

КУРС ЛЕКЦИЙ

по учебной дисциплине

«Переходные процессы в электроэнергетических системах»

Раздел 2 **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ В ЭЭС**

ЛЕКЦИЯ № 3 **Трехфазное короткое замыкание
в простейшей электрической цепи**

Учебные вопросы лекции:

1. Особенности физического процесса короткого замыкания.
2. Расчет токов трехфазного короткого замыкания в простейшей электрической цепи.

Любой переходный процесс, как правило, начинается с резкого изменения параметров системы, наиболее частой причиной которых является короткое замыкание.

Современные методы расчета токов КЗ основаны на анализе физических явлений, сопровождающих короткие замыкания.

Симметричное трехфазное КЗ с точки зрения его аналитики является наиболее простым, однако вычисления токов и напряжений при несимметричных КЗ могут быть приведены при помощи метода симметричных составляющих к вычислениям этих величин при некотором эквивалентном трехфазном замыкании.

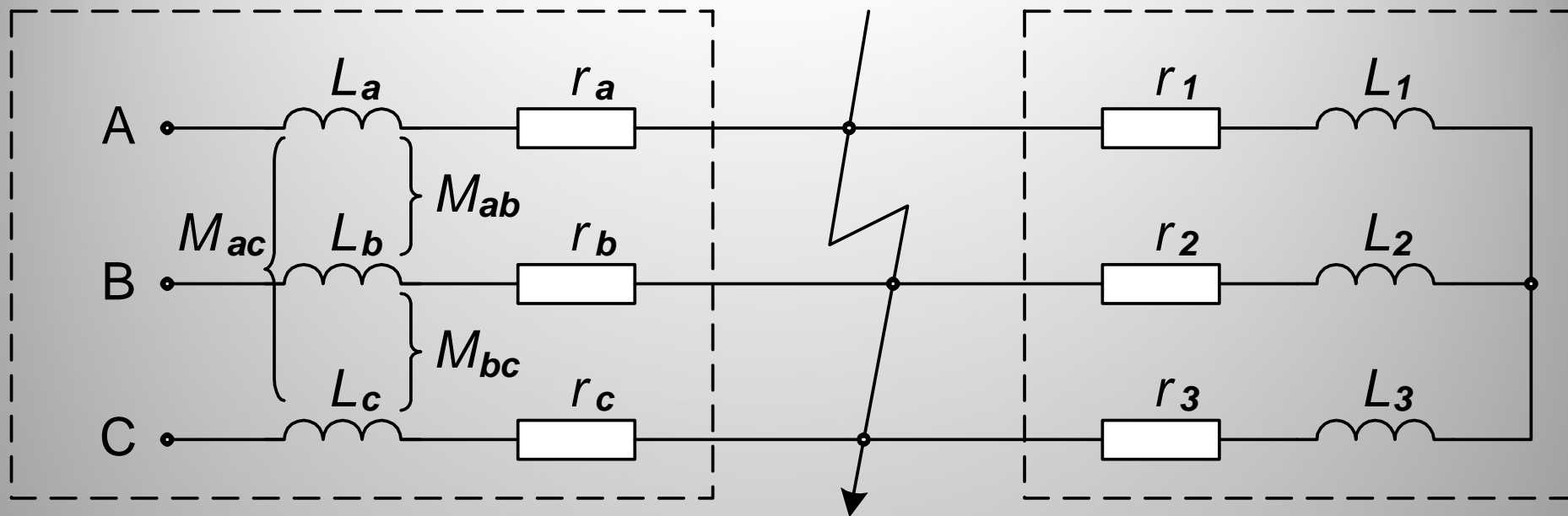


Рисунок 1

**Трёхфазное КЗ в простейшей трёхфазной цепи с
сосредоточенными активными и
индуктивными сопротивлениями при
отсутствии трансформаторных связей**

Цепь питается от источника неограниченной мощности $S_C = \infty$, $x_C = 0$

Фазные токи в цепи изменяются по закону:

$$i_A(t) = \frac{U_m}{Z_A} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (1.1)$$

$$i_B(t) = \frac{U_m}{Z_B} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (1.2)$$

$$i_C(t) = \frac{U_m}{Z_C} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (1.3)$$

где $U_m = const$ при $S_C = \infty$;

α — начальная фаза КЗ (угол, показывающий сдвиг по времени начала процесса).

**полное сопротивление фазной цепи в
нормальном режиме;**

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} -$$

**активное сопротивление фазной цепи в
нормальном режиме;**

$$R = r_a + r_1$$

**индуктивное сопротивление фазной цепи в
нормальном режиме;**

$$X = \omega (L_a + L_1)$$

угол сдвига между напряжением и током

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$$

Правая часть данной цепи зашунтирована, и ток в ней будет поддерживаться лишь до тех пор, пока запасенная в индуктивности энергия магнитного поля не перейдёт в тепло, выделяющееся в активном сопротивлении .

Этот ток не превышает тока нормального режима и не представляет опасности для оборудования.

