

1. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНИЙ, ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

1.1. Воздушные и кабельные линии электропередачи

Линии электропередачи обладают распределенными по длине погонными (на единицу длины) параметрами. Для линий сравнительно небольшой длины (до 400 км) распределенность параметров можно не учитывать и использовать сосредоточенные параметры: активное и индуктивное сопротивления линии r_l и x_l , активную и емкостную проводимость линии g_l и b_l .

Целью расчета параметров схемы замещения линий электропередачи (ЛЭП) является определение продольных активного и индуктивного сопротивлений, а также поперечных активной и емкостной проводимостей на землю для каждой из трех фаз ЛЭП.

Применяемые конструктивные исполнения ЛЭП таковы, что можно полагать параметры схем замещения каждой фазы электропередачи одинаковыми, что позволяет выполнять графическое изображение схемы замещения только для одной фазы ЛЭП.

Для воздушных ЛЭП напряжением 110 кВ и выше длиной до 400 км используется П-образная схема замещения (рис. 1).

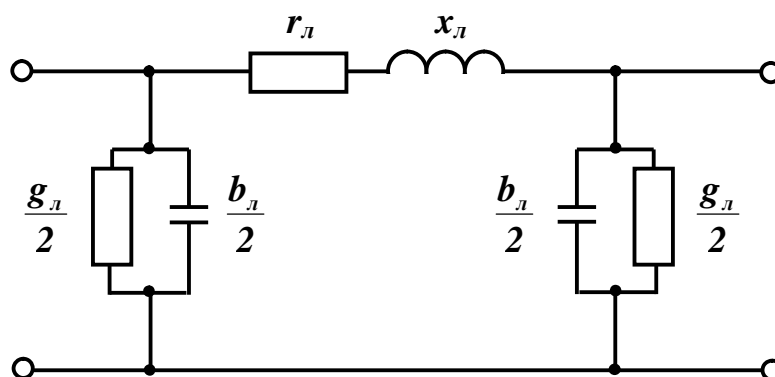


Рис. 1. П-образная схема замещения воздушной ЛЭП

Активное сопротивление линии определяется по формуле:

$$r_l = r_0 \cdot l, \text{ Ом}, \quad (1)$$

где r_l - погонное сопротивление, Ом/км, при температуре провода $+20^0$ С;

l - длина линии, км.

Активное сопротивление единицы длины провода (жилы кабеля) определяется материалом токоведущих проводников и площадью их сечения и при частоте переменного тока 50 Гц принимается равным омическому (явление поверхностного эффекта начинает сказываться при сечениях более 500 мм^2):

$$r_0 = \frac{r}{F}, \quad \text{Ом / км} \quad (2)$$

или

$$r_0 = \frac{1000}{g \times F}, \quad \text{Ом / км}, \quad (3)$$

где F - поперечное сечение провода или жилы кабеля, мм^2 ;

r - удельное сопротивление $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$;

g - удельная проводимость, $\text{м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$.

Для алюминия $r = 28,9 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$, $g = 34,6 \text{ м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$;

для меди $r = 18,8 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$, $g = 53,0 \text{ м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$;

для сталеалюминиевых проводов $r = 31,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$; $g = 31,7 \text{ м} / \text{Ом} \cdot \text{мм}^2$.

При температуре, отличной от 20^0 С, сопротивление линии уточняется по выражению:

$$r_{0,t} = r_0 \times [1 + a_T(t - 20)], \text{ Ом}, \quad (4)$$

где a_T - температурный коэффициент, $1/^\circ\text{C}$, равный **0,004** для сталеалюминиевых проводов;

$a_T = 0,0043 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ для медных проводов;

t - температура провода, $^\circ\text{C}$.

Активное сопротивление стальных проводов зависит от тока и находится по таблицам, в зависимости от поперечного сечения.

Индуктивное сопротивление фазы линии определяется следующим образом:

$$x_l = x_0 \times l, \text{ Ом}, \quad (5)$$

где x_0 - погонное индуктивное сопротивление, Ом / км.

Погонные индуктивные сопротивления фаз воздушной линии электропередачи в общем случае различны. Они зависят от взаимного расположения проводников и их геометрических размеров.

Переменный ток, проходя по линии, образует вокруг проводников переменное магнитное поле, которое наводит в проводнике ЭДС. Сопротивление току, вызываемое противодействием ЭДС самоиндукции, называется индуктивным сопротивлением.

