

Расчет токов короткого замыкания в электроустановках напряжением ниже 1000 В

- При расчетах токов КЗ в установках ниже 1000 В **учитывают все сопротивления короткозамкнутой цепи, как индуктивные, так и активные.**
- Для установок напряжением до 1000 В при расчетах токов КЗ считают, что **мощность питающей системы не ограничена** и напряжение с высокой стороны цехового трансформатора является неизменным. Это условие выполняется, если мощность системы примерно в 50 раз превосходит мощность цехового трансформатора.
- Расчетные точки при расчете токов КЗ выбирают **в начале отходящих линий** непосредственно за коммутационным аппаратом.
- Кроме того, **учитывают активные сопротивления всех переходных контактов** в этой цепи (на шинах, на вводах и выводах аппаратов, разъемные контакты аппаратов и контакт в месте КЗ).

- При отсутствии достоверных данных о контактах и их переходных сопротивлениях рекомендуется при расчете токов КЗ в сетях, питаемых трансформаторами мощностью до 1600 кВА, учитывать их сопротивления следующим образом:
- 0,015 Ом – для распределительных устройств на станциях и подстанциях;
- 0,02 Ом – для первичных цеховых РП, а также на зажимах аппаратов, питаемых радиальными линиями от щитов подстанций или главных магистралей;
- 0,025 Ом – для вторичных цеховых РП, а также на зажимах аппаратов, питаемых от первичных РП;
- 0,03 Ом – для аппаратуры, установленной непосредственно у приемников электроэнергии, получающих питание от вторичных РП.

Расчет токов КЗ на напряжениях до 1000 В выполняют в именованных единицах!!!!

- Сопротивление элементов системы электроснабжения высшего напряжения приводят к низшему напряжению по формуле

$$x_H = x_B \left(\frac{U_{\text{ном.Н}}}{U_{\text{ном.В}}} \right)^2,$$

- где x_B – сопротивление элемента системы электроснабжения высшего напряжения; x_H – сопротивление элемента системы электроснабжения высшего напряжения, приведенное к низшему напряжению;
- $U_{\text{ном.В}}$, $U_{\text{ном.Н}}$ – соответственно номинальные напряжения высшей и низшей ступеней

Питающая энергосистема. Активное и индуктивное сопротивления питающей энергосистемы до зажимов высокого напряжения ВН понижающего трансформатора находят по току КЗ на стороне ВН и приводят к стороне низшего напряжения:

$$x_{с.НН} = x_{с.ВН} \left(\frac{U_{\text{ном. тр. НН}}}{U_{\text{ном. тр. ВН}}} \right)^2; \quad r_{с.НН} = r_{с.ВН} \left(\frac{U_{\text{ном. тр. НН}}}{U_{\text{ном. тр. ВН}}} \right)^2, \quad (2.1)$$

где $x_{с.ВН}$ и $r_{с.ВН}$ – индуктивное и активное сопротивления энергосистемы, соответственно, приведенные к стороне ВН;

$x_{с.ВН}$ и $r_{с.ВН}$ – то же, приведенные к стороне НН понижающего трансформатора;

$U_{\text{ном. тр. НН}}$ и $U_{\text{ном. тр. ВН}}$ – номинальные напряжения обмоток НН и ВН понижающего трансформатора.

Допускается при расчетах токов КЗ не учитывать активное сопротивление энергосистемы, а индуктивное – принимать равным полному сопротивлению энергосистемы, определяя его значение по известному току $I_{\text{КЗ ВН}}^{(3)}$ или мощности $S_{\text{КЗ ВН}}^{(3)}$ трехфазного КЗ на зажимах ВН понижающего трансформатора 6(10)/0,4 кВ:

$$x_{с.ВН} \approx \frac{U_{с.ВН}}{\sqrt{3} I_{\text{КЗ ВН}}^{(3)}} = \frac{U_{с.ВН}^2}{S_{\text{КЗ ВН}}^{(3)}}, \quad (2.2)$$

где $U_{с.ВН}$ – напряжение энергосистемы со стороны ВН трансформатора, при котором определялись ток и мощность КЗ системы.

Пример 2.1.

По результатам расчета тока трехфазного КЗ на стороне 6 кВ понижающего трансформатора мощность короткого замыкания системы составила 150 МВА. Привести сопротивление питающей энергосистемы к напряжению 0,4 кВ.

Решение.

Подставив уравнение (2.2) в (2.1) и приняв $U_{с.ВН} = U_{ном.тр.ВН}$ получаем:

$$X_{с.НН} = X_{с.ВН} \left(\frac{U_{ном.тр.НН}}{U_{ном.тр.ВН}} \right)^2 = \frac{U_{с.ВН}^2}{S_{КЗ\ ВН}^{(3)}} \cdot \frac{U_{ном.тр.НН}^2}{U_{ном.тр.ВН}^2} = \frac{U_{ном.тр.НН}^2}{S_{КЗ\ ВН}^{(3)}} = \frac{400^2}{150 \cdot 10^6} =$$
$$= 1,066 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 1,066 \text{ мОм.}$$

- Активное и индуктивное сопротивления, мОм, трансформаторов, приведенные к напряжению ступени КЗ, определяют из формул

$$r_T = \frac{\Delta P_K U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ.Т}}^2} \cdot 10^6 ;$$

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2} = \sqrt{\left(\frac{u_K}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_K}{S_{\text{НОМ.Т}}}\right)^2} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ.Т}}} \cdot 10^6 ,$$

- $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное линейное напряжение обмотки низкого напряжения, кВ;
- $S_{\text{НОМ.Т}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА;
- u_K – напряжение КЗ трансформатора, %

**Активные и индуктивные сопротивления, мОм,
трансформаторов 6(10)/0,4 кВ**

Мощность трансформатора, кВ·А	$\mu_{кз}, \%$	$x_{1тр} = x_{2тр}$	$x_{0тр}$	$r_{1тр} = r_{2тр}$	$r_{0тр}$	$z_{тр}^{(1)}/3$
Соединение обмоток Y/Y₀						
100	4,5	64,7	581,8	31,5	253,9	260
160	4,5	41,7	367	16,6	150,8	162
250	4,5	27,2	234,9	9,4	96,5	104
400	4,5	17,1	148,7	5,5	55,6	65
630	5,5	13,6	96,2	3,1	30,3	43
1000	5,5	8,5	60,6	2,0	19,1	27
1000	8	12,6	72,8	2,0	19,1	33,6
1600	5,5	4,9	37,8	1,3	11,9	16,6
Соединение обмоток Δ/Y₀						
100	4,5	66	66	36,3	36,3	75,3
160	4,5	43	43	19,3	19,3	47
250	4,5	27	27	10,7	10,7	30
400	4,5	17	17	5,9	5,9	18,7
630	5,5	13,5	13,5	3,4	3,4	14
1000	5,5	8,6	8,6	2,0	2,0	9
1000	8	12,65	12,65	1,9	1,9	12,8
1600	5,5	5,4	5,4	1,1	1,1	5,7

Воздушные и кабельные линии. Активное и индуктивное сопротивления кабельных и воздушных линий электропередачи определяется по соотношениям:

$$X_{\text{кл,вл}} = x_0 \cdot l; \quad R_{\text{кл,вл}} = r_0 \cdot l \quad (2.7)$$

где x_0 и r_0 – индуктивное и активное погонное сопротивление проводников, соответственно;

l – длина проводников.

