Глава 4
Схемы замещения элементов систем передачи электрической энергии

1. Общие сведения

2. Схемы замещения воздушных линий

3. Параметры схемы замещения воздушной линий 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

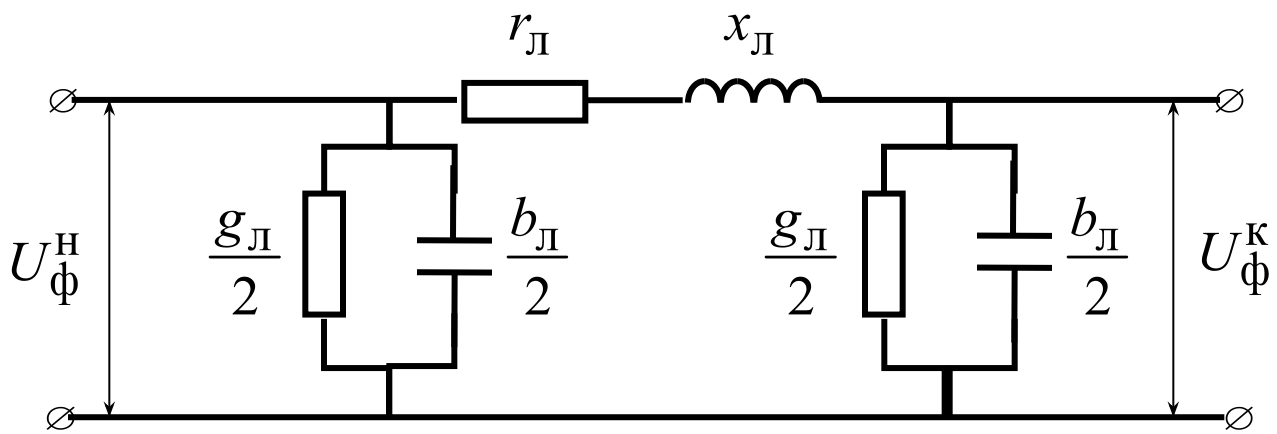
- **Электрические сети переменного тока:**
  - трехфазные;
  - симметричные, т.е. при необходимости - транспонированные;
  - при симметричных и синусоидальных токах и напряжениях;
  - длиной до 400 км и напряжением до 500 кВ включительно.
- **Сосредоточенные параметры СЗ** ЛЭП определяются ее **длиной** 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. $r_{Л}$ - активное сопротивление линии:

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

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

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

2. $x_л$ - индуктивное сопротивление линии:

$$x_л = x_0 l_л$$

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

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

$d_{пр}$ - диаметр провода;

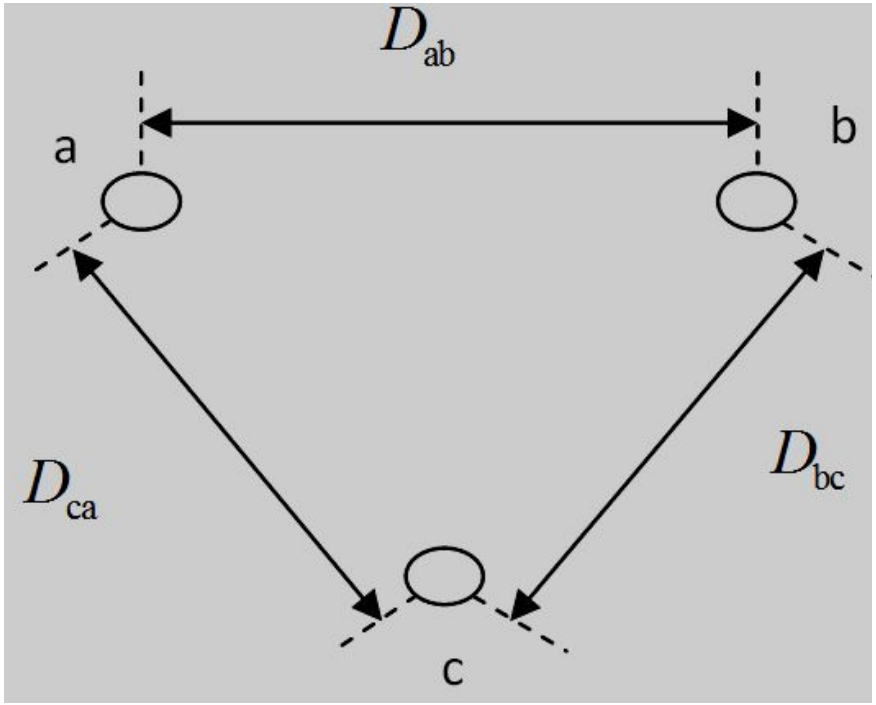
μ - магнитная проницаемость материала провода:

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

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

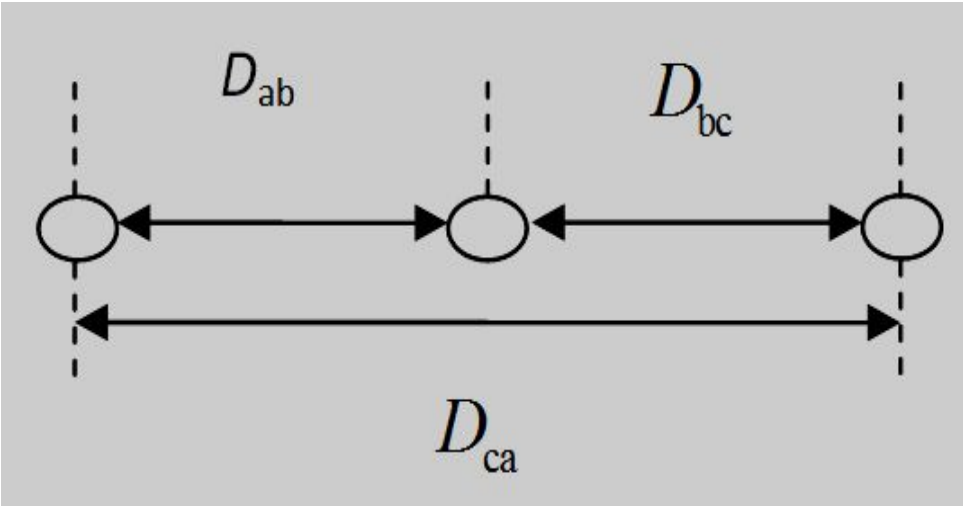
$x_0^{''}$ - индуктивное сопротивление обусловленное потоком внутри провода.

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



$$D_{\text{мф}} = D$$

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{\text{мф}} \cdot D_{\text{мф}} \cdot 2D_{\text{мф}}} = 1{,}26 D_{\text{мф}}$$



 Для проводов из цветных металлов $x_0' >> x_0''$

Для стальных проводов $x_0' << x_0''$

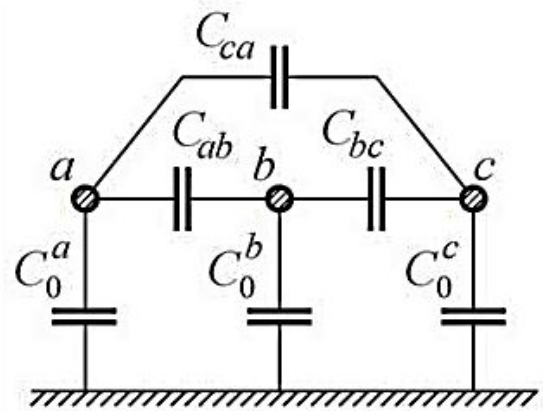
3. $g_л$ - активная проводимость:

$$g_л = g_0 l_л$$

$$g_0 = \frac{\Delta P_{кор}}{U_н^2}$$

4. $b_л$ - ёмкостная проводимость:

$$b_л = b_0 l_л$$

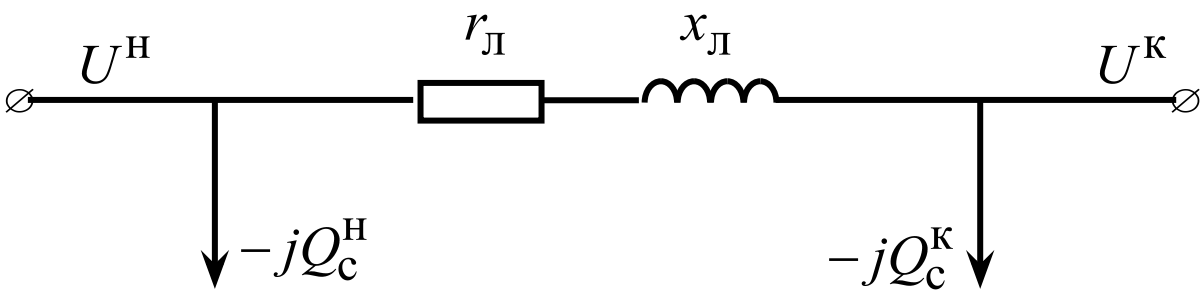


В практических расчётах рабочую ёмкость трёхфазной ВЛ с одним проводом в фазе на единицу длины (Ф/км) определяют по формуле