В проводе одной из фаз трехфазной линии токи соседних проводов наводят ЭДС взаимной индукции, которая приводит к уменьшению индуктивного сопротивления. Поэтому чем дальше друг от друга расположены фазные провода, тем меньше будет влияние соседних проводов и, следовательно, больше поток рассеяния между проводами и индуктивное сопротивление.

При расчетах симметричных режимов погонное индуктивное сопротивление определяется зависимостью:

$$x_0 = 0,1445 \times \lg \frac{\mu D_{cp}}{R} + 0,0157 m, \text{ Ом / км}, \quad (6)$$

где D_{cp} - среднегеометрическое расстояние между фазными проводами, мм;

R - радиус провода, мм;

μ - относительная магнитная проницаемость материала провода.

Для алюминиевых, сталеалюминиевых и медных проводов принимается $\mu = 1$.

Значения индуктивных сопротивлений единицы длины проводов различного сечения варьируются в зависимости от среднегеометрического расстояния между фазами.

Среднегеометрическое расстояние между фазами определяется зависимостью:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{AB} \times D_{BC} \times D_{CA}}, \text{ м}, \quad (7)$$

где D_{AB} ; D_{BC} ; D_{CA} - расстояние между проводами соответствующих фаз, м.

Например, при расположении фаз по вершинам равностороннего треугольника со стороной D среднегеометрическое расстояние равно D , а при горизонтальном расположении проводов $D_{cp} = \sqrt[3]{2D}$ (см. рис. 2).

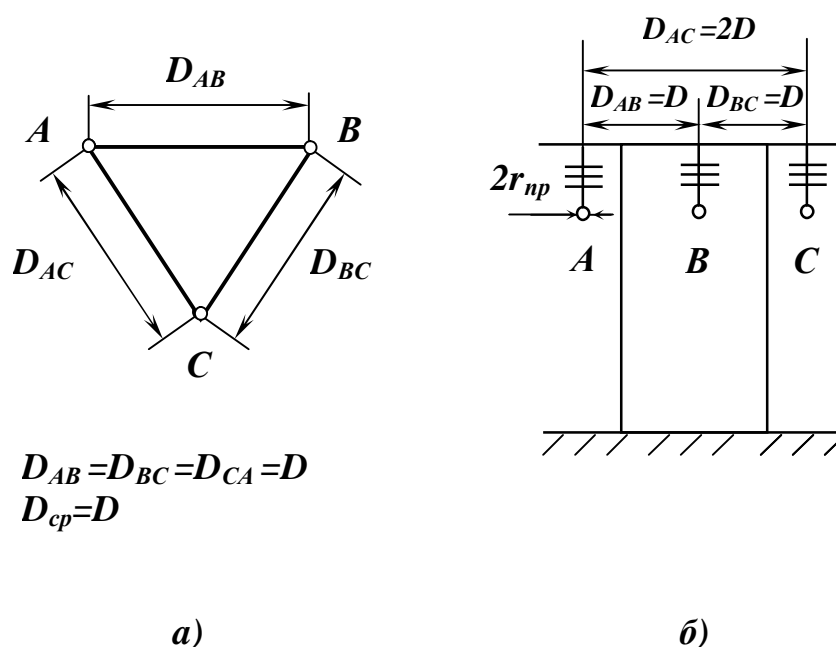


Рис. 2. Расположение проводов линии электропередачи:

- а) по вершинам равностороннего треугольника;
- б) при горизонтальном расположении фаз.

Расстояния между фазами определяются изоляционными промежутками в зависимости от класса напряжения (см. табл. 1).

Усредненные среднегеометрические расстояния между фазными проводами воздушных линий

Класс напряжения, кВ	35	110	150	220	330	500	750
Среднегеометрическое расстояние, м	3,5	5	6,5	8	11	14	19,5

При несимметричном расположении проводов ЭДС самоиндукции и взаимной индукции проводов отдельных фаз неодинаковы, что приводит к различию их сопротивлений. Для выравнивания сопротивлений отдельных фаз применяется способ взаимной перестановки мест проводов на опоре. Такая перестановка называется транспозицией.

Для уменьшения индуктивного сопротивления проводов, а также исключения явления “короны” при нормальных климатических условиях в линиях электропередачи напряжением выше 220 кВ применяют расщепление провода. Каждая фаза линии при этом содержит два и более провода, связанных дистанционными распорками длиной 30 - 60 см.

В формулу (6) в этом случае вводится не радиус провода R , а эквивалентный радиус провода, $R_{эк}$. При количестве проводов в расщеплении n он определяется по формуле:

$$R_{эк} = \sqrt[n]{R \times a^{n-1}}, \quad (8)$$

где n - число проводов в фазе;

a - расстояние между осями проводов в расщепленной фазе, мм.