Погонное индуктивное сопротивление воздушных линий электропередачи с проводами из цветных металлов зависит от среднего геометрического расстояния между проводами. Его значение приводится в справочной литературе (например [4]). Линии со стальными проводами применяют редко. Их погонные сопротивления зависят от конструкции провода и протекающего тока.

Шины и шинопроводы. Их сопротивления рассчитывают по соотношениям (2.7). Сопротивления шин и шинопроводов длиной 5 м и менее можно не учитывать, так как их влияние на ток КЗ невелико.

При известных расстояниях между прямоугольными шинами индуктивное сопротивление (мОм/м) можно определить по выражению:

$$x_0 = 0,1445 \lg \frac{4 \cdot a_{\text{ср}}}{h}, \quad (2.8)$$

где $a_{\text{ср}} = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазами, мм;

h – высота шины, мм.

Пример 2.4.

Отдельно стоящая подстанция промышленного предприятия с трансформатором ТМ-630/6 запитана от ГПП кабелем СБ-(3×50) длиной 250 м, а от распреустройства низкого напряжения отходят две линии электропередачи. Первая, длиной 67 м, выполнена кабелем АНРГ-(4×95); вторая, длиной 500 м, – проводом АС-50, среднее геометрическое расстояние между проводами 800 мм. Определить сопротивления кабельных и воздушной линий электропередачи.

Решение.

Питающая линия напряжением 6 кВ выполнена кабелем с медными жилами сечением 50 мм². Значения погонных сопротивлений $r_0 = 0,37$ мОм/м, $x_0 = 0,0625$ мОм/м (табл. 6.13 [4]), а сопротивления всей линии:

$$X_{6кВ} = x_0 \cdot l = 0,0625 \cdot 250 = 15,63 \text{ мОм},$$

$$R_{6кВ} = r_0 \cdot l = 0,37 \cdot 250 = 92,50 \text{ мОм}.$$

Для воздушной линии электропередачи со сталеалюминиевыми проводами $r_0 = 0,65$ мОм/м (табл. 6.3 [4]), а $x_0 = 0,338$ мОм/м (табл. 6.2 [4]). Вся линия длиной 500 м имеет сопротивления:

$$X_{ВЛ} = x_0 \cdot l = 0,338 \cdot 500 = 169 \text{ мОм},$$

$$R_{ВЛ} = r_0 \cdot l = 0,65 \cdot 500 = 325 \text{ мОм}.$$

Кабель АНРГ-(4×95) с алюминиевыми жилами сечением 95 мм² имеет сопротивления:

$$X_{КЛ} = x_0 \cdot l = 0,081 \cdot 67 = 5,43 \text{ мОм},$$

$$R_{КЛ} = r_0 \cdot l = 0,329 \cdot 67 = 22,04 \text{ мОм}.$$

Его погонные сопротивления x_0 и r_0 определены по таблице 6.13 [4].

Пример 2.5.

На цеховой подстанции установлен трансформатор ТМ-630/6. К распределительному щиту 0,4 кВ трансформатор присоединен алюминиевыми шинами сечением $60 \times 8 \text{ мм}^2$, расположенными горизонтально в одну линию с расстоянием между фазами 200 мм. Определить активное и индуктивное сопротивления шин, если расстояние до щита 0,4 кВ составляет 6 м. Как изменятся сопротивления шин при их вертикальном расположении и расстоянии между фазами 200 мм.

Решение.

По таблице 6.12 [4] погонное активное сопротивление составляет $r_0 = 0,074 \text{ мОм/м}$, индуктивное рассчитываем по соотношению (2.8):

$$x_0 = 0,1445 \lg \frac{4 \cdot a_{\text{ср}}}{h} = 0,1445 \lg \frac{4 \cdot 0,264}{0,008} = 0,306 \text{ мОм/м},$$

где расстояние между шинами первой и второй фазы $a_{12} = 200 \text{ мм}$, между второй и третьей $a_{23} = 200 \text{ мм}$, между первой и третьей $a_{13} = 200 + 60 + 200 = 460 \text{ мм}$, а среднегеометрическое расстояние:

$$a_{\text{ср}} = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}} = \sqrt[3]{200 \cdot 460 \cdot 200} = 264 \text{ мм} = 0,264 \text{ м}.$$

Сопротивление шин до щита 0,4 кВ:

$$X_{\text{ш}} = x_0 \cdot l = 0,306 \cdot 6 = 1,839 \text{ мОм},$$

$$R_{\text{ш}} = r_0 \cdot l = 0,074 \cdot 6 = 0,444 \text{ мОм}.$$

При вертикальном расположении шин активное сопротивление не изменится, а индуктивное составит:

$$x_0 = 0,1445 \lg \frac{4 \cdot a_{\text{ср}}}{h} = 0,1445 \lg \frac{4 \cdot 0,254}{0,060} = 0,178 \text{ мОм/м},$$

где расстояние между шинами первой и второй фазы $a_{12} = 200 \text{ мм}$, между второй и третьей $a_{23} = 200 \text{ мм}$, между первой и третьей $a_{13} = 200 + 8 + 200 = 408 \text{ мм}$, а среднегеометрическое расстояние:

$$a_{\text{ср}} = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}} = \sqrt[3]{200 \cdot 408 \cdot 200} = 254 \text{ мм} = 0,254 \text{ м}.$$

$$X_{\text{ш}} = x_0 \cdot l = 0,178 \cdot 6 = 1,068 \text{ мОм}.$$

Реакторы. Реактор напряжением 0,4 кВ типа РТТ-0,38-50-0,14 имеет номинальные параметры: напряжение 380 В, ток 50 А, индуктивное сопротивление при частоте 50 Гц составляет 140 мОм, активное – для исполнения УЗ (алюминиевая обмотка) 17 мОм, для исполнения ТЗ (медная обмотка) 16 мОм.

Токоограничивающие реакторы устанавливаются в линиях 6(10) кВ или в цепи трансформатора для ограничения токов КЗ до таких значений, которые позволили бы применить сравнительно легкую аппаратуру (выключатели, разъединители) и не завышать сечение кабелей в сети электроснабжения.

Сопротивление реактора (Ом) определяется, по соотношениям:

$$x_p = \omega L = 314L; \quad (2.10)$$

$$x_p = \frac{u_{\text{КЗ}} \cdot U_{\text{НОМ}}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\text{НОМ}}}, \quad (2.11)$$

где $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение реактора;

$I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток реактора;

$u_{\text{КЗ}}$ – напряжение короткого замыкания, %.

