

Расчеты токов короткого замыкания

- Методика расчета токов КЗ, приведенная ниже, позволяет определить значение периодической составляющей полного тока КЗ для начального момента времени, т.е. сверхпереходный ток, точнее его действующее значение.
- Именно эта величина является расчетной для выбора параметров устройств РЗА.
- Однако устройства РЗА могут иметь различные значения времени срабатывания, отличные от $t = 0$. Например, резервные защиты линий 110 кВ и трансформаторов.
- Учитывается ли изменение тока КЗ во времени при выборе уставок РЗА?
- В существующих методиках расчетов токов КЗ исходят из того, что имеющиеся на генераторах устройства регулирования напряжения (АРН) и форсировки возбуждения (АРВ) позволяют сохранять ток в ветви КЗ практически неизменным во времени, особенно при КЗ, электрически удаленных от генераторов, а также при несимметричных КЗ.[4]
- Однако поскольку КЗ в электрической цепи представляет собой сложный режим, сопровождающийся переходным процессом, в целях упрощения практических расчетов принят ряд допущений, которые, как показывают анализ осциллограмм и опыт эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики, незначительно сказываются на точности результатов расчетов.

К основным допущениям относятся:

- - В электрической системе отсутствуют качания, т.е. не учитывается угол сдвига между ЭДС параллельно работающих генераторов.
- - Отсутствует насыщение магнитных систем генераторов, трансформаторов, двигателей.
- Практически не учитывается емкостная проводимость линий электропередачи, за исключением линий напряжением выше 330 кВ значительной протяженности (> 150 км).
- - Не учитываются токи намагничивания трансформаторов и
- автотрансформаторов.

- - Не учитываются активные сопротивления генераторов, трансформаторов, реакторов из-за их незначительной величины по сравнению с индуктивными сопротивлениями.
- - Не учитывается незначительная несимметрия трехфазных электрических систем (неравенство сопротивлений фаз).
- - Не учитывается активное сопротивление ЛЭП, если $K_L < 1/3X_L$
- - Как правило, не учитывается влияние нагрузки в процессе КЗ. Исключения составляют отдельные расчеты, в которых учет нагрузки ведется для начального момента КЗ, так как в этот момент электродвигатели являются дополнительными источниками и подпитывают точку КЗ. Это происходит в том случае, если узел нагрузки, в которой преобладает двигательная нагрузка, расположен вблизи места КЗ, и КЗ сопровождается значительным снижением напряжения.

Порядок ведения расчетов токов КЗ.

- Расчеты токов КЗ выполняются в следующей последовательности:
- 1. Выбор и составление расчетной схемы сети, и затем схемы замещения.
- 2. Расчет параметров элементов схемы замещения.
- 3. Выбор видов короткого замыкания.
- 4. Выбор расчетных режимов работы данной сети.
- 5. Преобразование схемы замещения относительно заданной точки КЗ и определение суммарного тока КЗ.
- 6. Распределение токов КЗ по ветвям. Рассмотрим поочередно эти задачи.

Порядок ведения расчетов токов КЗ.

Расчеты токов КЗ выполняются в следующей последовательности:

- 1. Составление схемы замещения сети.
- 2. Расчет параметров элементов схемы замещения.
- 3. Схема сворачивается относительно точки КЗ.
- 4. Определяется результирующий ток.

$$I_{КЗ}^{(3)} = \frac{E_{рез} U_6}{\sqrt{3} z_{рез}}$$

- 5. Найденное значение тока распределяется между элементами участка.

$$I_{КЗ}^{(2)} = I_{КЗ}^{(3)} \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Выбор и составление расчетной схемы электрической сети и схемы замещения.

- Расчетная схема является изображением первичной схемы сети в однофазном исполнении, на которой указываются паспортные данные всех входящих в нее элементов, имеющих электрическое сопротивление -генераторов, трансформаторов, линий электропередачи, реакторов, электродвигателей. Если необходимо учесть питание места короткого замыкания от энергосистемы, параллельно работающей с рассчитываемой сетью, в расчетную схему вводится эквивалентный генератор с сопротивлением, равным эквивалентному сопротивлению энергосистемы, и ее эквивалентная ЭДС.
- На основании расчетной схемы составляется схема замещения, в которой все перечисленные элементы заменяются своими электрическими сопротивлениями. Для источников питания обязательно указывается ЭДС.
- Расчет сопротивлений элементов схемы замещения может выполняться либо в относительных единицах, приведенных к базисным условиям, т.е. к базисной мощности $S_{\text{баз}}$ и базисному напряжению $U_{\text{баз}}$, либо в именованных единицах, т.е. в Омах.

Если расчет ведется в относительных единицах, то выбираются две основные величины:

- $S_{\text{баз}}$ - полная трехфазная мощность, МВА или кВА,
- $U_{\text{баз}}$ - междуфазное напряжение, кВ.
- Рекомендуется принять $S_{\text{баз}} = 1000$ МВА, $U_{\text{баз}}$ - равным среднему напряжению ступени.
- 1115; 770; 515; 340; 230; 154; 115; 37; 27; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15 (кВ)

- Исходя из этих выбранных базисных величин, можно определить базисные значения и токов разных ступеней напряжения:

$$I_{\sigma_1} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma_1}}$$

$$I_{\sigma_2} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma_2}}$$

$$I_{\sigma_3} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma_3}}$$

-
- Сопротивления элементов схемы замещения в относительных единицах, приведенные к базисным условиям, определяются по формулам:

При расчёте по базисной
МОЩНОСТИ
В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ

Расчет сопротивлений элементов схемы замещения, приведенных к ступени КЗ, производится по формулам:

■ Генератор:

$$x_{\Gamma} = x_d'' \frac{S_{\Sigma}}{S_{\text{НОМ}}}$$

■ Система:

$$E_c := 1$$

$$x_c = \frac{x_{c\%}}{100} \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$$

$x_{c\%}$ - сопротивление системы в
относительных единицах

Если дана мощность КЗ системы:

$$x_c = \frac{x_{c\%}}{100} \frac{S_6}{S_k}$$

■ Генератор:

$$x_{\Gamma} = x_d'' \frac{S_{\delta}}{S_{\Gamma.H}}$$

$$E_{G1} := \sqrt{(\cos f_{G1})^2 + (\sin(f_{G1}) + X_{dG1})^2} =$$

■ Двухобмоточный трансформатор

$$x_T = \frac{u_K \%}{100} \frac{S_{\Sigma}}{S_{\text{НОМ}}}$$

Трехобмоточный трансформатор или автотрансформатор:

$$x_{\epsilon} = \frac{u_{K_{\epsilon}} \%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}}$$

$$x_c = \frac{u_{K_c} \%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}}$$

$$x_H = \frac{u_{K_H} \%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}}$$

$$u_{K_{\theta}} \% = 0,5(u_{K_{\theta-c}} + u_{K_{\theta-H}} - u_{K_{c-H}})\%;$$

$$u_{K_c} \% = 0,5(u_{K_{\theta-c}} + u_{K_{c-H}} - u_{K_{\theta-H}})\%;$$

$$u_{K_H} \% = 0,5(u_{K_{\theta-H}} + u_{K_{c-H}} - u_{K_{\theta-c}})\%.$$

Если напряжение КЗ какой-либо из обмоток получается равным нулю или меньше нуля, то сопротивление соответствующей обмотки трансформатора принимается равным нулю.

■ Линия:

$$x_{\text{л}} = x_{\text{уд}} \ell \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б(I,II,III)}}}$$

$x_{\text{уд}}$ - Удельное сопротивление на 1 км (рекомендуется 0,4 Ом/км)

■ Реактор:

$$x_p = \frac{x_p \%}{100} \frac{S_{\delta}}{U_{\delta(I,II,III)}^2}$$

$U_{\delta(I,II,III)}$ - среднее напряжение ступени, на которой установлен реактор

- При известных базисных токах и общий ток КЗ для всех ступеней напряжения

$$I_{k1}^{(3)} = \frac{E_{\mathcal{E}} \cdot I_{\mathcal{E}1}}{X_{\mathcal{E}}}$$

При расчёте по базисному
напряжению

- Базисное напряжение выбирается произвольно. Обычно за базисное напряжение принимается $U_{\text{ср.ном}}$ той ступени трансформации, на которой установлена рассчитываемая защита.

Расчет сопротивлений элементов схемы замещения, приведенных к ступени КЗ, производится по формулам:

■ Генератор:

$$x_{\Gamma} = x_d'' \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{\Gamma.н}}$$

■ Система:

$$x_c = \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_K}$$

x_{c*} - сопротивление системы в
относительных единицах

Или через ном (не с.н.!!) напряжение системы:

$$x_c = \frac{U_{\bar{6}}^2}{U_H^2}$$

Если дана мощность КЗ системы:

- Система: при известной мощности короткого замыкания:

$$x_c = \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{\text{КЗ}}}$$

-
- для системы бесконечной мощности:

$$x^*_c = 0$$

■ Двухобмоточный трансформатор

$$x_T = \frac{u_k \%}{100} \frac{U_{\phi}^2}{S_{T.ном}}$$

Трехобмоточный трансформатор или автотрансформатор:

$$x_v = \frac{u_{k_v} \%}{100} \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_H}$$

$$x_c = \frac{u_{k_c} \%}{100} \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_H}$$

$$x_H = \frac{u_{k_H} \%}{100} \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_H}$$

$$u_{K_{\theta}} \% = 0,5(u_{K_{\theta-c}} + u_{K_{\theta-H}} - u_{K_{c-H}})\%;$$

$$u_{K_c} \% = 0,5(u_{K_{\theta-c}} + u_{K_{c-H}} - u_{K_{\theta-H}})\%;$$

$$u_{K_H} \% = 0,5(u_{K_{\theta-H}} + u_{K_{c-H}} - u_{K_{\theta-c}})\%.$$

Если напряжение КЗ какой-либо из обмоток получается равным нулю или меньше нуля, то сопротивление соответствующей обмотки трансформатора принимается равным нулю.

■ Линия:

$$x_{\text{л}} = x_{\text{уд}} \ell \frac{U_{\text{б}}^2}{U_{\text{ср.н}}^2}$$

$x_{\text{уд}}$ - Удельное сопротивление на 1 км (рекомендуется 0,4 Ом/км)

■ Реактор:

$$x_p = \frac{x_p \%}{100} \frac{U_{\delta}^2}{U_{ср.ном}^2}$$

$U_{ср.ном}$ - среднее напряжение ступени, на которой установлен реактор

■ Нагрузка:

$$x_{\text{нагр.}} = x^*_{\text{нагр.}} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{нагр.ном}}}$$

$$x_{\text{нагр.}} = x^*_{\text{нагр.}} \frac{U_{\delta}^2}{U_{\text{с.н}}^2}$$

-
- В таблице приводятся значения средних номинальных напряжений, используемых в расчетах $T_{кз}$,
 - а также номинальные и максимальные значения напряжений по ГОСТ 721-77*

U, напряжение, кВ			Режим заземления нейтралей тр-ров
Номинальное	Наибольшее	Среднее ном.	
0,22/0,127 0,38/0,22 0,66/0,38	- 0,4/0,23 0,69/0,4	0,22/0,127 0,4/0,23 0,69/0,4	Чаще всего работают с глухозаземленными нейтралями.
3,0 6,0 10,0 20,0 35,0	3,6 7,2 12,0 24,0 40,5	3,15 6,3 10,5 20,0 37,0	Работают с изолированными или компенсированными нейтралями.*)
110 220 330 500 750	126 252 363 525 787	115 230 340 515 750	Работают с глухозаземленными нейтралями.

