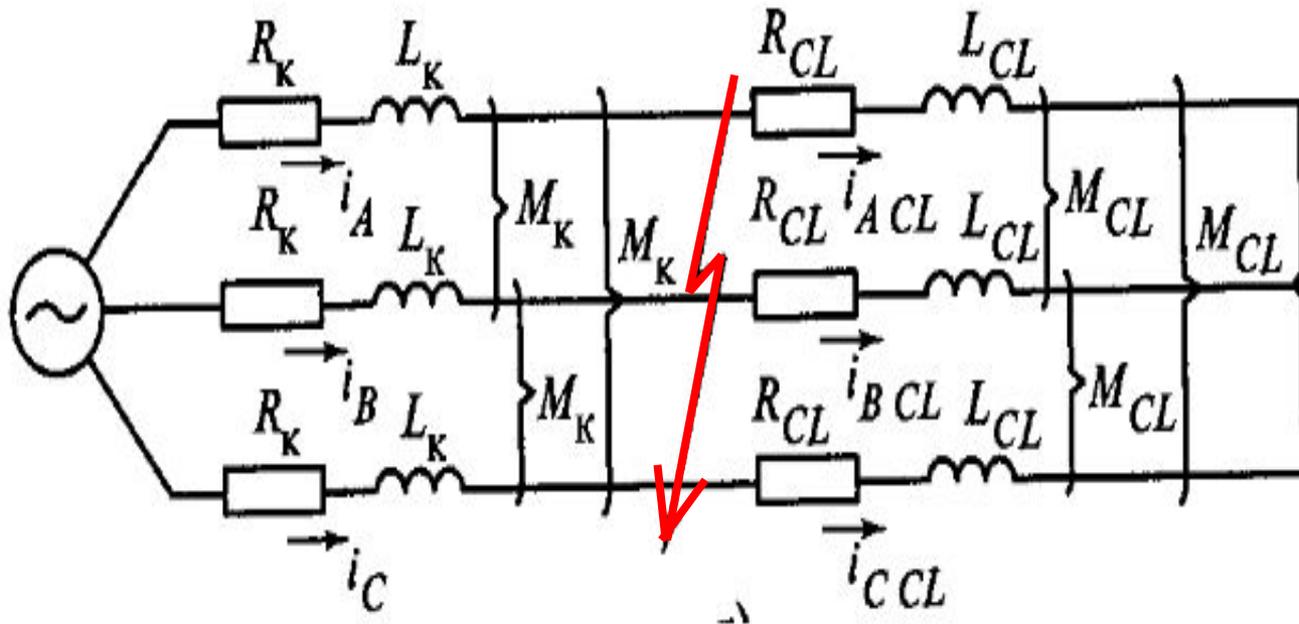


ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ  
КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ В  
АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ ЦЕПИ,  
ПОДКЛЮЧЕННОЙ К ИСТОЧНИКУ  
СИНУСОИДАЛЬНОГО  
НАПРЯЖЕНИЯ

Лекция №2

Рассмотрим следующую симметричную трехфазную цепь с источником питания  $K$  и линией эле



Где:

- $R_K, R_{CL}$  – активные сопротивления
- $L_K, L_{CL}$  – индуктивные сопротивления
- $M_K, M_{CL}$  – взаимные индуктивности

- При трехфазном КЗ в месте, показанном на схеме, цепь делится на две части.
- Правая ее часть оказывается замкнутой накоротко. Левая ее часть осталась присоединенной к источнику синусоидального напряжения.

Запишем уравнение, связывающее ток и падение напряжения в фазе А левой части схемы:

$$U_A = R_K \cdot i_A + L_K \cdot \frac{di_A}{dt} + M_K \cdot \frac{di_B}{dt} + M_K \cdot \frac{di_C}{dt}$$

