

# Глава 4

## Схемы замещения элементов систем передачи электрической энергии

1. Общие сведения
2. Схемы замещения воздушных линий
3. Параметры схемы замещения воздушной линии с расщепленными фазами
4. Схема замещения кабельных линий
5. Схемы замещения ЛЭП и области их применения
6. Особенности схем замещения силовых трансформаторов  
электроэнергетических систем

# §1 Общие сведения

## □ Электрические сети переменного тока:

- трехфазные;
- симметричные, т.е. при необходимости - транспонированные;
- при симметричных и синусоидальных токах и напряжениях;
- длиной до 400 км и напряжением до 500 кВ включительно.

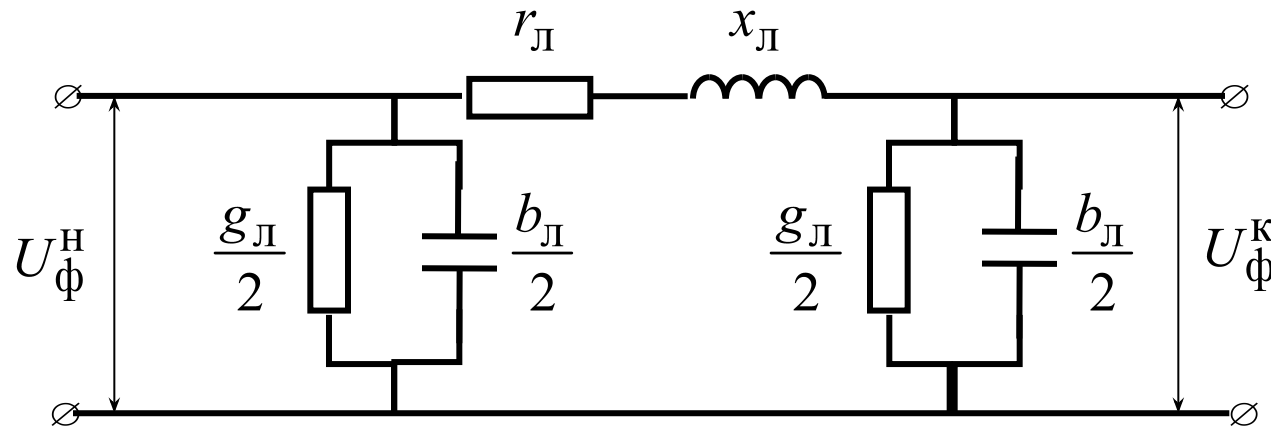
## □ Сосредоточенные параметры СЗ ЛЭП определяются ее длиной и удельными значениями сопротивлений и проводимостей.

### Параметры СЗ зависят от:

- номинального напряжения;
- конструктивного выполнения (воздушные или кабельные линии);
- числа цепей;
- взаимного расположения фаз и цепей;
- материала токоведущих элементов и изоляции.

## §2 Схемы замещения воздушных линий

Воздушные линии электропередачи напряжением 110 - 500кВ, длиной до 300- 400 км обычно представляются П-образной схемой замещения



□ В СЗ различают продольные и поперечные ветви:

- **продольные** – по которым проходит ток нагрузки и величиной которого определяются потери мощности в этих ветвях.
- **поперечные** – включены на фазное напряжение и соединены с нейтралью схемы. Потери мощности в этих ветвях определяются приложенным напряжением.

## Параметры П-образной схемы замещения:

1.  $r_{\text{Л}}$  - активное сопротивление линии:

$$r_{\text{Л}} = \frac{\rho}{F} l_{\text{Л}} = \frac{1}{\gamma F} l_{\text{Л}} = r_0 l$$

$$r_0 = r_{0_{20}} (1 + \alpha(t - 20)),$$

где  $\alpha = \alpha_{\text{Cu}} = \alpha_{\text{Al}} = 0,004 \frac{1}{0^{\circ}\text{C}}$  - температурный коэффициент сопротивления материала провода.

