

## КЗ в системах электроснабжения (ЭС).

В системах электроснабжения возникают КЗ, приводящие к резкому увеличению токов, поэтому все основное электрическое оборудование должно быть выбрано с учетом действия этих токов.

Различают следующие виды КЗ:

- трехфазное (симметричное) – 3 фазы соединяются между собой.
- двухфазное – 2 фазы соединяются между собой без соединения с землей.
- однофазное – 1 фаза соединяется с нейтралью источника через землю.
- двойное замыкание на землю – 2 фазы соединяются между собой и с землей.

Причины возникновения КЗ:

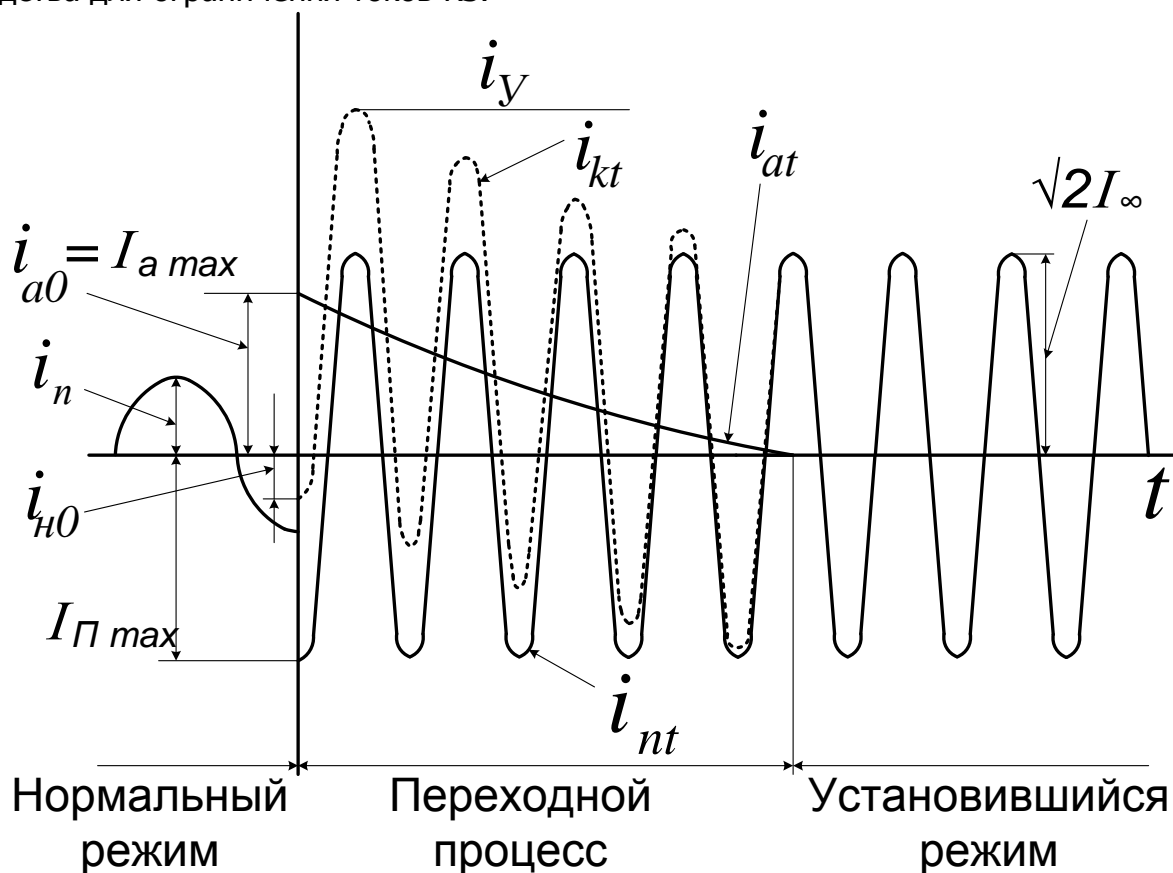
- повреждение изоляции отдельных частей электроустановок;
- неправильное действие персонала;
- оплавление изоляции из-за перенапряжений в системе КЗ.

КЗ сопровождается:

- прекращением питания потребителей, присоединенных с точкой, в которой произошло КЗ.
- нарушением нормальной работы других потребителей, подключенных к неповрежденным участкам сети и вследствие понижения напряжения на этих участках.

Для предотвращения КЗ необходимо:

1. Устранить причины КЗ;
2. уменьшить время действия защиты;
3. применять быстродействующие выключатели;
4. правильно вычислять токи КЗ и по ним выбирать необходимую аппаратуру, защиту и средства для ограничения токов КЗ.



При КЗ в цепи протекает переходной процесс, состоящий из 2-х составляющих тока: периодической (колебательной) и апериодической.

$i_{HO}$  - мгновенное значение тока нагрузки.

$i_y$  -мгновенное значение ударного тока КЗ через полпериода (0,01 с) после возникновения КЗ.

По величине  $i_y$  проверяют электрические аппараты, шины и изоляторы на динамическую устойчивость.

$I_{П MAX}$  и  $i_n$  - максимальное и мгновенное значения периодической составляющей тока КЗ.

$I_{a max}$  и  $i_{a0}$  -максимальное и мгновенное значения апериодической составляющей тока КЗ.

$I_{\infty}$  - действующее значение установившегося тока КЗ. По этому току проверяют электрические аппараты и токоведущие части на термическую устойчивость.

$I'' = I_{no}$  - начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ (сверхпереходной ток КЗ).

$$I_{nmax} = \sqrt{2} \cdot I_{no}$$

$$i_{kt} = i_{at} + i_{nt}$$

$i_{at}$  - характеризует затухание тока КЗ, зависит от активного сопротивления цепи и обмоток статора. В сетях выше 1000 В, сопротивление мало и время затухания  $\tau = 0,15 \div 0,2$  с.

Благодаря инерции магнитного поля не происходит мгновенного изменения тока от  $i_{HO}$  до  $I_{nmax}$  за счет возникновения апериодической составляющей.

## Основные соотношения между величинами токов КЗ.

1. Аперiodическая составляющая изменяется согласно следующему закону:

$$i_a = I_{amax} \cdot e^{-t/T_a},$$

где  $T_a$  - постоянная времени затухания.  $T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{X_k}{314 \cdot r_k}$

$r_k$  и  $X_k$  - сопротивления цепи КЗ.

2.  $i_y$  - ударный ток, соответствующий времени 0,01 с, определяется:

$$i_y = i_a + I_{nmax} = I_{amax} \cdot e^{-t/T_a} + I_{nmax}.$$

При  $t = 0$  с:

$$I_{amax} = I_{nmax}$$

$$i_y = I_{nmax}(1 + e^{-t/T_a}) = \sqrt{2} \cdot I_{n0}(1 + e^{-t/T_a}) = \sqrt{2} \cdot I_{n0} \cdot \kappa_y$$

$\kappa_y$  определяется местом КЗ:

для ВЛ 1000 В:  $T_a = 0,05$  с;  $\Rightarrow \kappa_y = 1 + e^{0,01/0,05} = 1,8$

Следовательно,  $i_y = \sqrt{2} \cdot I_{n0} \cdot \kappa_y = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot I_{n0} = 2,55 \cdot I_{n0}$ .

Если ЭДС источника неизменна, т.е. при питании от сети неограниченной мощности, то периодическая составляющая тока КЗ будет неизменна:

$$I'' = I_{n0} = I_{K3}$$

При вычислении токов КЗ, удаленных от источника питания точках, где активное сопротивление значительно (за трансформаторами малой мощности, в кабельной сети)  $\kappa_y$  определяется по зависимости  $\kappa_y = f(T_a)$ .

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ в течение первого периода определяется:

$$I_y = \sqrt{I_{\Pi}^2 + I_{at}^2}$$

$$I_{at} = i_y - I_{\Pi MAX} = \kappa_y \cdot I_{\Pi MAX} - I_{\Pi MAX} = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi 0} \cdot (\kappa_y - 1)$$

$$I_{\Pi 0} = I_{K3}$$

$$I_y = \sqrt{I_{K3}^2 + [\sqrt{2} \cdot I_{K3} \cdot (\kappa_y - 1)]^2} = I_{K3} \cdot \sqrt{1 + 2(\kappa_y - 1)^2} = I_{K3} \cdot q$$

$$q = \sqrt{1 + 2(\kappa_y - 1)^2}$$

### Определение параметров цепи КЗ.

Для вычисления токов КЗ составляют расчетную схему, соответствующую нормальному режиму работы системы, считая, что все источники питания включены параллельно.

В расчетной схеме учитывают сопротивление питающего генератора, трансформаторов, ВЛ и реакторов. По расчетной схеме составляют схему замещения, в которой указывают сопротивление источников и потребителей и намечают точки для расчетов токов КЗ.

Для генераторов, трансформаторов, ЛЭП небольшой протяженности обычно учитывают только индуктивные сопротивления.

При значительной протяженности ВЛ учитываются также и активные сопротивления. Активное сопротивление  $R$  необходимо учитывать, если выполняется условие:

$$r_{\Sigma} = R_{\Sigma} > \frac{X_{\Sigma}}{3},$$

где  $r_{\Sigma}$  и  $R_{\Sigma}$  - суммарные сопротивления до места КЗ.

Принимают следующие значения индуктивных сопротивлений. Для синхронных генераторов (СГ):

$X_d'' = 0,125$  - сверхпереходное сопротивление (для турбогенераторов)

$X_d'' = 0,2$  - для гидрогенераторов (ГГ) с успокоительной обмоткой

$X_d'' = 0,27$  - для ГГ без успокоительной обмотки

Для СД и АД:  $X_d'' = 0,2$

Для трансформаторов  $X\% = U_k\%$  — напряжение КЗ в %.

Для ВЛ ( $U > 1000$  В)  $X_0 = 0,4$  Ом/км.

Для КЛ (кабельных линий) (6-20 кВ)  $X_0 = 0,08$  Ом/км.

$$r_0 = \frac{1000}{\gamma \cdot S}$$

В схемах замещения все указанные сопротивления выражаются либо в омах, либо в относительных единицах.