* - Для отдельных категорий потребителей 6(10) кВ принят режим "частичного заземления нейтрали". См. конспект лекций М.А. Шабада "Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ", изд. ПЭИпк, 2005.

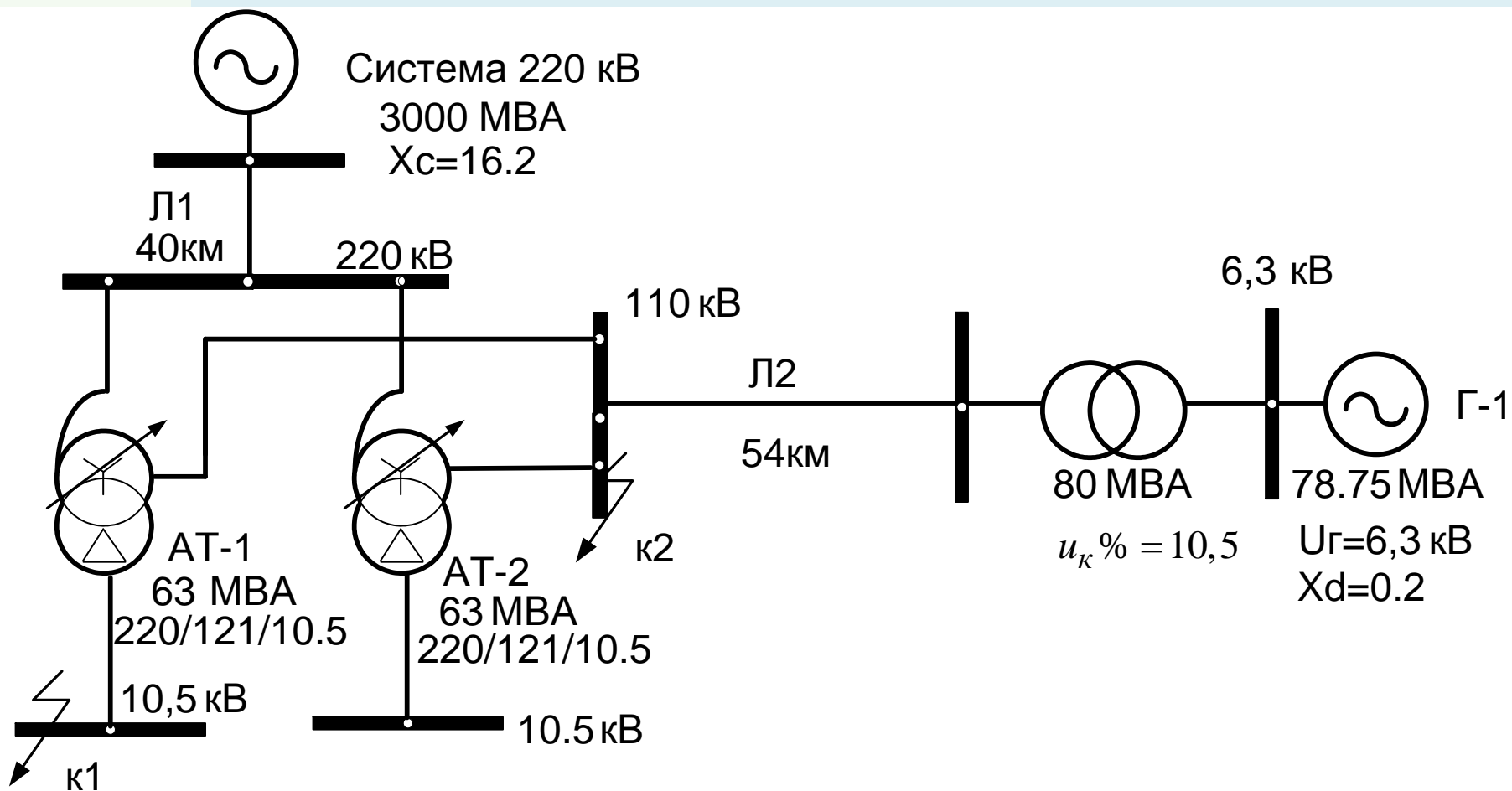
Индексы, использованные в предыдущих формулах, означают:

" \circ " – значение, приведенное к основной ступени напряжения (ступени K3) и к базисным условиям,

"*" – относительное значение,

" \bullet " – значение, приведенное к номинальным условиям.

Пример



$$u_{K_{\theta-c}} = 11\%;$$

$$u_{K_{c-H}} = 22\%;$$

$$u_{K_{\theta-c}} = 35\%.$$

$$E_{G1} := \sqrt{(\cos f_{G1})^2 + (\sin(f_{G1}) + X_{dG1})^2} = 1.131$$

$$X_{G1} := X_{dG1} \cdot \frac{U6^2}{S_{HOMG1}} = 0.28$$

$$x_1 = x_c = x_c \frac{U_6^2}{U_C^2} = 16.2 \frac{10,5^2}{220^2} = 0.037$$

$$x_2 = x_{\text{л}} = x_{\text{уд}} \ell \frac{U_6^2}{U_{\text{ср.н}}^2} = 0,4 \cdot 40 \frac{10,5^2}{230^2} = 0,033$$

$$u_{K_B} \% = 0,5 \frac{(11 + 35 - 22)}{100} = 0,12$$

$$u_{K_C} \% = 0,5 \frac{11 + 22 - 35}{100} \approx 0$$

$$u_{K_H} \% = 0,5 \frac{35 + 22 - 11}{100} = 0,23$$

$$x_3 = x_6 = x_e = \frac{u_{\kappa_e} \%}{100} \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_H} = 0.12 \frac{10,5^2}{63} = 0.21$$