Активное сопротивление реакторов 6(10) кВ мало и в расчетах не учитывается.

Пример 2.6.

Определить сопротивление реактора по данным: $U = 6$ кВ, $I_{\text{НОМ}} = 600$ А, $u_{\text{КЗ}} = 6$ %.

Решение.

По выражению (2.11):

$$x_p = \frac{u_{\text{КЗ}} \cdot U_{\text{НОМ}}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\text{НОМ}}} = \frac{6 \cdot 6000}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 600} = 0,346 \text{ Ом.}$$

Если вместо $u_{\text{КЗ}}$ задано $L = 0,11$ мГн, то по выражению (2.10):

$$x_p = \omega L = 314 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3} = 0,346 \text{ Ом.}$$

Трансформаторы тока. Активное и индуктивное сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока принимают по справочным данным [4] или приложению 5 ГОСТ Р 50270–92 [9].

Автоматические выключатели, рубильники, переходные сопротивления. Сопротивления токовых катушек и переходных сопротивлений подвижных контактов автоматических выключателей, рубильников, а также переходные сопротивления контактов и контактных соединений (вставных контактов, болтовых соединений шин и др.) принимают по справочникам и каталогам [4, 9]. Приблизительно сопротивление контактов рекомендуется учитывать следующим образом: 0,1 мОм – для контактных соединений кабелей; 0,01 мОм – для шинопроводов; 1,0 мОм – для коммутационных аппаратов.

Определение полного сопротивления участка сети. Полное сопротивление участка сети z является геометрической суммой активного r и индуктивного x сопротивлений. В схеме с последовательно включенными элементами при определении полного сопротивления до места КЗ необходимо отдельно определить суммарное активное сопротивление r_{Σ} , отдельно суммарное индуктивное x_{Σ} , а затем найти их геометрическую сумму:

$$z_{\Sigma} = \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}. \quad (2.12)$$

Если определять z_i для каждого элемента сети $z_i = \sqrt{r_i^2 + x_i^2}$, а затем найти их арифметическую сумму, то величина полного сопротивления z_{Σ} будет завышенной, а ток короткого замыкания – заниженным.

Пример 2.7.

Определить полное сопротивление схемы, состоящей из трех последовательно включенных элементов цеховой сети. Для первого сопротивления $x_1 = 5$ мОм, $r_1 = 0$; для второго – $x_2 = 5$ мОм, $r_2 = 5$ мОм; для третьего – $x_3 = 0$, $r_3 = 5$ мОм.

Решение.

Правильное решение:

$$z_{\Sigma} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^3 r_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^3 x_i\right)^2} = \sqrt{(0+5+5)^2 + (5+5+0)^2} = 14,2 \text{ мОм}$$

Неправильное решение:

$$\begin{aligned} z_1 &= \sqrt{r_1^2 + x_1^2} = \sqrt{0^2 + 5^2} = 5 \text{ мОм}; \\ z_2 &= \sqrt{r_2^2 + x_2^2} = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7,07 \text{ мОм}; \\ z_3 &= \sqrt{r_3^2 + x_3^2} = \sqrt{5^2 + 0^2} = 5 \text{ мОм}; \end{aligned}$$

полное сопротивление:

$$z_{\Sigma} = z_1 + z_2 + z_3 = 5 + 7,07 + 5 = 17,07 \text{ мОм}$$

вместо 14,2 мОм.

Параллельное включение

В сетях встречается и параллельное включение двух или нескольких элементов. Эквивалентное сопротивление такой схемы определяется:

$$z_{\text{эк}} = \frac{\sqrt{r_1^2 + x_1^2} \cdot \sqrt{r_2^2 + x_2^2}}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}}. \quad (2.13)$$

Пример 2.8.

Определить полное сопротивление схемы из двух параллельно включенных элементов цеховой сети. Их сопротивления: $r_1 = 5$ мОм, $x_1 = 0$ и $r_2 = 0$, $x_2 = 5$ мОм.

Решение.

$$\begin{aligned} z_1 &= \sqrt{r_1^2 + x_1^2} = \sqrt{5^2 + 0^2} = 5 \text{ мОм}; \\ z_2 &= \sqrt{r_2^2 + x_2^2} = \sqrt{0^2 + 5^2} = 5 \text{ мОм}; \\ z_{\text{эк}} &= \frac{z_1 \cdot z_2}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}} = \frac{5 \cdot 5}{\sqrt{(5+0)^2 + (0+5)^2}} = 3,54 \text{ мОм}. \end{aligned}$$

Эквивалентные активные и реактивные сопротивления цепи, состоящей из двух параллельно включенных элементов, определяются по выражениям:

$$z_{\text{эк}} = \frac{r_2 \cdot z_1^2 + r_1 \cdot z_2^2}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} = \frac{r_2(r_1^2 + x_1^2) + r_1(r_2^2 + x_2^2)}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}; \quad (2.14)$$

$$x_{\text{эк}} = \frac{x_2 \cdot z_1^2 + x_1 \cdot z_2^2}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} = \frac{x_2(r_1^2 + x_1^2) + x_1(r_2^2 + x_2^2)}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}. \quad (2.15)$$

- При расчете токов КЗ для выбора аппаратов и проводников можно не учитывать сопротивление системы (если оно неизвестно) до ТП 6...35/0,4 кВ:

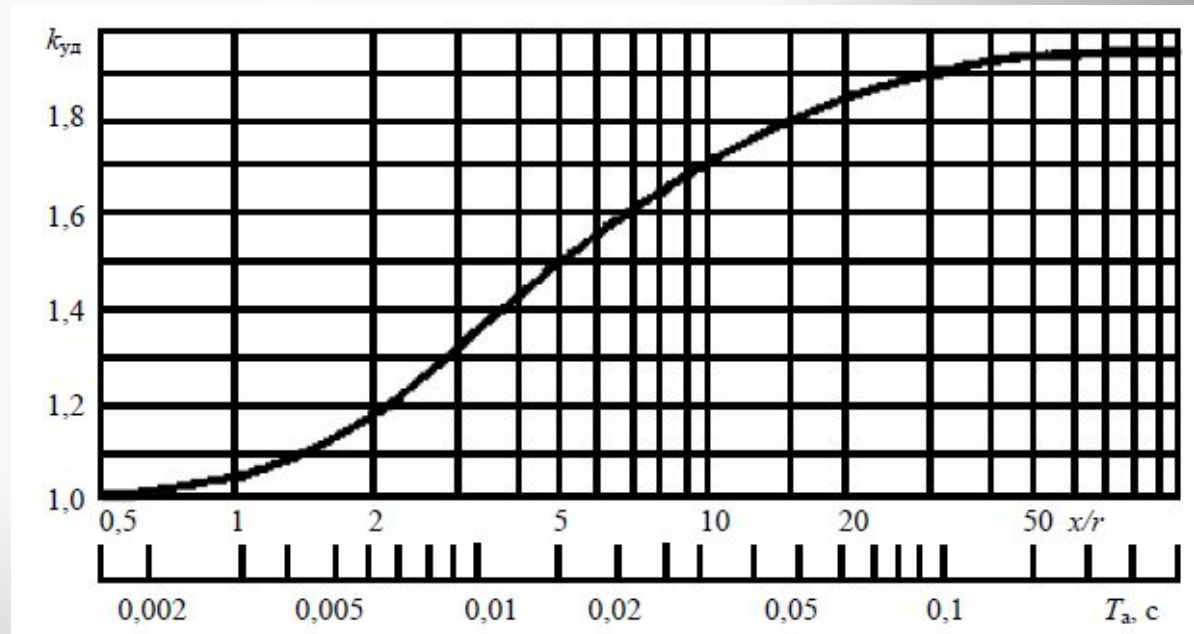
$$I_K^{(3)} = U_{\text{ном}} / \left[\sqrt{3} (Z_T + Z_{\text{п}}) \right]$$

