operatorname{Re} \left( \frac{\underline{A} \dot{U}_2^2}{\underline{B}} \right) \right]^2}, \quad (18)$$

где обобщенные параметры  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$  и  $\underline{D}$  равны

$$\underline{A} = \underline{D} = \operatorname{ch} \gamma_0 l = \operatorname{ch} \alpha_0 l \cdot \cos \beta_0 l + j \operatorname{sh} \alpha_0 l \cdot \sin \beta_0 l,$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_c \operatorname{sh} \gamma_0 l = \underline{Z}_c (\operatorname{sh} \alpha_0 l \cdot \cos \beta_0 l + j \operatorname{ch} \alpha_0 l \cdot \sin \beta_0 l).$$

Для линий без потерь  $\alpha_0 = 0$ , тогда

$\underline{A} = \underline{D} = \cos \beta_0 l$ ,  $\underline{B} = \underline{Z}_c \sin \beta_0 l$ . В этом случае уравнение (15), (18)

преобразуются к виду:

$$Q_{1*} = \frac{\cos \beta_0 l}{\sin \beta_0 l} - \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \beta_0 l} - P_*^2},$$

$$Q_{2*} = -\frac{\cos \beta_0 l}{\sin \beta_0 l} + \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \beta_0 l} - P_*^2},$$

где принято  $U_1 = U_2 = U$ ;  $P_1 = P_2 = P$ ; выражения записаны в относительных единицах, за базисную принята натуральная мощность линии  $P_C = U^2/Z_c$ .

По выражениям (16), (17) можно определить мощность в начале линии  $\dot{S}_1$ :

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 = \sqrt{3}\dot{U}_1 I_1^* &= \underline{A}\underline{C}U_2^2 + \underline{B}\underline{D}\frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} + \left(\underline{B}\underline{C} + \underline{A}\underline{D}\right)P_2 + \\ &+ j\left(-\underline{B}\underline{C} + \underline{A}\underline{D}\right)Q_2 \end{aligned} \quad (19)$$

Аналогично мощность в конце линии  $\dot{S}_2$  находится по выражениям (13), (14):

$$\begin{aligned} \dot{S}_2 = \sqrt{3}\dot{U}_2 I_2^* &= -\underline{D}\underline{C}U_1^2 - \underline{B}\underline{A}\frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} + \left(\underline{B}\underline{C} + \underline{D}\underline{A}\right)P_1 + \\ &+ j\left(-\underline{B}\underline{C} + \underline{D}\underline{A}\right)Q_1 \end{aligned} \quad (20)$$

Уравнения (19) и (20) получены при использовании соответственно выражений (16), (17) и (13), (14) с подстановкой в них токов  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}_1$ , выраженных через мощности  $\dot{S}_2$  и  $\dot{S}_1$ .

### 2.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические положения.
2. Решить задачи:

#### Задача №5

Участок линии передачи длиной 450 км и напряжением 500 кВ, выполненной проводами марки 3хАСО-500, работает с равным напряжением по концам  $U_1 = U_2 = 500$  кВ.

Требуется построить зависимости реактивных мощностей начала и конца участка  $Q_1$ ,  $Q_2$  от передаваемой активной мощности. Принимаем обобщенные постоянные участка линии:

$$\begin{aligned} \underline{A} = \underline{D} &= 0,885 + j0,00845 = 0,885e^{j0,55^\circ}, \\ \underline{B} &= 9,4 + j126,7 = 126,8e^{j85,8^\circ}, \end{aligned}$$

$$\underline{C} = 0,00170e^{j90,2^\circ}.$$

### Задача №6

Линия длиной 1000 км выполнена проводами марки ЗхАСО-500.

Требуется найти напряжение в середине линии при передаче мощности  $P_2 = 400$  и 1000 МВт и определить фазу напряжения и тока в начале линии.