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

$$I_{c\text{ф}} = U_0 b_0 = \frac{U b_0}{\sqrt{3}} \qquad Q_{c\text{ф}} = 3U_0 I_{c\text{ф}} = 3U_0^2 b_0 = U^2 b$$

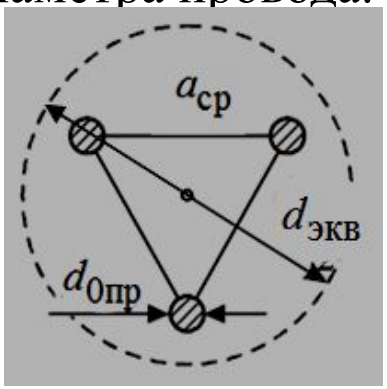
$$Q_c = \frac{1}{2}\left(U^{\text{н}}\right)^2 b_0 l + \frac{1}{2}\left(U^{\text{к}}\right)^2 b_0 l$$



$$Q_{\text{с}}^{\text{н}} = \frac{1}{2}\left(U^{\text{н}}\right)^2 b_{\text{л}} \qquad Q_{\text{с}}^{\text{к}} = \frac{1}{2}\left(U^{\text{к}}\right)^2 b_{\text{л}}$$

§3 Параметры схемы замещения воздушной линии с расщепленными фазами

При $U_{н} \geq 330$ кВ провод каждой фазы расщепляется на несколько $n_{ф}$ проводов, что соответствует увеличению эквивалентного диаметра провода. Тогда:



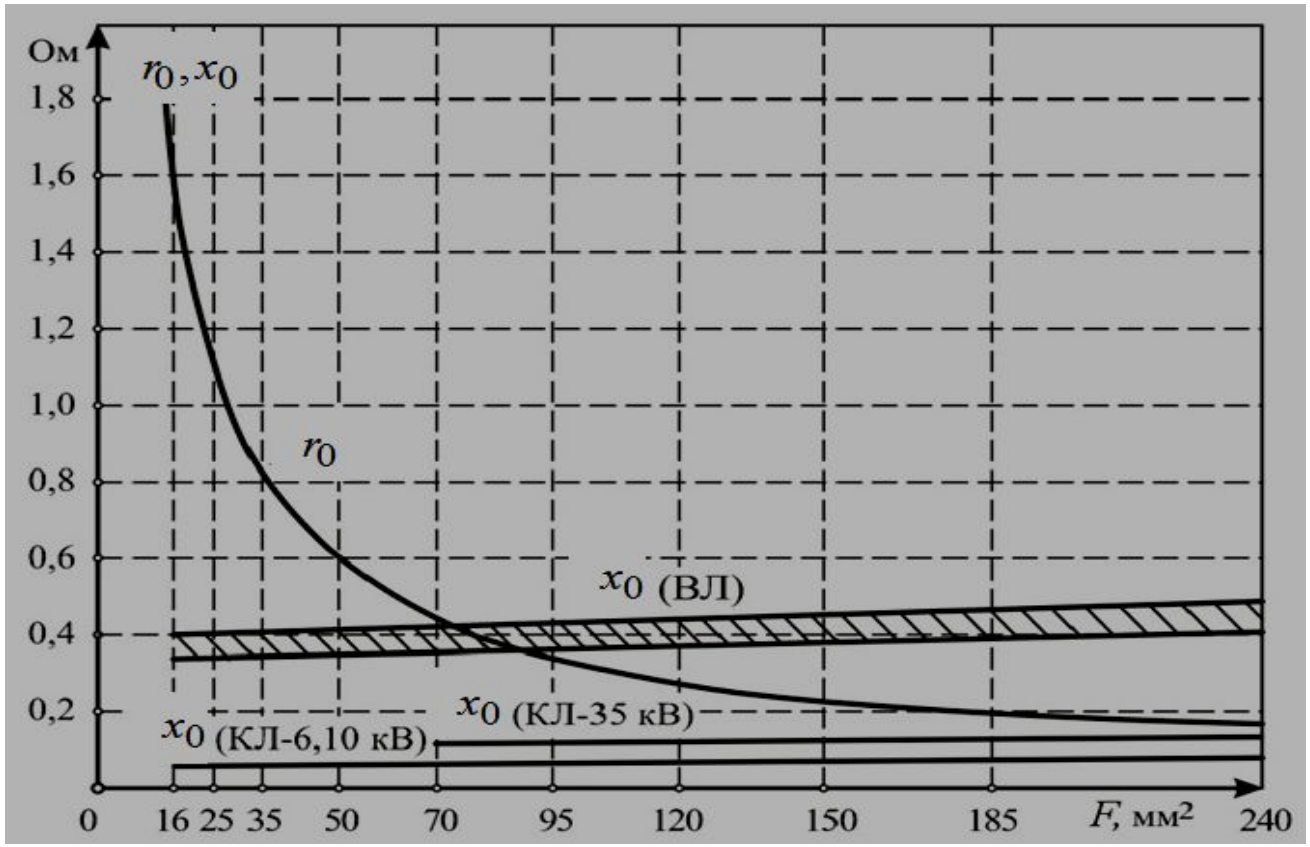
$$d_{экв} = 2\sqrt[n_{ф}]{\frac{d_{0пр}}{2} a_{ср}^{n_{ф}-1}},$$