2.  $x_L$  - индуктивное сопротивление линии:

$$x_L = x_0 l_L$$
$$x_0 = 0,144 \lg \left( \frac{2D_{\text{ср}}}{d_{\text{пр}}} \right) + 12500\mu = 0,144 \lg \left( \frac{2D_{\text{ср}}}{d_{\text{пр}}} \right) + 0,0157 = x_0' + x_0'',$$

где  $D_{\text{ср}}$  - среднегеометрическое расстояние между фазами;

$d_{\text{пр}}$  - диаметр провода;

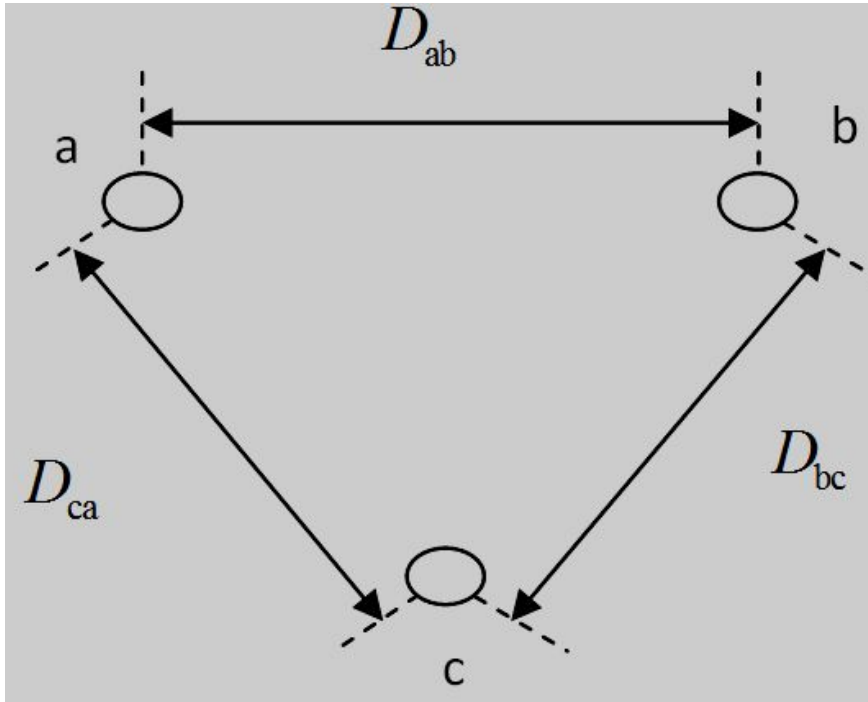
$\mu$  - магнитная проницаемость материала провода:

$$\mu_{\text{Al}} = \mu_{\text{Cu}} = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}};$$

$x_0'$  индуктивное сопротивление обусловленное внешним потоком образованным вокруг провода;

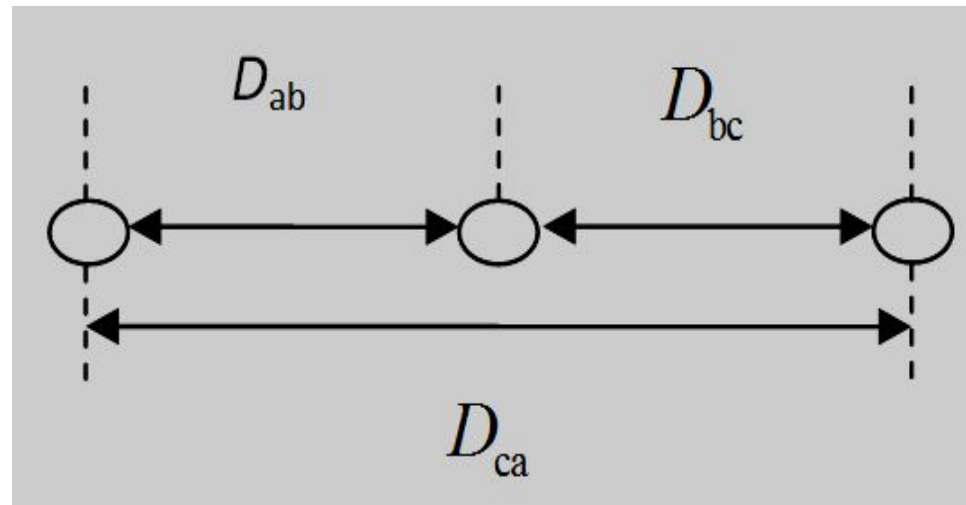
$x_0''$  - индуктивное сопротивление обусловленное потоком внутри провода.