## Расчет токов КЗ в относительных единицах.

Все расчетные данные приводят к базисному напряжению и базисной мощности. За базисное напряжение принимают среднее номинальное напряжение.

Ряд среднего номинального напряжения:

$$U_{НОМ\text{ ср}} = 0,23; 0,4; 0,69; 3,15; 6,3; 10,5; 21; 37; 115; 230 \text{ кВ}$$

За базисную мощность  $S_B$  можно выбрать мощность, принимаемую при расчетах за единицу. Например, мощность системы, суммарные номинальные мощности генераторов станции или трансформаторов подстанции, или удобное для расчетов число, кратное 10.

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B}$$

Сопротивления в относительных единицах выражаются:

$$X_* = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{НОМ} \cdot X}{U_{НОМ}} = \frac{\sqrt{3} \cdot S_{НОМ} \cdot X}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}^2} = \frac{S_{НОМ} \cdot X}{U_{НОМ}^2}$$
$$r_* = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{НОМ} \cdot r}{U_{НОМ}} = \frac{\sqrt{3} \cdot S_{НОМ} \cdot r}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}^2} = \frac{S_{НОМ} \cdot r}{U_{НОМ}^2}$$

Относительные сопротивления ВЛ и КЛ:

$$X_{*\bar{\sigma}} = \frac{S_{\bar{\sigma}} \cdot X}{U_{НОМ}^2} = \frac{S_{\bar{\sigma}} \cdot X}{U_{\bar{\sigma}}^2}, \quad r_{*\bar{\sigma}} = \frac{S_{\bar{\sigma}} \cdot r}{U_{НОМ}^2}$$

$$X = X_0 \cdot \ell, \quad r = r_0 \cdot \ell,$$

$X, r$  - изм-ся в Омах

$S_H$  - МВА

$U_{НОМ}$  - кВ

Генераторы, двигатели:

$$X_{*\bar{\sigma}} = \frac{S_{\bar{\sigma}} \cdot X_*}{S_{НОМ}} = \frac{S_{\bar{\sigma}} \cdot X''_d}{S_{НОМ}^{(Г,Д)}}$$

Для системы:  $X_{*\bar{\sigma}} = \frac{S_{\bar{\sigma}} \cdot X_c}{S_{НОМ}}$

Трансформаторы:

Если  $S_{НОМ\text{ TP}} \geq 630 \text{ кВА}$ , тогда  $X_{*\bar{\sigma}} = \frac{S_{\bar{\sigma}} \cdot X_{*T}}{S_{НОМ\text{ TP}}} = \frac{0,01 \cdot U_K \% \cdot S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ\text{ TP}}}$

$$r_{*\bar{\sigma}} = \frac{S_{\bar{\sigma}} \cdot r_*}{S_{НОМ\text{ TP}}} = P_{КЗ} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ\text{ TP}}}$$

Если  $S_{НОМ ТР} \leq 630 \text{ кВА}$ , тогда  $r_{*\delta} = \frac{P_{K3}}{S_{НОМ ТР}}$ ,  $X_{*\delta} = \sqrt{U_K^2 - r_{*}^2} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ ТР}}$

Сопротивления реактора:  $X_{*\delta} = 0,01 \cdot X_P \% \cdot \frac{I_{\delta} \cdot U_{НОМ}}{I_{НОМ} \cdot U_{\delta}}$

Часто в электроснабжении пользуются понятием системы неограниченной мощности – условно можно считать такую систему, напряжение на шинах которой можно полагать практически неизменным при любых изменениях тока (в том числе КЗ) в присоединенной к ней маломощной цепи.

Для системы неограниченной мощности:

$$S_H = \infty, \quad X_{*C} = 0, \quad r_{*C} = 0$$

Такое допущение возможно, если сопротивление системы не превышает (5-10)% от результирующего сопротивления цепи КЗ.

Периодическая составляющая тока трехфазного КЗ:

$$I_{\Pi} = I_K^{(3)} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}},$$

если  $r_{\Sigma} \ll X_{\Sigma}$ , то  $I_{\Pi} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma}}$ ,

т.к.  $X_{PE3*} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\delta} \cdot X_{PE3}}{U_{\delta}}$ , то  $\frac{I_K^{(3)}}{I_{\delta}} = \frac{U_{НОМ} / U_{\delta}}{X_{PE3}}$  и  $U_{НОМ} = U_{\delta}$ , то

$$I_K^{(3)} = I_K^{(3)*} \cdot I_{\delta}$$

$$I_K^{(3)} = \frac{I_{\delta}}{X_{PE3*}}$$

$$S_K = \frac{S_{\delta}}{X_{PE3*}}$$

Пример: имеется система неограниченной мощности.

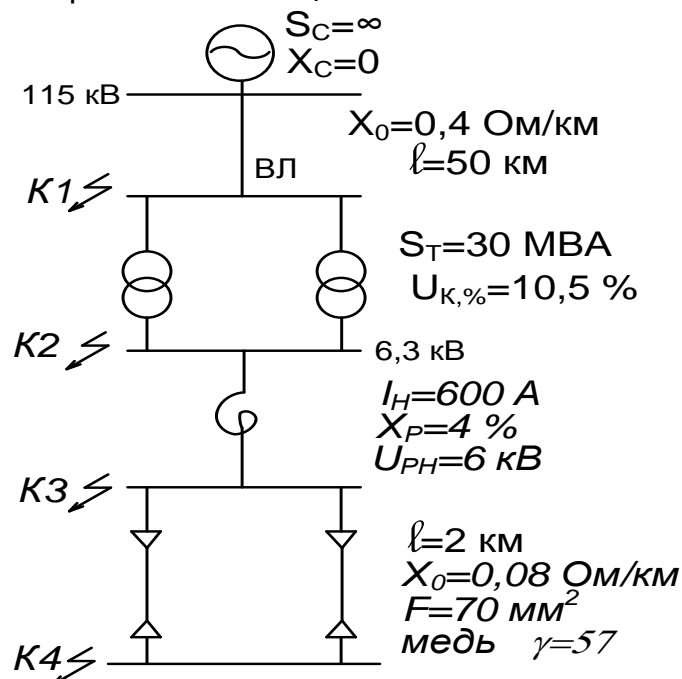
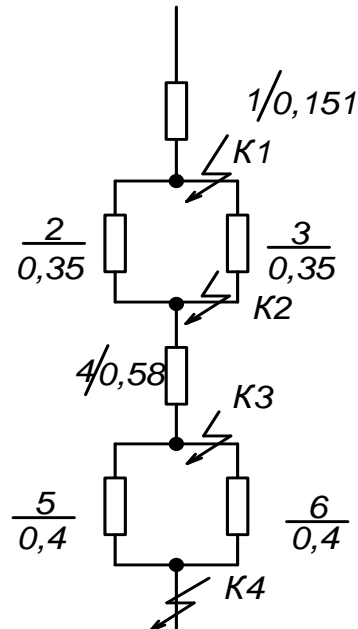


Схема замещения:



Принимаем  $S_6 = 100$  МВА.

1) Рассчитаем сопротивление  $X_1$  в относительных единицах:

$$X_{1*} = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_6}{U_{НОМ}^2} = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_6}{U_6^2}, \quad \text{где } U_6 = 115 \text{ кВ}$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА}$$

$$X_{1*} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,151$$

$$X_{PE31*} = X_{1*}$$

$$I_K^{(3)} = \frac{I_6}{X_{PE31*}} = \frac{0,5}{0,151} = 3,31 \text{ кА}$$

Ударный ток:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{n0} \cdot \kappa_y = \sqrt{2} \cdot I_K^{(3)} \cdot \kappa_y = 2,55 \cdot I_K^{(3)} = 2,55 \cdot 3,31 = 8,44 \text{ кА}$$

$$S_K = \frac{S_6}{X_{PE31*}} = \frac{100}{0,151} = 660 \text{ МВА}$$

2) Далее рассчитаем относительное сопротивление трансформатора:

$$X_{2*} = X_{3*} = 0,01 \cdot U_{K, \%} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ TP}} = 0,01 \cdot 10,5 \cdot \frac{100}{30} = 0,35$$

$$X_{PE32*} = X_{1*} + \frac{X_{2*}}{2} = 0,151 + \frac{0,35}{2} = 0,326$$

для точки K2  $U_6 = 6,3$  кВ.  $S_6$  не меняется.

$$I_{\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ } \kappa A$$

$$I_K^{(3)} = \frac{I_{\bar{o}}}{X_{PE32*}} = \frac{9,16}{0,326} = 28,1 \text{ } \kappa A$$

$$i_v = 2,55 \cdot I_K^{(3)} = 2,55 \cdot 28,1 = 71,6 \text{ } \kappa A$$

$$S_K = \frac{S_{\bar{o}}}{X_{PE3*2}} = \frac{100}{0,326} = 307 \text{ } MBA$$

$$3) \quad X_{*4} = 0,01 \cdot X_P \% \cdot \frac{I_{\bar{o}} \cdot U_{HOM}}{I_{HOM} \cdot U_{\bar{o}}} = 0,01 \cdot 4 \cdot \frac{9,16 \cdot 6}{0,6 \cdot 6,3} = 0,58$$

$$X_{\Delta\dot{A}\zeta3*} = X_{1*} + \frac{X_{2*}}{2} + X_{4*} = 0,151 + \frac{0,35}{2} + 0,58 = 0,906$$

$$I_K^{(3)} = \frac{I_{\bar{o}}}{X_{PE33*}} = \frac{9,16}{0,906} = 10 \text{ } \kappa A$$

$$i_v = 2,55 \cdot I_K^{(3)} = 2,55 \cdot 10 = 25,5 \text{ } \kappa A$$

$$S_K = \frac{S_{\bar{o}}}{X_{PE3*3}} = \frac{100}{0,906} = 110 \text{ } MBA$$

$$4) \quad X_{5*} = X_{6*} = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2} = 0,08 \cdot 2 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,4$$

$$r_5 = r_6 = \frac{1000 \cdot \ell}{\gamma \cdot F} = \frac{1000 \cdot 2}{57 \cdot 70} = 0,539 \text{ } \hat{=} \text{ } \hat{=}$$

$$r_{*5} = r_{*6} = \frac{S_{\bar{o}} \cdot r}{U_{HOM}^2} = \frac{100 \cdot 0,539}{6,3^2} = 1,36$$

$$X_{\Delta\dot{A}\zeta4*} = X_{1*} + \frac{X_{2*}}{2} + X_{4*} + \frac{X_{5*}}{2} = 0,151 + \frac{0,35}{2} + 0,58 + \frac{0,4}{2} = 1,106$$

$$r_{pez4*} = \frac{r_{5*}}{2} = 0,68$$

$$\frac{r_{pez*}}{X_{pez*}} = \frac{0,68}{1,106} > \frac{1}{3}$$

$$Z_{pez*} = \sqrt{r_{PE3*4}^2 + X_{PE3*4}^2} = \sqrt{0,68^2 + 1,106^2} = 1,298$$

$$I_K^{(3)} = \frac{I_{\bar{o}}}{Z_{PE3*}} = \frac{9,16}{1,298} = 7 \text{ } \kappa A$$