$$x_0 = 0{,}144 \lg\left(\frac{2D_{ср}}{d_{экв}}\right) + \frac{0{,}0157}{n_{ф}} \qquad b_0 = \frac{7{,}58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(2D_{ср} / d_{экв}\right)} \qquad r_0 = r_{0пр} / n_{ф}$$

$n_{ф} = 1$	x_0
$n_{ф} = 2$	$0{,}81 x_0$
$n_{ф} = 3$	$0{,}72 x_0$
$n_{ф} = 4$	$0{,}68 x_0$

§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.

$$I_{\text{у}} = \frac{U b_{\text{л}} tg\delta}{\sqrt{3}} = \frac{U g_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \qquad \Delta P_{\text{из}} = U^2 b_{\text{л}} tg\delta = U^2 g_{\text{л}}$$

- Удельные параметры схемы замещения кабеля r_0, x_0, также Q_{C0} 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.

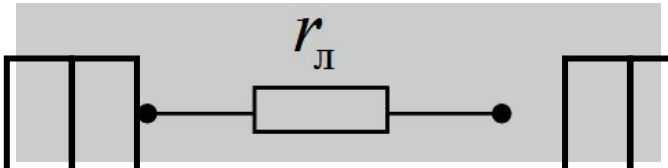
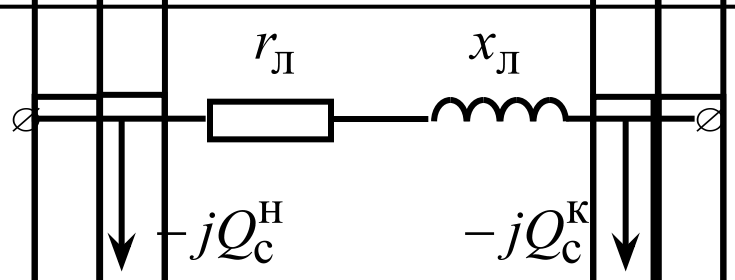
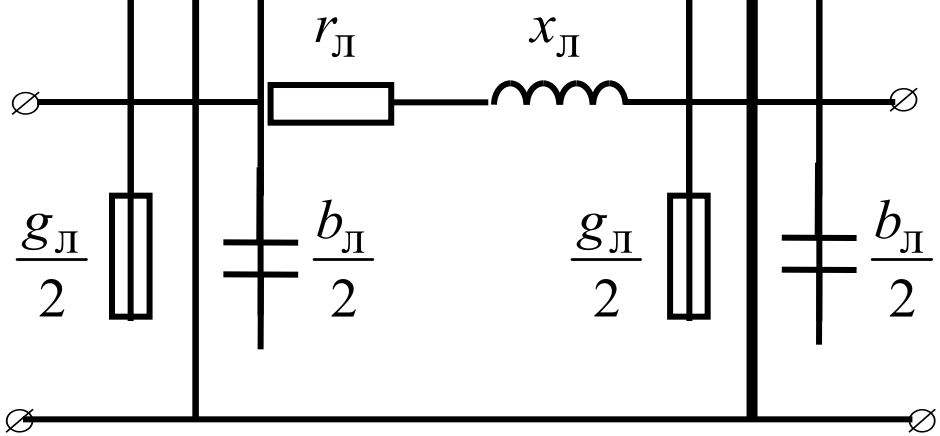
5. Поперечные проводимости в схемах замещения можно не изображать, а заменять соответствующими мощностями, табл.2. Например, активную проводимость заменить потерями активной мощности в ВЛ или в изоляции КЛ. Емкостную проводимость - зарядной мощностью.