Например, при расщеплении провода на 4:

$$R_{эк} = \sqrt[4]{R \times a^3}. \quad (9)$$

Погонное индуктивное сопротивление, Ом/км, при расщеплении провода в фазе определяется по формуле:

$$x_0 = 0,1445 \lg \frac{\frac{\pi D_{cp}}{R_{эк}} \frac{\pi}{\theta}}{\frac{\pi}{\theta}} + \frac{0,0157}{n}. \quad (10)$$

Для стальных проводов погонное индуктивное сопротивление, Ом/км, определяется в условиях, когда μ (см. выражение (6)) не равно единице. Первая составляющая, которую называют внешним индуктивным сопротивлением $x_0 \zeta$ равна

$$x_0 \zeta = 0,1445 \times l g \zeta \frac{\pi D_{cp} \ddot{o}}{R \frac{\ddot{o}}{\theta}} \quad (11)$$

Вторая составляющая, называемая внутренним сопротивлением, зависит от тока, протекающего по проводу, и равна

$$x_0 \alpha = 0,0157 \times m \quad (12)$$

Индуктивное сопротивление стальных проводов:

$$x_0 = x_0 \zeta + x_0 \alpha \quad (13)$$

Для кабельных линий погонное индуктивное сопротивление x_0 определяют из таблиц физико-химических данных.

В приближенных расчетах можно пользоваться средними значениями погонных индуктивностей, которые равны:

- для воздушных ЛЭП напряжением до 330 кВ $x_{0cp} = 0,4 \text{ Ом / км}$;
- напряжением до 1150 кВ $x_{0cp} = 0,3 \text{ Ом / км}$;
- для кабельных ЛЭП с бумажной изоляцией $x_{0cp} = 0,08 \text{ Ом / км}$.

Активная проводимость линии электропередачи g_0 определяется потерями активной мощности на “корону” и в незначительной степени активной проводимостью изоляции. Для кабелей активная проводимость определяется только потерями в диэлектрике изоляции от тока утечки через диэлектрик, т.к. “корона” отсутствует.

Коронирование проводов возникает при интенсивной ионизации окружающего провод воздуха. Особенно интенсивно коронируют провода в сырую погоду. “Корона” (фиолетовое свечение на поверхности провода и потрескивание электрических разрядов) возникает, когда на поверхности провода напряженность электрического поля (его градиент) превышает электрическую прочность воздуха, т.е.:

$$E_{нов} \approx E_{кор},$$

где $E_{кор} = 30 \dots 32 \text{ кВ/см}$.

Наиболее радикальным средством снижения потерь мощности на “корону” является увеличение диаметра (сечения) провода, т.к.:

$$E_{нов} = \frac{U}{F}. \quad (14)$$

Расчет погонной активной проводимости для воздушных линий производится по формуле:

$$g_0 = \frac{\alpha DP_0}{U_\phi^2} \times 10^{-3}, \text{ См/км}, \quad (15)$$

где DP_0 - потери активной мощности на “корону” на 1 км, кВт;

U_ϕ - напряжение фазы, кВ.

Потери на “корону” имеют место в том случае, когда рабочее напряжение линии превышает максимальное напряжение, при котором зажигается “корона”. Его называют критическим напряжением “короны” $U_{кф}$.

Для проводов, расположенных по вершинам треугольника:

$$U_{кф} = 48,9 \times m_0 \times m_n \times d \times R \times \lg \frac{\alpha D_{cp}}{R}, \text{ кВ}, \quad (16)$$

где m_0 - коэффициент, учитывающий состояние поверхности провода (для однопроволочных проводов $m_0 = 0,93 \dots 0,97$, для многопроволочных $m_0 = 0,83 \dots 0,87$);

m_n - коэффициент, учитывающий состояние погоды (при сухой погоде $m_n = 1$, при дожде, тумане или гололеде $m_n = 0,8$);

R - радиус провода или эквивалентный радиус провода (при расщеплении фазы), см;

d - коэффициент, учитывающий уровень барометрического давления и температуру окружающей среды.

Коэффициент d определяется выражением:

$$d = \frac{3,92 \times b}{273 + t}, \quad (17)$$

где b - атмосферное давление в см рт. ст.;

t - температура окружающей среды, °С.

При $b = 76 \text{ см рт. ст.}$ и $t = 25^\circ \text{ С}$ коэффициент d равен 1.