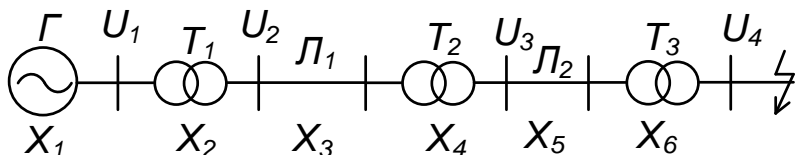
$$T_a = \frac{X_{PE34*}}{314 r_{PE3*4}} = \frac{1,106}{314 \cdot 0,68} = 0,004$$

$$\kappa_y = 1 + e^{-0,01/0,004} = 1 + 0,08 = 1,08$$

$$i_v = 1,08 \cdot \sqrt{2} \cdot I_K^{(3)} = 1,08 \cdot \sqrt{2} \cdot 7 = 10,7 \text{ } \kappa A$$



### Расчет токов КЗ в именованных единицах.



Все сопротивления схемы должны быть приведены к одному и тому же базисному напряжению. За базисное напряжение удобно принимать номинальное напряжение той ступени, на которой определяется КЗ. Приведение сопротивления в Омах к базисному напряжению проводят по следующим формулам:

$$X' = X \cdot (k_1 \cdot k_2 \dots k_n)^2, \quad k_i - \text{коэффициенты трансформации}$$

$$U' = U \cdot (k_1 \cdot k_2 \dots k_n)$$

$$I' = I \cdot \left( \frac{1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_n} \right)$$

$$Z' = Z \cdot (k_1 \cdot k_2 \dots k_n)^2$$

При перемножении коэффициентов трансформации получим:

Примем за базисное напряжение  $U_4$ :  $U_4 = U_6$

Для генератора:  $X'_1 = X_1 \cdot \left( \frac{U_4}{U_3} \cdot \frac{U_3}{U_2} \cdot \frac{U_2}{U_1} \right)^2 = X_1 \cdot \left( \frac{U_4}{U_1} \right)^2 = X_1 \cdot \left( \frac{U_6}{U_1} \right)^2$

Для трансформатора  $T_1$ :  $X'_2 = X_2 \cdot \left( \frac{U_4}{U_2} \right)^2 = X_2 \cdot \left( \frac{U_6}{U_2} \right)^2$

Для линии  $L_1$ :  $X'_3 = X_3 \cdot \left( \frac{U_4}{U_2} \right)^2 = X_3 \cdot \left( \frac{U_6}{U_2} \right)^2$

$$U' = U \cdot \frac{U_6}{U_{НОМ}}$$

$$I' = I \cdot \frac{U_{НОМ}}{U_6}$$

$$X' = X \cdot \left( \frac{U_6}{U_{НОМ}} \right)^2$$

За  $U_{НОМ}$  берут ряд напряжений:

$$U_{НОМ} = 0,4; 3,15; 6,3; 10,5; 21; 37; 115; 230 \text{ кВ}$$

Указав на схеме замещения сопротивления элементов схемы в Омах, определим результирующее сопротивление  $X_{вн} (X_{\Sigma})$ .

Если расчет производится в именованных единицах, а сопротивления заданы в относительных единицах, то они пересчитываются.

Формулы расчета:

$$X = X_{*НОМ} \cdot \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot I_{НОМ}} = X_{*НОМ} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$$

$$r = r_{*НОМ} \cdot \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot I_{НОМ}} = r_{*НОМ} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$$

$$I'' = I^{(3)} = I_K = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot (X_C + X_{BH})}$$

$$X_{\Sigma} = X_C + X_{BH}$$

C – система

BH – внешние сопротивления

Максимально возможный ток трехфазного КЗ при повреждении за любым элементом расчетной схемы, определяется при  $X_C=0$ .

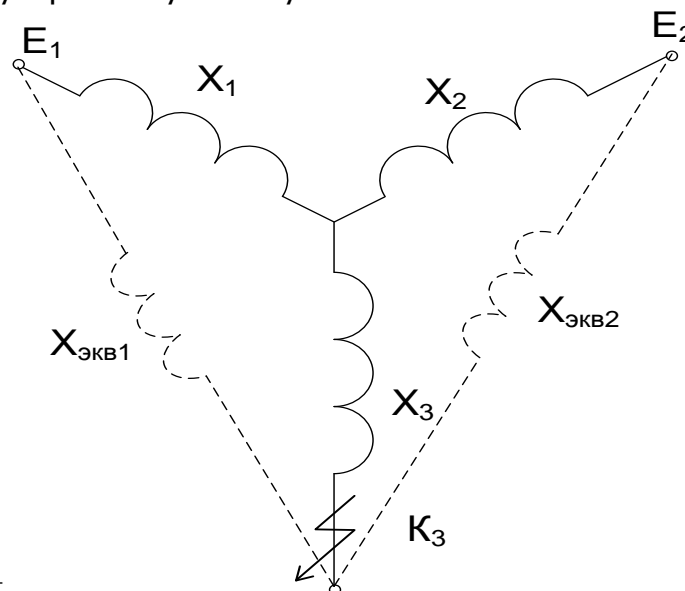
$$I^{(3)}_{max} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot X_{BH}}$$

$$X_C = \frac{U_C}{\sqrt{3} \cdot I^{(3)}} \text{ или } X_C = \frac{U_{НОМ}^2}{S_K^{(3)}} \text{ или } X_C = \frac{U_{НОМ}^2}{S_{ОТКЛ}}$$

$S_{ОТКЛ}$  - мощность отключения установленного аппарата.

При расчете токов КЗ можно применять закон Ома для схемы замещения, но необходимо учитывать несколько источников питания (н/п: энергосистема, ТЭЦ).

Предположим следующую расчетную схему:



$$E_{ЭКВ} = \frac{E_1 \cdot \frac{1}{X_1} + E_2 \cdot \frac{1}{X_2}}{\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2}}$$

Мы получили схему замещения, представляющую собой звезду, преобразованную в треугольник. Токи от каждого источника вычислим с помощью коэффициентов распределения  $C_1$  и  $C_2$ . Эти коэффициенты показывают какая часть тока КЗ, принятого за единицу создается источником питания данной ветви.

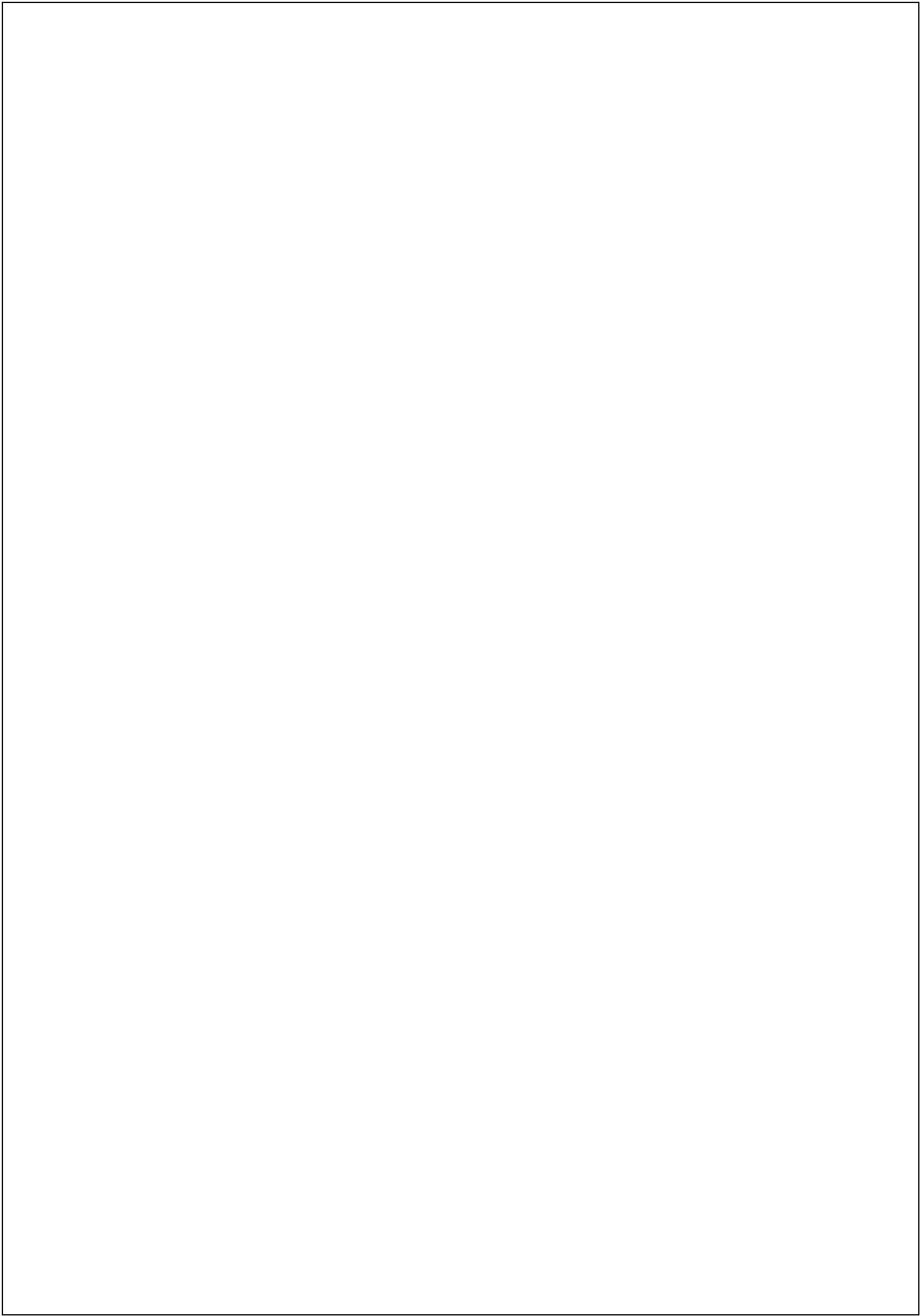
Для двух ветвей:  $C_1 + C_2 = 1$ .