- где $U_{\text{н}}$ – номинальное линейное напряжение вторичной обмотки понижающего трансформатора, В;
- Z_T – полное сопротивление трансформатора, приведенное к напряжению его вторичной обмотки, Ом;
- $Z_{\text{п}}$ – полное сопротивление линии от ТП до точки КЗ, включая сопротивление контактов, Ом

- Выбор защитной аппаратуры и проверка шинопроводов в цеховых сетях на электродинамическую стойкость осуществляется после расчета ударных токов

$$I_y = I_{\text{по}} \sqrt{1 + 2(K_{\text{уд}} - 1)^2}$$

- . Значения ударных коэффициентов определяют по кривой $K_{\text{уд}} = f(x/r)$, а при $x/r \leq 0,5$ принимают равными единице



Пример 2.9.

На цеховой подстанции установлен трансформатор ТМ-630/6 ($u_{кз} = 5,5 \%$; $\Delta P_{кз} = 7,6$ кВт). К распределительному щиту 0,4 кВ трансформатор присоединен алюминиевыми шинами сечением 60×8 мм², расположенными вертикально с расстоянием между фазами $a = 200$ мм (рис. 2.1). На вводе установлен автоматический выключатель. В цехе проложен магистральный шинопровод ШМА ($I_{ном} = 1250$ А), ответвление от него выполнено шинопроводом ШРА ($I_{ном} = 400$ А). В точке К1 присоединена группа электродвигателей М1 общей мощностью 200 кВт, $U_{ном} = 380$ В, $\eta = 0,94$, $\cos \phi = 0,91$. На другом ответвлении от магистрального шинопровода присоединена вторая группа двигателей М2 мощностью 150 кВт, $U_{ном} = 380$ В, $\eta = 0,92$, $\cos \phi = 0,84$. Определить активное и индуктивное сопротивление до точки короткого замыкания К1.

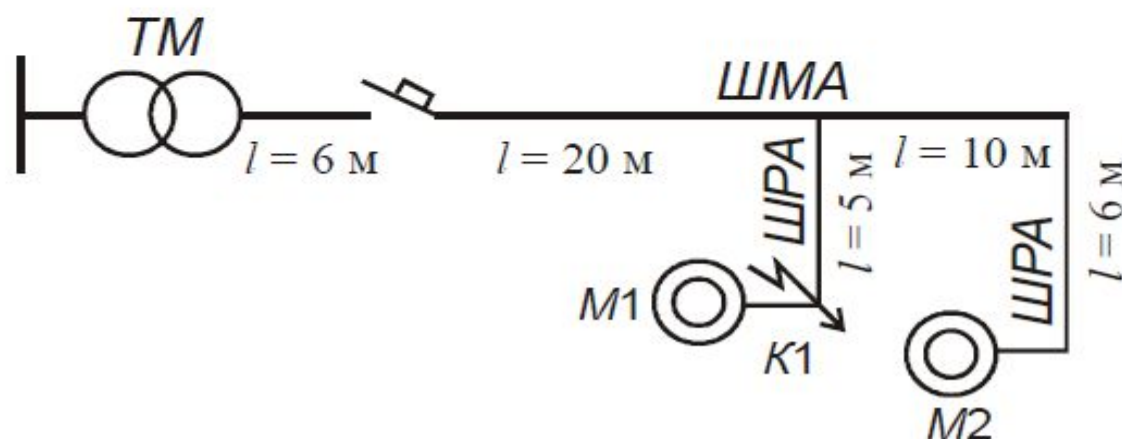


Рис. 2.1. Расчетная схема к примеру 2.9

Решение.

Принимаем, что напряжение на шинах 6 кВ цеховой подстанции неизменно. Сопротивление от источника питания до этих шин не учитываем. Расчет сопротивлений ведем в именованных единицах.

Сопротивление трансформатора по (2.4) и (2.5):

$$r_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{КЗ}} \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ, ТД}}^2} = \frac{7,6 \cdot 400^2}{630^2} = 3,06 \text{ МОМ};$$

$$X_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном.тр}}} \sqrt{\left(\frac{u_{\text{кз}}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{\text{кз}}}{S_{\text{ном.тр}}}\right)^2} = \frac{400^2}{630} \sqrt{\left(\frac{5,5}{100}\right)^2 - \left(\frac{7,6}{630}\right)^2} = 13,63 \text{ МОМ.}$$

Сопротивление токовой катушки автоматического выключателя по [4, табл. 6.16] $r_a = 0,10$ мОм, $x_a = 0,10$ мОм; переходное сопротивление контактов $r_k = 0,15$ мОм.

Сопротивление шин до распределительного щита 0,4 кВ определено в примере 2.5 и составляет: $R_{III} = 0,444$ мОм, $X_{III} = 1,068$ мОм.

Сопротивление магистрального шинпровода ($r_0 = 0,034$ МОм/м, $x_0 = 0,016$ МОм/м по [4, табл. 6.16]):

$$X_{\text{ИМА}} = x_0 \cdot l = 0,016 \cdot 20 = 0,32 \text{ МОМ},$$

$$R_{\text{III MA}} = r_0 \cdot l = 0,034 \cdot 20 = 0,68 \text{ MOM.}$$

Сопротивление распределительного шинпровода ($r_0 = 0,15$ мОм/м, $x_0 = 0,17$ мОм/м по [4, табл. 6.16]):