Поскольку  $i_A + i_B + i_C = 0$

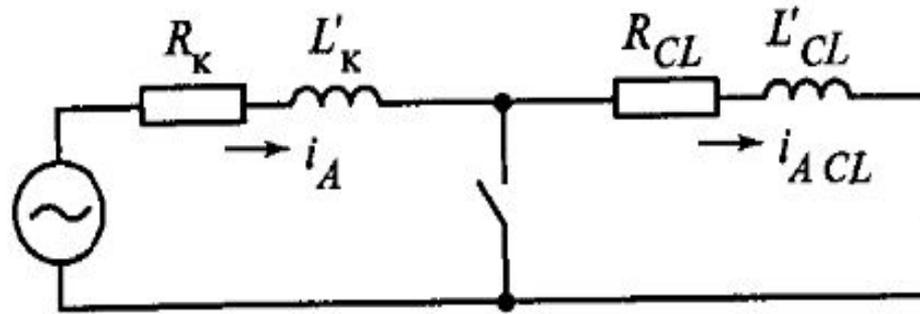
то:  $\frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} = -\frac{di_A}{dt}$

$$U_A = R_K \cdot i_A + (L_K - M_K) \cdot \frac{di_A}{dt}$$

Анализ переходного процесса в трехфазной цепи можно свести к анализу переходного процесса в однофазной цепи, используя вместо  $L_K > L'_K$ , тем самым учитывая влияние двух других фаз на рассматриваемую фазу А.

$$L'_K = L_K - M_K$$

Преобразуем трехфазную схему в однофазную:

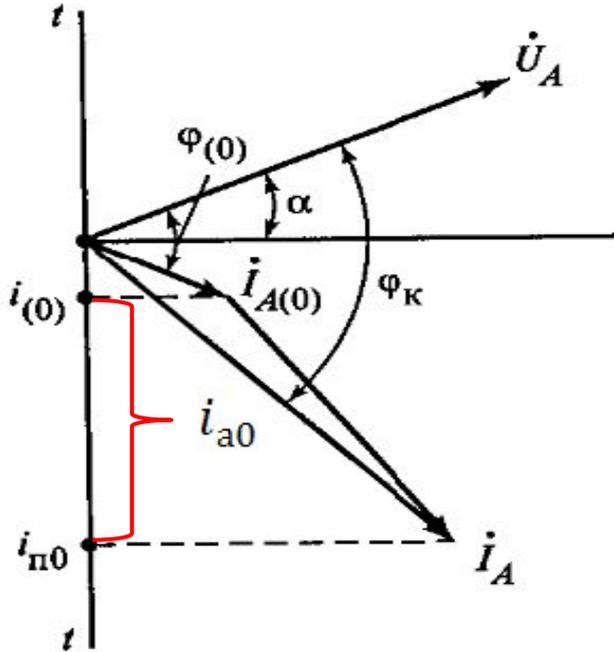


$$i_A = I_m \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + i_{a0} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}$$

Где:

- $\alpha$  – угол включения, т.е. угол между вектором напряжения к моменту короткого замыкания и перпендикуляром к оси времени, проведенным через начало вектора напряжения.
- $\varphi_K$  – угол сдвига по фазе периодической составляющей тока короткого замыкания относительно напряжения.

# Векторная диаграмма тока и напряжения фазы А к моменту КЗ и периодической составляющей тока этой фазы в начальный момент КЗ



$\dot{I}_{A(0)}$  - вектор тока фазы А до короткого замыкания

$\dot{I}_{\pi 0}$  - вектор периодической составляющей тока этой же фазы в начальный момент короткого замыкания

$i_{a0}$  - модуль начального значения аperiodической составляющей тока короткого замыкания

$\varphi_K > \varphi_{(0)}$   
 $\varphi_K \approx (85-90)^\circ$  - для сети с воздушными ЛЭП

# Ток к моменту КЗ:

$$i_{(0)} = i_{п0} + i_{a0}$$

Отсюда:

$$i_{a0} = i_{(0)} - i_{п0} = I_{m(0)} \cdot \sin(\alpha - \varphi_{(0)}) - I_m \cdot \sin(\alpha - \varphi_K)$$

$$I_{m(0)} = \frac{U_m}{\sqrt{(R_K + R_{CL})^2 + (\omega L'_K + \omega L'_{CL})^2}} \quad \text{– амплитуда синусоидального тока в цепи к моменту КЗ.}$$