Аналитическое описание процессов в диссипативной части системы

Точка трехфазного КЗ делит цепь на две независимые цепи, одна из которых остается присоединенной к источнику, а другая превращается в короткозамкнутый контур, ток в котором будет поддерживаться до тех пор, пока запасенная в нем энергия не перейдет в тепло в активном сопротивлении данной цепи. Для данной части схемы уравнение баланса напряжений будет иметь вид:

$$0 = i_j R_1 + L_1 \frac{di_j}{dt} \quad (1.7)$$

Приведя уравнение к виду дифференциального уравнения показательного убывания получим:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{r}{L}i \quad (1.8)$$

Решением данного уравнения имеет вид:

$$i(t) = Ce^{-\frac{r}{L}t} \quad (1.9)$$

Постоянная интегрирования C находится из условия $i(0) = i_0$, а именно, при $t = 0$ имеем,

$$i(0) = Ce^{-\frac{r}{L}0} = C = i_0 \quad \text{тогда} \quad i(t) = i_0 e^{-\frac{r}{L}t} \quad (1.10)$$

Обозначив постоянную цепи как $T = \frac{L}{r}$

окончательно получаем: $i(t) = i_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (1.11)$

Решение полученного уравнения показывает, что в рассматриваемой диссипативной цепи имеется лишь свободный ток, который затухает по экспоненте с постоянной времени T .

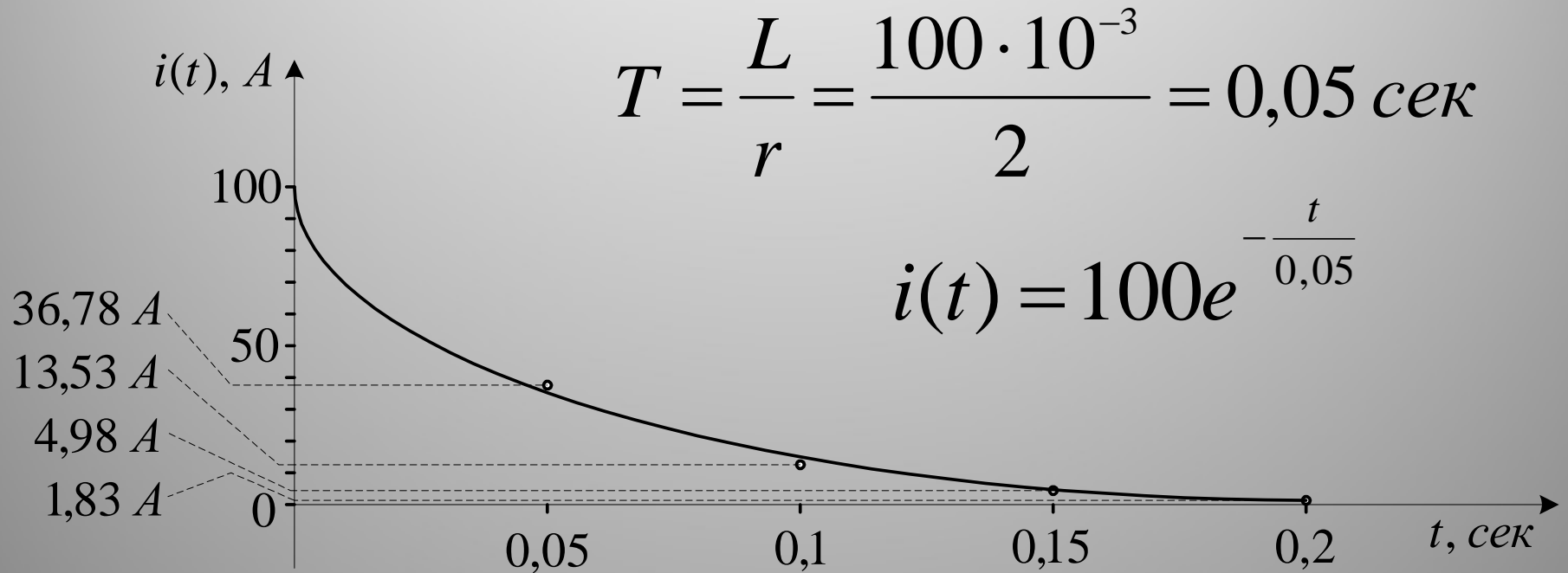


Рис. 2 -График изменения тока КЗ в цепи активной нагрузки при: $L=100$ мГн, $r = 2$ Ом

Вывод по результатам анализа переходных процессов в диссипативной части системы

Очевидно, что с увеличением активного сопротивления цепи и с уменьшением её погонной индуктивности энергия в цепи рассеивается быстрее, а величина тока в данной цепи не может превышать значение тока стационарного режима.

В силу указанных причин процессы, происходящие в диссипативной части системы не представляют опасности для её элементов.