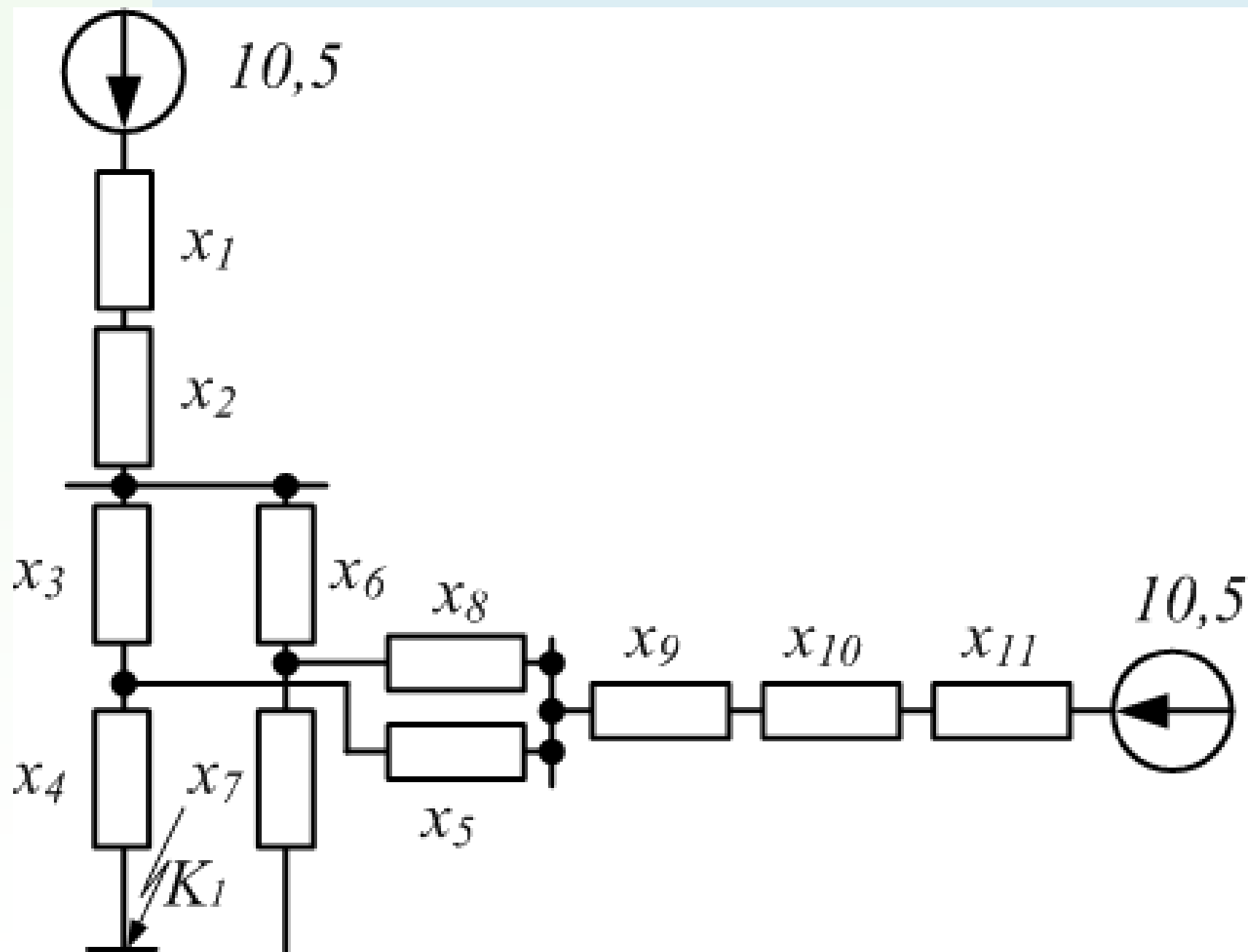
$$x_5 = x_8 = x_c = \frac{u_{\kappa_c} \%}{100} \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_H} = 0$$