$$C_1 = \frac{X}{X_1}, \quad C_2 = \frac{X}{X_2}$$

$$X = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2}$$

$$C_1 = \frac{X_2}{X_1 + X_2}, \quad C_2 = \frac{X_1}{X_1 + X_2}$$

$$X_{ЭКВ1} = \frac{X_{\Sigma}}{C_1}; \quad X_{ЭКВ2} = \frac{X_{\Sigma}}{C_2};$$



$$X_{\Sigma} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} + X_3$$

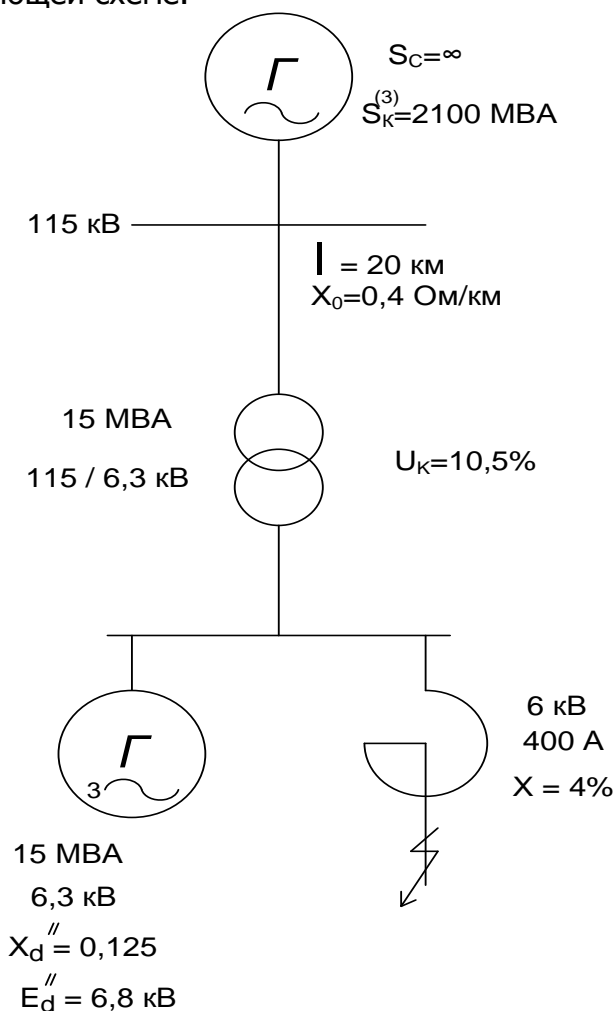
$$X_{\text{ЭКВ1}} = X_3 + X_1 + \frac{X_1 \cdot X_3}{X_2}$$

$$X_{\text{ЭКВ2}} = X_3 + X_2 + \frac{X_2 \cdot X_3}{X_1}$$

- основные формулы для расчета.

Пример:

Определить ток КЗ в следующей схеме.



За базисное напряжение принимаем:  $U_6 = 115$  кВ.

1. рассчитаем схему замещения:

Система:  $X_1 = \frac{U_{НОМ}^2}{S_K^{(3)}} = \frac{115^2}{2100} = 6,3 \text{ Ом}$

Воздушная линия:  $X_2 = X_0 \cdot \ell = 0,4 \cdot 20 = 8 \text{ Ом}$

Трансформатор:  $X_3 = 0,01 \cdot U_{K, \%} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} = 0,01 \cdot 10,5 \cdot \frac{115^2}{15} = 92,5 \text{ Ом}$

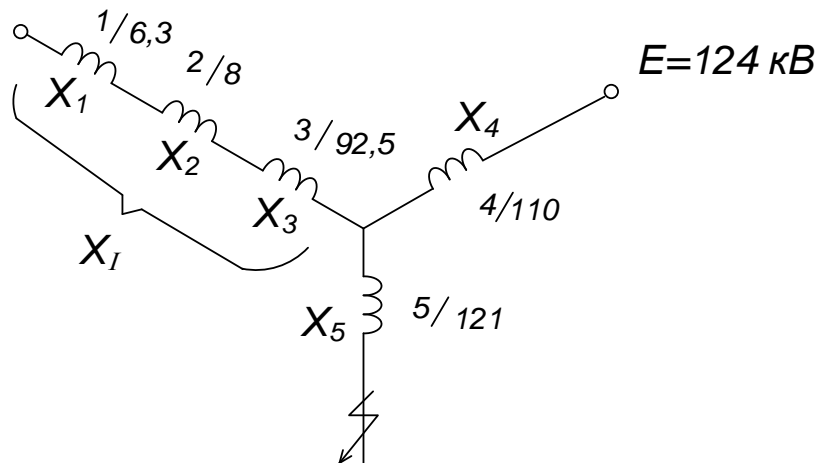
Реактор:  $X_5 = 0,01 \cdot X_P \% \cdot \frac{U_{НОМ P}}{\sqrt{3} \cdot I_{НОМ P}} \cdot \left( \frac{U_6}{U_{НОМ}} \right)^2 = 0,01 \cdot 4 \cdot \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0,4} \cdot \left( \frac{115}{6,3} \right)^2 = 121 \text{ Ом}$

Генератор:  $X_4 = X_d'' \cdot \left( \frac{U_6}{U_{НОМ}} \right)^2 = 0,125 \cdot \left( \frac{115}{6,3} \right)^2 = 110 \text{ Ом}$

$$E' = E_d'' \cdot \frac{U_{\delta}}{U_{НОМ}} = 6,8 \cdot \frac{115}{6,3} = 124 \text{ кВ}$$

Схема замещения:

$U=115 \text{ кВ}$



$$X_I = X_1 + X_2 + X_3 = 6,3 + 8 + 92,5 = 106,8 \text{ Ом}$$

$$E_{\text{ЭКВ}} = \frac{U \cdot \frac{1}{X_I} + E \cdot \frac{1}{X_4}}{\frac{1}{X_I} + \frac{1}{X_4}} = \frac{115 \cdot \frac{1}{106,8} + 124 \cdot \frac{1}{110}}{\frac{1}{106,8} + \frac{1}{110}} = 119 \text{ кВ}$$

$$X_{\Sigma} = \frac{X_I \cdot X_4}{X_I + X_4} + X_5 = \frac{106,8 \cdot 110}{106,8 + 110} + 121 = 175,2 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{ЭКВ1}} = X_I + X_5 + \frac{X_I \cdot X_5}{X_4} = 106,8 + 121 + \frac{106,8 \cdot 121}{110} = 345 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{ЭКВ2}} = X_5 + X_4 + \frac{X_5 \cdot X_4}{X_I} = 121 + 110 + \frac{121 \cdot 110}{106,8} = 356 \text{ Ом}$$

$$I_{\Sigma} = \frac{E_{\text{ЭКВ}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma}} = \frac{119}{\sqrt{3} \cdot 175,2} = 392 \text{ А}$$

$$I_1' = \frac{E_{\text{ЭКВ}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{ЭКВ1}}} = \frac{119}{\sqrt{3} \cdot 345} = 199 \text{ А}$$

$$I_2' = \frac{E_{\text{ЭКВ}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{ЭКВ2}}} = \frac{119}{\sqrt{3} \cdot 356} = 193 \text{ А}$$

$$I_1 = I_1' \cdot \frac{U_{\delta}}{U_{НОМ}} = 199 \cdot \frac{115}{6,3} = 3632,5 \text{ А}$$

$$I_2 = I_2' \cdot \frac{U_{\delta}}{U_{НОМ}} = 193 \cdot \frac{115}{6,3} = 3523 \text{ А}$$

$$I_K = I_1 + I_2 = 3632,5 + 3523 = 7155,5 \text{ А}$$

### Расчет токов КЗ по расчетным кривым.

Используется при КЗ вблизи источника питания (на шинах электростанций или на линиях близлежащих к ней)

$$I'' = I_{n0} - I_k$$

Периодическую составляющую находят по расчетным кривым представляющим зависимость  $K_t$  (кратность периодической составляющей тока КЗ)  $X^*_{расч}$ .

Для времени принимаемого от начала возникновения КЗ указанные кривые рассчитаны для одного турбо или гидрогенератора с АРВ (автоматическая разгрузка).

$$X^*_{расч} = \frac{X^*_{\delta} \cdot S_{ном\Sigma}}{S_{\delta}} ; \text{где } S_{ном\Sigma} - \text{это суммарная номинальная мощность источника питания}$$

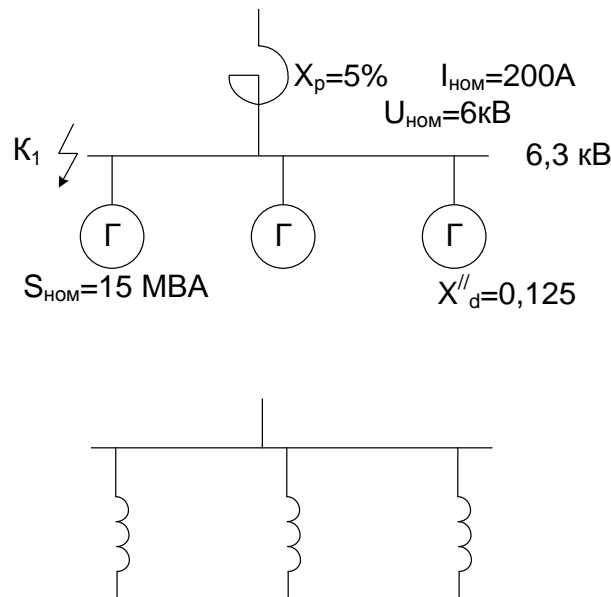
Если принять  $S_{\delta} = S_{ном\Sigma}$ , то  $X^*_{расч} = X^*_{\delta}$  и по расчетным кривым определяем ток

$$I_t = K_t \cdot I_{\Sigma ном} = K_t \cdot \frac{S_{\Sigma ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} ; \text{где } I_{\Sigma ном} - \text{суммарный ток источника питания, } U_{ном} -$$

напряжение ступени для которой рассматривается КЗ.  $S_t = K_t \cdot S_{\Sigma ном}$

#### Задача:

Определить токи и мощность КЗ на шинах электростанции на которой установлены 3 турбогенератора с АРВ.