$$X_{\text{III PA}} = x_0 \cdot l = 0,17 \cdot 5 = 0,85 \text{ MOM},$$

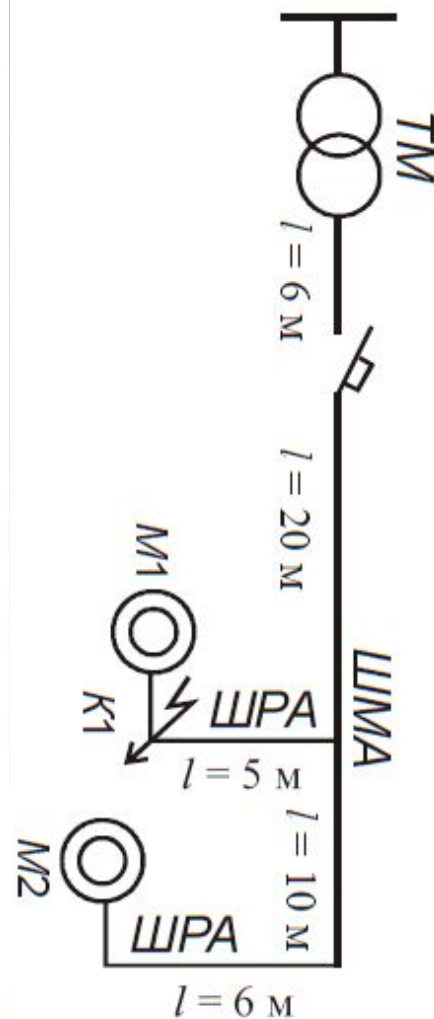
$$R_{\text{III PA}} = r_0 \cdot l = 0,15 \cdot 5 = 0,75 \text{ MOM.}$$

Результирующие сопротивления до точки КЗ:

$$R_{\text{pez}} = r_{\text{tp}} + r_{\text{a}} + r_{\text{к}} + R_{\text{III}} + R_{\text{III MA}} + R_{\text{III PA}} =$$

$$= 3,06 + 0,10 + 0,15 + 0,444 + 0,68 + 0,75 = 5,184 \text{ МОМ};$$

$$X_{\text{tot}} = x_{\text{II}} + x_{\text{I}} + X_{\text{III}} + X_{\text{III}^{\text{MA}}} + X_{\text{III}^{\text{PA}}} = 13.63 + 0.10 + 1.068 + 0.32 + 0.85 = 15.968 \text{ MOM.}$$



Токи КЗ двигателей

- Токи КЗ двигателей, присоединенных непосредственно к месту короткого замыкания, учитываются только при определении полного ударного тока КЗ:

$$i_{уд} = k_{пуск} \sqrt{2} I_{ном \Sigma}$$

- где – $k_{пуск} = I_{л} / I_{ном} \approx 4,5 - 7$ кратность пускового тока КЗ двигателей;
- $I_{ном \Sigma}$ – номинальный ток одновременно работающих двигателей, кА.

Пример

- Определить ток трехфазного КЗ в точке К4, сопротивление, Ом, элементов схемы до цехового трансформатора. Принять сопротивление, Ом, элементов схемы до цехового трансформатора 1,458 Ом

1. Приведенное к базисному напряжению $U = 0,4$ кВ сопротивление, Ом, элементов схемы до цехового трансформатора составит

$$x_{\text{рез3;0,4}} = x_{\text{рез3}} \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 1,458 \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0021.$$

2. Определяем сопротивление, мОм, цехового трансформатора

$$r_{\text{цт}} = \frac{\Delta P_{\text{к}}}{S_{\text{ном.т}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном.т}}} = \frac{12,2}{1000} \cdot \frac{0,4^2}{1000} \cdot 10^6 = 1,95;$$

$$x_{\text{цт}} = \sqrt{\left(\frac{u_{\text{к}}}{100} \right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{\text{к}}}{S_{\text{ном.т}}} \right)^2} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном.т}}} \cdot 10^6 = \sqrt{\left(\frac{5,5}{100} \right)^2 - \left(\frac{12,2}{1000} \right)^2} \cdot \frac{0,4^2}{1000} \cdot 10^6 = 8,23$$

3. Рассчитываем суммарное реактивное сопротивление, мОм, до точки К4:

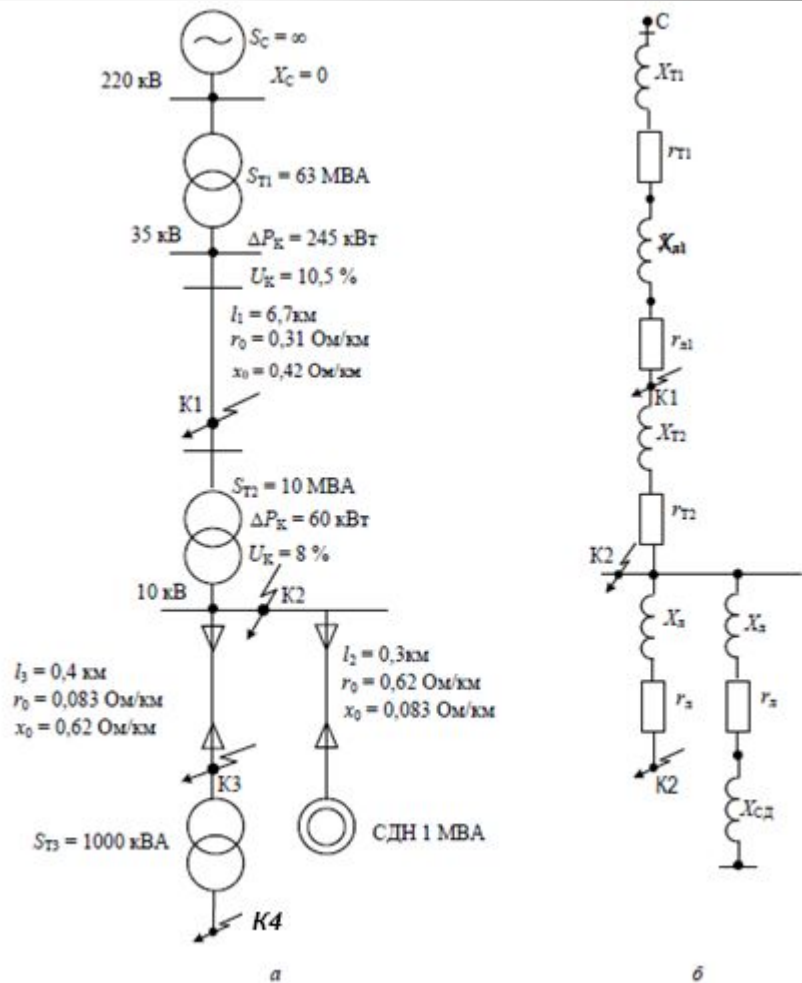
$$x_{\Sigma \text{КК}} = x_{\text{рез3;0,4}} + x_{\text{цт}} = 2,1 + 8,23 = 10,33.$$

Суммарное активное сопротивление, мОм, кроме сопротивления цехового трансформатора, должно учитывать переходные сопротивления контактов. Для этого вводим в расчет добавочное сопротивление, которое на шинах подстанции составляет 15 мОм:

$$r_{\Sigma \text{К4}} = r_{\text{цт}} + r_{\text{доб}} = 1,95 + 15 = 16,95.$$

4. Определяем ток, кА, КЗ в точке К4:

$$I_{\text{к.К4}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \sqrt{x_{\Sigma \text{КК}}^2 + r_{\Sigma \text{КК}}^2}} = \frac{400}{1,73 \cdot \sqrt{10,33^2 + 16,95^2}} = 11,65.$$