Для проводов, расположенных горизонтально:

$$U_{\text{кф}} = 0,96U_{\text{кф}} - \text{для среднего провода};$$

$$U_{\text{кф}} = 1,06U_{\text{кф}} - \text{для крайнего провода.}$$

Потери мощности на “корону” определяются из выражения:

$$DP_0 = \frac{0,18}{d} \times \sqrt{\frac{R}{D_{\text{ср}}}} \times (U_{\text{ф}} - U_{\text{кф}})^2, \text{ кВт/км.} \quad (18)$$

Для исключения условий возникновения “короны” определены минимальные сечения и диаметры проводов для различных номинальных напряжений (см. табл. 2).

Таблица 2

Минимальные сечения и диаметры сталеалюминиевых проводов по условиям “короны”

Номинальное напряжение, кВ	Количество проводов в фазе	Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм ²
110	1	11,3	70
150	1	15,2	120
220	1	21,6	240
330	2	23,5*	300
500	3	25,2*	300
750	4	29*	400

* При расстоянии между проводами в фазе 400 - 600 мм.

Активная проводимость кабельной линии рассчитывается по формуле:

$$g_0 = \frac{\pi DP_0'}{\epsilon U_\phi^2} \times 10^{-3}, \text{ См/км}, \quad (19)$$

где $DR_0\zeta$ - потери активной мощности в изоляции, отнесенные к одной фазе и определяемые зависимостью

$$DR_0\zeta = U_\phi^2 \times w \times C_0 \times \text{tg}d, \quad (20)$$

здесь C_0 - удельная рабочая емкость кабеля, Ф/км;

$\text{tg}d$ - тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции при фазном напряжении.

Активная проводимость линии равна:

$$g_l = g_0 \times l. \quad (21)$$

Погонная емкостная проводимость b_0 , См/км, как воздушных линий, так и кабельных, обусловлена наличием емкостей между проводом и землей, а также между фазными проводами. Она рассчитывается по формуле:

$$b_0 = \frac{\pi \cdot 7,58}{\epsilon \cdot \lg \frac{D_{cp}}{R}} \times 10^{-6}. \quad (22)$$

Благодаря наличию емкостей линия становится источником реактивной мощности. Реактивная мощность, генерируемая линией (зарядная мощность), определяется зависимостью:

$$Q_c = \frac{1}{2} \times U^2 b_0 \times l, \text{ квар}, \quad (23)$$

где l - длина линии.

Комплекс полного сопротивления единицы длины линии содержит действительную часть в виде погонного активного сопротивления и мнимую - в виде погонного индуктивного сопротивления

$$\underline{z}_0 = r_0 + jx_0, \quad (24)$$

следовательно модуль полного сопротивления определяется как:

$$z_0 = \sqrt{r_0^2 + x_0^2}. \quad (25)$$

Комплекс полной поперечной проводимости единицы длины линии записывается следующим образом:

$$\underline{y}_0 = g_0 - jb_0, \quad (26)$$

а ее модуль

$$y_0 = \sqrt{g_0^2 + b_0^2}. \quad (27)$$

Для определения каждого сопротивления и проводимости в схеме замещения линии необходимо значение величин сопротивлений, отнесенных к единице длины линии, умножить на длину линии l , км.

При расчете установившихся режимов сетей до 220 кВ включительно активная проводимость практически не учитывается (см. рис. 3а). Для большинства расчетов в сетях 110 - 220 кВ линия электропередачи обычно представляется более простой схемой замещения, в которой активная проводимость не учитывается, а вместо емкостной проводимости учитывается реактивная мощность, генерируемая емкостью линий (см. рис. 3б).

В сетях с $U_{ном} \approx 330 \text{ кВ}$ при определении потерь мощности и при расчете оптимальных режимов необходимо учитывать потери на “корону”, т.е. ее активную проводимость.

Для воздушных линий $U_{ном} \leq 35 \text{ кВ}$ в схеме замещения присутствуют только активные и индуктивные сопротивления (см. рис. 3в).

Для двухцепных ЛЭП схема замещения такая же, как и для одноцепных, но сопротивления линии вдвое меньше, а проводимости вдвое больше.

Кабельные линии электропередачи представляют такой же П-образной схемой замещения, как и воздушные линии (рис. 1).

При расчетах режимов для кабельных сетей с $U_{ном} \leq 10 \text{ кВ}$ можно учитывать только активное сопротивление (см. рис. 3г). В схемах замещения кабельных линий высокого напряжения необходимо учитывать Q_c , и при напряжении $\geq 220 \text{ кВ}$ - активную проводимость g_l .