За расчетную балансовую мощность примем суммарную мощность турбогенераторов.

$$S_{\delta} = S_{ном\Sigma} = 3 \cdot 15 = 45 \text{ МВА}$$

$$X_{\Gamma} = \frac{X''_d \cdot S_{ном}}{S_{\delta}} = \frac{0,125 \cdot 45}{15} \quad (!)$$

$$X_{расч*} = \frac{X_{\Gamma}}{3} = 0,125 \quad X_{расч*} = 0,125 \quad t = 0 \Rightarrow$$

$$K_t = 8 \quad I_{\Sigma} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{45}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 4,1 \text{ кА}$$

$$I_{n0} = K_t \cdot I_{\Sigma} = 8 \cdot 4,1 = 32,8 \text{ кА}$$

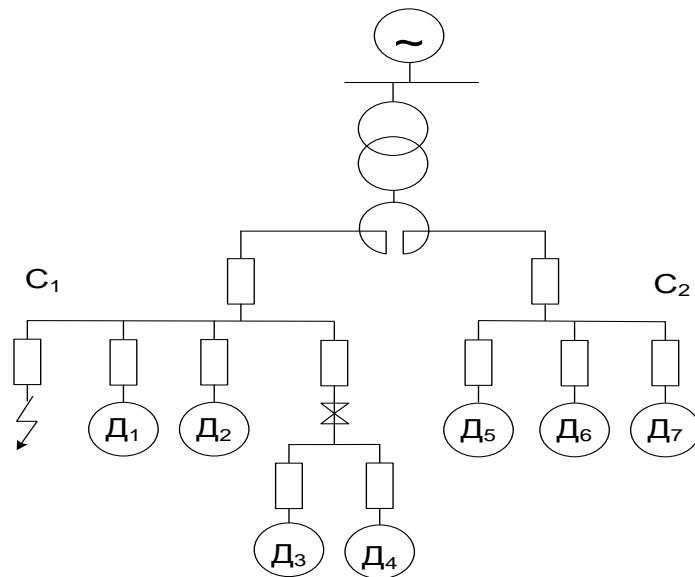
$$S_K = K_t \cdot S_{\Sigma ном} = 8 \cdot 45 = 360 \text{ МВА}$$

$$i_y = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_0 = 1,91 \cdot \sqrt{2} \cdot 32,8 = 89 \text{ кА}$$

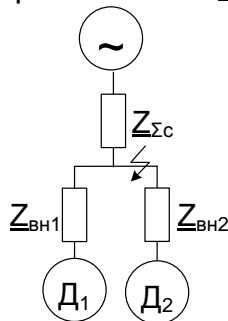
### Расчет токов КЗ в сетях предприятий с двигательной нагрузкой.

При расчете систем электроснабжения 6-10 кВ в ряде случаев оказывается, что токи подпитки от двигателя превосходят токи КЗ от системы.

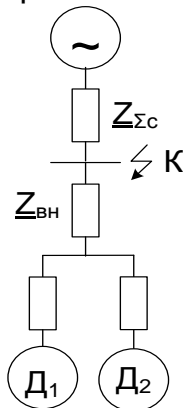
Метод расчета токов КЗ с учетом двигателей зависит от места их расположения в расчетной схеме.



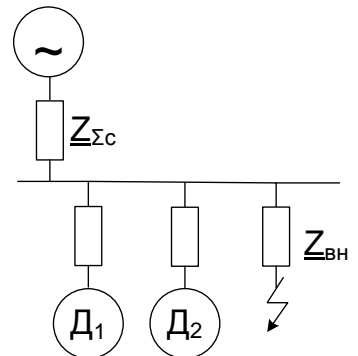
- 1) Различают радиальную схему в которой каждый двигатель связан с точкой трехфазного КЗ внешним индивидуальным сопротивлением  $Z_{\text{вн}i}$



- 2) Также различают схемы в которых точка КЗ находится за общим для группы двигателей сопротивлением  $Z_{\text{вн}}$



- 3) Точка КЗ находится за общим для двигателя и сопротивления системы.



Если по радиальной схеме включены разнотипные двигатели АД и СД с разными параметрами, то их надо учитывать индивидуально каждый. Остальная часть схемы должна быть преобразована относительно точки КЗ результирующим сопротивлением системы. Это сопротивление определяет составляющую тока КЗ от системы неизменную во времени. Если внешнее индивидуальное сопротивление  $Z_{BH*}$  не превышает 10-20% от сверхпереходного

сопротивления двигателя ( $X_{d*}^{//} = \frac{1}{I_{\dot{I}*}}$ )  $|Z_{BH*}| < (0,1 \div 0,2) X_{d*}^{//}$

То при расчете тока составляющего  $I_{до}$  учитывать не надо. Кабель длиной не более 200-300 мм и сечением не менее 50-70 мм<sup>2</sup>

$$I_{до} = I_{*П} \cdot I_H \text{ (для всех АД кроме ВДД, ДВДА)}$$

$$I_{до} = 1,2 \cdot I_{*П} \cdot I_H \text{ (ВДД; ДВДА)}$$

Если  $|Z_{BH*}| > (0,1 \div 0,2) X_{d*}^{//}$

$$I_{до} = \frac{I_{*П} \cdot I_H}{1 + \frac{Z_{BH*}}{X_{d*}^{//}}} \text{ (кроме ВДД, ДВДА)}$$

$$I_{до} = \frac{1,2 \cdot I_{*П} \cdot I_H}{1 + \frac{Z_{BH*}}{X_{d*}^{//}}} \text{ (для ВДД; ДВДА)}$$

$$I_{Дт} = I_{до} \cdot e^{-t/T_p'}$$

где:  $T_p'$  -расчетная постоянная времени.

При учете внешнего сопротивления:

$$T_p' = \frac{T_{pД}}{1 + \frac{X_{BH*}}{X_{d*}^{//}}}$$

$T_{pД}$  - расчетная постоянная времени двигателя при КЗ на его выводах (по справочникам)

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ синхронного двигателя при учете его внешнего сопротивления, когда за базисное условие принимают его номинальный ток и напряжение.

$$I_{до} = \frac{E_{*0}^{//} \cdot I_H}{\sqrt{(X_{d*}^{//} + X_{BH*})^2 + r_{BH*}^2}}$$

$X_{d*}^{//}$  -из справочника;  $E_{*0}^{//}$  -сверхпереходное ЭДС в начальный момент КЗ;

$X_{BH*}, r_{BH*}$  - индуктивная и активная составляющие внешнего сопротивления

$$E_{*0}^{//} = \sqrt{\cos^2 \varphi_H + (\sin \varphi_H + X_{d*}^{//})^2}$$

$\cos \varphi_i$  - это номинальный коэффициент мощности АД в режиме перевозбуждения.

Значение периодической составляющей тока КЗ от СД в произвольный момент времени находят по расчетным кривым.

1) Сначала определяем  $I_{до}$

2) по кривым для нужного момента врем находят отношение  $\frac{I_{Дт}}{I_{до}}$

3)  $I_{Дт} = I_{Дт*} \cdot I_{до}$

Апериодическая составляющая  $T_{кз}$  (АД и СД) в любой момент времени определяется как:



$$i_{Дт} = \sqrt{2} \cdot I_{ДО} \cdot e^{-t/T_a}$$

$$i_{y\partial} = K_{y\partial} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{ДО}$$

Если учитываются внешние сопротивления, то значение  $\hat{E}_{\alpha\alpha}$  :

$$\text{АД: } K_{y\partial} = e^{-0,01/T_P'} + e^{-0,01/T_0}$$

$$\text{СД: } K_{y\partial} = 1 + e^{-0,01/T_0}$$

$$T_O = \frac{X_{d*}^{//} + X_{BH*}}{\omega \cdot \left( \frac{X_{d*}^{//}}{\omega \cdot T_{a\partial}} + r_{BH} \right)}$$

$T_{a\partial}$  - из справочных данных

Периодическая составляющая тока КЗ

$$I_t = \sum_{i=1}^n I_{Дти} + I_i$$

Апериодическая составляющая

$$i_{at} = \sqrt{2} \cdot \sum_{i=1}^n I_{ДО} \cdot e^{-t/T_{0i}} + \sqrt{2} \cdot I_i \cdot e^{-t/T_{0c}}$$

$$i_y = \sqrt{2} \cdot \sum_{i=1}^n K_{yi} \cdot I_{ДО} + \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_c$$

$$K_y = 1 - e^{-0,01/T_{0c}}$$

## Выбор числа и мощности трансформаторов.

Число трансформаторов, как и число питающих линий, определяют в зависимости от категории потребителей. Для потребителей 3-ей категории, а иногда и для 2-ой, используют однитрансформаторную подстанцию. Если основная часть потребителей 1-ая и 2-ая категория, применяют двухтрансформаторную подстанцию. В виде исключения иногда используют трехтрансформаторную подстанцию.

При выборе мощности трансформаторов:

1. трансформаторы с мощностью более 1000 кВА предусматривают в цехах с высокой удельной плотностью нагрузки, при наличии электроприемников с частичными пиками нагрузки (сварочные аппараты) и электроприемников большой мощности.
2. стремятся к наибольшей однотипности трансформаторов.
3. располагают в цехе с расчетной мощностью более 1000 кВА не меньше двух трансформаторов, даже если там нет потребителей 1-ой категории.
4. трансформаторы выбирают так, чтобы при выходе из строя одного трансформатора, оставшийся мог нести всю оставшуюся нагрузку 1-ой и 2-ой категории, при этом потребителей 3-ей категории можно отключать.