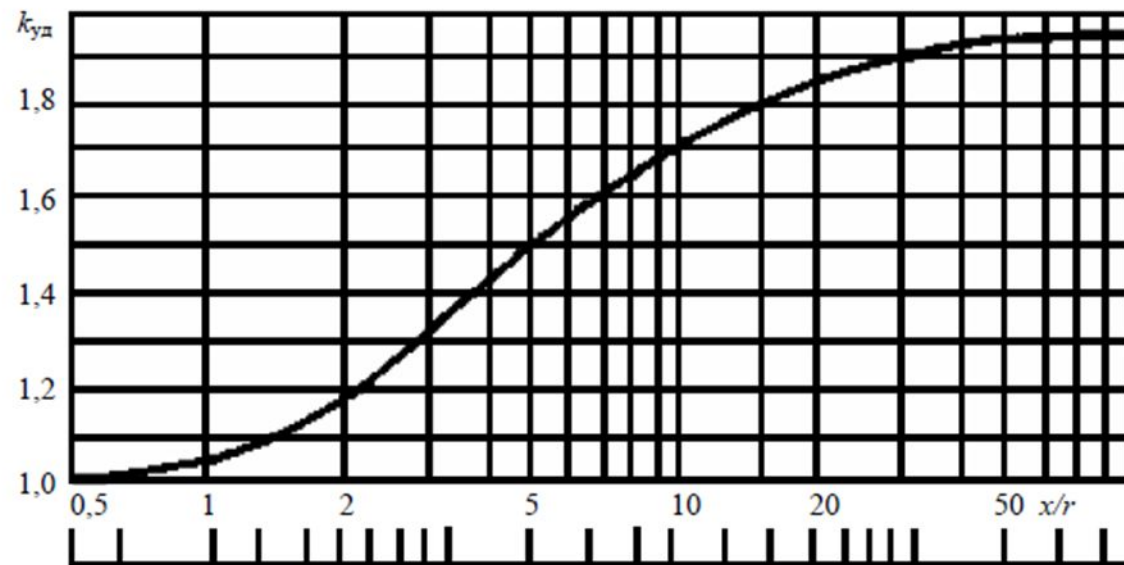


- Рассчитываем ударный ток кА в точке К4. Находим ударный коэффициент по кривой в зависимости от от x_{Σ}/r_{Σ} сечения

$$T_{al} = \frac{x_{\Sigma K4}}{r_{\Sigma K4}} = \frac{10,33}{16,95} = 0,61;$$

$$K_{ydl} = 1,02;$$

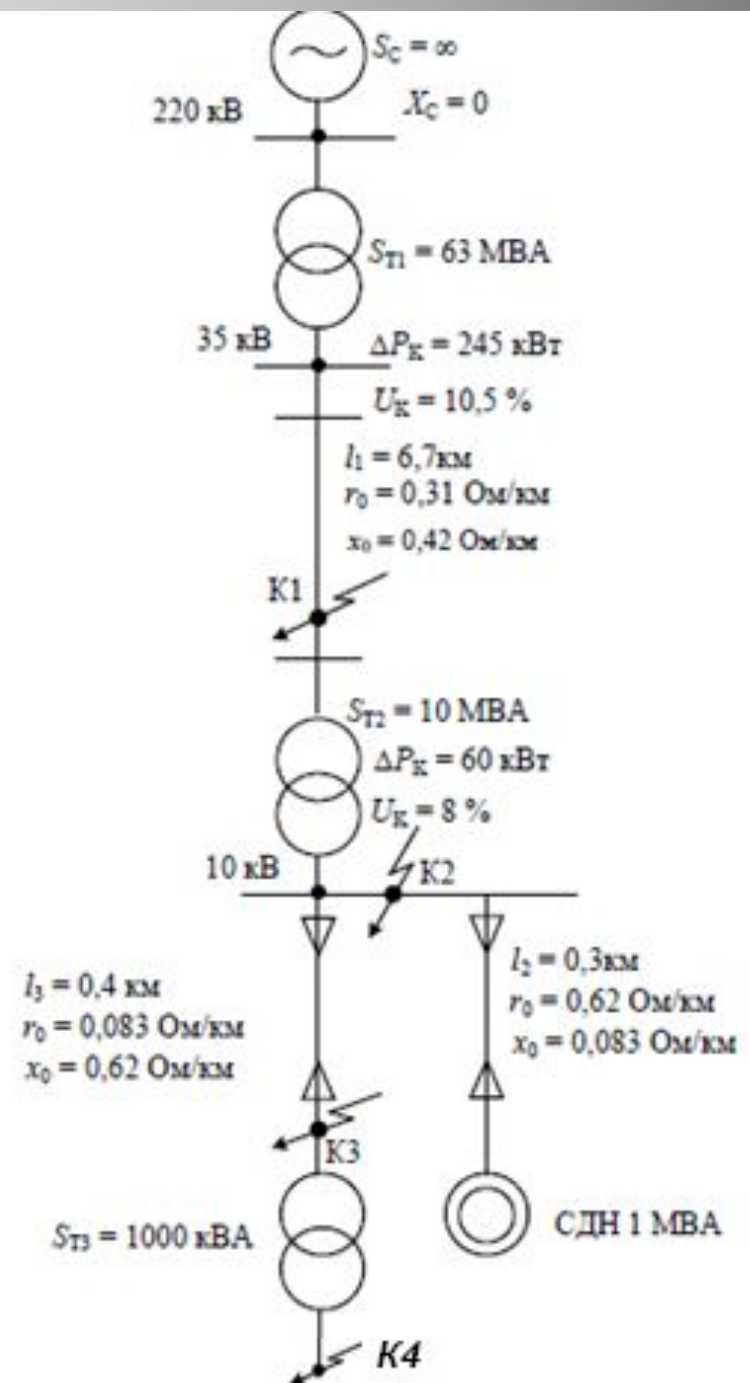
$$i_{уд4} = \sqrt{2} I_{к.К4} K_{ydl} = 1,41 \cdot 11,65 \cdot 1,02 = 16,75.$$

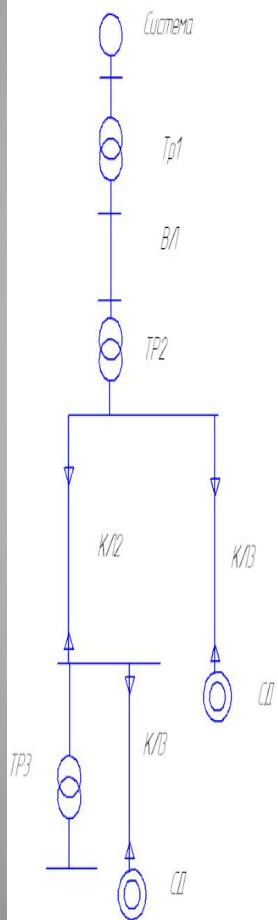


Задание

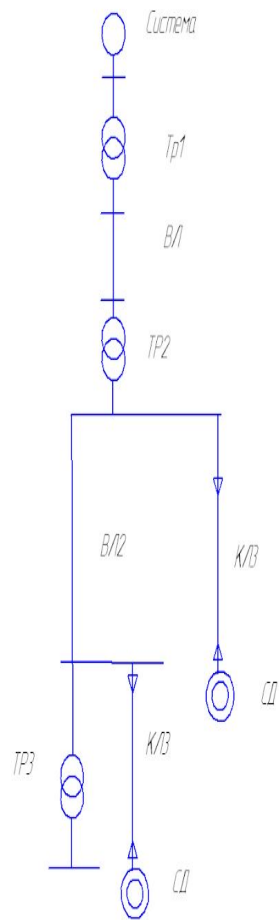
- Рассчитать токи КЗ в точках схемы, указанных на **рис** при условии, что питание осуществляется от системы неограниченной мощности.
- Исходные данные для расчета приведены в **табл.**
- Принять, что воздушная линия выполнена проводом активным сопротивлением $0,3 \text{ Ом/км}$, реактивным сопротивлением $0,4 \text{ Ом/км}$
- Для кабельных линий принять $r_0=0,6$ $x_0=0,08 \text{ Ом/км}$
- Данные по трансформаторам принять в соответствии с таблицей

Мощность, мВт	ΔРк, кВт	Укз%
0,63	7,6	4,5
1	11,6	5,5
1,6	18	6,5
16	85	10,5
25	120	10,5
40	170	10,5
63	245	10,5

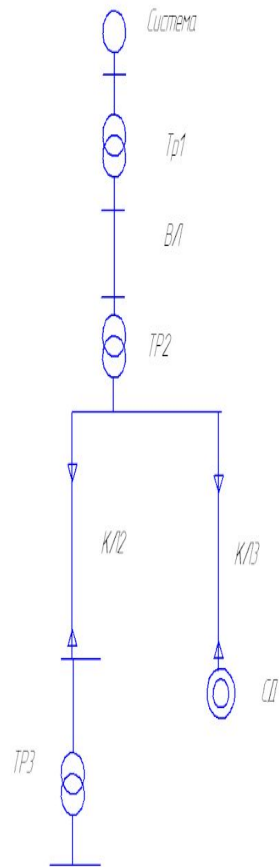




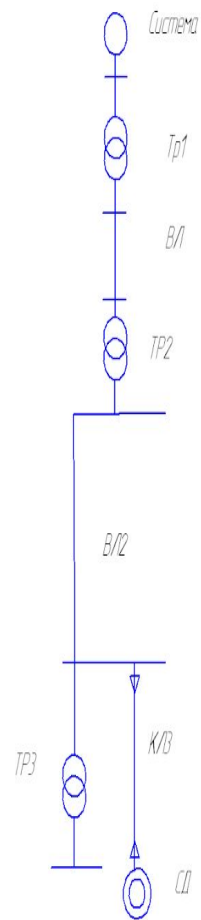
CX1



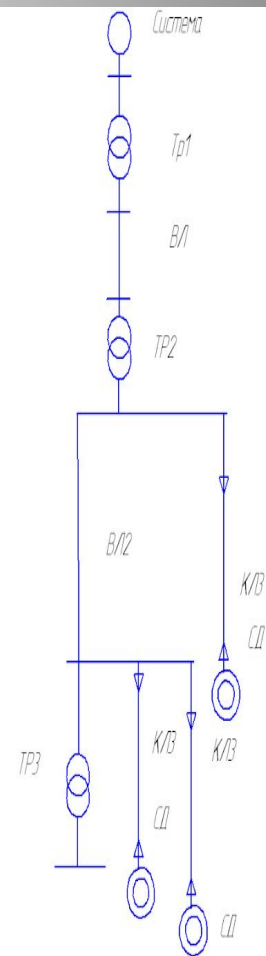
CX2



CX3



CX4



Варианты исходных данных для расчета токов короткого замыкания

Вариант	St1	St2	St3	U1	U2	U3	U4	I1	I2	I3	Scдн
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	63	25	1,6	220	110	10	0,4	15	0,5	0,2	0,5
2	63	40	1	220	110	10	0,4	12	0,6	0,3	0,8
3	63	40	1	220	110	10	0,4	14	0,4	0,4	1
4	40	25	1,6	110	35	10	0,4	9	0,3	0,5	1,25
5	40	16	0,63	110	35	10	0,4	10	0,4	0,3	1,25
6	40	25	0,63	110	35	6	0,4	8	0,5	0,2	1
7	25	16	1,6	110	35	6	0,4	11	0,6	0,25	1
8	25	16	1	110	35	6	0,4	9	0,4	0,35	1
9	25	16	1	220	35	10	0,4	7	0,3	0,45	0,63
10	63	25	1	220	35	10	0,4	12	0,5	0,25	0,8
11	63	25	2,5	110	35	10	0,4	13	0,6	0,4	1,25
12	40	25	2,5	110	35	6	0,4	8	0,6	0,3	0,5
13	40	16	1,6	220	110	10	0,4	5	0,3	0,2	0,5
14	16	10	0,63	110	35	6	0,4	7	0,8	0,25	1,25
15	16	10	0,63	110	35	6	0,4	6	0,6	0,45	0,8
16	63	40	0,4	110	35	6	0,4	16	0,7	0,5	0,8
17	40	25	1,6	110	35	10	0,4	17	0,6	0,4	0,63
18	25	16	1	220	110	10	0,4	10	0,5	0,35	0,63
19	25	16	1	220	110	10	0,4	11	0,8	0,2	0,8
20	25	10	0,63	110	110	10	0,4	12	0,4	0,15	0,8
21	40	25	1,6	110	35	6	0,4	14	0,5	0,45	1
22	25	16	1	110	35	10	0,4	9	0,7	0,35	1
23	16	10	0,63	110	35	6	0,4	8	0,6	0,5	1
24	63	25	1,6	110	35	6	0,4	12	0,5	0,4	1,25
25	40	25	1,6	220	110	10	0,4	15	0,4	0,3	0,8
26	25	16	1	220	35	10	0,4	13	0,55	0,4	1
27	16	10	1	110	35	6	0,4	17	0,45	0,2	1
28	25	16	0,63	110	35	10	0,4	9	0,65	0,25	0,8
29	40	25	1	110	35	10	0,4	8	0,6	0,35	0,8
30	63	40	1,6	110	35	10	0,4	11	0,4	0,2	1

Пример 2.12.

Комплектная трансформаторная подстанция с трансформатором мощностью 1000 кВА, напряжением 6,3/0,4 кВ и $u_{K3} = 5,5 \%$ питается от энергосистемы. Ток КЗ со стороны энергосистемы на зажимах 6,3 кВ трансформатора составляет в максимальном режиме 17 кА, в минимальном – 10 кА. Определить параметры для выбора автоматических выключателей отходящих от КТП линий,

Решение.