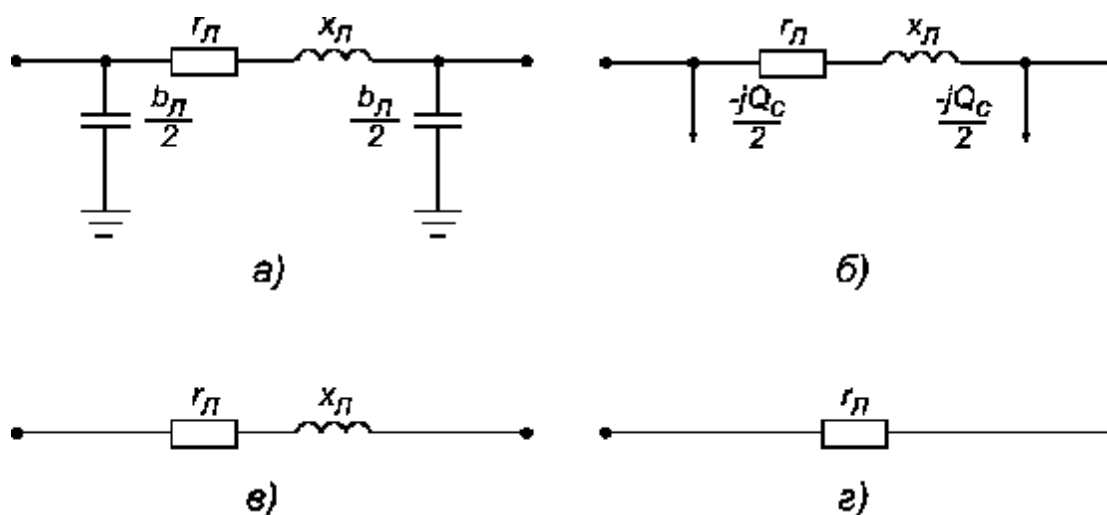


Рис. 3. Схемы замещения линий электропередачи:

- а), б) воздушная линия 110-220 кВ с емкостной проводимостью и с реактивной мощностью, генерируемой емкостью линии;***
- в) воздушная или кабельная линия напряжением $\leq 35 \text{ кВ}$;***
- г) кабельная линия напряжением $\leq 10 \text{ кВ}$.***

Примеры решения задач

Пример 1.1.

Линия электропередачи 110 кВ выполнена проводом АС-70/11 и имеет длину 40 км. Провода расположены в горизонтальной плоскости, расстояние между ними 4 м. В линии осуществлена транспозиция проводов. Определить параметры схемы замещения и реактивную мощность, генерируемую линией.

Решение.

Задача может быть решена двумя путями:

- а) решение с использованием справочных данных;
- б) аналитическое решение на основе расчетных формул.

Первый метод. Используя таблицы /4/, определяем активное сопротивление 1 км линии $r_0 = 0,428 \text{ Ом/км}$, индуктивное сопротивление $x_0 = 0,444 \text{ Ом/км}$ и емкостную проводимость $b_0 = 2,55 \times 10^{-6} \text{ См/км}$.

Активное сопротивление в схеме замещения определяется так:

$$r = r_0 \times l = 0,428 \times 40 = 17,12 \text{ Ом};$$

индуктивное: $x = x_0 \times l = 0,444 \times 40 = 17,76 \text{ Ом};$

емкостная проводимость:

$$B = b_0 \times l = 2,55 \times 10^{-6} \times 40 = 1,02 \times 10^{-4} \text{ См}.$$

Т. к. сечение провода 70 мм^2 , т.е. равно минимальному по условию исключения “короны”, то активная проводимость в схеме замещения не учитывается.

Второй метод. Сечение алюминиевой части провода АС-70/11 равно 68 мм^2 согласно /4/. Активное сопротивление единицы длины линии (2):

$$r_0 = r / F = 28,9 / 68 = 0,425 \text{ Ом/км}.$$

Активное сопротивление линии: $r = r_0 \times l = 0,425 \times 40 = 17 \text{ Ом}.$

Для расчета погонного индуктивного сопротивления определим среднегеометрическое расстояние между фазами:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{AB} \times D_{BC} \times D_{CA}} = \sqrt[3]{4 \times 4 \times 8 \times 10^6} = 504 \text{ см}$$

и по справочным данным /4/ найдем радиус провода $R = 5,7 \text{ см}$.