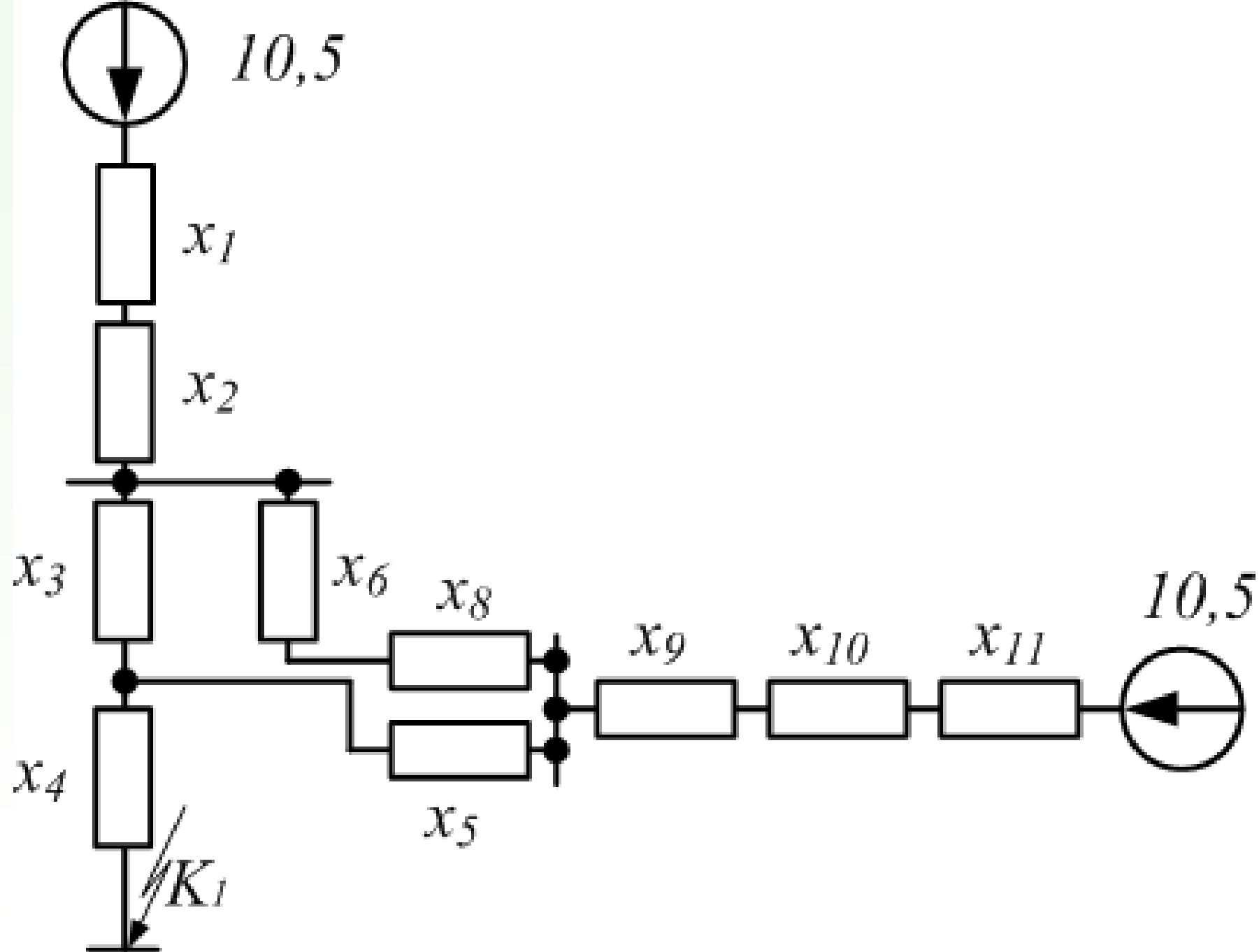
$$x_4 = x_H = \frac{u_{\kappa_H} \%}{100} \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_H} = 0,23 \frac{10,5^2}{63} = 0,4$$

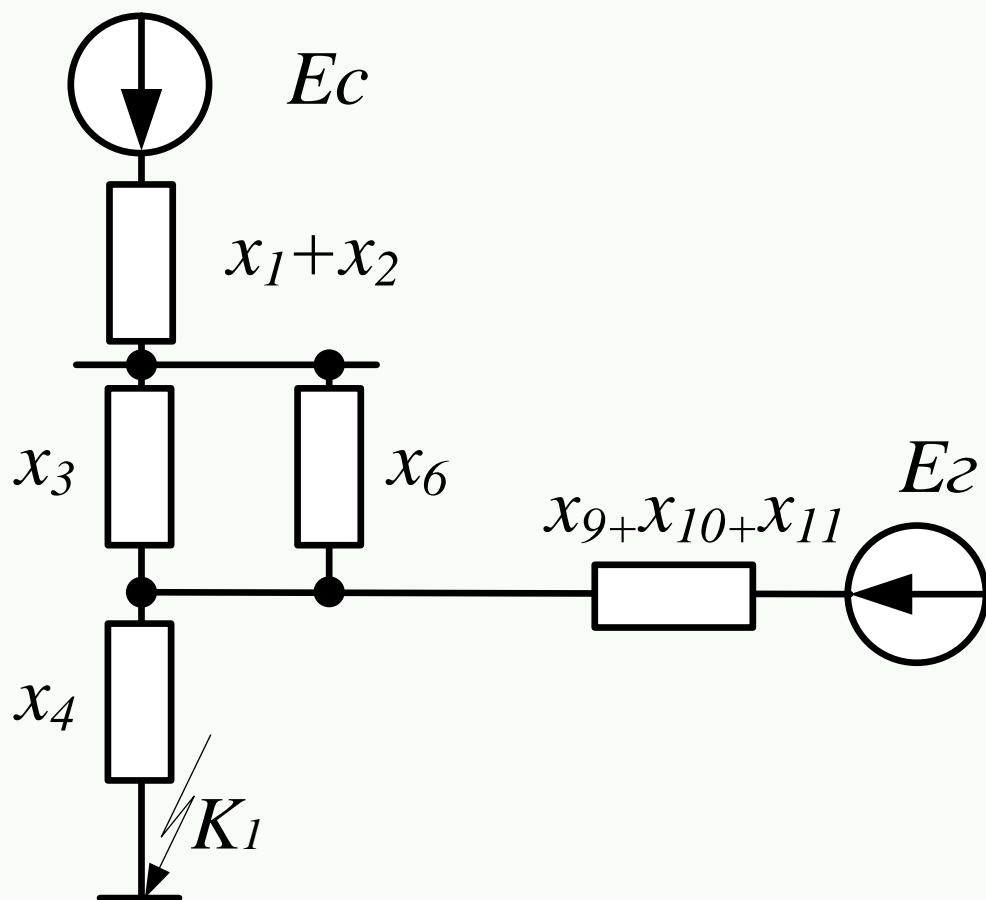
$$x_9 = x_{\text{л}} = x_{\text{уд}} \ell \frac{U_{\bar{6}}^2}{U_{\text{ср.н}}^2} = 0,4 \cdot 54 \frac{10,5^2}{115^2} = 0,18$$

$$x_{10} = \frac{u_{\kappa} \%}{100} \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{\text{н}}} = \frac{10,5}{100} \frac{10,5^2}{80} = 0,145$$

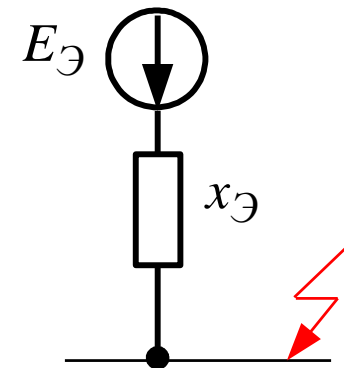
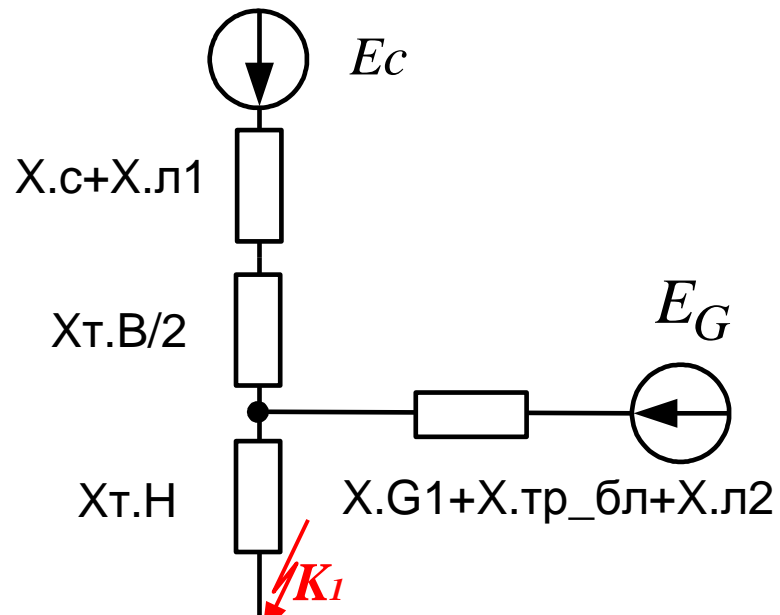
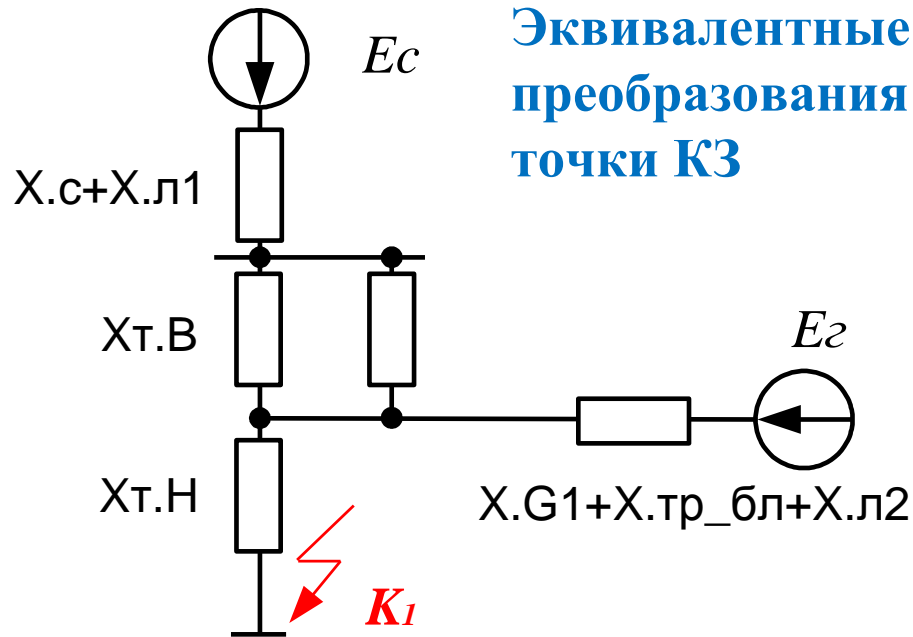
$$x_{11} = x_{\Gamma} = x_d'' \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{\Gamma.\text{н}}} = 0,2 \frac{10,5^2}{78,75} = 0,28$$







Эквивалентные
преобразования до
точки КЗ



$$\underline{x1} := \frac{(X_{G1} + X_{л2} + X_{тр_6л}) \cdot \left(X_c + X_{л1} + \frac{X_{тВ}}{2} \right)}{X_{G1} + X_{тр_6л} + X_{л2} + \left(X_c + X_{л1} + \frac{X_{тВ}}{2} \right)} = 0.136$$

$$\underline{E1} := \left(\frac{E_c}{X_c + X_{л1} + \frac{X_{тВ}}{2}} + \frac{E_{G1}}{X_{G1} + X_{тр_6л} + X_{л2}} \right) \cdot x1 = 1.029$$

$$X_{G1} + X_{тр_6л} + X_{л2} = 0.605$$

$$X_c + X_{л1} + \frac{X_{тВ}}{2} = 0.175$$

$$\underline{x2} := x1 + X_{тН} = 0.538$$

Общий ток трёхфазного КЗ

$$I_{k3} := \frac{E1 \cdot U6}{\sqrt{3} \cdot x_{\Sigma}} = 11.594$$

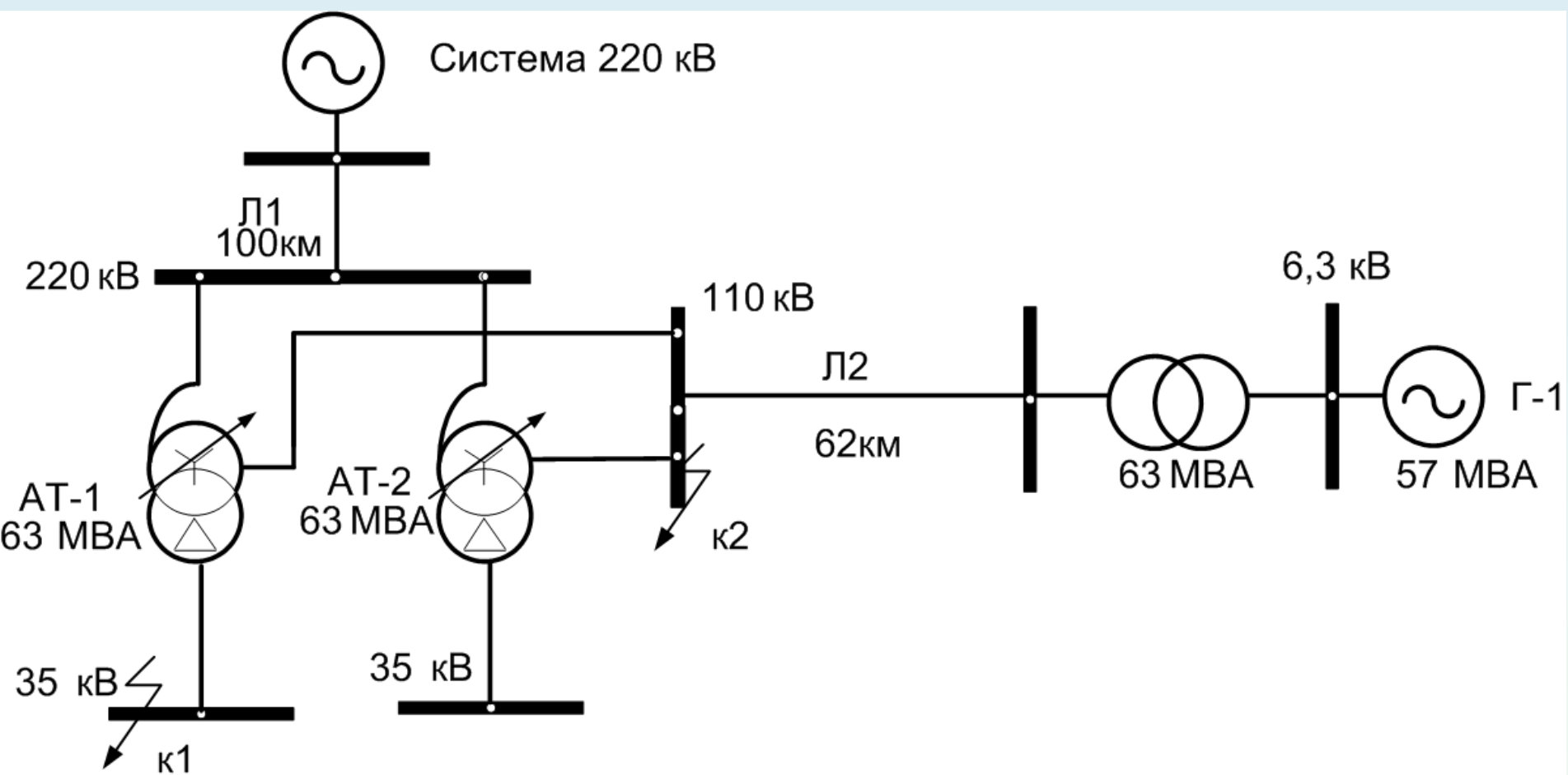
Общий ток двухфазного КЗ

$$I_{k2} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3} = 10.041$$

$$I_{k1}^{(3)} = \frac{1,029 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,538} = 11.594 \text{ kA}$$