Касательная к любой точке экспоненты в принятом для оси времени t масштабе дает значение постоянной времени. Это свойство используется для опытного определения постоянных времени затухания апериодических свободных токов. Для большей точности точку, к которой проводят касательную, нужно брать в начальной (более крутой) части кривой. За время $t = T$ апериодический ток уменьшается в $e = 2,71...$ раза или, что то же, до $1/e = 0,368$ своего начального значения. В соответствии с этим, величине T можно дать такое определение: это время, в течение которого переменная величина уменьшается до $0,368$ своего начального значения.

О влиянии апериодического тока в фазе КЗ на величину тока в неповреждённых фазах

После затухания апериодической составляющей заканчивается переходный процесс в данной части цепи. В одной из фаз свободный ток может отсутствовать, если в момент возникновения КЗ предшествующий ток в этой фазе проходил через нуль; при этом свободные токи в двух других фазах будут одинаковы по величине, но противоположны по направлению.

Поэтому в начальный момент трёхфазное КЗ является несимметричным КЗ, так как начальные значения свободного тока каждой фазы различны.

Аналитическое описание переходного процесса на участке, получающем питание от источника (левая часть схемы на рис. 1)

В данной части схемы кроме свободного тока под действием приложенного синусоидального напряжения с неизменной амплитудой должен установиться вынужденный периодический ток с амплитудой больше предшествующего (до КЗ) из-за снижения суммарного сопротивления цепи. Дифференциальное уравнение для левой части цепи (фаза А) по закону Кирхгофа имеет вид:

$$U_A = L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + ri_A \quad (1.12)$$

Учитывая, что в симметричном режиме:

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (1.13) \quad \text{или} \quad i_A = -(i_B + i_C)$$

$$\begin{aligned} U_A &= L \frac{di_A}{dt} + M \left(\frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) + ri_A = L \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_A}{dt} + ri_A = \\ &= ri_A + (L - M) \frac{di_A}{dt}. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Обозначив суммарную индуктивность фазы А как $L_A = L - M$ получим

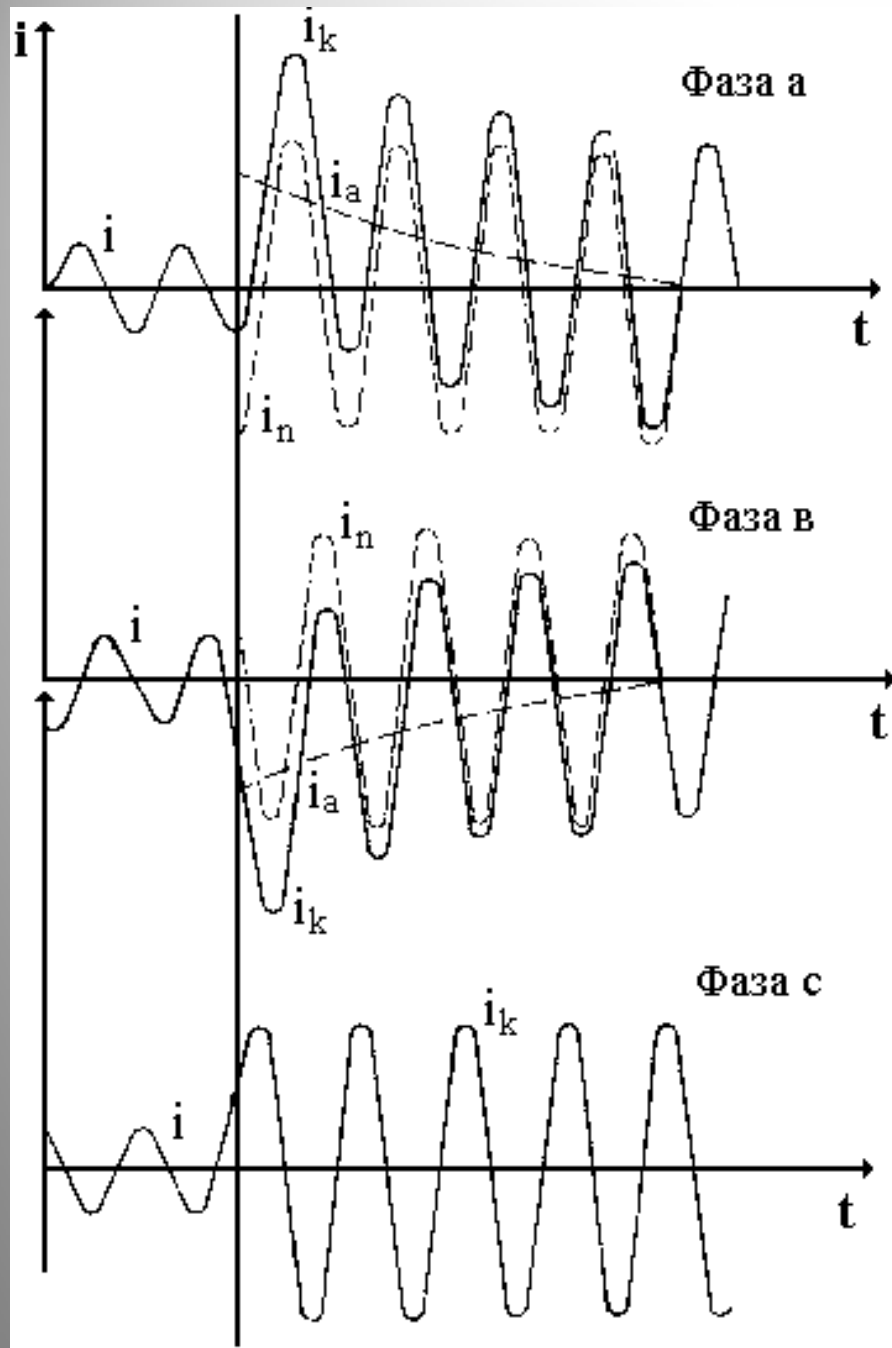
$$U_A = ri_A + L_A \frac{di_A}{dt}. \quad (1.15)$$