Тогда погонное индуктивное сопротивление (6):

$$x_0 = 0,1445 \lg \frac{D_{cp}}{R} + 0,0157 \text{ м} = 0,1445 \times \lg \frac{504}{0,57} + 0,0157 = 0,44 \text{ Ом / км.}$$

Индуктивное сопротивление линии: $x = x_0 \times l = 0,44 \times 40 = 17,6 \text{ Ом}$.

$$\text{Емкостная проводимость (22): } b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{504}{0,57}} \times 10^{-6} = 2,57 \times 10^{-6} \text{ См / км.}$$

$$\frac{B}{2} = \frac{b_0 l}{2} = \frac{2,57 \times 10^{-6} \times 40}{2} = 0,51 \times 10^{-4} \text{ См.}$$

Активная проводимость вводится в схему замещения, если есть потери на “корону”. Потери на “корону” имеют место в том случае, когда критическое напряжение “короны” превышает рабочее напряжение линии. При сухой погоде $m_n=1$, $d=1$, при плохой погоде $d=0,9$, $m_n=0,8$. Согласно формуле (16) критическое напряжение “короны” определяется так:

$$U_{кф} = 48,9 m_0 m_n d R \lg \frac{D_{cp}}{R} = 48,9 \times 0,85 \times 1 \times 1 \times 0,57 \times \lg \frac{5,04}{0,0057} = 69,8 \text{ кВ}$$

и для среднего провода равно $U_{кф}^c = 0,96 U_{кф} = 67 \text{ кВ}$.

$$\text{Фазное напряжение линии равно } U_\phi = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,5 \text{ кВ.}$$

Т.к. фазное напряжение линии меньше критического, то на всем протяжении линии "короны" не будет. Можно и по табл. 2. без расчета определить, что для провода марки АС - 70 /11 учитывать потери на “корону” при напряжении 110 кВ не нужно.

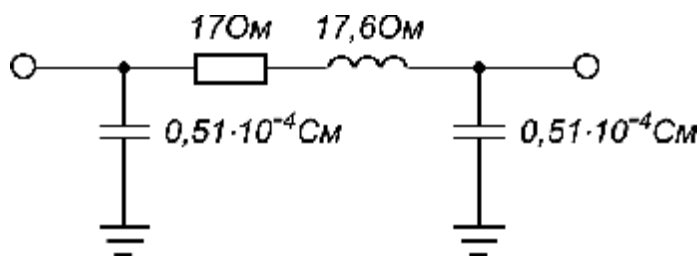


Рис. 4. Схема замещения линии

Пример 1.2.

Электроэнергия при напряжении 6 кВ передается от подстанции завода в цех по кабелю с алюминиевыми жилами сечением $F = 10 \text{ мм}^2$ длиной $l = 6 \text{ км}$. Определить, в каком соотношении находятся индуктивные и активные сопротивления, зарядная и полная мощность линии, если допустимый по нагреву ток кабеля равен $I_{\text{доп}} = 80 \text{ А}$.

Решение

Активное сопротивление кабельной линии по выражению (2):

$$R = \frac{r}{F} l = \frac{28,9}{10} \times 6 = 17,2 \text{ Ом.}$$

Погонное индуктивное сопротивление трехжильного кабеля с бумажной изоляцией сечением 10 мм^2 равно $x_0 = 0,11 \text{ Ом/км}$ /4/. Тогда индуктивное сопротивление линии согласно справочным данным:

$$X = x_0 \times l = 0,11 \times 6 = 0,66 \text{ Ом.}$$

Соотношение индуктивного и активного сопротивлений равно:

$$\frac{X}{R} = \frac{0,66}{17,2} \times 100\% = 3,85\%.$$

Зарядная мощность кабельных линий при погонной емкостной проводимости, равной согласно /4/ $g_0 = 0,6 \times 10^{-4} \text{ См/км}$, составляет:

$$Q_c = U^2 \times g_0 \times l = 6^2 \times 0,6 \times 10^{-4} \times 6 = 13 \text{ квар.}$$

Предельная мощность, которая может быть передана по этой линии, равна: $S_{\text{пред}} = \sqrt{3} \times U_{\text{ном}} \times I_{\text{доп}} = \sqrt{3} \times 6 \times 80 = 831 \text{ кВА}$.

Соотношение зарядной и полной мощности равно:

$$\frac{Q_c}{S_{\text{пред}}} = \frac{13}{831} \times 100\% = 1,56\%.$$

Поскольку точность инженерных расчетов лежит в пределах 5 %, то, как видно из расчетов, индуктивное сопротивление и емкостную проводимость в кабельных линиях напряжением 6 - 10 кВ можно не учитывать.

Задачи для самостоятельного решения

№1

Линия 110 кВ выполнена проводом АС-70 /11. Расположение проводов на опоре горизонтальное. Расстояние между фазами 4 м. Длина линии 70 км. Определить, во сколько раз изменятся параметры схемы замещения линии при замене провода марки АС-70 /11 на АС-150 /24.