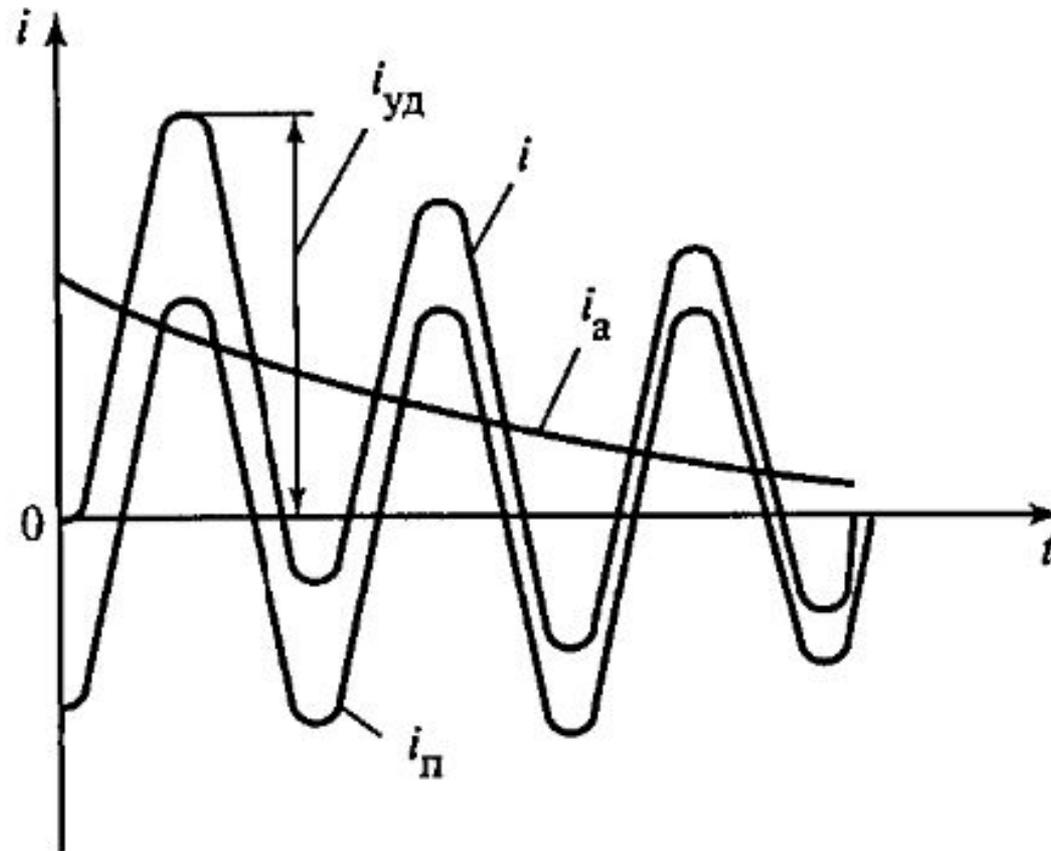
- Начальное значение периодической составляющей зависит от угла включения  $\alpha$  и предшествующей нагрузки.
- В качестве расчетного случая принимается случай, когда ток в цепи до КЗ отсутствовал. При этом:

$$i_{a0} = -i_{п0} = -I_m \sin(\alpha - \varphi_K)$$

И в этом случае полный ток КЗ можно определить:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) - I_m \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}$$

# Изменение во времени тока КЗ и его составляющих



# Ударный ток

- Ударный ток КЗ- это наибольшее мгновенное значение тока КЗ в одной из фаз трехфазной электрической цепи, когда короткое замыкание происходит в момент прохождения напряжения этой фазы через нулевое значение, а до возникновения КЗ ток в цепи отсутствовал.
- Это самый тяжелый случай.
- Ударный ток используется для проверки оборудования.

# ДЕЙСТВИЯ ТОКА КОРотКОГО ЗАМЫКАНИЯ

- Термическое действие – быстрый нагрев, нарушение свойств изоляции вплоть до потери изоляционной способности

$$\frac{I_{\text{кз}}}{I_{\text{ном}}} = (10 - 20)\text{раз}$$

- Электродинамическое действие-механическое взаимодействие проводов с током. При больших токах возможно повреждение оборудования.

$$i_{уд} = I_m + I_m \cdot e^{-\frac{0,01}{T_a}}$$

$t=0,01$  с – наступает ударный ток при частоте 50 Гц

$$i_{уд} = I_m \cdot \left( 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \right) = I_m \cdot K_{уд}$$

$K_{уд}$  – ударный коэффициент, который показывает, во сколько раз ударный ток КЗ больше амплитуды периодической составляющей тока КЗ.

$$K_{уд} = \frac{i_{уд}}{I_m} = \frac{i_{уд}}{\sqrt{2} \cdot I_{по}}$$

Постоянная времени ..... аperiodической составляющей:

$$T_a = \frac{L_K'}{R_K} = \frac{X_K'}{\omega \cdot R_K}$$

Если  $\frac{X}{R} > 5$    $K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$

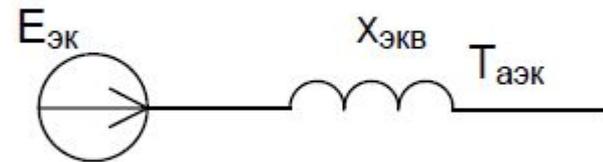
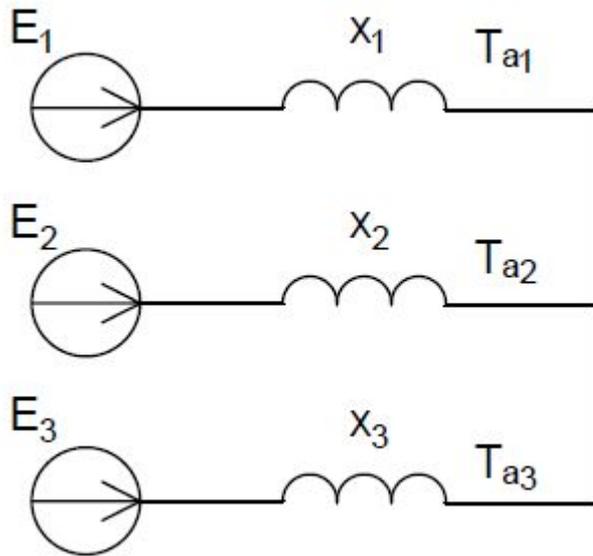
Если  
и  $\frac{X}{R} < 5$    $K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01(0,5+\varphi_K/\pi)}{T_a}}$

МЭК:  $K_{уд} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3}{w \cdot T_a}}$

Для случая трехфазного  $K'_{T_a^{(3)}} = \frac{X_{ЭКВ}}{w \cdot R_{ЭКВ}}$

- Постоянную времени затухания рассчитывают для каждой независимой ветви.

- Для упрощения расчета принимается, что апериодическая составляющая  $i_a$  представляет собой эквивалентную экспоненту в месте КЗ и затухает с



# Методы расчета $T_a$

- С использованием индуктивных и активных сопротивлений, найденных при поочередном исключении из расчетной схемы всех активных, а затем всех индуктивных сопротивлений:

$$T_a = \frac{X_{\text{ЭКВ}}(R = 0)}{\omega \cdot R_{\text{ЭКВ}}(X = 0)}$$

- С использованием составляющих комплексного эквивалентного (входного) сопротивления расчетной схемы, найденного при промышленной частоте:

$$T_a = \frac{\text{Im}(Z_{\text{ЭКВ}})}{\omega \cdot \text{Re}(Z_{\text{ЭКВ}})}$$

- С использованием составляющих комплексного эквивалентного (входного) сопротивления расчетной схемы, определенного при некоторой оптимальной частоте (20 Гц):

$$T_a = 2,5 \cdot \left( \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{\omega \cdot R_{\text{ЭКВ}}} \right)$$

# Алгоритм расчета $i_{уд}$ и $I_{по}$

1. Рассчитывают индуктивное сопротивление схемы замещения, используя метод относительных единиц
2. Упрощают схему относительно точки КЗ до вида, когда в точке КЗ сходятся несколько независимых ветвей
3. В каждой независимой ветви определяются токи  $I_{поi}$
4. Рассчитывается полный ток  $I_{по}$  суммированием токов независимых ветвей  $I_{поi}$
5. Определяют активное сопротивление схемы замещения
6. Эквивалентируют схему с активными сопротивлениями до вида, как в п.2

7. Рассчитывают постоянную времени для каждой независимой ветви:

$$T_{ai} = \frac{X_i'}{\omega \cdot R_i}$$

$X_i'$  – сопротивление **обратной** последовательности  
Для генераторов, синхронных компенсаторов  $X' \neq X$ , поэтому необходимо повторить п.1,2, принимая  $X$  обратной последовательности

8. Определяются ударные коэффициенты для каждой независимой ветви
9. Определяются ударные токи для каждой независимой ветви:

$$i_{удi} = K_{удi} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{поi}$$