$$I_{k1}^{(2)} = I_{k1}^{(3)} \frac{\sqrt{3}}{2} = 10,04 \text{ kA}$$

Примеры для самостоятельной работы



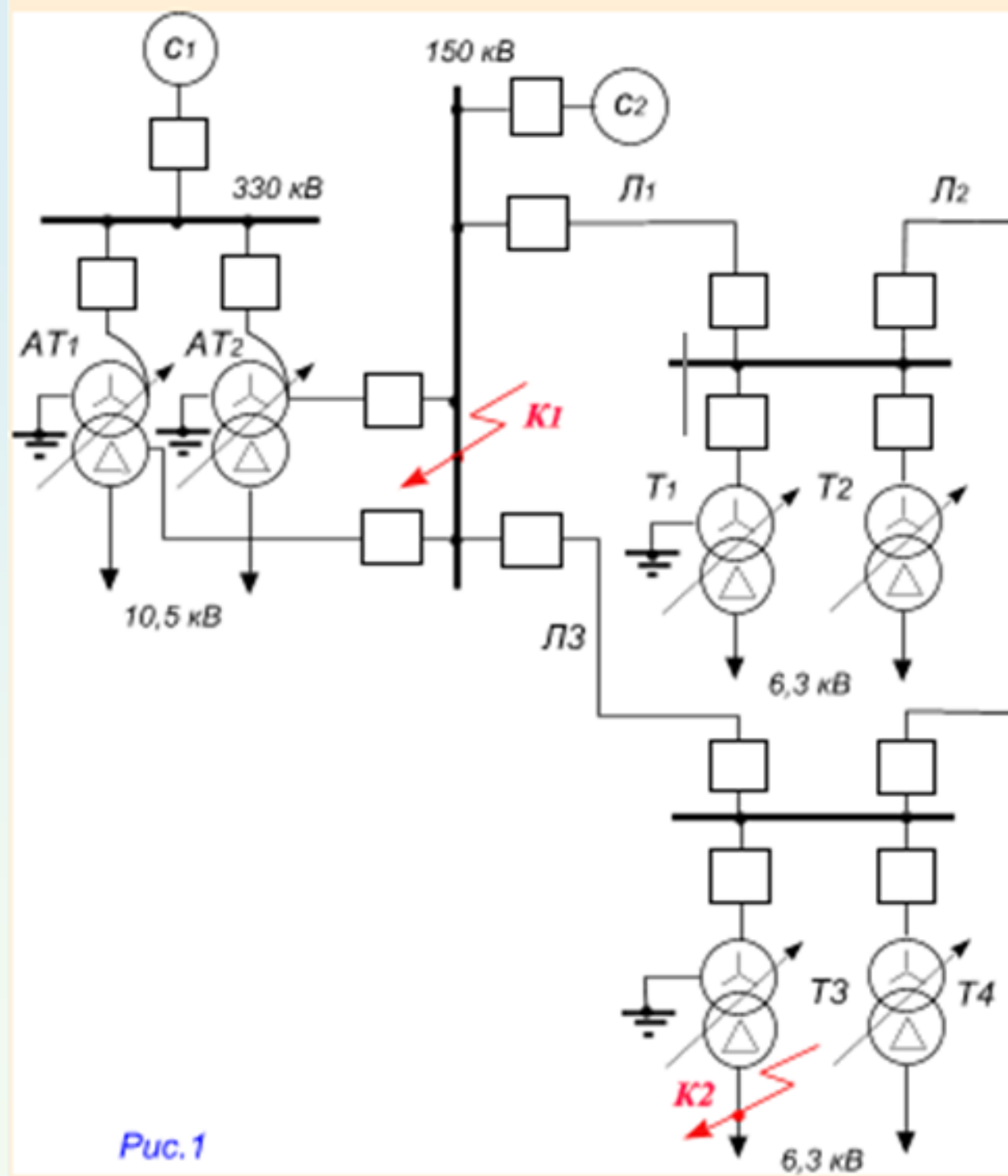
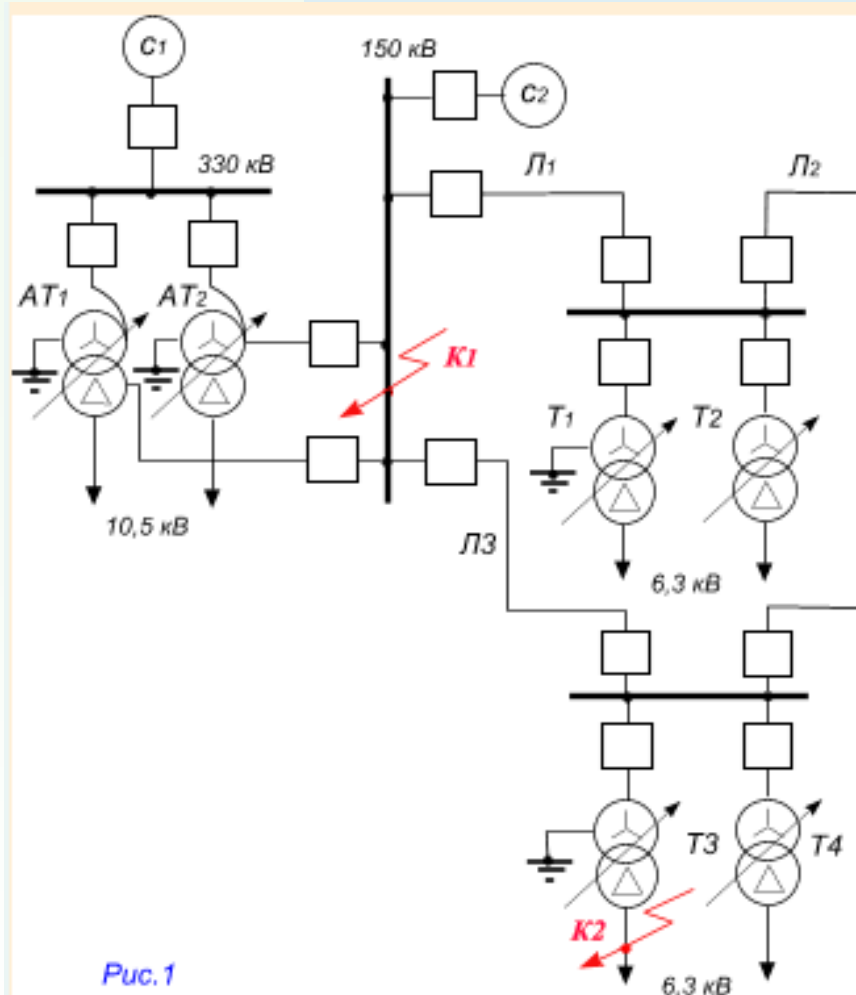


Рис.1



Элементы схемы имеют следующие параметры:

Система C1: $E_c = 330 \text{ кВ}$; $X_{1C} = 11,9 \text{ Ом}$; $X_{0C} = 18,3 \text{ Ом}$

Система C2: $E_c = 150 \text{ кВ}$; $X_{1C} = 10,6 \text{ Ом}$; $X_{0C} = 8,4 \text{ Ом}$

Автотрансформаторы AT1 и AT2

$S = 250 \text{ МВА}$; $X_{0T} = X_{1T}$; $330+2 \times 2,5\%/165/10,5 \text{ кВ}$

$U_k \text{ ВН-СН} = 11,3\%$; $U_k \text{ ВН-НН} = 35\%$; $U_k \text{ СН-НН} = 22\%$

Трансформаторы T1 - T4 $S = 63 \text{ МВА}$; $158 + 8 \times 1,5\%/6,3 \text{ кВ}$

$U_k = 10,5\%$

Линии Л1 -Л3 $L1 = 8 \text{ км}$; $L2 = 10 \text{ км}$; $L3 = 8 \text{ км}$

$X_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$

Рис.1