№2

ЛЭП выполнена проводом марки АСК-95 /16. Полное ее сопротивление равно 14 Ом. Среднегеометрическое расстояние между проводами фаз составляет 4,5 м. Определить длину линии. Параметры схемы замещения найти по справочным данным и рассчитать аналитически. Напряжение линии 110 кВ.

№3

Линия 110 кВ протяженностью 90 км выполнена проводом АС-95/16. Расстояние между фазами 4 м. Изменятся ли параметры схемы замещения, если горизонтальную подвеску проводов на опоре заменить на подвеску по вершинам равностороннего треугольника? Рассчитать параметры схемы замещения аналитически и сравнить со справочными данными.

№4

Одноцепная ЛЭП - 110 кВ протяженностью 60 км выполнена на металлических двухцепных опорах проводом марки АС-150 /24. Компоновка проводов на опоре - по вершинам равностороннего треугольника. Как изменятся параметры схемы замещения ЛЭП - 110 кВ, если будет подведена вторая цепь, аналогичная первой? Рассчитать параметры схемы замещения в обоих случаях. Расстояние между фазами - 5 м.

№5

Как изменится схема замещения линии и ее параметры, если первоначально была ЛЭП - 110 кВ, выполненная на металлических опорах с горизонтальной подвеской проводов, длиной 115 км, а затем ее изменили на ЛЭП -220 кВ с аналогичной подвеской проводов? Марка провода в обоих случаях - АСКП-240 /39. Расстояние между фазами при напряжении 110 кВ - 4 м, напряжении 220 кВ - 7 м.

№6

ЛЭП - 330 кВ выполнена проводом марки АС-400 /64 и имеет протяженность 180 км. Изменяются ли параметры схемы ее замещения, если каждую фазу выполнить двумя проводами марки АС-240 /39? Расстояние между проводами при расщеплении - 400 мм. Расстояние между фазами - 8 м.

№7

ЛЭП - 330 кВ выполнена проводами марки АСК-300 /48 с расщеплением фазы на два провода. Расстояние между проводами в расщеплении 400 мм, а длина линии - 340 км. Определить параметры схемы замещения. Расстояние между фазами - 8 м.

№8

ЛЭП - 500 кВ выполнена проводом марки АСК-400 /64 с расщеплением проводов в фазе на три. Расстояние между проводами в расщеплении - 600 мм. Длина линии 400 км. Составить схему замещения таким образом, чтобы можно было определить параметры режима ее работы в начале, конце и середине линии. Определить параметры схемы замещения с учетом “короны”. Подвеска проводов - горизонтальная. Расстояние между фазами-11 м.

№9

Как изменится схема замещения линии и параметры участка линии, если ЛЭП - 35 кВ заменить на ЛЭП - 110 кВ? Марка проводов в обоих случаях остается неизменной – АСК - 120 /19. Расстояние между фазами в ЛЭП - 35 кВ составляет 3,2 м, а у ЛЭП - 110 кВ – 4,5 м. Подвеска проводов на опоре - треугольником.

№10

Две линии 10 кВ связывают потребителя с источником. Длина линии равна 15 км. Одна из них выполнена проводом АС-50 /8, расстояние между фазами составляет 1,5 м, а расположение проводов на опоре - по вершинам равностороннего треугольника. Вторая линия выполнена кабелем с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией сечением 50 мм². Составить схемы замещения линий и рассчитать их параметры. Произвести анализ полученных результатов.

№11

ВЛ - 10 кВ, длина которой 10 км, выполнена проводом АС-35/6,2. Среднегеометрическое расстояние между фазами составляет 1,4 м. Как изменятся параметры схемы замещения линии, если провод марки АС-35/6,2 заменить на провод марки ПМС-35?

№12

Рассчитать параметры схемы замещения ВЛ - 10 кВ, выполненной проводом ПМС-35. Расстояние между фазами 1,5 м, провода расположены по вершинам равностороннего треугольника. Ток равен 30 А. Изменятся ли параметры схемы замещения, если ток станет равен 70 А?

№13

Промышленное предприятие получает питание от районной подстанции по воздушной и кабельной линиям 10 кВ. Длина обеих линий одинакова и составляет 10 км. ВЛ выполнена проводом АС-70 / 11 со среднегеометрическим расстоянием между проводами 1,2 м. Кабельная линия выполнена кабелем марки ААШВ-70. Определить параметры схемы замещения. Что произойдет с ними, если напряжение изменится и будет равным 35 кВ?