Учитывая, что решение уравнения (1.15) представится в виде суммы вынуждающей и свободной составляющих:

$$i_A = i'_A + i''_A = \frac{U_m}{Z_A} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_A) + i_{A(0)} e^{-\frac{t}{T_A}}$$

Учитывая, что в момент непосредственно предшествующий КЗ ток в рассматриваемой цепи изменяясь по гармоническому закону может иметь значение в диапазоне от 0 до максимального значения, также изменяется от 0 до максимального значения и значение апериодической составляющей тока КЗ изменяется в зависимости от момента КЗ. Однако в момент возникновения КЗ, когда ток в одной из фаз равен нулю в двух других фазах ток КЗ имеет ненулевое значение.

На графиках, представленных на рисунке 3, показано три характерных случая течения рассматриваемого процесса КЗ.



**Рис. 3 - Графики токов
КЗ в отдельных фазах
при трехфазном КЗ для
случая, когда в одной из
фаз (фаза С) не
возникает
апериодическая
слагающая тока**

В практических расчетах максимально возможное мгновенное значение полного тока КЗ находят при наибольшем значении апериодической составляющей, т.е. когда $\omega t = \pi$

соответственно $i_{A(0)} = I_m$

$$\begin{aligned} i_A &= i'_A + i''_A = \frac{U_m}{Z_A} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_A) + I_m \sin(\omega t + \varphi - \alpha_A) e^{-\frac{t}{T_A}} = \\ &= I_m + I_m e^{-\frac{\pi t}{T}} = I_m \left(1 + e^{-\frac{\pi t}{T}} \right). \end{aligned} \quad (1.16)$$

Для сетевой частоты получим:

$$i_A = I_m \left(1 + e^{-\frac{\pi t}{T}} \right) = I_m \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T}} \right) = i_y. \quad (1.17)$$

Это значение тока носит название ударного тока КЗ, а отношение

$$K_y = \frac{i_y}{I_m} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T}} \quad \text{ударный коэффициент:}$$

На рисунке 4 показаны графические зависимости периодической и апериодической составляющей тока трёхфазного КЗ при максимальном значении величины апериодической составляющей.