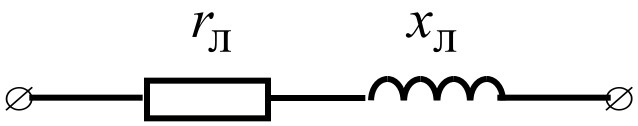
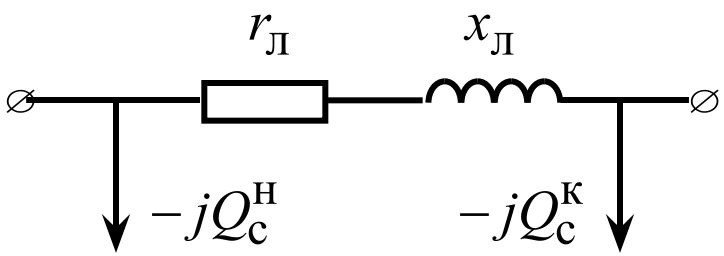
6. Применение в ВЛ с расщепленной фазы уменьшает индуктивное сопротивление, потери на «корону» и увеличивает зарядную мощность линии.

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 несущественно.

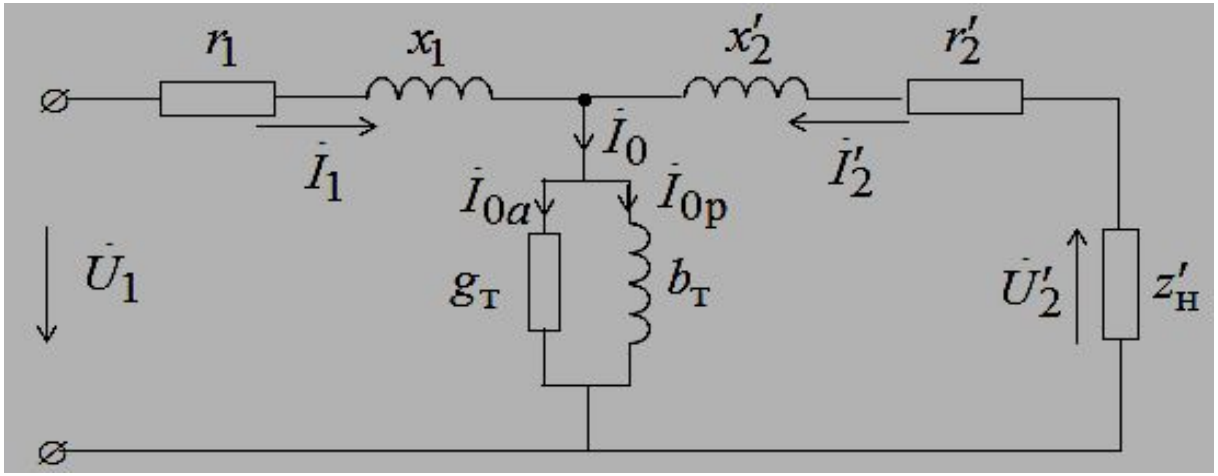
8. В проводах ВЛ при малых сечениях (16–35 мм^2) преобладают активные сопротивления, а при больших сечениях (180мм^2 и более в питающих сетях напряжением 220 кВ и выше) свойства сетей определяются их индуктивностями Активные и индуктивные сопротивления проводов средних сечений (50 – 185 мм^2) близки друг к другу. В КЛ напряжением до 10 кВ небольших сечений (50 мм^2 и менее) определяющим является активное сопротивление.

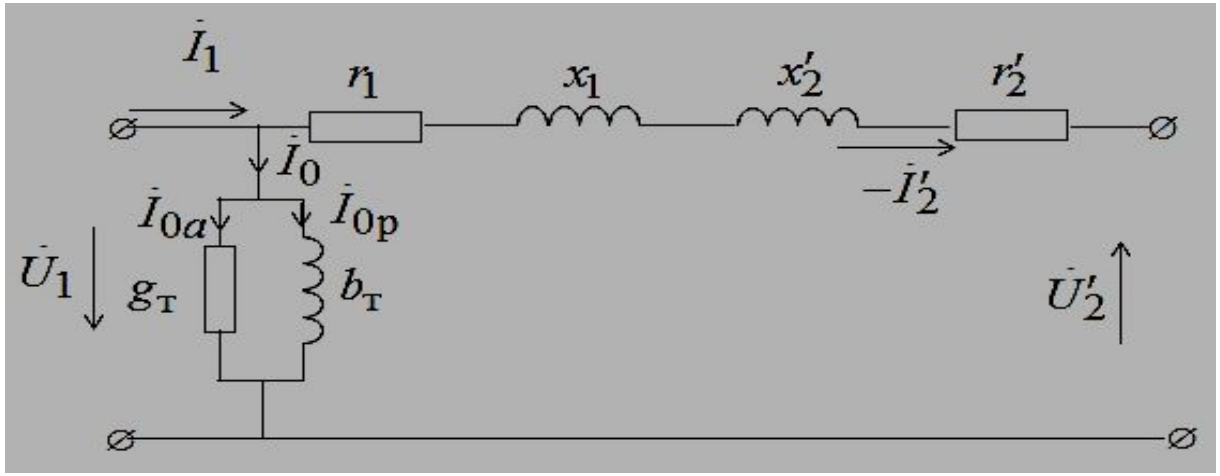
Таблица 1

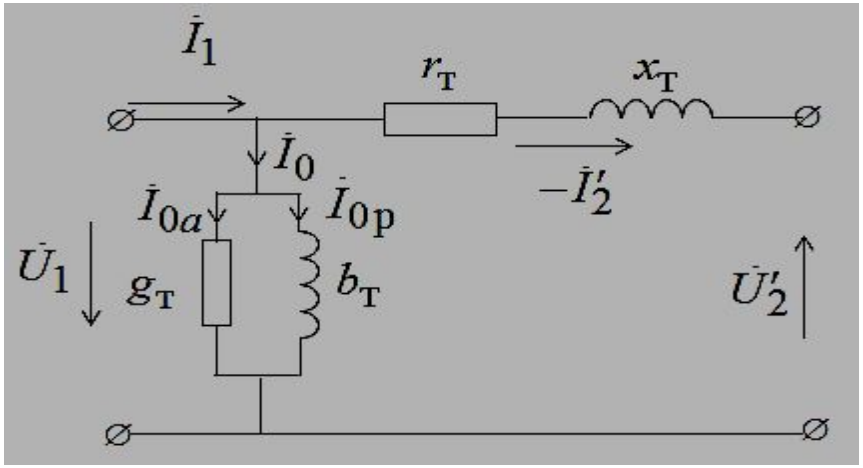
Вид ЛЭП	$U_{\text{н}}$, **кВ**	**Схема замещения**
КЛ	≤ 10 кВ	
	20,35 кВ	
	110,220 кВ	

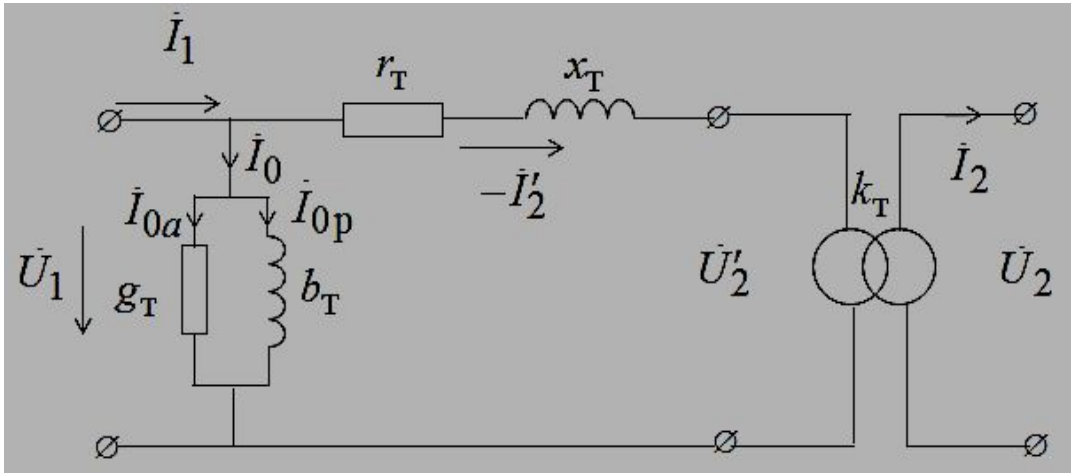
Вид ЛЭП	$U_{\text{н}}$, кВ, км	Схема замещения
ВЛ	≤ 35 кВ	
	110, 220 кВ	
	330 ÷ 500 кВ $l \leq 400$ км	Полная П-образная СЗ
	500 кВ $300 \leq l \leq 1000$ км	Для определения параметров П-образной СЗ используются поправочные коэффициенты на длину линии.
	> 500 кВ	Для определения параметров СЗ учитывается равномерное распределение сопротивлений и проводимостей вдоль линии.

§6 Особенности схем замещения силовых трансформаторов электроэнергетических систем



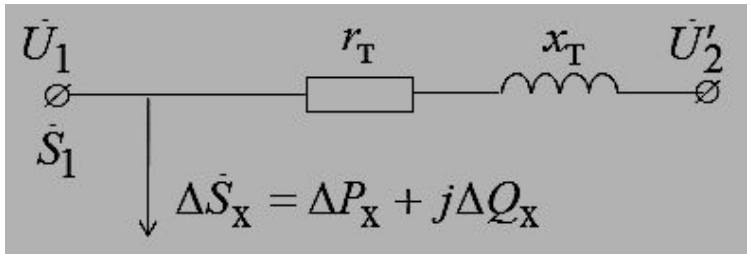






$kB_1 \le 220$

$kB_1 \le 35$



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

- $S_{н}$ - номинальная мощность, МВА;
- $U_{вн}, U_{нн}$ - номинальные напряжения обмоток высшего и низшего напряжений, кВ;
- $\Delta P_{х}$ - активные потери ХХ, кВт;
- $I_{х}\%$ - ток ХХ, $\%I_{н}$;
- $\Delta P_{к}$ - потери короткого замыкания, кВт;
- $u_{к}\%$ - напряжение короткого замыкания, $\%U_{н}$.

$$r_{\text{т}} = \frac{\Delta P_{\text{к}} U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}^2}, [\text{Ом};] \qquad x_{\text{т}} = \frac{u_{\text{к}}\% U_{\text{н}}^2}{100 S_{\text{н}}}, [\text{Ом};]$$

$$g_{\text{т}} = \frac{\Delta P_{\text{х}}}{U_{\text{н}}^2}, [\text{См};] \qquad b_{\text{т}} = \frac{I_{\text{х}}\% S_{\text{н}}}{100 U_{\text{н}}^2}, [\text{См}.]$$

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

При $S_{2\text{н}} \neq S_2$ и $U_{2\text{н}} \neq U_2$:

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{т}} = 3 I_2^2 r_{\text{т}} = \dfrac{S_2^2}{U_2^2} r_{\text{т}}; \\ \Delta Q_{\text{т}} = 3 I_2^2 x_{\text{т}} = \dfrac{S_2^2}{U_2^2} x_{\text{т}} = \dfrac{u_{\text{к}}\% S_2^2}{100 S_{\text{н}}}. \end{cases} \qquad \begin{cases} \Delta P = \Delta P_{\text{х}} + \Delta P_{\text{к}} = \Delta P_{\text{х}} + \dfrac{\Delta P_{\text{к}} S_2^2}{S_{\text{н}}^2}; \\ \Delta Q = \Delta Q_{\text{х}} + \Delta Q_{\text{к}} = \dfrac{I_{\text{х}}\% S_{\text{н}}}{100} + \dfrac{u_2\% S^2}{100 S_{\text{н}}}. \end{cases}$$