## Выбор мощности трансформатора по полной расчетной мощности.

1)  $S_{p\Sigma}$

$$S_{НОМ Т} \geq \frac{S_{p\Sigma}}{2 \cdot 0,7}$$

$$1,4 \cdot S_{НОМ Т} \geq S_{p\Sigma}$$

**Пример:**  $S_{p\Sigma} = 16600 \text{ кВА}$

I, II – 75%

$$S_{НОМ Т} = \frac{16600}{2 \cdot 0,7} = 11857 \text{ кВА}$$

Предположим  $S_{НОМ} = 10000 \text{ кВА}$

Проверим на перегрузочную способность:

$$1,4 \cdot 10000 \leq 16600$$

$$1,4 \cdot 10000 \geq (16600 - 4150) \text{ без III категории}$$

2) выбор числа и мощности по перегрузочной способности трансформатора (по суточному графику нагрузки).

Из суточного графика известно  $S_{cp}$ ,  $S_m$

Дано:  $S_{cp}$ ,  $S_m$ ,  $t$  – продолжительность максимума нагрузки

$$k_{3Г} = \frac{S_{cp}}{S_m}$$

$k_{3Г}$  – коэффициент заполнения графика

Определяем по  $k_{3Г}$  и  $t$ :

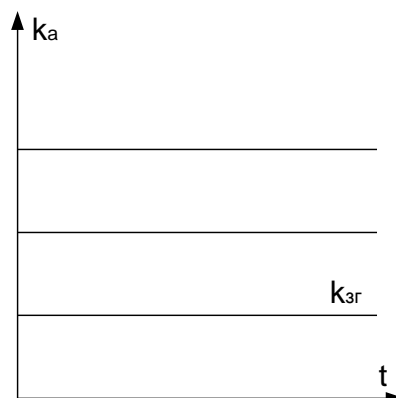
$$k_a = k_n = \frac{S_m}{S_n}; \Rightarrow S_n = \frac{S_m}{k_a}$$

Далее проверка:

$$S_{cp} \leq k_a \cdot 1,4 \cdot S_n \leq 1,05 \cdot S_n$$

**Пример:**  $S_m = 18000 \text{ кВА}$ ,  $t = 24$ ,  $S_{cp} = 13000 \text{ кВА}$

I, II – 75%



$$k_{3Г} = \frac{S_{cp}}{S_m} = \frac{13000}{18000} = 0,72$$

$$k_n = 1,18 \text{ (при } k_{3Г} = 0,72 \text{ и } t = 24)$$

$$S_n = \frac{S_m}{k_a} = \frac{18000}{1,18} = 15500 \text{ кВА}$$

$$16000 \cdot 1,4 > 0,72 \cdot 18000 = 13000$$

## **Разъединители. Отделители. Короткозамыкатели. Замыкатели.**

### **Разъединитель QS**

Это электрический аппарат предназначенный для создания видимых разрывов электрических сетей, с целью обеспечения безопасности людей осматривающих и ремонтирующих оборудования электрических установок высокого напряжения.

### **Отделитель QR**

Это разъединитель с автоматическим отключающим приводом, включают отделители вручную, они могут отключать токи намагничивания трансформаторов.

### **Короткозамыкатель QK**

Это аппарат предназначенный для создания искусственного КЗ. Совместное применение отделителей и короткозамыкателей на подстанциях напряжением 35-220 кВ позволяет отказаться от использования выключателей.

### **Заземлитель QS**

Это однополюсный аппарат включаемый в нейтраль трансформаторов в зависимости от режима работы нейтрали, она может быть заземлена и разземлена.

Принцип действия заземлителя и короткозамыкателя аналогичны, но заземлители включают и выключают вручную.

### **Выбор и проверка аппаратов, изоляторов и токоведущих частей.**

Токоведущие части (шины, кабели) и все виды аппаратов: выключатели, разъединители, предохранители, измерительные аппараты должны выбираться в соответствии с максимальными расчетными величинами (ток, напряжение, мощность отключения) для нормального режима и режима КЗ.

Для их выбора сравнивают указанные расчетные величины с допустимыми значениями для токоведущих частей и высоковольтного оборудования.

#### Выбор и проверка шин

Шины выбирают по расчетному току, номинальному напряжению, условиям окружающей среды и проверяют на термическую и динамическую устойчивость.

1) Минимальная площадь сечения шины выбирается по термической устойчивости:

$$F_{TY} = I_{\infty} \frac{\sqrt{t_{np}}}{c}$$

$I_{\infty}$  -установившийся ток КЗ в А

$t_{np}$  - приведенное время, это время КЗ в течении которого  $I_{\infty}$  выделяет тоже количество теплоты, что и изменяющийся ток КЗ за действительное время  $t_{np} = 0,2 \div 0,25 \text{ с}$ .

$c$  - термический коэффициент. Для алюминиевой шины  $c=88$ ; для медной шины  $c=171$ ; для стальной шины  $c=60$ .

2) Динамическая устойчивость характеризуется допустимым механическим напряжением на изгиб.

$$\sigma_p = \frac{1,76 \cdot 10^{-3} \cdot i_y^2 \cdot l^2}{a \cdot W}$$

$i_y$  -ударный ток КЗ в кА;

$l$  -расстояние между опорными изоляторами в см;

$a$  -расстояние между осями шин смешанных фаз см;

$W$  -момент сопротивления в см<sup>3</sup>.

Пример:

Выбрать шины и проверить их в режиме КЗ если дано:  $I_n = 510 \text{ А}$  ;  $I_{\infty} = 2 \text{ кА}$  ;  $i_y = 5,1 \text{ кА}$  ;  
 $a = 250 \text{ мм}$  ;  $l = 900 \text{ мм}$  .

По расчетному току выбираем алюминиевые шины размером 40х5 мм с  $I_{дон} = 540 \text{ А}$

$$F_{TY} = I_{\infty} \frac{\sqrt{t_{np}}}{c} = 2000 \cdot \frac{\sqrt{0,2}}{88} = 10,2 \text{ мм}^2$$

Высчитываем момент сопротивления при расположении шин плашмя:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

При расположении шин на ребро:

$$W = \frac{b^2 \cdot h}{6}$$

где:  $b$  - толщина полосы (5 мм)

$h$  - высота (ширина) шины (40 мм)

Для нашего примера:  $W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,5 \cdot 4^2}{6} = 1,33 \text{ см}^3$

$$\sigma_p = \frac{1,76 \cdot 10^{-3} \cdot i_y^2 \cdot l^2}{a \cdot W} = \frac{1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 5,1^2 \cdot 90^2}{25 \cdot 1,33} = 11,2 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{дон ал} = 80 \text{ МПа} ; \sigma_{дон меди} = 170 \text{ МПа} ; \sigma_{дон стали} = 190 \text{ МПа}$$

$$F_{TY} = 10,2 \text{ мм}^2 < S = 200 \text{ мм}^2$$

$$\sigma_{дон ал} = 80 \text{ МПа} > \sigma_p = 11,2 \text{ МПа}$$

### **Выбор и проверка кабелей.**

Кабели выбирают по расчетному току, напряжению способу прокладки условиям окружающей среды и проверяют на термическую устойчивость при КЗ.

Проверка на термическую устойчивость:

$$S_{\min} = I_{\infty} \frac{\sqrt{t_{np}}}{c}$$

Пример:

Дано: Алюминиевый кабель  $U = 10 \text{ кВ}$ ; сечением  $S_p = 35 \text{ мм}^2$ ;  $I_{K3} = I_{\infty} = 6500 \text{ А}$ ;

$$t_{np} = t_{\text{выкл}} + t_{\text{защ}}$$

$$t_{\text{выкл}} = [0,15 \div 0,2]; \quad t_{\text{защ}} = [0,05 \div 0,5]$$

$$t_{np} = t_{\text{выкл}} + t_{\text{защ}} = 0,15 + 0,45 = 0,6 \text{ с}$$

$$S_{\min} = 6500 \frac{\sqrt{0,6}}{88} \approx 60 \text{ мм}^2$$

$S_{\min} < S_p$  не выполняется

$$\text{если } t_{np} = 0,2 \text{ с, то } S_{\min} = 6500 \frac{\sqrt{0,2}}{88} = 35 \text{ мм}^2$$

### **Выбор и проверка реакторов**

Реакторы выбирают по расчетному току линии и заданному допустимому току КЗ.

Выбор реактора состоит в определении его индуктивного сопротивления  $x_p\%$ , которое необходимо включить в данную цепь, чтобы снизить  $I_{K3}$  до значения  $I_{K3 \text{ доп}}$ .

$x_p\%$  можно определить по формуле:

$$x_p \% = \frac{I_{np}}{I_{K3 \text{ доп}}} \cdot 100\%$$

$I_{np}$  - номинальный ток реактора по каталогу, близкий к току цепи.

Пример:

Необходимо выбрать реактор, чтобы в линии  $U_n = 6 \text{ кВ}$ ,  $I_n = 900 \text{ А}$  снизить до  $I_{K3 \text{ доп}} = 19,3 \text{ кА}$

Выбираем реактор имеющий  $I_n = 1 \text{ кА}$ ,  $I_{np} = 1 \text{ кА}$

$$x_p \% = \frac{1}{19,3} \cdot 100\% = 5,2\%$$

По которому данному условию удовлетворяет реактор РБА-6-1000 напряжением 6кВ,  $x_p \% = 6\%$

### **Выбор и проверка выключателей высокого напряжения и разъединителей**

Выключатели выбирают по номинальному току и напряжению, конструктивному исполнению, роду установки и проверяют на термическую и динамическую устойчивости и отключающую способность в режиме КЗ.

На термическую устойчивость выключатели проверяют по следующему условию:

$$I_{t_n}^2 \cdot t_n \geq I_{\infty}^2 \cdot t_{np}$$

$I_{t_n}^2$  - номинальный ток термической устойчивости выключателя, задаваемый заводом изготовителем

$t_n$  - номинальное расчетное время термической устойчивости

$I_5 = 19 \text{ кА}$  - это означает, что выключатель выдерживает ток 19 кА в течении 5 с.

Динамическую устойчивость выключателя проверяют сравнением расчетного ударного тока  $i_y$

с максимальным допустимым током КЗ  $i_m$  на который рассчитан выключатель:

$$i_y \leq i_m$$

Условие проверки выключателя на отключающую способность:

$$S_k \leq S_{отк}$$

$S_k$  - расчетная мощность КЗ

$S_{отк}$  - отключающая способность выключателя

Разъединители выбирают и проверяют также, как и выключатели, но не выполняется проверка на отключающую способность.

Пример:

Необходимо выбрать выключатель и разъединитель для линии со следующими параметрами:

$$U_n = 10 \text{ кВ}, I_n = 500 \text{ А}, i_y = 20 \text{ кА}, I_k = I_\infty = 14 \text{ кА}, t_{np} = 2 \text{ с}.$$

Выбираем выключатель ВМТ-10 (630 А,  $U_n = 10 \text{ кВ}$ )

Расчетные данные	Данные каталога
$U_n = 10 \text{ кВ}$ $I_n = 500 \text{ А}$ $i_y = 20 \text{ кА}$ $I_\infty^2 \cdot t_{np} = 14^2 \cdot 2 = 392 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ $S_k = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 14 = 242 \text{ МВА}$	$U_n = 10 \text{ кВ}$ $I_n = 630 \text{ А}$ } проверка по номинальному току и напряжению $i_m = 52 \text{ кА}$ - проверка на динамическую устойчивость $I_{10}^2 \cdot t_{10} = 14^2 \cdot 10 = 1960 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ - термическая способность $S_{отк} = 350 \text{ МВА}$ - отключающая способность $I_{отк} = 20 \text{ кА}$

Выбираем разъединитель: РВ-10/600

Расчетные данные	Данные каталога
$U_n = 10 \text{ кВ}$ $I_n = 500 \text{ А}$ $i_y = 20 \text{ кА}$ $I_\infty^2 \cdot t_{np} = 14^2 \cdot 2 = 392 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ $S_k = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 14 = 242 \text{ МВА}$	$U_n = 10 \text{ кВ}$ $I_n = 600 \text{ А}$ } проверка по номинальному току и напряжению $i_m = 35 \text{ кА}$ - динамическая устойчивость $I_5^2 \cdot t_5 = 20^2 \cdot 5 = 2000 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ - термическая способность

### **Выбор и проверка предохранителей**

Их выбирают по конструктивному исполнению, роду установки, номинальному току и напряжению и проверяют на отключающую способность:

$$I_{отк} > I_k, S_{отк} > S_k$$

### **Выбор и проверка выключателей нагрузки**

Выбирают по номинальному току и напряжению, и проверяют на термическую и динамическую устойчивость, а также отключающую способность в нормальном рабочем режиме, а проверяют в режиме КЗ.

Условия:

$$i_m \geq i_y$$

$$I_{отк} \geq I_k$$

$$S_{отк} \geq S_k$$

### **Выбор и проверка трансформаторов тока**

Выбирают по типу, роду установки, номинальному току и напряжению, по нагрузке вторичных цепей обеспечивающей погрешность в пределах паспортного класса точности и проверяют на термическую и динамическую устойчивость к токам КЗ.

1) Условие термической устойчивости:

$$K_t \geq I_\infty \frac{\sqrt{t_{np}}}{I_{ном}}$$

$\hat{E}_t$  - кратность термической устойчивости (приводится в каталогах)

2) Условие динамической устойчивости:

$$K_{дин} \cdot \sqrt{2} \cdot I_n \geq i_y$$

$\hat{E}_{дин}$  - коэффициент динамической устойчивости (в каталогах)

3) Выбор трансформатора по условиям вторичной цепи

$$S_{2н} \geq S_{2р}$$

$S_{2т}$  - номинальная мощность вторичной обмотки (приводится в каталогах)

$S_{2δ}$  - расчетная мощность вторичной обмотки в нормальном режиме

$$S_{2р} = S_{np} + I_2^2 (r_{np} + r_k)$$

$S_{тδ}$  - мощность потребления приборами и реле

$I_2$  - ток во вторичной обмотке

$r_{тδ}$  - сопротивление проводов

$$r_{np} = \frac{S_{2р} - S_{np} - I_2^2 r_k}{I_2^2}$$

$$r_k = 0,1 \text{ Ом}$$

Пример: (продолжение предыдущего примера)

$$U_n = 10 \text{ кВ}, I_n = 500 \text{ А}, i_y = 20 \text{ кА}, I_k = I_\infty = 14 \text{ кА}, t_{np} = 2 \text{ с}.$$

РВ-10/600

Выбираем трансформатор тока: ТПОФ-10-600-0,5

$$K_{дин} = 130$$

$$K_t = 80$$

Расчетные данные	Данные каталога
$U_n = 10 \text{ кВ}$	$U_n = 10 \text{ кВ}$
$I_n = 500 \text{ А}$	$I_n = 600 \text{ А}$
$i_y = 20 \text{ кА}$	$i_y = K_{дин} \cdot \sqrt{2} \cdot I_n = 130 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,6 = 110 \text{ кА}$
$I_\infty^2 \cdot t_{np} = 14^2 \cdot 2 = 392 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$K_t \cdot I_n^2 = (80 \cdot 0,6)^2 = 2300 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

### **Выбор и проверка трансформаторов напряжений**

Выбирают по номинальному напряжению первичной цепи, по типу, роду установки, классу точности и нагрузке, определяемой мощности, которая потребляется катушками приборов и реле. Проверяют на допустимую погрешность измерения:

$$S_n > S_2$$

$S_f$  - номинальная мощность вторичной обмотки

$S_2$  - расчетная мощность подключаемых приборов и реле (из справочников)

### **Режимы работы нейтралей трансформаторов и источников электрической энергии**

Нейтраль – общая точка соединения обмоток генераторов, трансформаторов, а также провод, соединенный с этой точкой.

В зависимости от режима работы нейтрали сети делятся:

1. сети с незаземленными или изолированными нейтральями;
2. сети с резонансно – заземленными (некомпенсированными) нейтральями;
3. сети с эффективно заземленными нейтральями;
4. сети с глухо заземленными нейтральями.

Режим нейтрали определяет ток однофазного КЗ и в зависимости от его величины сети делятся на сети с малыми токами замыкания на землю менее 500 мА (сети 1 и 2 группы) и с большими токами замыкания на землю более 500 мА (сети 3 и 4 группы).

Сети с изолированной нейтралью могут быть следующего вида:

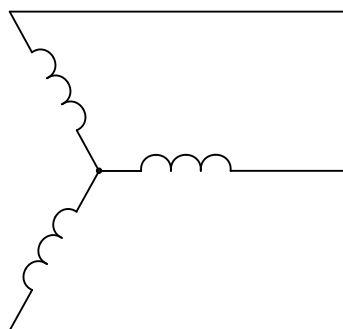


Рисунок 1.

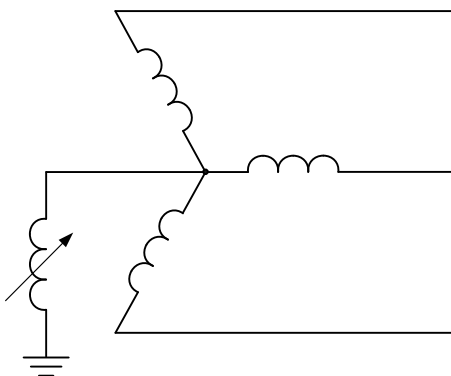


Рисунок 2.

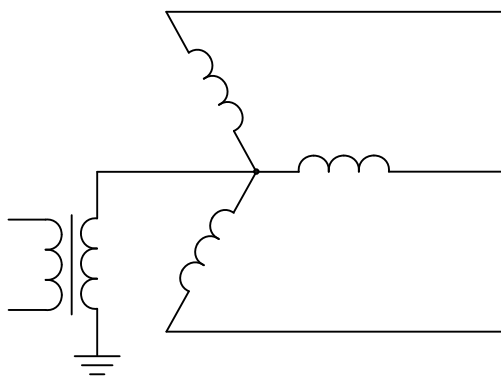


Рисунок 3.

Нейтраль в таких сетях может быть:

1. полностью изолирована от земли (рис. 1);
2. связана с заземляющим устройством через аппараты, имеющие большое сопротивление (рис. 2), либо через реакторы катушки, компенсирующие емкостной ток сети.

При нарушении изоляции одной фазы возникает однофазное КЗ. Напряжение этой фазы относительно земли равно 0. Напряжение двух других фаз относительно земли равно



междуфазному напряжению, а токи этих двух фаз увеличиваются в 3 раза по сравнению с током одной фазы в нормальном режиме.

Из-за малой величины ток КЗ не влияет на междуфазные напряжения и режим работы электроприемников. Поэтому в таких сетях КЗ считается не аварийным, а лишь аномальным режимом, при возникновении которого может оставаться включенной в течение 2 часов.

Коэффициент замыкания на землю:  $k_{zz} = \frac{U'_{nn}}{U_{nn}}$ ,

где  $U'_{nn}$  - напряжение поврежденной фазы при КЗ в другой фазе,

$U_{nn}$  - напряжение этой фазы в нормальном режиме.

В данном случае в сетях с изолированной нейтралью  $k_{zz} = 1,3$ .

С изолированной нейтралью работают следующие сети:

1. трехфазные сети 6-35 кВ, в которых токи замыкания не превышают допустимых значений;
2. трехфазные трехпроводные сети до 1 кВ – сети (220...660)В;
3. все сети низких напряжений, в которых для обеспечения безопасности людей предусматривают защитные мероприятия, не связанные с применением заземления, т.е. защитная изоляция, разделяющие трансформаторы.

Сети с заземленной нейтралью:

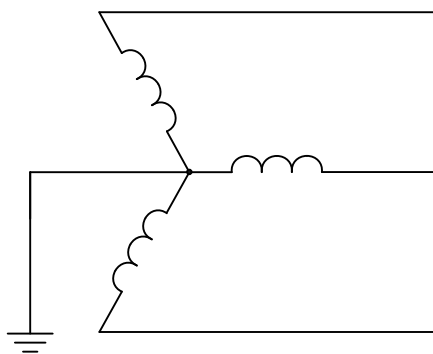


Рисунок 1.

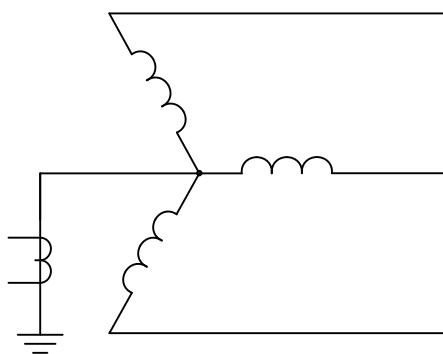


Рисунок 2.

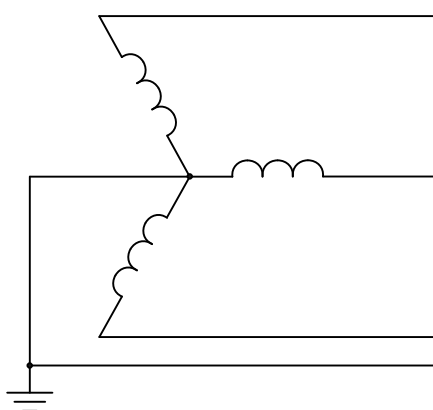


Рисунок 3.

В сетях с заземленной нейтралью нейтраль может заземляться:

1. глухо (рис. 1), т.е. с помощью провода без сопротивлений;
2. через малое сопротивление, например, трансформатор тока (рис. 2). Такое соединение – эффективно заземленная нейтраль.
3. через настроенные индуктивности (дугогасящие катушки), благодаря чему ток в месте замыкания может оказаться равным 0. Такая сеть называется сетью с резонансно заземленной нейтралью (с компенсирующей нейтралью).

Сети с глухим заземлением нейтрали имеют  $k_{33} = 1$ .

Для эффективно заземленной нейтрали  $k_{33} \leq 1,4$ .

4. трехфазная четырехпроводная сеть с заземленным нулевым проводом (рис. 3).

В сетях с глухо заземленной нейтралью большие токи однофазного КЗ являются причиной усложнения и удорожания заземляющих устройств, но при этом изоляция фазных проводов может быть рассчитана на фазное напряжение, что существенно при напряжениях 110 кВ и выше.

Для ограничения тока КЗ в системе ЭС применяют заземление нейтрали не всех работающих трансформаторов, а только их части. Те части нейтрали, которые не включены в работу, называются разземленной нейтралью.

Для возможности разземления нейтрали применяют однополюсные заземлители, параллельно с которыми устанавливаются разрядники. Разрядник защищает изоляцию нулевых выводов обмоток на случай работы с разземленной нейтралью.

Глухое заземление нейтрали применяют в сетях 110 кВ и выше, в четырехпроводных сетях 380/220 и трехпроводных сетях постоянного тока.

### **Расчет токов однофазного КЗ**

В основу расчета несимметричного тока КЗ положен метод симметричных составляющих, согласно которому любая несимметричная система векторов заменяется тремя условными симметричными составляющими прямой обратной и нулевой последовательности.

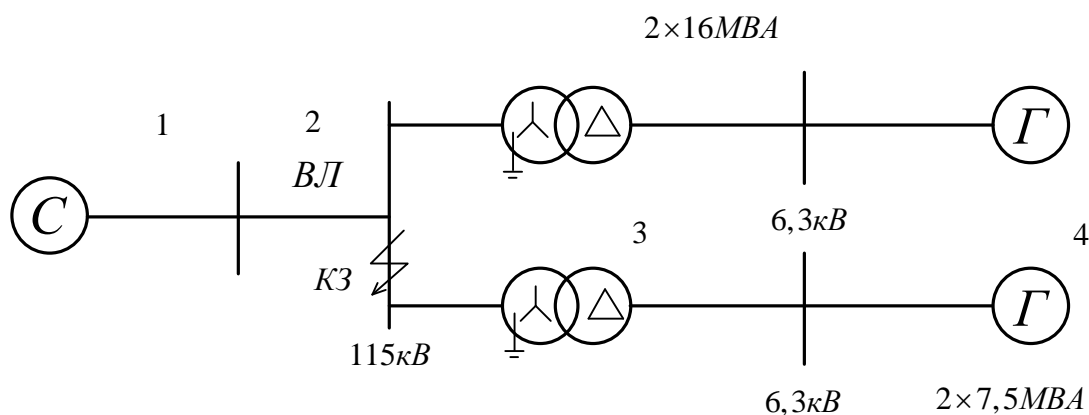
Прямая последовательность аналогична схеме замещения для расчета токов трехфазного КЗ.

Для прямой последовательности сопротивления те же, но нет сопротивления генератора (источника).

В схеме нулевой последовательности сопротивление трансформатора не меняется, а будет меняться сопротивление ВЛ и КЛ.

ВЛ	$X_0/X_1$
1. одноцепная линия без тросов	3,5
2. одноцепная линия со стальными тросами	3
3. одноцепная линия с тросами из цветного металла	2
4. двухцепная линия без тросов	5,5
5. двухцепная линия со стальными тросами	4,7

Для КЛ  $X_0/X_1=(3,5...4,6)$ ,  
 где  $X_0$  – сопротивление нулевой последовательности,  
 $X_1$  – сопротивление прямой последовательности.



$$I^{(3)} = 10000 \text{ A}$$

$$I^{(1)} = 8300 \text{ A}$$

$$X_1 = 0,4 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

$$U_k = 10,5\%$$

$$l = 12 \text{ км}$$

$$X_{d*} = 0,121$$

$$E'' = 1,07$$

$$X_{1,1} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10^3 \cdot 10} = 6,65 \text{ Ом}$$

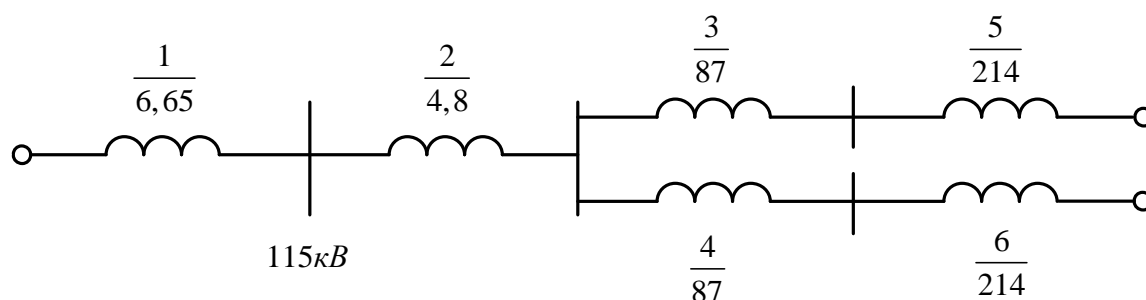
$$X_{1,1} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot I^{(3)}}$$

Примем  $U_{\phi} = 115 \text{ кВ}$ .

$$X_{1,2} = X_1 \cdot l = 0,4 \cdot 12 = 4,8 \text{ Ом}$$

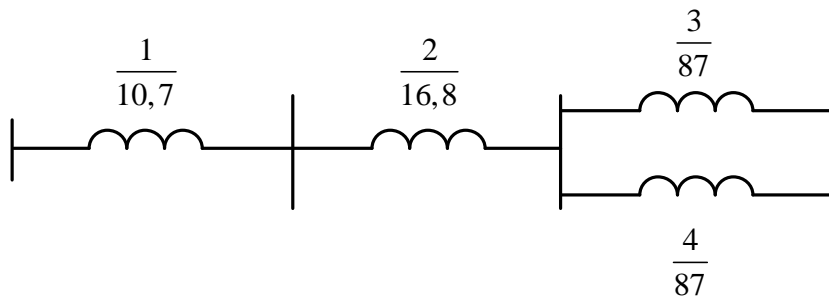
$$X_{1,3} = X_{1,4} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{\phi}}{S} = \frac{0,105 \cdot 115 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^3} = 87 \text{ Ом}$$

$$X_{1,5} = X_{1,6} = X_{d*} \cdot \frac{U_{\phi}}{S_2} = 0,121 \cdot \frac{115 \cdot 10^3}{7,5 \cdot 10^3} = 214 \text{ Ом}.$$



$$U = \frac{115}{\sqrt{3}}$$

Составим схему замещения для обратной последовательности:



Если известен  $I^{(1)}$ , то по формуле  $\frac{I^{(1)}}{\sqrt{3}} = \frac{U / \sqrt{3}}{2 \cdot X_{1,1} + X_{0,1}}$  определяем

$$X_{0,1} = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{I^{(1)}} - 2 \cdot X_{1,1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 10^3}{8300} - 2 \cdot 6,65 = 10,7 \text{ Ом}$$

Возьмем  $\frac{X_0}{X_1} = 5,5$ , тогда

$$X_0 = X_1 \cdot 5,5 = 12 \cdot 0,4 \cdot 5,5 = 16,8 \text{ Ом}$$

Трёхфазное КЗ:

От системы до КЗ:

$$X_{1,1} + X_{1,2} = 6,65 + 4,8 = 11,45 \text{ Ом}$$

От генератора до КЗ:

$$\frac{X_{1,3} + X_{1,5}}{2} = \frac{87 + 214}{2} = 150,5 \text{ Ом}$$

$$X_{1\Sigma} = 11,45 \parallel 150,5 = 10,64 \text{ Ом}$$

$$I^{(3)} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,64} = 6240 \text{ А}$$

Ток двухфазного КЗ:

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I^{(3)} = 5400 \text{ А}$$

Результирующее сопротивление нулевой последовательности:

$$X_{0\Sigma} = (10,7 + 16,8) \parallel \frac{87}{2} = 16,85 \text{ Ом}$$

$$X_{\Sigma}^{(1)} = 2 \cdot X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma}$$

$$I^{(1)} = 3 \cdot I_0 = \frac{3 \cdot U_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma}^{(1)}} = \frac{3 \cdot 115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 38,13} = 5220 \text{ А}.$$