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



$$D_{cp} = D$$

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



□ Для проводов из цветных металлов  $x'_0 \gg x''_0$

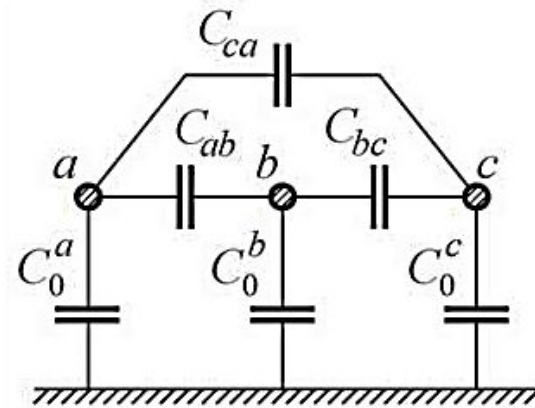
Для стальных проводов  $x'_0 \ll x''_0$

3.  $g_{\text{Л}}$  - активная проводимость:

$$g_{\text{Л}} = g_0 l_{\text{Л}}$$
$$g_0 = \frac{\Delta P_{\text{кор}}}{U_{\text{Н}}^2}$$

4.  $b_{\text{Л}}$  - ёмкостная проводимость:

$$b_{\text{Л}} = b_0 l_{\text{Л}}$$

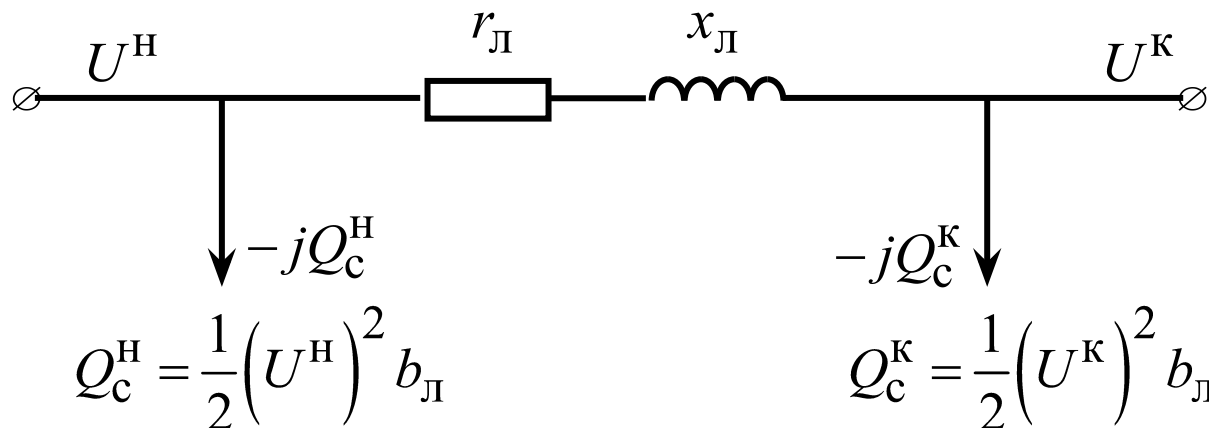


В практических расчётах рабочую ёмкость трёхфазной ВЛ с одним проводом в фазе на единицу длины (Ф/км) определяют по формуле

$$C_0 = \frac{0,024}{\lg \frac{2D_{\text{ср}}}{d_{\text{пр}}}} \quad b_0 = \omega C_0 \quad b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \left( \frac{2D_{\text{ср}}}{d_{\text{пр}}} \right)}$$

$$I_{c\phi} = U b = \frac{U b_0}{\sqrt{3}} \quad Q_{c\phi} = 3U I_{c\phi} = 3U^2 b = U^2 b$$

$$Q_c = \frac{1}{2} (U^H)^2 b_0 l + \frac{1}{2} (U^K)^2 b_0 l$$



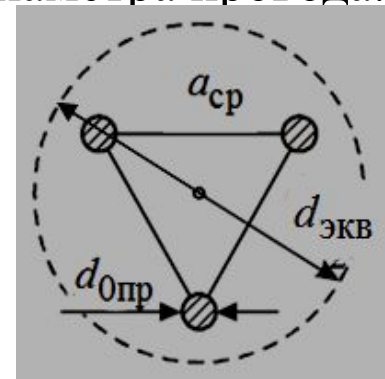


## §3 Параметры схемы замещения воздушной линии с расщепленными фазами

При  $U_H \geq 330$  кВ провод каждой фазы расщепляется на несколько  $n_\phi$  проводов, что соответствует увеличению эквивалентного диаметра провода.

Тогда:

$$d_{\text{ЭКВ}} = 2^{n_\phi} \sqrt{\frac{d_{\text{фр}}}{2}} a_{\text{ср}}^{n_\phi - 1},$$

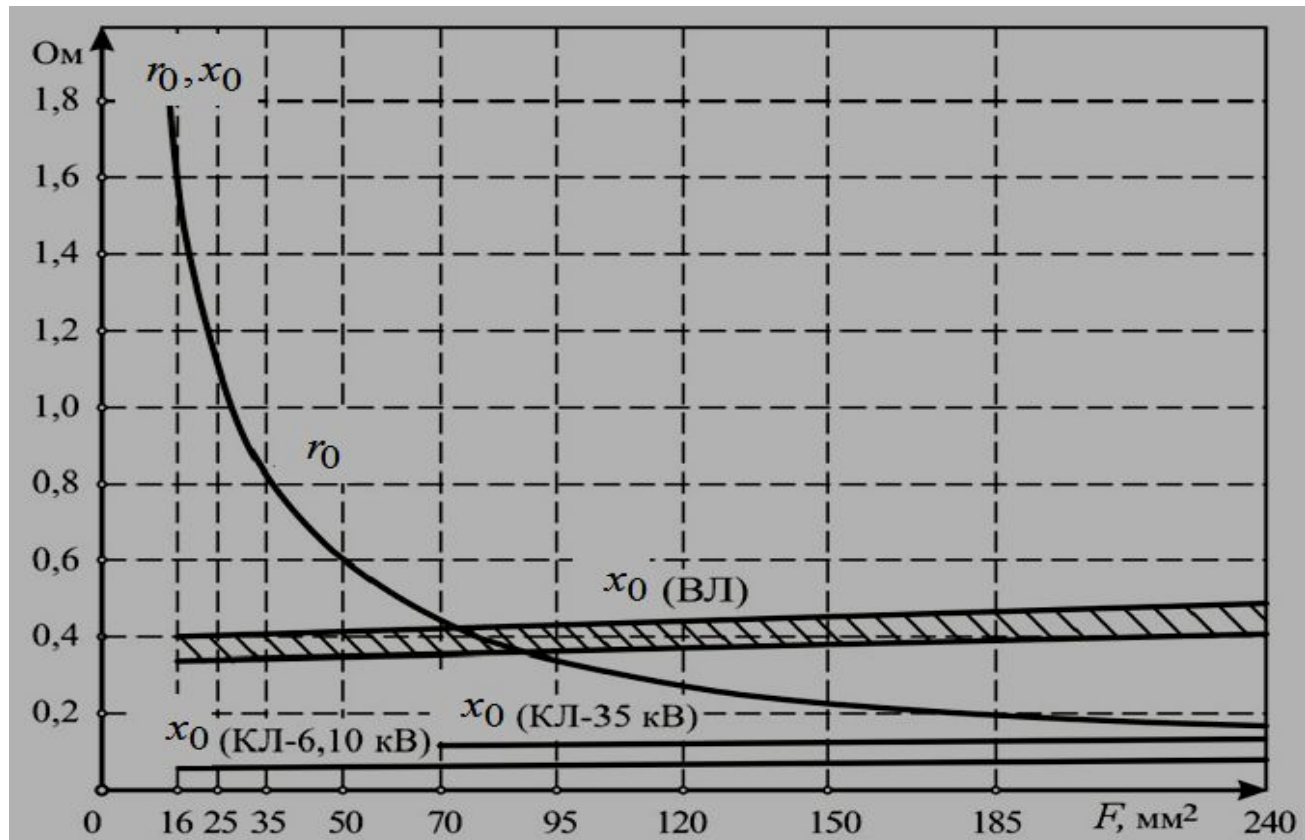


$$x_0 = 0,144 \lg \left( \frac{2D_{\text{ср}}}{d_{\text{ЭКВ}}} \right) + \frac{0,0157}{n_\phi} \quad b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \left( \frac{2D_{\text{ср}}}{d_{\text{ЭКВ}}} \right)} \quad r_0 = \frac{r_{\text{фр}}}{n_\phi}$$