№14

Предприятие связано с источником электроэнергии воздушной линией 35 кВ, выполненной проводом марки АС-120/19, протяженностью 20 км. Во сколько раз изменится полное сопротивление линии, если ее заменить кабелем ОАБ с сечением жил 120 мм^2 ? Рассчитать аналитически параметры схемы замещения воздушной линии при расстоянии между фазами, равном 3,2 м.

№15

Воздушная двухцепная линия длиной 100 км питает районную электрическую сеть 220 кВ. Линия выполнена проводом марки АС - 400/51. Составить схему замещения линии и найти параметры схемы замещения. Как изменится схема замещения и ее параметры, если линию выполнить одноцепной? Расстояние между фазами - 7 м.

№16

Воздушная линия электропередачи напряжением 500 кВ длиной 220 км связывает две электростанции. Составить для нее схему замещения и определить ее параметры, если линия выполнена проводом АСК-500 /64, число проводов в фазе - три. Расстояние между проводами в расщеплении 500 мм. Расстояние между фазами - 11 м. Подвеска проводов горизонтальная.

1.2. Трансформаторы и автотрансформаторы

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы являются основным электрическим оборудованием, обеспечивающим передачу электрической энергии от электростанций к потребителям и ее распределение.

С помощью трансформаторов и автотрансформаторов осуществляется повышение напряжения до значений 35; 110; 220; 330; 500; 750 кВ, необходимых для линий электропередачи, а также многократное ступенчатое понижение напряжения до значений, при которых работают электроприемники: 20; 10; 6; 0,66; 0,38; 0,22 кВ.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы, однофазные и трехфазные, выпускаются номинальной мощностью, кратной 10, 16, 25, 40, 63 кВА. Трансформаторы могут быть двух- и трехобмоточные, а также с расщепленной обмоткой низкого напряжения.

Параметры схемы замещения силовых трансформаторов и автотрансформаторов определяются на основе каталожных данных. Для двухобмоточных трансформаторов используются следующие каталожные данные:

номинальная мощность трансформатора, $S_{т ном}$;

напряжение обмотки высокого напряжения, $U_{вн}$;

напряжение обмотки низкого напряжения, $U_{нн}$;

потери активной мощности в режиме короткого замыкания, DP_K ;

напряжение короткого замыкания, u_K ;

потери активной мощности в режиме холостого хода, DP_x ;

ток холостого хода, I_x .

Номинальной называют мощность трансформатора, которой он может быть нагружен при номинальных температурных условиях охлаждающей среды.

Номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток - это напряжения между выводами обмоток при холостом ходе трансформатора.

В режиме короткого замыкания (КЗ) одна из обмоток трансформатора замыкается накоротко, а по другой протекает ток, равный номинальному, при некотором приложенном напряжении u_k , которое и называется напряжением короткого замыкания. Оно меньше номинального и выражается в процентах от него отношением:

$$u_{k,\%} = \frac{u_k}{U_{\text{вн}}} 100\%. \quad (28)$$

Мощность, потребляемая трансформатором в режиме короткого замыкания, практически целиком расходуется на нагрев его обмоток, а потери в стали ничтожны из-за малого значения приложенного напряжения u_k , т.к. потери в стали пропорциональны квадрату приложенного напряжения. Поэтому приближенно считают, что все потери мощности в опыте КЗ DP_k идут на нагрев обмоток трансформатора, т.е.:

$$DP_k = 3I_{\text{ном}}^2 \times R_m = \frac{S_{\text{т ном}}^2}{U_{\text{вн}}^2 \times R_m}, \quad (29)$$

где R_m - активное сопротивление трансформатора.

В режиме холостого хода первичная обмотка включается на номинальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Потребляемый из сети ток называется током холостого хода. Он выражается в процентах от номинального тока первичной обмотки, $I_{\text{в ном}}$:

$$I_{x,\%} = \frac{I_x}{I_{\text{в ном}}} 100\%. \quad (30)$$

Мощность потерь в режиме холостого хода складывается из мощности потерь в магнитопроводе на вихревые токи и гистерезис, DP_x ; мощности, идущей на намагничивание стали, DQ_x ; мощности потерь в первичной обмотке, обусловленных током холостого хода. Но при холостом ходе $I_x \ll I_{\text{в ном}}$, - следовательно, мала мощность потерь в первичной обмотке по сравнению с потерями в магнитопроводе. Поэтому для трансформаторов с номинальной мощностью более 1 кВА учитываются только потери в стали:

