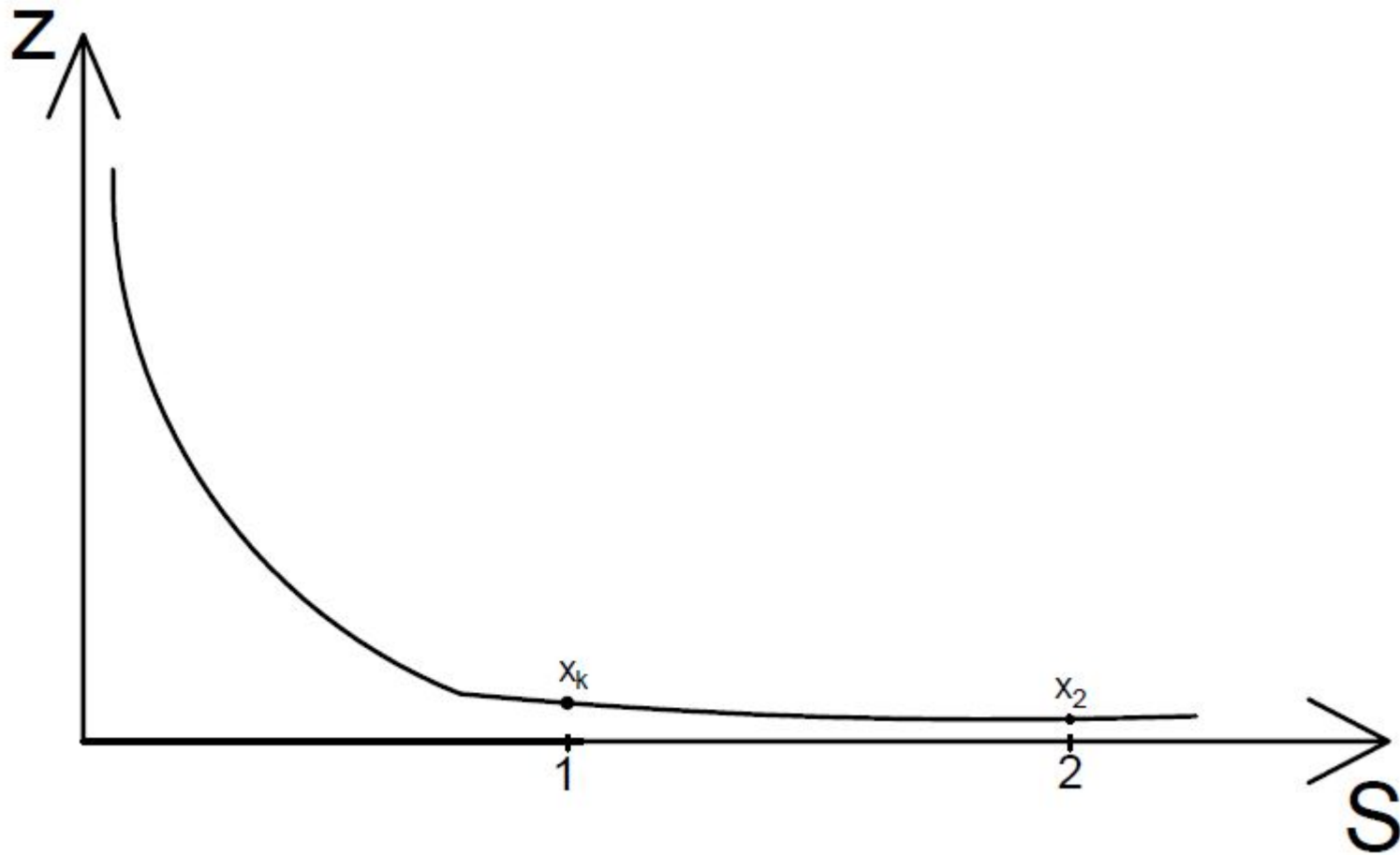


**Определение параметров  
схемы замещения  
обратной и нулевой  
последовательностей  
различных элементов  
(кроме синхронных  
машин)**

Лекция 9

Сопротивление обратной  
последовательности асинхронного  
двигателя



$$X_{*K} = \frac{1}{I_{*II}}$$

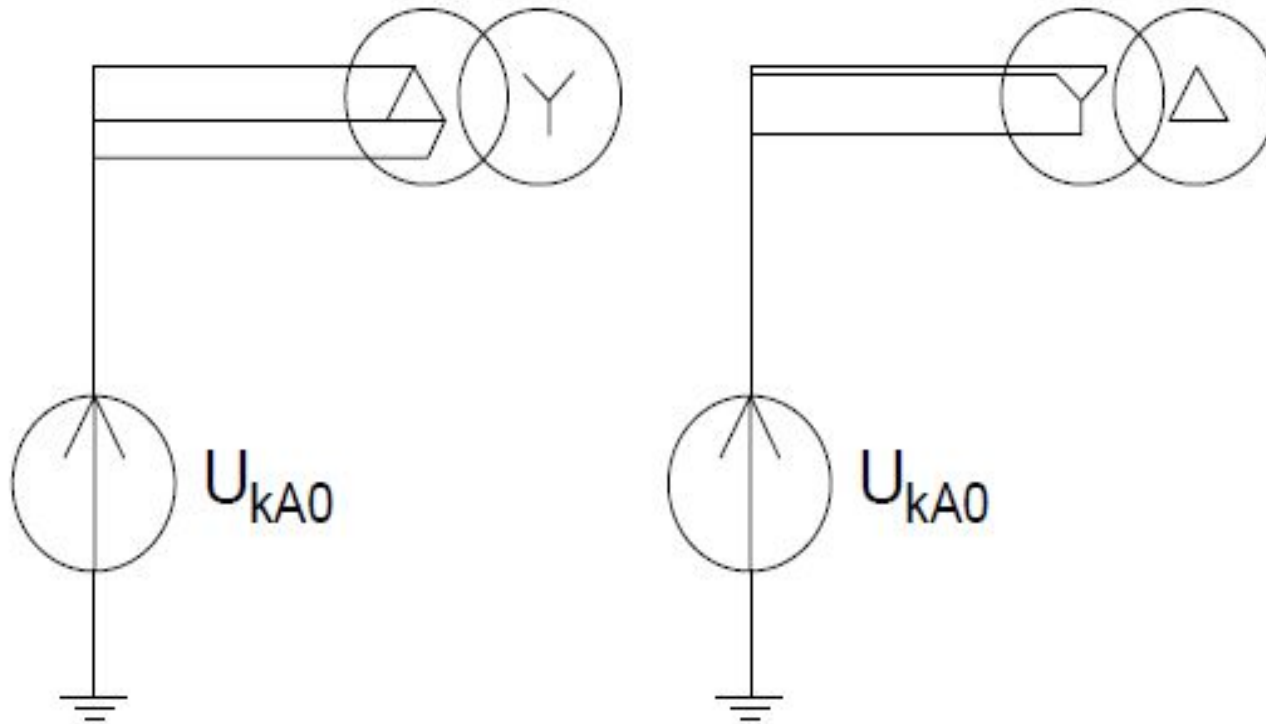
Чтобы определить сопротивление  $x_2$  асинхронного двигателя, необходимо асинхронный двигатель раскрутить от постороннего двигателя до той же скорости, поменяв чередование фаз.

Значение  $x_2$  численно равно сопротивлению, измеренному при скольжении  $2-s$ .

Характер сопротивления  $x_2$  асинхронного двигателя показывает, что:

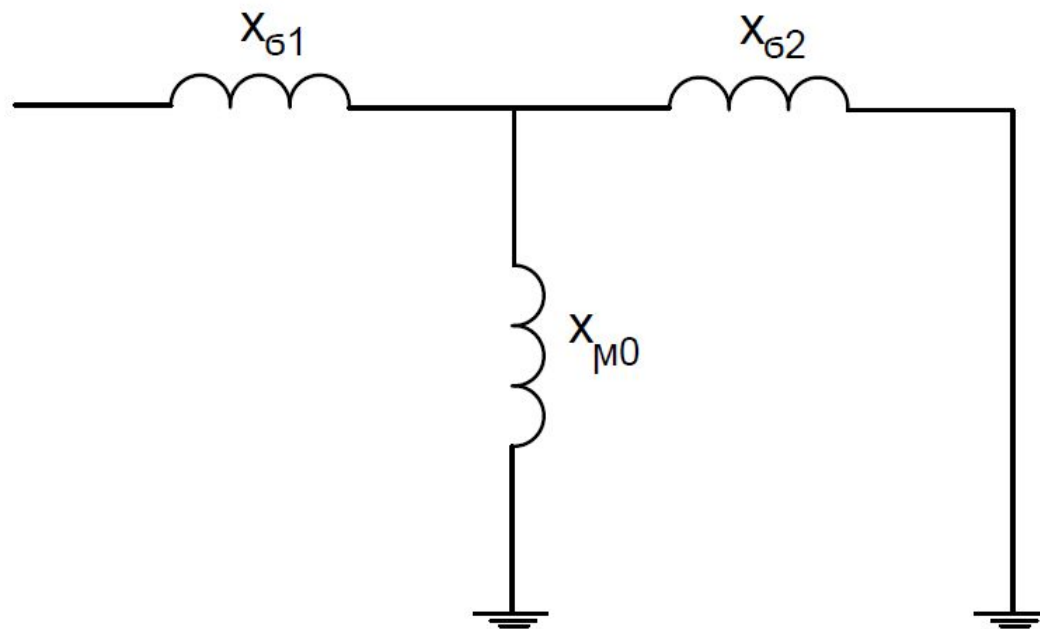
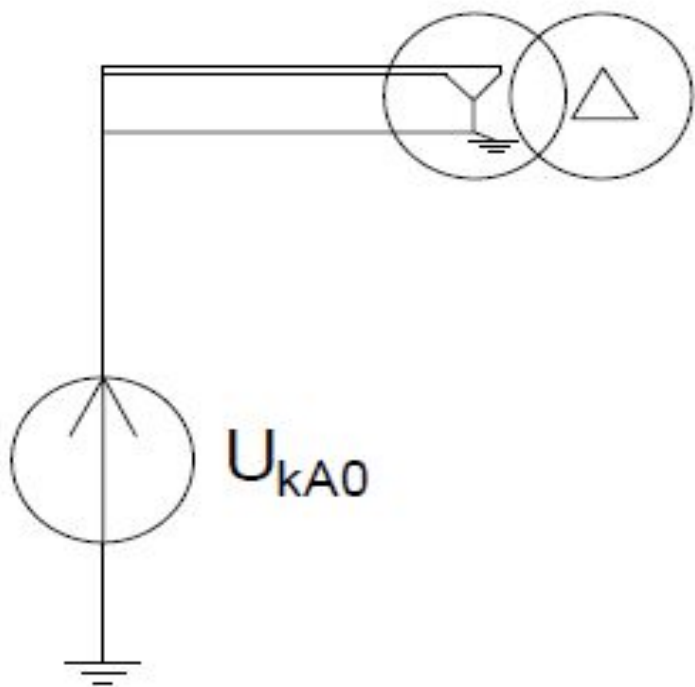
$$x_{*2} \approx x_{*к} = \frac{1}{I_{*п}}$$

# Сопrotивление нулевой последовательности трансформатора



При КЗ со стороны треугольника или незаземленной звезды  $X_0 = \infty$ , так как ток нулевой последовательности не может вернуться в источник.

$x_0 \neq \infty$ , если со стороны КЗ имеется схема соединения- звезда с заземлением.



$X_{\sigma 1}, X_{\sigma 2}$  —

сопротивления рассеяния обмоток трансформатора.

Одинаковы для прямой, обратной и нулевой последовательностей.

$X_{\mu 0}$  — сопротивление нулевой последовательности взаимной индукции между обмотками высшего и низшего напряжений. Зависит от конструкции магнитопровода трансформатора.

$$X_{\mu 0} \neq X_{\mu 1}$$

4-стержневой и броневой трансформаторы:

$$X_{\mu 0} = X_{\mu 1}$$

Если 3-стержневой трансформатор:

$X_{\mu 0} < X_{\mu 1}$  и поток нулевой последовательности замыкается по баку и маслу трансформатора.

Если у трансформатора обмотка со стороны, противоположной точке КЗ, имеет схему соединения треугольник, то токи нулевой последовательности замыкаются в треугольнике.

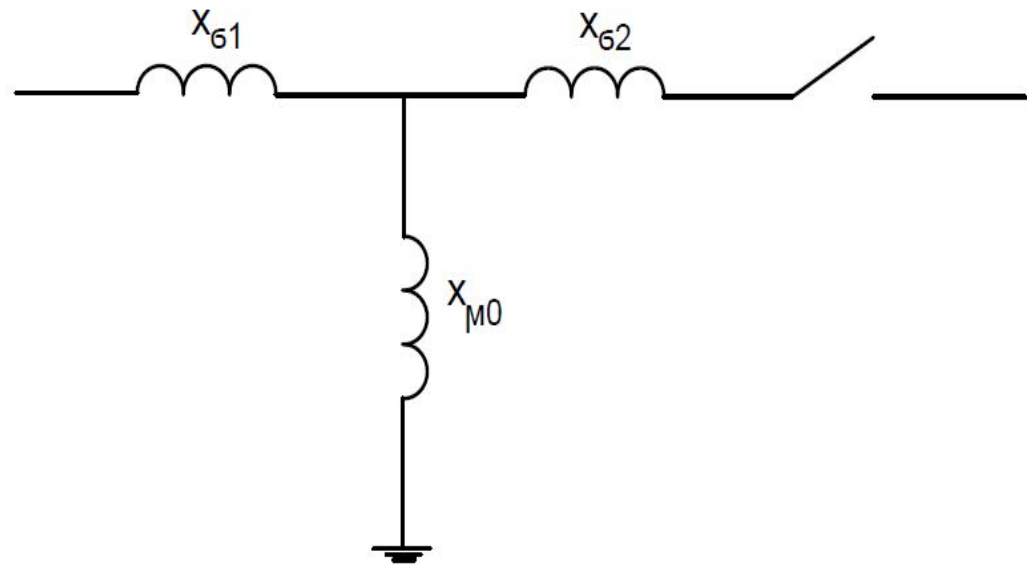
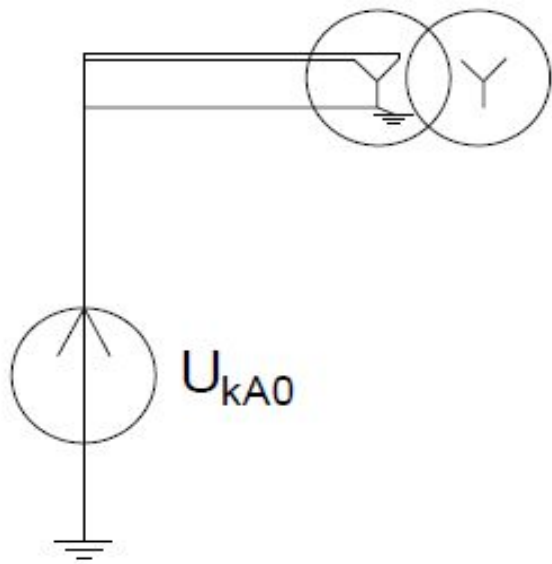
$$X_{0\text{тр}} = X_{\sigma 1} + X_{\mu 0} \parallel X_{\sigma 2}$$

$$X_{\mu 0} = (0,5 - 1) \text{ о. е.}$$

$$X_{\sigma} = 0,05$$

$$\frac{1 \cdot 0,05}{1 + 0,05} \approx 0,048$$

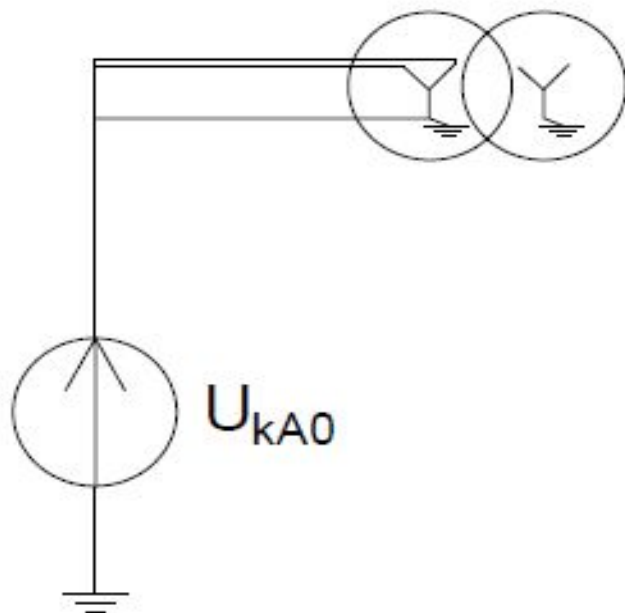
Если у трансформатора обмотка со стороны, противоположной точке КЗ, имеет схему соединения звезда без заземления, то будет размыкание в ветви с  $X_{\sigma 2}$ .



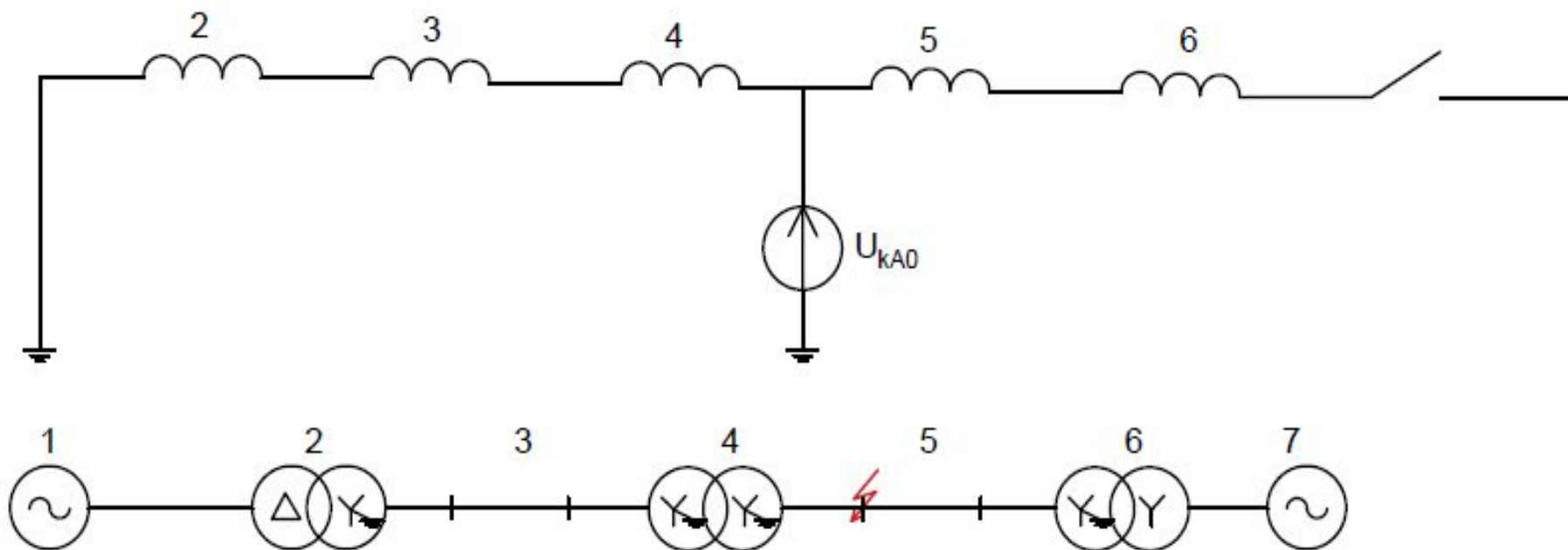
$$X_{0\text{тр}} = X_{\sigma 1} + X_{\mu 0} = \infty$$



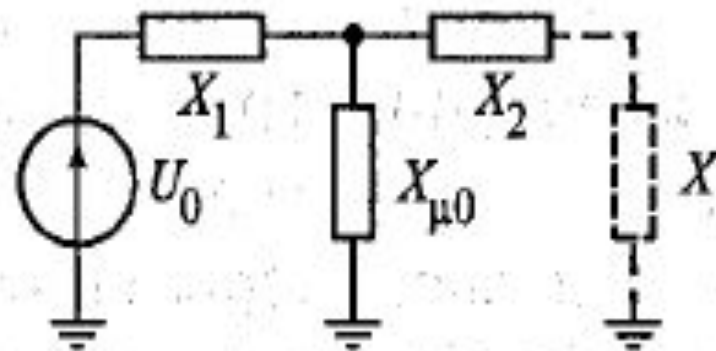
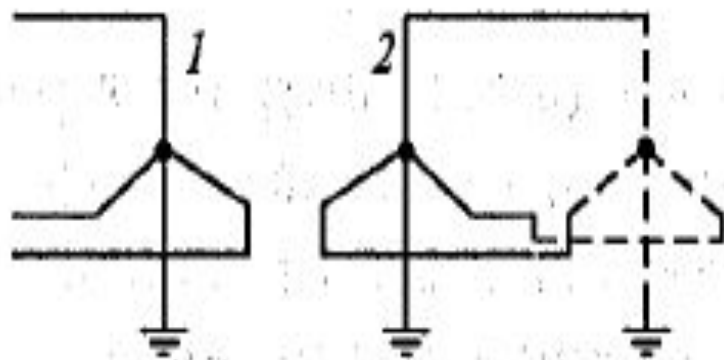
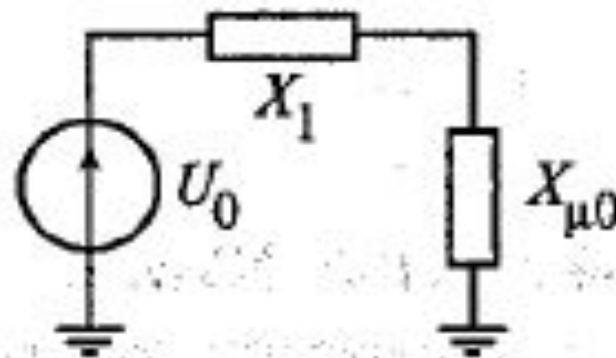
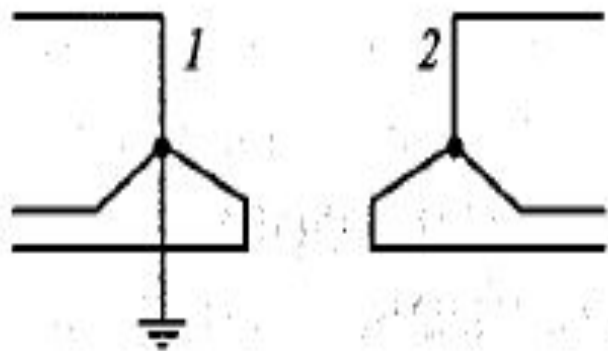
Если у трансформатора обмотка со стороны, противоположной точке КЗ, имеет схему соединения звезда с заземлением, то схема зависит от того, есть ли после трансформатора последовательно включенные трансформаторы с заземленной звездой

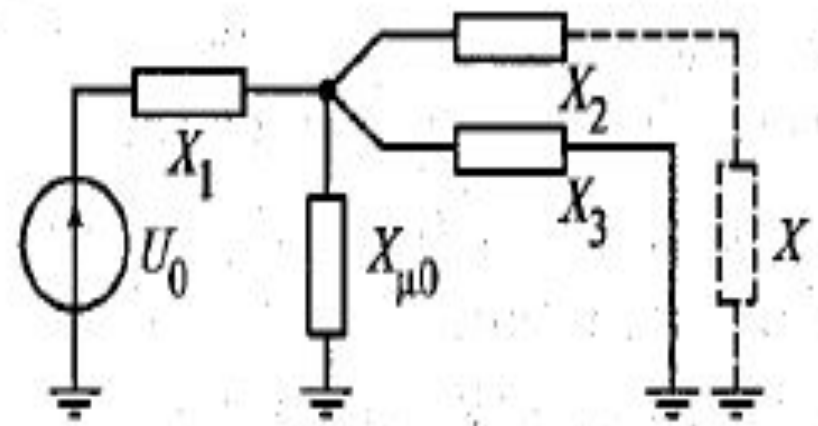
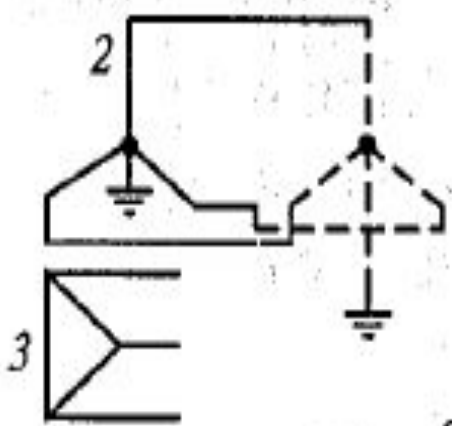
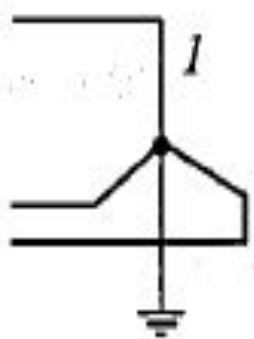
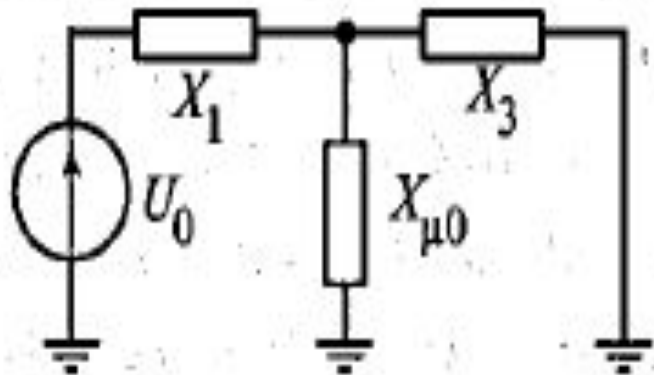
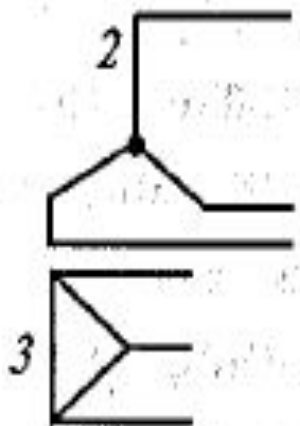
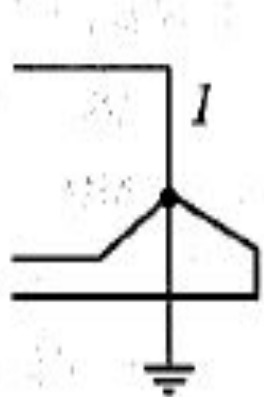


# Пример



# Разные схемы соединения обмоток трехобмоточных трансформаторов и их схемы замещения



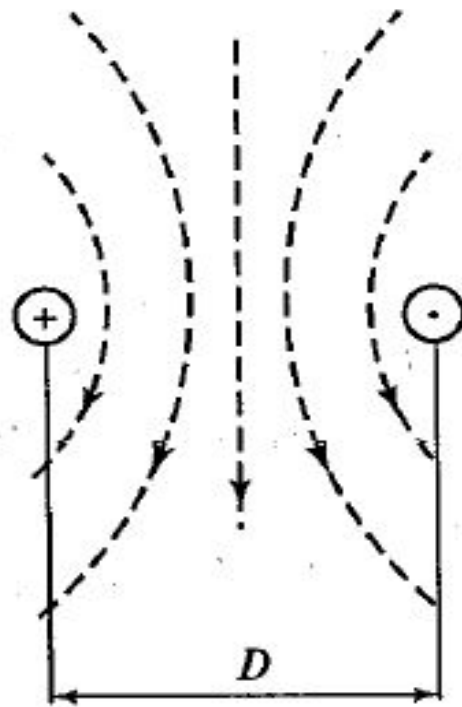




# Соппротивление нулевой последовательности воздушной линии

$R$ -радиус провода

$D$ -расстояние между линиями



$$X = X_{\text{вш}} + X_{\text{вт}}$$

$X_{\text{вш}}$  обусловлено внешними потоками

$X_{\text{вт}}$  обусловлено магнитными потоками внутри проводника

- $$X_{\text{ВШ}} = 2\pi \cdot f \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{D}{R}$$

$$X_{\text{ВТ}} = 2\pi \cdot f \cdot \frac{\mu_0}{8\pi}$$

$$X = 2\pi \cdot f \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{D}{R} + \frac{1}{4} \right) = 2\pi \cdot f \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{D}{R_{\text{ЭК}}}$$

$R_{\text{ЭК}} = 0,779R$ -пересчитанный радиус с учетом внутреннего магнитного потока;

Перейдем от натурального логарифма к десятичному:

$$X = 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \lg \frac{D}{R_{\text{ЭК}}}$$

# Влияние земли на сопротивление линии

Сырая земля :  $\gamma = 1 \cdot 10^{-3} \text{ См} \cdot \text{км}$

Сухая земля:  $\gamma = 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{км}$

$R_z = 2\pi^2 \cdot f$ -сопротивление, определяющее  
потери мощности в земле.

Для самой земли:  $R_z = 0,05 \text{ Ом/км}$



# Индуктивное сопротивление линии при возврате обратного тока по земле

- $$x = 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \lg\left(\frac{6593}{R_{\text{ЭК}} \cdot \sqrt{f \cdot \gamma}}\right)$$

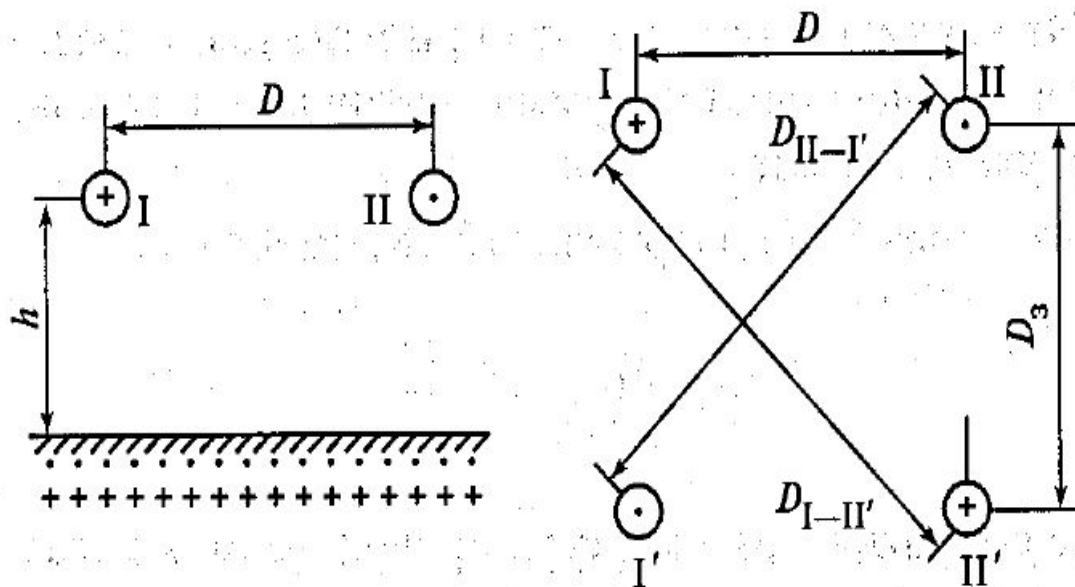
$D_3 = \frac{6593}{\sqrt{f \cdot \gamma}}$  - глубина залегания обратного фиктивного проводника

$D_3 = 935$  м , если земля сырая

$x = 0,145 \cdot \lg \frac{D}{R_{\text{ЭК}}}$  – сопротивление двухпроводной линии(1)

$x_3 = 0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{R_{\text{ЭК}}}$  - сопротивление линии при возврате обратного тока по земле(2)

При определении сопротивления нулевой последовательности линии необходимо учитывать взаимную индукцию между проводниками.



$X_\mu$ -сопротивление взаимной индукции

$$\begin{aligned}
 X_\mu &= X_3 - X = 0,145 \left( \lg \frac{D_3}{R_{ЭК}} - \lg \frac{D}{R_{ЭК}} \right) \\
 &= 0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{D} \quad (3)
 \end{aligned}$$

# Сопротивление взаимной индукции для трехпроводной линии

• среднее сопротивление взаимной индукции  
любой пары проводников.

$$\begin{aligned}x_{\mu} &= \frac{1}{3} \cdot 0,145 \left( \lg \frac{D_3}{D_{1-2}} + \lg \frac{D_3}{D_{2-3}} + \lg \frac{D_3}{D_{3-1}} \right) = \\&= \frac{1}{3} \cdot 0,145 \cdot \lg \frac{D_3^3}{D_{1-2} \cdot D_{2-3} \cdot D_{3-1}} = \\&= 0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt[3]{D_{1-2} \cdot D_{2-3} \cdot D_{3-1}}} = \\&= 0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{D_{\text{cp}}}\end{aligned}$$

# Соппротивление нулевой последовательности воздушной линии без заземленного грозотроса

Падение напряжения нулевой последовательности в фазе А:

$$\Delta U_{A0} = jx_3 \cdot I_0 + jx_\mu \cdot I_0 + jx_\mu \cdot I_0 = jI_0(x_3 + 2x_\mu) = jI_0 \cdot x_0$$

$$\begin{aligned} x_0 &= 0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{R_{\text{эк}}} + 2 \cdot 0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_3^3}{R_{\text{эк}} \cdot D_{\text{ср}}^2} = \\ &= 3 \cdot 0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt[3]{R_{\text{эк}} \cdot D_{\text{ср}}^2}} \end{aligned}$$

- $$x_0 = 0,435 \cdot lg \frac{D_3}{R_{cp}}$$

$R_{cp}$  –среднегеометрический радиус проводов трехфазной линии

Сравним  $x_0$  и  $x_1$ :

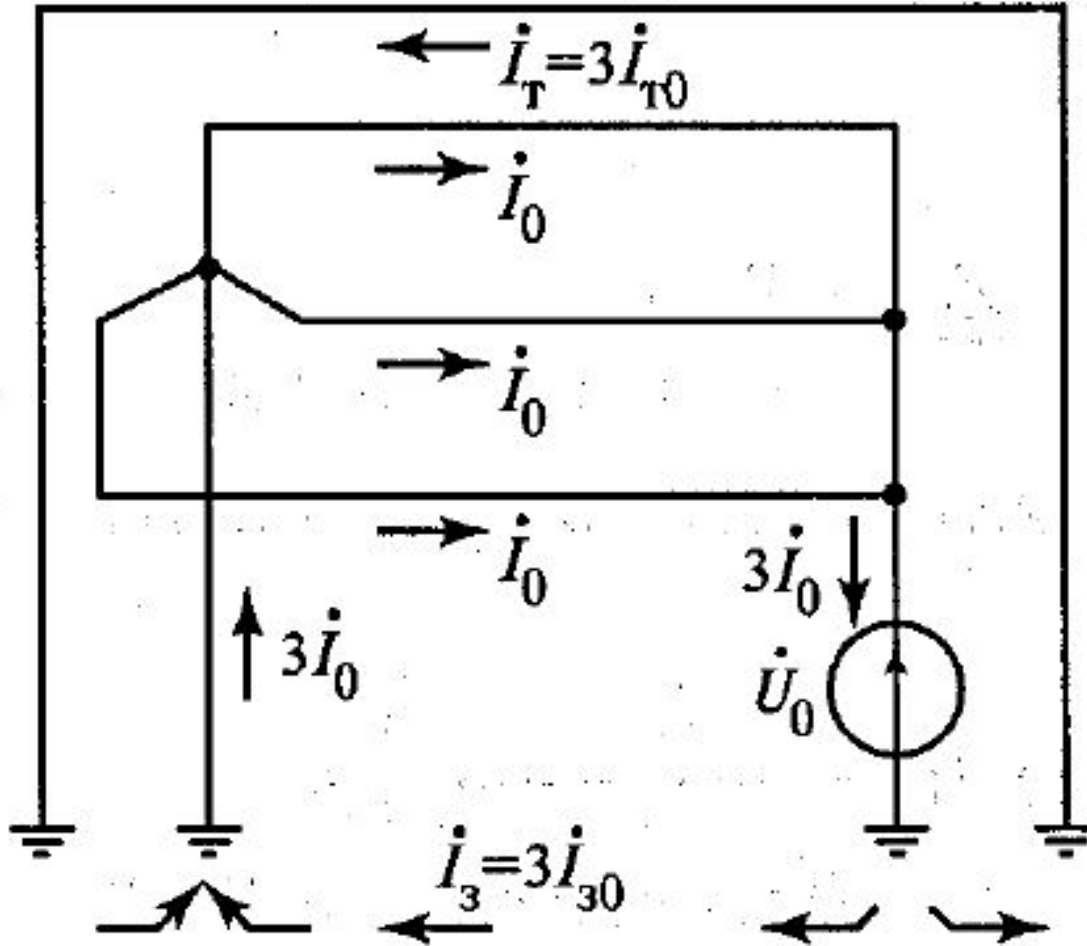
$$\begin{aligned} \Delta U_{A1} &= jx_3 \cdot I_{KA1} + jx_\mu \cdot I_{KB1} + jx_\mu \cdot I_{KC1} = \\ &= jI_{KA1} \cdot (x_3 + a^2 \cdot x_\mu + a \cdot x_\mu) = \\ &= jI_{KA1} \cdot (x_3 + x_\mu \cdot (a^2 + a)) = jI_{KA1} \cdot x_1 \end{aligned}$$

$$x_1 = x_3 - x_\mu$$

$$x_0 = x_3 + 2x_\mu$$

Следовательно,  $x_0 > x_1$

# Сопротивление нулевой последовательности одноцепной воздушной линии с заземленным грозотросом



- $$I_0 = I_{30} + I_{T0}$$

$$I_T = 3I_{T0}$$

$$I_3 = 3I_{30}$$

$$x_T = 0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{R_{\text{эк0T}}}$$

Уравнения падения напряжения на грозотросе:

$$\Delta U_{T0} = jx_T \cdot 3 \cdot I_{T0} = j \cdot I_{T0} \cdot x_{0T}$$

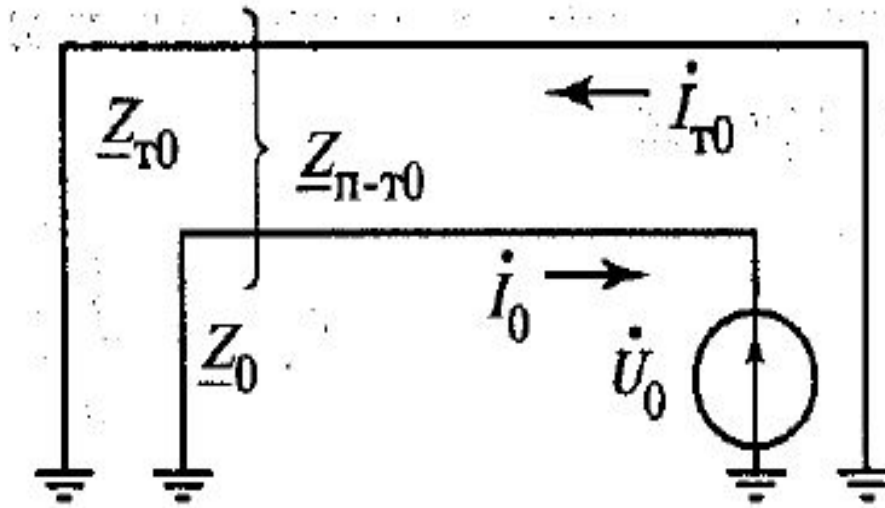
$$x_{0T} = 0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{R_{\text{экT}}}$$

Сопротивление взаимоиндукции между проводом любой фазы и тросом, учитывая транспозицию проводов линии:

$$\begin{aligned} X_{\mu\Pi-\Gamma} &= \frac{1}{3} \cdot 0,145 \left( \lg \frac{D_3}{D_{\Gamma-1}} + \lg \frac{D_3}{D_{\Gamma-2}} + \lg \frac{D_3}{D_{\Gamma-3}} \right) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot 0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{D_{\Pi-\Gamma}} \cdot 3 \end{aligned}$$

$D_{\Pi-\Gamma} = \sqrt[3]{D_{\Gamma-1} \cdot D_{\Gamma-2} \cdot D_{\Gamma-3}}$  -среднегеометрическое расстояние между проводами и грозотросом





Для эквивалентного фазного проводника падение напряжения:

$$\Delta U_{T0} = jx_{\mu\Pi-T} \cdot I_{T0} + jx_{\mu\Pi-T} \cdot I_{T0} + jx_{\mu\Pi-T} \cdot I_{T0} = j3 \cdot x_{\mu\Pi-T} \cdot I_{T0} = j \cdot x_{\mu\Pi-T0} \cdot I_{T0}$$

Сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между проводами линии и тросом:

$$x_{\mu\Pi-T0} = 3 \cdot x_{\mu\Pi-T} = 0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{D_{\Pi-T}}$$

Концы грозотроса заземлены:

$$U_{\text{ГТ}} = 0 = jx_{0\text{T}} \cdot I_{\text{T0}} - jx_{\mu\text{П-Т0}} \cdot I_0$$

$$I_{\text{T0}} = \frac{x_{\mu\text{П-Т0}} \cdot I_0}{x_{0\text{T}}}$$

Подставляем в выражение для падения напряжения в проводе:

$$\Delta U_0 = jx_0 \cdot I_0 - jx_{\mu\text{П-Т0}} \cdot I_{\text{T0}} = j\left(x_0 - \frac{x_{\mu\text{П-Т0}}^2}{x_{0\text{T}}}\right) \cdot I_0$$

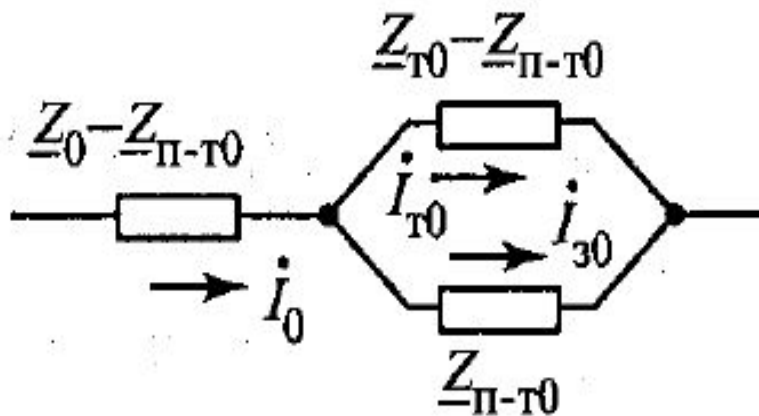
Сопротивление нулевой последовательности воздушной линии электропередачи с учетом заземленного грозотроса:

$$x_0^{\text{T}} = x_0 - \frac{x_{\mu\text{П-Т0}}^2}{x_{0\text{T}}}$$

# Схема замещения одноцепной воздушной линии с грозотросом

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad x_0^T &= x_0 - \frac{x_{\mu\Pi-T0}^2}{x_{T0}} = \\
 &= (x_0 - x_{\mu\Pi-T0}) + x_{\mu\Pi-T0} - \frac{x_{\mu\Pi-T0}^2}{(x_{T0} - x_{\mu\Pi-T0}) + x_{\mu\Pi-T0}} = \\
 &= x_{\sigma 0} + x_{\mu\Pi-T0} - \frac{x_{\mu\Pi-T0}^2}{x_{\sigma T0} + x_{\mu\Pi-T0}} = x_{\sigma 0} + \frac{x_{\sigma T0} \cdot x_{\mu\Pi-T0}}{x_{\sigma T0} + x_{\mu\Pi-T0}}
 \end{aligned}$$

Схема замещения:







При практических расчетах принимают:

- $x_0 = 3,5x_1$  – одноцепная ЛЭП без ГТ
- $x_0 = 3x_1$  – одноцепная ЛЭП с заземленным ГТ из стали
- $x_0 = 2x_1$  – одноцепная ЛЭП с заземленным ГТ из алюминия