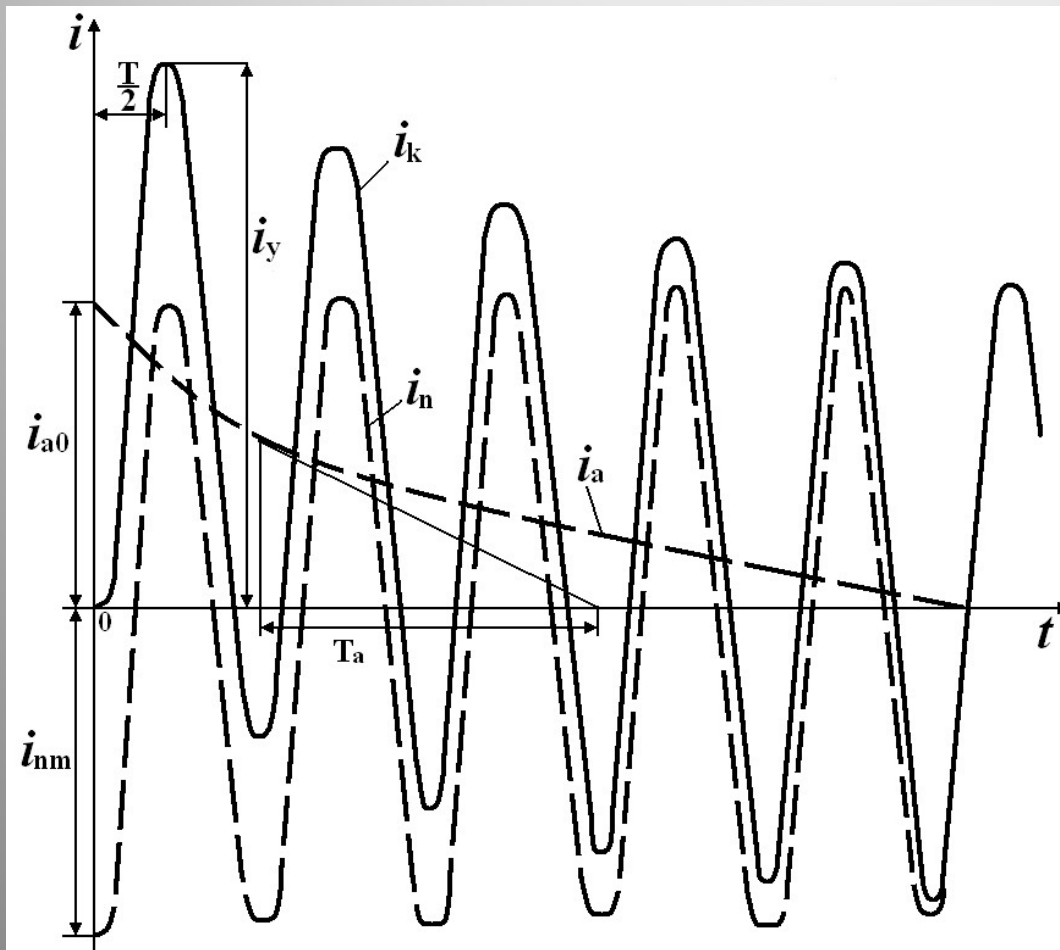


Рисунок 4 –
Графические
зависимости
периодической и
апериодической
составляющей тока
трёхфазного КЗ

Учитывая, что среднеквадратическое и амплитудное значение тока для гармонических функций связаны соотношением $I_m = \sqrt{2}I$ величину ударного тока можно определить как:

$$i_{y.} = \sqrt{2} I K_y$$

K_y изменяется в пределах от 1 до 2 экспоненциально, как показано на рисунке 5.

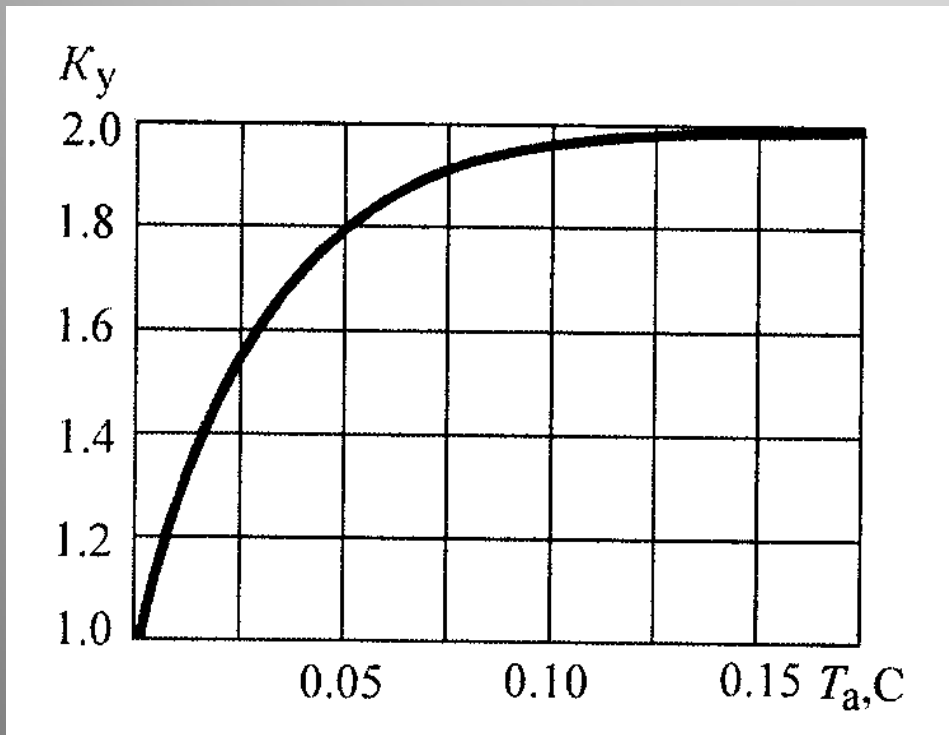


Рис. 5 - Зависимость ударного коэффициента от постоянной времени T_a

Чем меньше T_a , тем быстрее
затухает апериодическая
составляющая и тем меньше K_u .
В высоковольтных сетях (35 кВ и
выше) апериодическая
составляющая исчезает через
0,1...0,3 с. В сетях низкого
напряжения она практически
незаметна.

Расчет токов трехфазного короткого замыкания в системе базисных величин

Расчет токов трехфазного КЗ заключается в определении величины ударного и установившегося токов в цепи элемента системы. Для этого удобно использовать систему относительных единиц - базисных величин.

Расчет начинается с составления расчетной схемы (рис. 6), на которой указывают места короткого замыкания, источники электро-энергии (энергосистема, генераторы, компенсаторы) и все элементы системы электроснабжения (трансформаторы, реакторы, воздушные и кабельные линии) с их параметрами.

По каталогам или паспортным данным определяют $S_{НГ} (P_{НГ}, \cos \varphi)$ для генераторов - номинальную мощность U_N напряжение x_d'' индуктивное сверхпереходное - сопротивление по продольной оси (или в виде относительного номинального значения $x_{\bullet Н} = 0,12 \dots 0,13$ для турбогенераторов u_k для гидрогенераторов с демпферными обмотками и т.п.), в процентах

для ЛЭП – длину линии и удельное индуктивное сопротивление (для воздушных ЛЭП 6...35 кВ $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$ для кабельных ЛЭП 6...10 кВ $x_0 = 0,1 \text{ Ом/км}$);

для реакторов - номинальные значения напряжения и токов $U_{PH} I_{PH}$
индуктивное сопротивление x_p

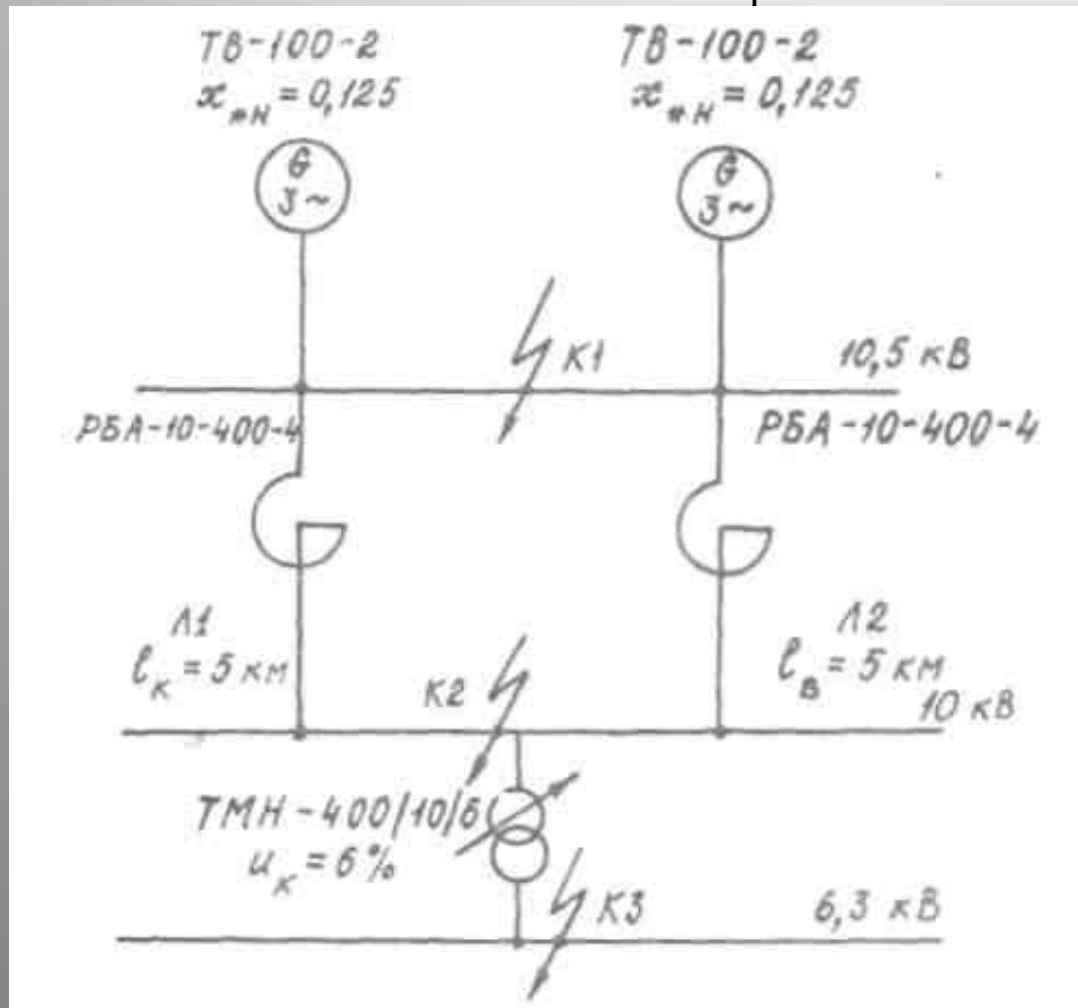


Рисунок 6 - Расчетная
схема СЭС

При проверке оборудования точки КЗ должны быть намечены таким образом, чтобы через элементы СЭС протекали токи КЗ. Эти токи находят путем расчета, для упрощения которого составляют схему замещения (рис. 7); на ней все магнитные связи трансформаторов заменяют электрическими, а все другие элементы схемы - относительными сопротивлениями, приведенными к базисным условиям.

В состав схемы замещения должны входить только те элементы расчетной схемы, через которые протекает ток КЗ. Токи КЗ в сетях выше 1000 В рассчитывают по относительным индуктивным сопротивлениям при базисных значениях мощности S_B и напряжения U_B которыми задаются. Величину базисной мощности рекомендуется выбирать любую, кратную десяти или кратную установленной мощности генераторов или трансформаторов. За базисное напряжение принимается номинальное напряжение той ступени, для которой вычисляется ток КЗ. Тогда для каждой ступени напряжения базисный ток определяется по формуле:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{2} \cdot U_B} \quad (1.18)$$

а базисное полное сопротивление

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} \quad (1.19)$$

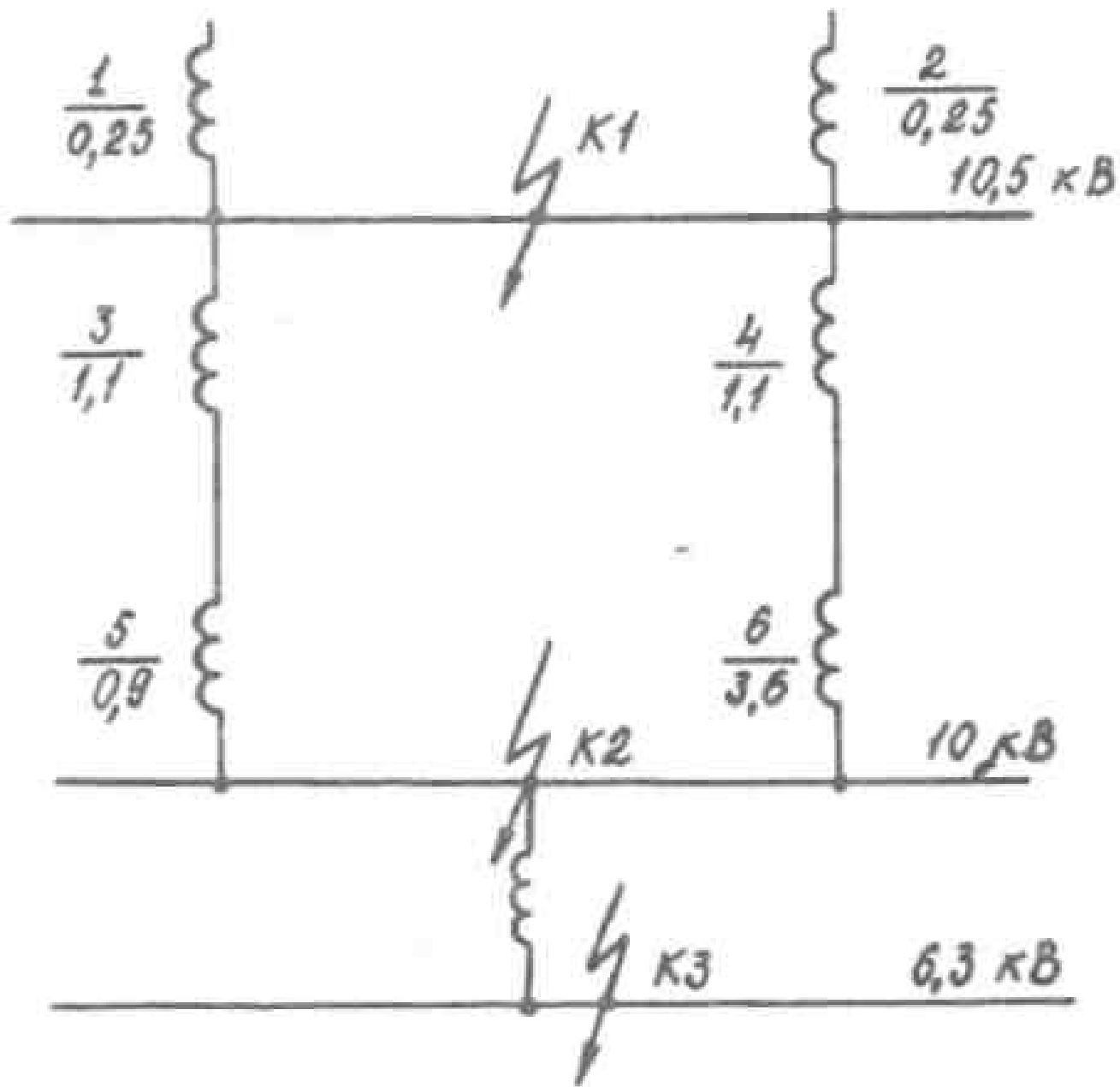


Рисунок 7 -
Схема
замещения
СЭС

Из четырех базисных единиц можно выбрать только две, а две другие получаются из приведенных соотношений. Когда величины базисной мощности, напряжения, тока и полного сопротивления определены, тогда значения величин, входящие в расчетные соотношения, выражаются в относительных единицах:

$$U_{\bullet Б} = \frac{U}{U_B} \quad S_{\bullet Б} = \frac{S}{S_B} \quad I_{\bullet Б} = \frac{I}{I_B} \quad Z_{\bullet Б} = \frac{Z}{Z_B} \quad (1.20)$$

где звездочка указывает, что соответствующая величина выражена в относительных единицах, а индекс Б - что она приведена к базисным условиям.

Так как на практике при расчетах токов короткого замыкания активной составляющей сопротивления можно пренебречь (если его величина не превышает 30% от индуктивной составляющей), то обычно определяют относительные базисные индуктивные сопротивления элементов короткозамкнутой цепи по формулам:

для генераторов

$$x_{*БГ} = x_{*НГ} \frac{S_{Б}}{S_{НГ}} \quad (1.21)$$

трансформаторов

$$x_{*БТ} = \frac{u_{К}}{100} \frac{S_{Б}}{S_{НТ}} \quad (1.22)$$

линий

$$x_{*БЛ} = x_0 l \frac{S_{Б}}{U_{Б}^2} \quad (1.23)$$

реакторов

$$x_{*БР} = \frac{x_{Р}}{100} \frac{I_{Б}}{I_{НР}} \quad (1.24)$$

Эти данные наносят на схему замещения (см. рис.7), в числителе указывается порядковый номер, а в знаменателе - величина относительного индуктивного сопротивления элемента сети. Затем исходная схема замещения путем последовательных преобразований приводится к простейшей схеме замещения "источник - сопротивление - точка КЗ".

Напомним известные из курса "Теоретические основы электротехники" некоторые способы преобразования и упрощения расчетных схем, имеющих достаточно сложную конфигурацию (например, рис.8).

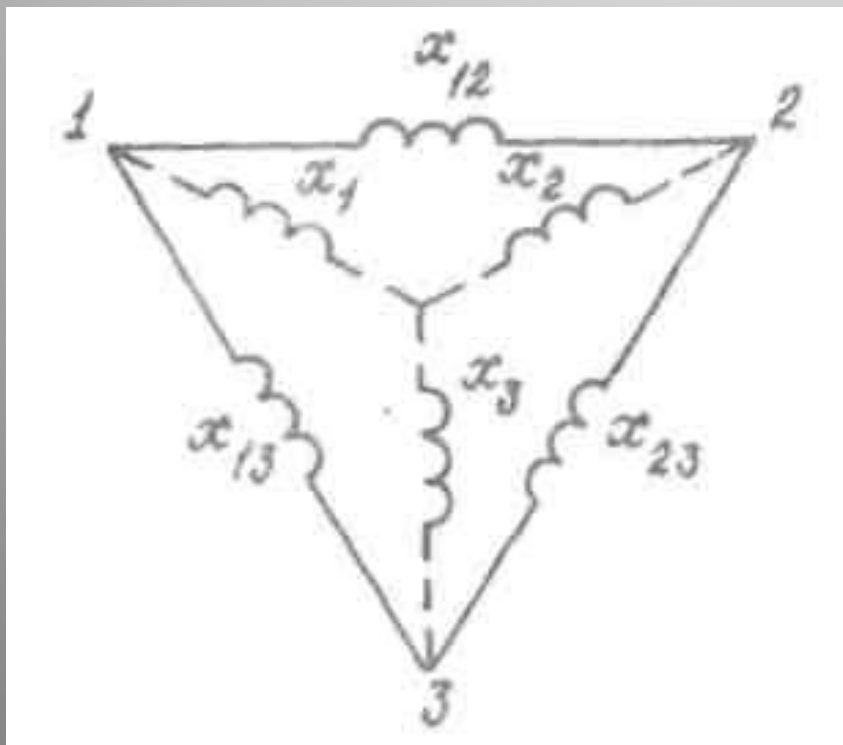


Рисунок 8 - Преобразование треугольника сопротивления в эквивалентную звезду

В результате преобразований можно получить эквивалентное сопротивление цепи для последующего определения базисного результирующего сопротивления от источника питания до расчетной точки КЗ по (1.21 – 1.24)

$$x_{*Брез} = \frac{x_{\Theta}}{x_B} \quad (1.25)$$

Так, при последовательном соединении элементов эквивалентное сопротивление цепи будет равно:

$$x_{\Theta} = x_1 + x_2 + \dots + x_n \quad (1.26)$$

при параллельном соединении

$$1/x_{\Theta} = 1/x_1 + 1/x_2 + \dots + 1/x_n \quad (1.27)$$

Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду (рис. 8) производится по формулам:

$$x_1 = \frac{x_{12}x_{13}}{x_{12} + x_{13} + x_{23}}; \quad x_2 = \frac{x_{23}x_{12}}{x_{12} + x_{13} + x_{23}}; \quad x_3 = \frac{x_{13}x_{23}}{x_{12} + x_{13} + x_{23}}; \quad (1.28)$$

(1.29)

а в треугольник

$$x_{12} = x_1 + x_2 + \frac{x_1 x_2}{x_3} \quad x_{23} = x_2 + x_3 + \frac{x_2 x_3}{x_1} \quad x_{13} = x_1 + x_3 + \frac{x_1 x_3}{x_2}$$

Полученное в результате таких расчетов результирующее сопротивление определено при произвольно взятом S_B . Переход от базисной к действительной мощности источников электроэнергии производится через расчетное сопротивление