$n_\phi = 1$	$x_0$
$n_\phi = 2$	$0,81x_0$
$n_\phi = 3$	$0,72x_0$
$n_\phi = 4$	$0,68x_0$

## §4 Схемы замещения кабельных линий

- Кабельные линии электропередачи представляют такой же П-образной схемой замещения, что и воздушные линии.
- Удельные активные и реактивные сопротивления  $r_0$   $x_0$  определены в справочной литературе или находят по тем же формулам, что и для воздушных линий.
- Очевидно, что  $x_0$  уменьшается, а  $b_0$  растет при сближении фазных проводов.



□ Емкостный ток и зарядная мощность в кабельных линиях больше, чем в воздушных.

□ Величины удельной активной проводимости для кабельных линий обусловлены процессами, происходящими в изоляции.

$$I_y = \frac{U b_{\text{л}} \operatorname{tg} \delta}{\sqrt{3}} = \frac{U g_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \quad \Delta P_{\text{из}} = U^2 b_{\text{л}} \operatorname{tg} \delta = U^2 g_{\text{л}}$$

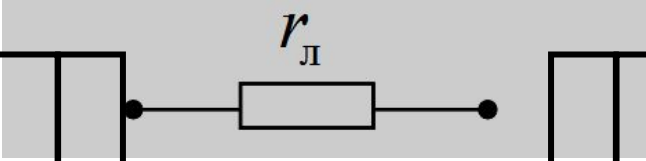
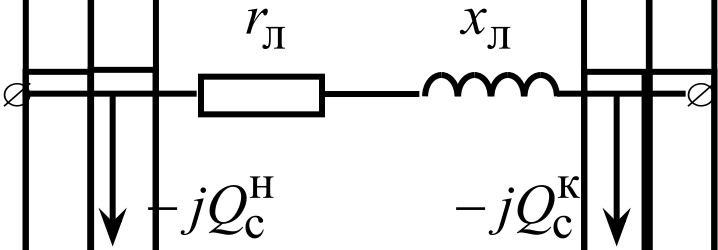
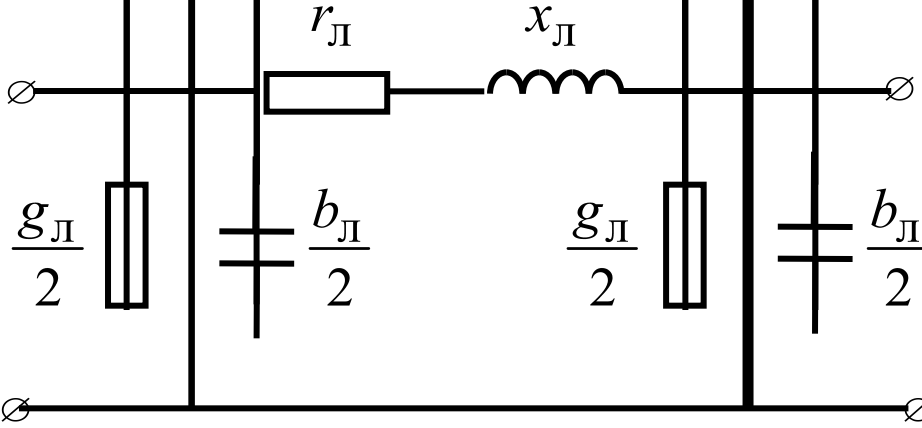
□ Удельные параметры схемы замещения кабеля  $\kappa_0$ ,  $\sigma_0$  также  $Q_{\text{с}0}$  приведенные в справочных таблицах, ориентировочны, более точно их можно определить по заводским характеристикам кабеля.

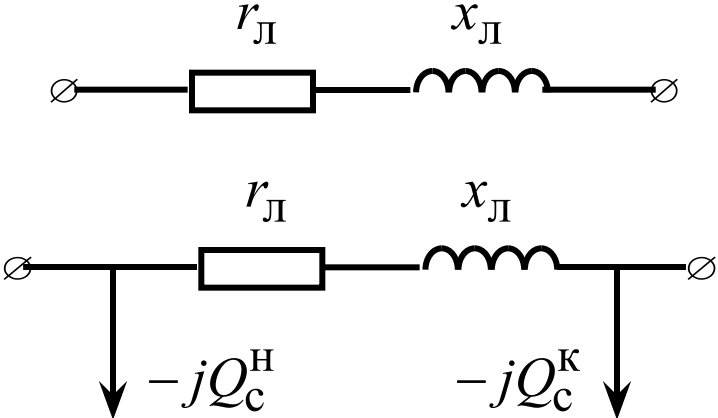
## §5 Области применения различных схем замещения линий

Обобщающие пояснения и основные выводы к схемам замещения:

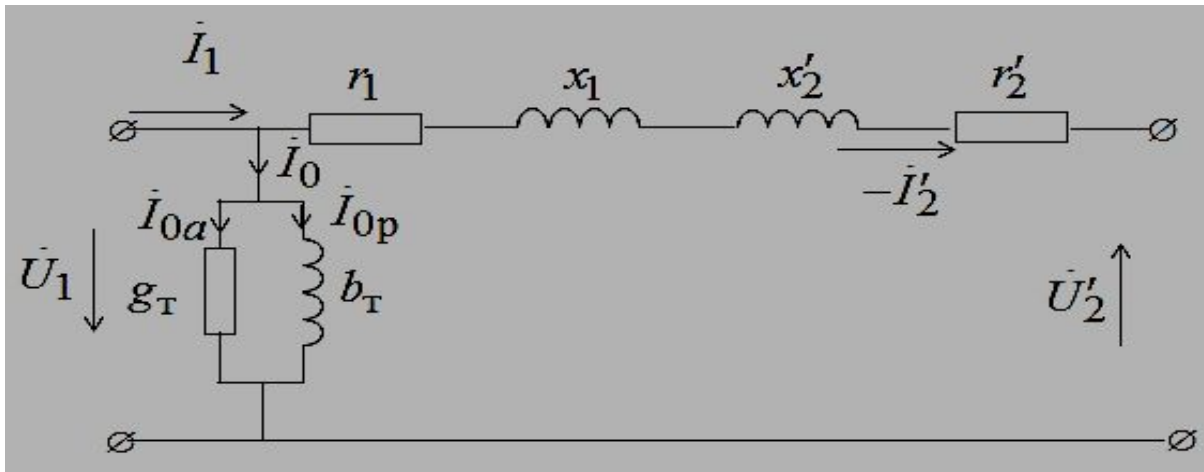
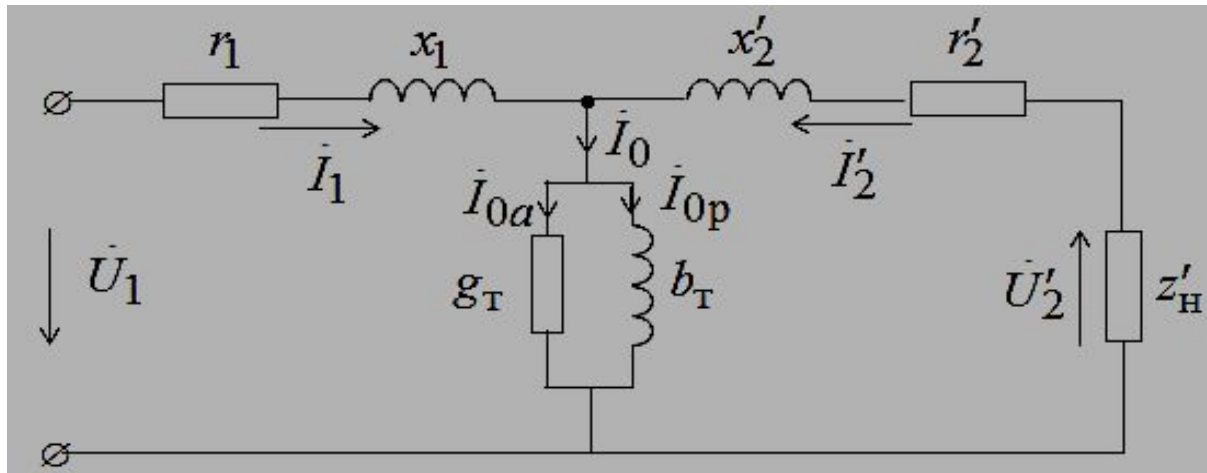
1. При расчете линий протяженностью менее 400км и рабочим напряжении 500кВ и ниже применяют упрощенную П-образную схему замещения с сосредоточенными параметрами.
2. При расчёте симметричных установившихся режимов ЭС схему замещения составляют для одной фазы.
3. Емкостная проводимость учитывает проводимости (емкости) между фазами, между фазами и землёй и отражает генерацию зарядной мощности всей трёхфазной конструкции линии.
4. Активная проводимость линии, изображаемая в виде поперечной связи между фазой (жилой) и точкой нулевого потенциала схемы (землёй), включает суммарные потери активной мощности на корону (или в изоляции) трёх фаз.

5. Поперечные проводимости в схемах замещения можно не изображать, а заменять соответствующими мощностями, табл.2. Например, активную проводимость заменить потерями активной мощности в ВЛ или в изоляции КЛ. Емкостную проводимость - зарядной мощностью.
6. Применение в ВЛ с расщепленной фазы уменьшает индуктивное сопротивление, потери на «корону» и увеличивает зарядную мощность линии.
7. В ВЛ напряжением до 220 кВ включительно, табл.2, а в КЛ до 35кВ включительно, табл.1, при определённых условиях можно не учитывать те или иные параметры, если их влияние на работу сети незначительно.
8. В проводах ВЛ при малых сечениях (16–35 мм<sup>2</sup>) преобладают активные сопротивления, а при больших сечениях (180мм<sup>2</sup> и более в питающих сетях напряжением 220 кВ и выше) свойства сетей определяются их индуктивностями. Активные и индуктивные сопротивления проводов средних сечений (50 – 185 мм<sup>2</sup>) близки друг к другу. В КЛ напряжением до 10 кВ небольших сечений (50 мм<sup>2</sup> и менее) определяющим является активное сопротивление.

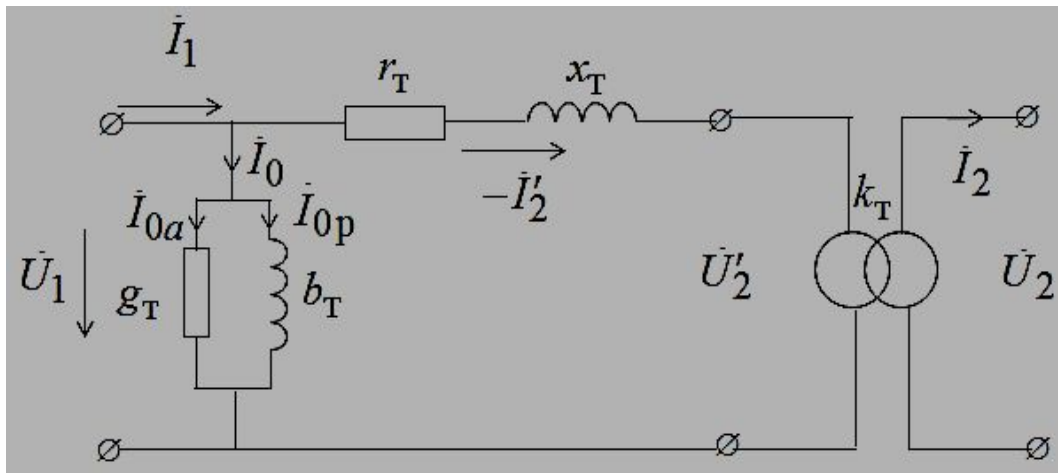
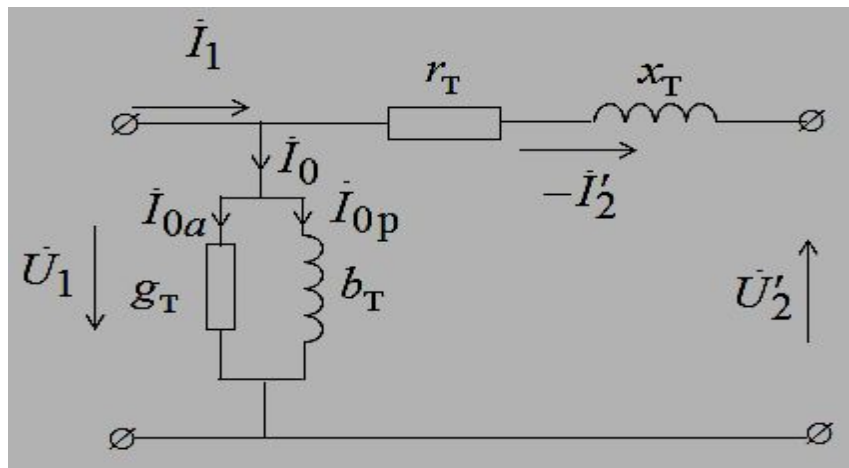
Вид ЛЭП	$U_H$ , кВ	Схема замещения
КЛ	$\leq 10$ кВ	
	20,35 кВ	
	110,220 кВ	

Вид ЛЭП	$U_H$ , кВ, км	Схема замещения
<b>ВЛ</b>	$\leq 35$ кВ  110, 220 кВ  330 ÷ 500 кВ $l \leq 400$ км  500 кВ $300 \leq l \leq 1000$ км  $> 500$ кВ	 <p data-bbox="929 818 1449 868">Полная П-образная СЗ</p> <p data-bbox="739 982 1792 1158">Для определения параметров П-образной СЗ используются поправочные коэффициенты на длину линии.</p> <p data-bbox="739 1175 1792 1343">Для определения параметров СЗ учитывается равномерное распределение сопротивлений и проводимостей вдоль линии.</p>

## §6 Особенности схем замещения силовых трансформаторов электроэнергетических систем

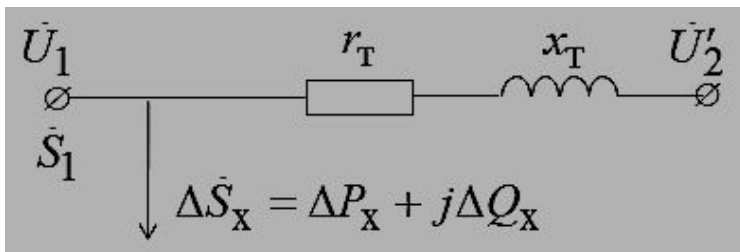






$$k_B \leq 220$$

$$k_B \leq 35$$



□ Параметры **Г-образной** СЗ могут быть определены результатами опытов холостого хода и короткого замыкания или по паспортным данным трансформатора, к которым относятся:

- $S_H$  - номинальная мощность, МВА;
- $U_{ВН}, U_{НН}$  - номинальные напряжения обмоток высшего и низшего напряжений, кВ;
- $\Delta P_X$  - активные потери ХХ, кВт;
- $I_X \%$  - ток ХХ,  $\%I_H$ ;
- $\Delta P_K$  - потери короткого замыкания, кВт;
- $u_K \%$  - напряжение короткого замыкания,  $\%U_H$ .

$$r_T = \frac{\Delta P_K U_H^2}{S_H^2} [\text{M} ;]$$

$$x_T = \frac{u_K \% U_H^2}{100 S_H} [\text{M} ;]$$

$$g_T = \frac{\Delta P_X}{U_H^2} [\text{M} ;]$$

$$b_T = \frac{I_{\text{н}} \% S}{100 U_H^2} [\text{M} .]$$

□ напряжения выражены в кВ, а мощности – в МВт и МВА.

При  $S_{\text{н}} \neq S_2$  и  $U_{2\text{н}} \neq U$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_T = 3I_2^2 r_T = \frac{S_2^2}{U_2^2} r_T; \\ \Delta Q_T = 3I_2^2 x_T = \frac{S_2^2}{U_2^2} x_T = \frac{u_K \% S_2^2}{100 S_H} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \Delta P = \Delta P_{\text{ж}} + \Delta P = \Delta P_X + \frac{\Delta P_K S_2^2}{S_H^2}; \\ \Delta Q = \Delta Q_{\text{ж}} + \Delta Q = \frac{I_{\text{н}} \% S_K}{100} + \frac{u_2 \% S^2}{100 S_H} \end{array} \right.$$