В обоих случаях напряжения по концам линии равны 500 кВ; линия рассматривается без потерь ( $U_1 = U_2 = 500$  кВ;  $r_0 = 0$ ); волновое сопротивление линии  $Z_c = 278$  Ом; натуральная мощность  $P_c = 900$  МВт; коэффициент изменения фазы на единицу длины  $\beta_0 = 0,06$  град/км.

### Задача №7

Линия, рассмотренная в задаче №6, разомкнута на конце; в начале линии подведено напряжение 500 кВ.

Требуется построить кривую распределения напряжения вдоль линии.

3. Подготовить отчет о выполнении практической работы в соответствии с указанными требованиями.

## 2.4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет о выполнении работы должен содержать:

- наименование и цель работы;
- подробную последовательность расчетов по каждой задаче;
- ответ по каждой задаче.

## 2.5. ФОРМЫ И СРОКИ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

Защиту отчета по практической работе принимает преподаватель, проводящий практические занятия, до девятой контрольной неделе. Защита проводится в форме собеседования по контрольным вопросам. Преподавателю предоставляется право задавать обучающимся дополнительные вопросы, а также, помимо теоретических вопро-

сов, давать задачи и примеры, связанные с тематикой практической работы.

Практическая работа считается защищенной, если студент дал полные ответы на все заданные вопросы, не допустив при этом существенных неточностей, а отчет оформлен в соответствии с изложенными требованиями.

## 2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими схемами замещения и какой системой уравнений может быть представлена электропередача при расчете параметров режимов?

2. Перечислить режимные параметры электропередачи.

3. Какие исходные данные необходимы для расчета параметров режимов электропередачи?

4. Можно ли, используя метод эквивалентного четырехполюсника, определить параметры режима в промежуточных точках электропередачи.

5. Какие режимно-технические ограничения должны быть учтены при расчете параметров режимов электропередачи?

## 3. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

### 3.1. ЦЕЛИ ЗАНЯТИЯ

1. Ознакомиться с факторами, влияющими на пропускную способность линий электропередачи.

2. Изучить метод расчета пропускной способности линий электропередачи.

### 3.2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Если считать, что напряжение по концам линии поддерживаются постоянными и не учитывать потери, то активная мощность, передаваемая по однородной линии:

$$P = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \beta_0 l} \sin \delta = P_{\text{пр}} \sin \delta.$$

Предельная мощность линии  $P_{пр}$  зависит от волновой длины  $\beta_0 l$ . Эта зависимость представлен на рис. 3. Минимальное значение величина  $P_{пр}$  приобретает при длине 1500 км. При дальнейшем увеличении волновой длины до полуволны величина  $\sin \beta_0 l$  уменьшается, стремясь к нулю, и  $P_{пр}$  возрастает.

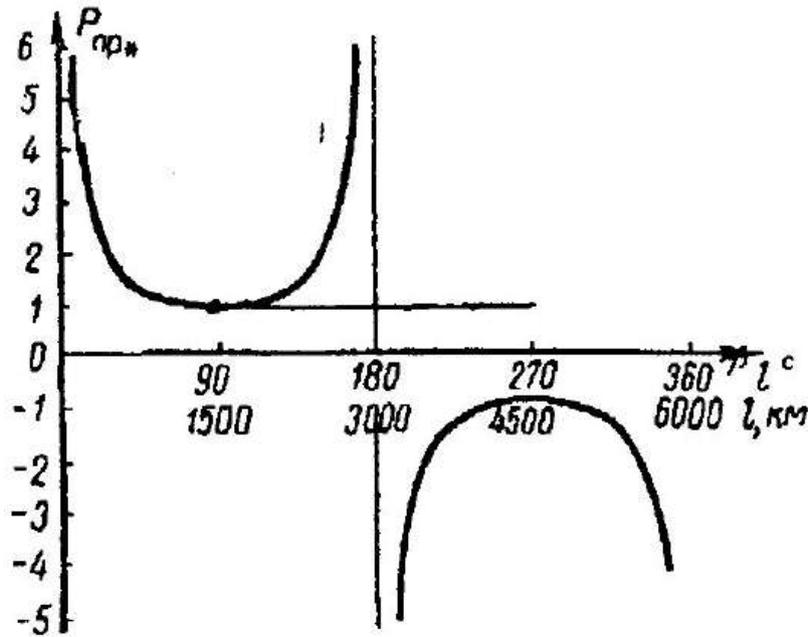


Рис. 3. Зависимость предельной мощности линии от волновой длины

Однако наличие высокого предела мощности  $P_{пр}$  в сверхдлинных линиях (более 1500 км) не является еще достаточным условием устойчивости режима передачи. Чтобы судить об устойчивости режима, надо обратиться к угловым характеристикам мощности линии  $P_* = f(\delta)$  для различных значений  $\beta_0 l$  и провести специальные расчеты.

Для увеличения предельной мощности  $P_{пр}$  обычно стремятся тем или иным путем изменить электрическую длину линии. Для уменьшения электрической длины применяется продольная емкостная и поперечная индуктивная компенсация. Иное их сочетание, т. е. поперечная емкостная компенсация и продольная индуктивная, позволяет увеличить электрическую длину линии до  $\beta_0 l \geq 180^\circ$ .

Наиболее рациональными являются схему с равномерным размещением компенсирующих установок вдоль линии.

1. Линии, длина которых превышает 800 км, при передаче натуральной мощности требуют продольной емкостной компенсации, а участки линии, имеющие длину 400-500 км по условиям ограничения перенапряжений и потерь активной мощности, должны иметь шунтирующие реакторы.

Установки продольной компенсации (УПК) с шунтирующими реакторами действуют как своего рода фазоповоротное устройство. Наилучшее использование УПК достигается при одинаковых напряжениях на обеих сторонах батареи ( $U_{1к} = U_{2к}$ ). УПК располагают в точках потокораздела реактивных мощностей, т.е. на стыках участков или в середине участков линии (рис. 4).

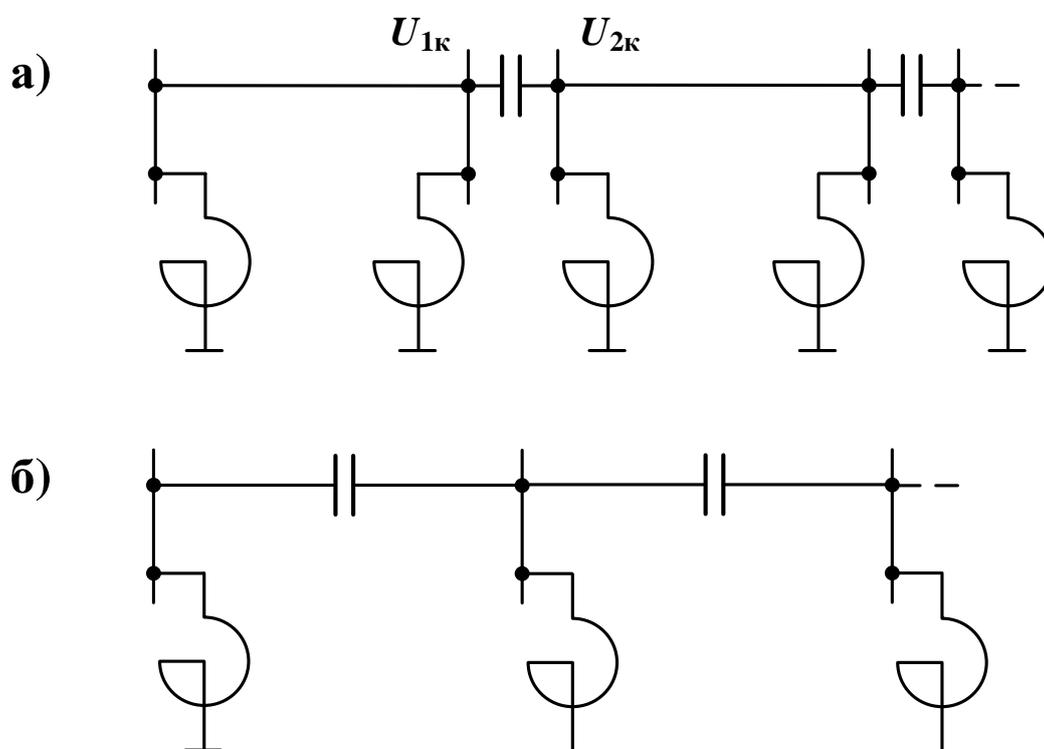


Рис. 4. Установки продольной компенсации с шунтирующими реакторами: а – при расположении на стыках участков линии; б – при расположении в середине участков линии

При установке УПК на стыках участков, необходимые для выравнивания напряжений УПК, мощности реакторов при активной нагрузке  $P$  определяются по формулам (30, 32), которые при  $\underline{A} = 1$ ;  $\underline{B} = -jX_K$ ;  $\underline{C} = 0$ ;  $\underline{D} = 1$  упрощаются:

$$Q_{1K} = -\frac{U^2}{X_K} + \sqrt{\left(\frac{U}{X_K}\right)^2 - P^2},$$

$$Q_{2K} = \frac{U^2}{X_K} - \sqrt{\left(\frac{U}{X_K}\right)^2 - P^2}.$$

Для обеспечения устойчивости при нагрузке  $P$  необходимо, чтобы результирующий фазовый сдвиг векторов напряжений на всех участках и УПК не превосходил некоторой величины  $\delta_0$ , допустимой по условиям устойчивости. Для вычисления сопротивления УПК следует воспользоваться известными соотношениями:

$$\sum_{i=1}^n \delta_{12i} - \sum_{i=1}^{n_k} \delta_{ki} = \delta_0,$$

$$\sin \delta_{12i} = P_{*i} \sin \beta_0 l_i, \quad (i = 1, 2 \dots n),$$

$$\sin \delta_{ki} = P_{*i} x_{k*i}, \quad (i = 1, 2 \dots n_k),$$

где  $\sin \delta_{12i}$ ,  $\sin \delta_{ki}$  – углы сдвига векторов напряжений на участках и УПК.

Величина  $x_k$  каждой УПК при таком подходе не должна превосходить сопротивления соответствующего участка  $x_{12*} = \sin \beta_0 l$ . Чтобы предельные мощности УПК и участков не оказались меньше величины передаваемой мощности, величины этих сопротивлений должны быть достаточно малыми. Это обстоятельство вызывает необходимость дробления УПК и распределения их вдоль линии.

При расположении УПК на стыках участков величина  $x_k$  не должна превышать следующих значений:

Таблица 1

Наибольшая величина  $x_k$  при расположении УПК  
на стыках участков

Число УПК	1	2	3	4
$x_k$ , %	50	67	75	80

Если УПК делят линию на равные участки, то пропускная способность такой нивелированной линии определяется сопротивлением некомпенсированного участка и

$$P_{H^*} = \frac{\sin \delta_0}{\sin \frac{\beta_0 l}{n}},$$

где  $n$  – число всех участков.

2. При передаче больших мощностей на расстояния свыше 1500 км технико-экономические показатели транзитных передач переменного тока существенно улучшаются, если компенсацию волновой длины заменить настройкой на полуволну. Настроенные электропередачи могут иметь настолько большой запас устойчивости, что пропускная способность будет определяться допустимым повышением напряжения в средней части линии.

Если не допускается повышение напряжения в средней части линии сверх номинального, то пропускная способность будет равна величине согласованной нагрузки настроенной линии

$$P_x = \frac{U^2}{z_x},$$

где  $z_x$  – характеристическое сопротивление настроенной линии.

Уменьшение  $z_x$  является важнейшим требованием к схемам настройки линии.

### 3.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические положения.
2. Решить задачи:

#### **Задача №8**

Линия электропередачи длиной 1500 км должна иметь пропускную способность  $P = 900$  МВт.

Требуется определить потребность компенсирующих устройств при различных номинальных напряжениях линии – 330, 500 и 750 кВ. Фазовый сдвиг векторов напряжений на концах линии не должен превосходить  $\delta_0 = 60^\circ$ .

### Задача №9

Для настроенных электропередач без промежуточных присоединений могут применяться схемы с повышенным напряжением средней части линии. Если допустить, что напряжение  $U_B$  средних точек линии может быть увеличено до следующего класса или до более высокого класса напряжения по сравнению с напряжением  $U_H$  конечных подстанций, то пропускную способность  $P$  можно значительно повысить. Наибольший эффект достигается в схемах, изображенных на рис. 5, когда настраивающие устройства размещаются на некотором расстоянии  $l_r$  от концов линии. Это позволяет для мощных электропередач сверхвысокого напряжения использовать трансформаторное оборудование, имеющее напряжение более низкое, чем максимальное напряжение линии.

Требуется для линии длиной 2000 км, волновое сопротивление которой  $z_c = 260$  Ом и общий угол настройки  $\alpha = 190^\circ$ , определить пропускную способность и проводимости (мощности) настраивающих устройств при кратности напряжения  $\nu = U_B / U_H = 1060 / 750$ . Влияние активных сопротивлений не учитывать.

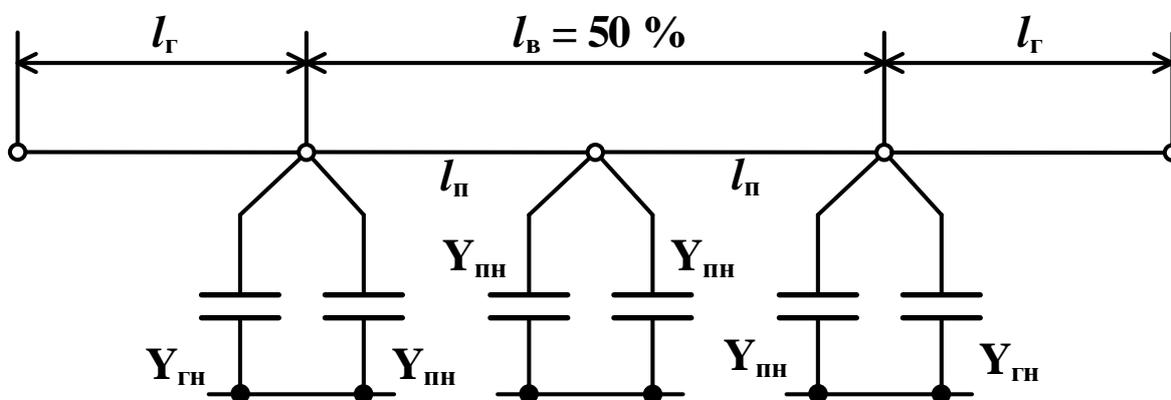


Рис. 5. Схема линии к задаче №9

3. Подготовить отчет о выполнении практической работы в соответствии с указанными требованиями.

#### 3.4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет о выполнении работы должен содержать:

- наименование и цель работы;
- подробную последовательность расчетов по каждой задаче;

- ответ по каждой задаче.

### 3.5. ФОРМЫ И СРОКИ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

Защиту отчета по практической работе принимает преподаватель, проводящий практические занятия, до тринадцатой контрольной неделе. Защита проводится в форме собеседования по контрольным вопросам. Преподавателю предоставляется право задавать обучающимся дополнительные вопросы, а также, помимо теоретических вопросов, давать задачи и примеры, связанные с тематикой практической работы.

Практическая работа считается защищенной, если студент дал полные ответы на все заданные вопросы, не допустив при этом существенных неточностей, а отчет оформлен в соответствии с изложенными требованиями.

### 3.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать понятие о пропускной способности линии электропередачи.
2. Перечислить факторы, влияющие на пропускную способность линий электропередачи.
3. Как можно изменить электрическую длину линии?
4. Принцип выбора мест установки компенсирующих устройств на линии электропередачи.
5. Как повышение напряжения в средней части линии влияет на ее пропускную способность?

## **4. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

### 4.1. ЦЕЛИ ЗАНЯТИЯ

1. Ознакомиться с работой линий электропередачи в режиме холостого хода.
2. Изучить метод расчета режимных параметров линий электропередачи в режиме холостого хода.

## 4.2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для установившегося режима холостого хода электропередачи, включенной на передающем конце, характерным является: повышение напряжения на линии и особенно на ее открытом конце, перегрузка генераторов передающей станции реактивным током и др. Если линия включена со стороны приемной системы, то и здесь следует ожидать повышение напряжения.

Реактивная мощность при нагрузке линии  $S$  равна:

$$Q_{\text{Л}} = Q_L - Q_C = \left( \frac{S^2}{P_C} - P_C \right) \sin \lambda,$$

где  $Q_L$ ,  $Q_C$  – реактивная мощность, потребляемая и генерируемая линией;  $P_C$  – натуральная мощность линии;  $\lambda$  – волновая длина линии.

Из этого выражения видно, что при передаче по линии мощности, меньше натуральной, результирующая реактивная мощность имеет емкостный характер. Это приводит к необходимости устанавливать на линии реакторы или синхронные компенсаторы, мощность которых определяется по режиму холостого хода.

Из уравнения (1) при токе  $\dot{I}_2 = 0$ , имеем

$$\dot{U}_1 = \underline{A}\dot{U}_2 = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 l.$$

Если принять во внимание, что активные сопротивления и проводимости малы, то

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \beta_0 l = \dot{U}_2 \cos \lambda,$$

где  $\lambda = l \sqrt{x_0 b_0} = 0,061 \cdot l$  эл. град,  $l$  – длина линии.

Отсюда можно найти соотношения напряжений по концам ЛЭП

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos \lambda} = \frac{1}{\cos(0,061 \cdot l)}.$$

Реактивная мощность в начале ЛЭП при холостом ходе равна

$$Q_1 = U_1^2 \underline{Y} = U_1^2 \frac{I_1^*}{\dot{U}_1} = U_1^2 \left( -j \frac{U_2}{Z_C} \sin \lambda / U_2 \cos \lambda \right) = -U_1^2 \frac{1}{Z_C} \operatorname{tg} \lambda,$$

где  $I_1^*$ ,  $\dot{U}_1^*$  получены из выражений (1) при неучете потерь в ЛЭП.

При подстановке в выражение для  $Q_1$  равенства  $U_1 = U_2 \cos \lambda$  и  $\operatorname{tg} \lambda = \sin \lambda / \cos \lambda$ , а также, учитывая соотношение  $\sin \lambda \cdot \cos \lambda = \frac{1}{2} \sin 2\lambda$ , получаем

$$Q_1 = -\frac{U_2^2}{2Z_C} \sin 2\lambda,$$

где  $Z_C$  – волновое сопротивление линии без потерь.

Следовательно, в установившемся режиме холостого хода ЛЭП, нагрузка генераторов, отвечающая зарядной мощности, при прочих равных условиях является функцией длины линии, т. к.  $\lambda = \beta_0 l$ .

При наличии на линии реакторов напряжение на открытом конце

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 / \underline{A},$$

где  $\underline{A}$  – постоянная эквивалентного четырехполюсника, замещающего линию с реактором.

Если реактор включен в середине линии, то

$$\underline{A} = \underline{A}_1 \underline{A}_2 + \underline{B}_1 \underline{C}_2 + \underline{A}_2 \underline{B}_1 \underline{Y}_p,$$

где параметр  $\underline{A}$  получен с учетом соотношения (10).

В последнем выражении (при  $r_0 = 0$ )

$$\underline{A}_1 = \underline{A}_2 = \cos \frac{\lambda}{2},$$

$$\underline{B}_1 = jZ_C \sin \frac{\lambda}{2},$$

$$\underline{C}_2 = j \frac{1}{Z_C} \sin \frac{\lambda}{2},$$

$$\underline{Y}_p = -j \frac{Q_p}{U^2}.$$

При включении реактора на открытом конце линии постоянная

$$\underline{A} = \cos \lambda + \underline{Y}_p \underline{B},$$

где  $\underline{B} = jZ_C \sin \lambda$ .

Если на линии имеется УПК, то напряжение на открытом конце

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{\underline{A}}.$$

В этом случае постоянная эквивалентного четырехполюсника

$$\underline{A} = \underline{A}_1 \underline{A}_2 + \underline{B}_1 \underline{C}_2 + \underline{A}_1 \underline{C}_2 x_k,$$

где  $\underline{A}_1 = \underline{A}_2 = \cos \frac{\lambda}{2}$ ,  $\underline{B}_1 = jZ_C \sin \frac{\lambda}{2}$ ,  $\underline{C}_1 = \underline{C}_2 = j \frac{1}{Z_C} \sin \frac{\lambda}{2}$ ;  $x_k$  – сопротивление УПК.

### 4.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические положения.
2. Решить задачи:

#### Задача №10

Линии электропередачи напряжением 500 кВ длиной 450 и 750 км, выполненные проводами марки ЗхАСО-500, отходят от электростанции, на шинах высшего напряжения которой поддерживается постоянным напряжение  $U_1 = 500$  кВ, и разомкнуты на приемных концах.

Параметры линий следующие:  $r_0 = 0,065$  Ом/км (одного провода в фазе),  $x_0 = 0,293$  Ом/км,  $b_0 = 3,93 \cdot 10^{-6}$  1/(Ом·км).

Требуется определить величину повышенного напряжения, возникающего на разомкнутых концах линий, и распределение напряжения и тока вдоль линий.

#### Задача №11

Для проведения синхронизации удаленной станции с приемной системой (рис. 6) предполагается включать холостую линию электропередачи длиной 850 км ( $r_0 = g_0 = 0$ ;  $x_0 = 0,292$  Ом/км;  $b_0 = 3,78 \cdot 10^{-6}$  1/(Ом·км)) на напряжение  $U_1 = 500$  кВ. Допустимое напряжение на открытом конце линии в рассматриваемых условиях равно 550 кВ.

Требуется определить напряжение на открытом конце линии электропередачи, если:

- а) на линии отсутствуют реакторы;
- б) в начале линии включен реактор мощностью 300 МВА;
- в) в середине линии включен тот же реактор;
- г) реактор включен в конце линии;

и показать, в каких случаях подключение линии на напряжение 500 кВ допустимо.

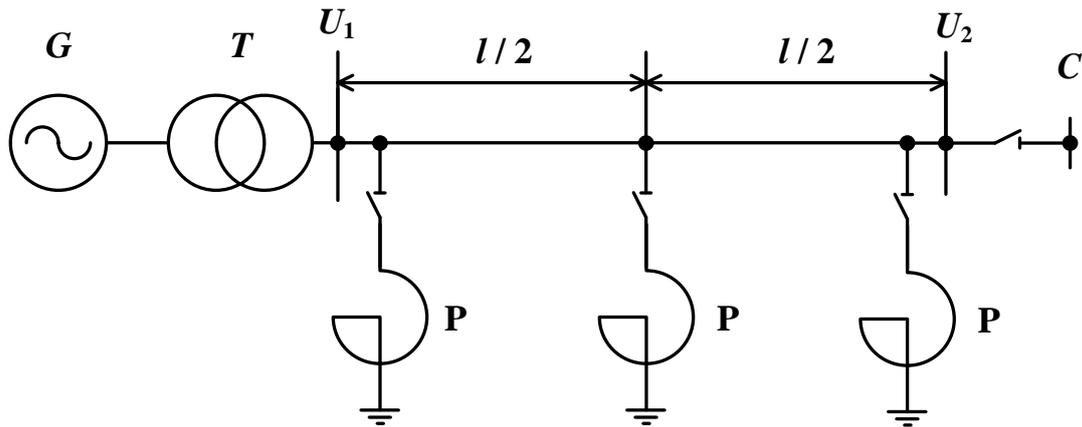


Рис. 6. Схема линии электропередачи к задаче №11

3. Подготовить отчет о выполнении практической работы в соответствии с указанными требованиями.

#### 4.4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет о выполнении работы должен содержать:

- наименование и цель работы;
- подробную последовательность расчетов по каждой задаче;
- ответ по каждой задаче.

#### 4.5. ФОРМЫ И СРОКИ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

Защиту отчета по практической работе принимает преподаватель, проводящий практические занятия, до семнадцатой контрольной недели. Защита проводится в форме собеседования по контрольным вопросам. Преподавателю предоставляется право задавать обучающимся дополнительные вопросы, а также, помимо теоретических вопросов, давать задачи и примеры, связанные с тематикой практической работы.

Практическая работа считается защищенной, если студент дал полные ответы на все заданные вопросы, не допустив при этом существенных неточностей, а отчет оформлен в соответствии с изложенными требованиями.

#### 4.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Особенности электропередачи при передаче по линии мощности меньше натуральной.
2. Чем опасен режим одностороннего включения протяженных линий сверхвысокого напряжения?
3. Какие меры могут быть приняты для исключения повышения напряжения на отключенном конце линии при плановом и внезапном отключении одного из выключателей?
4. Как сказывается наличие предвключенного индуктивного сопротивления на параметрах режима одностороннего включения линии?
5. Как сказывается включение реактора в начале или конце линии на значениях напряжения в конце линии и реактивной мощности в ее начале и на их распределении по линии?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### Основная литература

1. Бурман, А. П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем [Текст] : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки "Электроэнергетика", "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" / А. П. Бурман, Ю. К. Розанов, Ю. Г. Шакарян. – Москва : МЭИ, 2012. – 336 с.
2. Филиппова, Т. А. Энергетические режимы электрических станций и электроэнергетических систем : [учебник для вузов по профилю "Электроэнергетические системы и сети" направления подготовки 140400 – "Электроэнергетика и электротехника"] / Т. А. Филиппова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – 293 с. ил., табл. – Режим доступа:  
<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=212214&type=nstu:common>. – Загл. с экрана. (03.07.2017)

### Дополнительная литература

3. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии [Текст] : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 140400 "Электроэнергетика и электротехника" / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Москва : КноРус, 2014. – 648 с.

4. Веников, В. А. Режимы работы электрических систем и сетей [Электронный ресурс] / В. А. Веников, Л. А. Жуков, Г. Е. Поспелов. – Москва : Высшая школа, 1975. – 343 с. – Режим доступа: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=447957](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=447957). – Загл. с экрана. (03.07.2017)

5. Веников, В. А. Электрические системы. Т. 2. Электрические сети [Электронный ресурс] / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков, Л. А. Солдаткина. – Москва : Высшая школа, 1971. – 439 с. – Режим доступа: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=450000](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=450000). – Загл. с экрана. (03.07.2017)

6. Веников, В. А. Электрические системы. Т. 3. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения [Электронный ресурс] / В. А. Веников, В. В. Худяков, Н. Д. Анисимова. – Москва : Высшая школа, 1972. – 367 с. – Режим доступа: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=450003](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=450003). – Загл. с экрана. (03.07.2017)