1. Расчет при металлическом КЗ в максимальном режиме работы питающей энергосистемы.

Сопротивление питающей энергосистемы, приведенное к напряжению 0,4 кВ по соотношениям (2.1) и (2.2), составляет:

$$X_{c.HH} = X_{c.BH} \left(\frac{U_{ном.тр.HH}}{U_{ном.тр.BH}} \right)^2 = \frac{U_{c.BH}}{\sqrt{3} \cdot I_{K3 BH}^{(3)}} \left(\frac{U_{ном.тр.HH}}{U_{ном.тр.BH}} \right)^2 = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 17 \cdot 10^3} \left(\frac{0,4 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} \right)^2 =$$
$$= 0,86 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} = 0,86 \text{ мОм}.$$

Сопротивления трансформатора по таблице 2.1: $x_{тр} = 8,5 \text{ мОм}$, $r_{тр} = 2 \text{ мОм}$.

Максимальный ток металлического трехфазного КЗ на шинах 0,4 кВ определяется по (2.27) и составляет:

$$I_{K3 \max}^{(3)} = \frac{U_{ср.H}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,86 + 8,5)^2 + 2^2}} = 24 \text{ кА}.$$

Периодическая составляющая тока подпитки от электродвигателей:

$$I_{дв}'' = 2,29 I_{ном.тр} = 2,29 \frac{S_{ном.тр}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = 2,29 \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 3,3 \text{ кА}.$$

Суммарное значение тока для выбора аппаратуры (с учетом подпитки от электродвигателей):

$$I_{\text{КЗ}\Sigma}^{(3)} = I_{\text{КЗрасч}}^{(3)} + I_{\text{дв}}'' = 24 + 3,3 = 27,3 \text{ кА.}$$

Отношение результирующих сопротивлений от шин 0,4 кВ:

$$\frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} = \frac{x_{\text{с.нн}} + x_{\text{тр}}}{r_{\text{тр}}} = \frac{0,86 + 8,5}{2} = 4,67.$$

С учетом этого отношения определяем ударный коэффициент тока короткого замыкания $\kappa_{\text{уд}} = 1,5$, а ударный ток от системы составит:

$$i_{\text{уд}} = \kappa_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{КЗmax}}^{(3)} = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 24 = 50,9 \text{ кА.}$$

Суммарный ударный ток с учетом подпитки от двигателей:

$$i_{\text{уд}\Sigma} = i_{\text{уд}} + 3,22 \cdot I_{\text{ном.тр}} = i_{\text{уд}} + 3,22 \frac{S_{\text{ном.тр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = 50,9 + 3,22 \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 55,5 \text{ кА.}$$

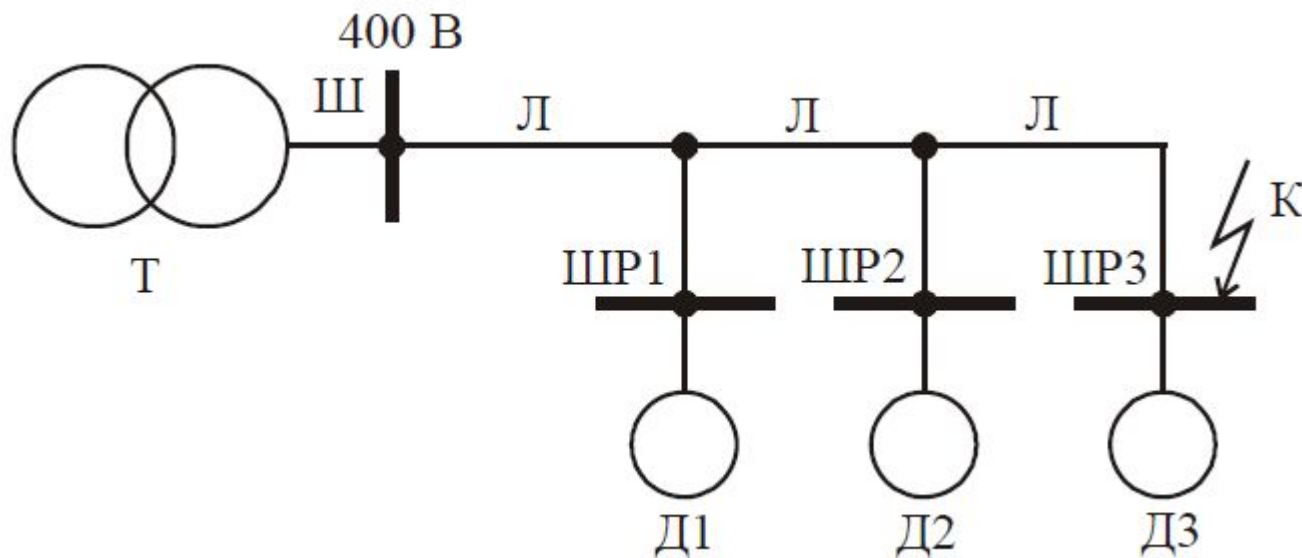
Тепловой импульс тока КЗ для автоматов серии «Электрон» при выдержке времени срабатывания отсечки $t_{\text{с.о}} = 0,25$ с:

$$\begin{aligned} B_{\text{КЗ}} &= \left(I_{\text{КЗmax}}^{(3)} \right)^2 \cdot (t_{\text{с.о}} + t_{\text{а}} + T_{\text{а.ср}}) + 1,5 \left(I_{\text{дв}}'' \right)^2 \cdot T_{\text{а.ср}} + 4 I_{\text{дв}}'' \cdot I_{\text{КЗmax}}^{(3)} \cdot T_{\text{а.ср}} = \\ &= 24^2 (0,25 + 0,06 + 0,03) + 1,5 \cdot 3,3^2 \cdot 0,03 + 4 \cdot 3,3 \cdot 24 \cdot 0,03 = 206 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.} \end{aligned}$$

Аналогично для выключателей АЗ700 при $t_{\text{с.о}} = 0,1$ с имеем $B_{\text{КЗ}} = 90,6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$

6. Определить ток трехфазного КЗ в точке К (рис. 2.20) цеховой сети.

Трансформатор 630 кВА, 10/0,4 кВ питается от системы бесконечной мощности ($x_c = 0$). Шины III медные сечением 60×8 мм, длиной 10 м, расстояние между фазами 160 мм, расположение шин по фазам – в одной плоскости. Участки линии Л выполнены медными проводами, проложенными открыто по стене, сечение 35 мм^2 , общая длина участков 3×50 м. Участки к ШР выполнены проводами ПР16 в газовых трубах (все три провода), длина каждого участка 25 м; D_1, D_2, D_3 – три одинаковые группы двигателей каждый мощностью 120 кВт при КПД $\eta = 0,9$; $\cos\varphi = 0,85$ и $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$.



11. Определить токи КЗ в точках сети 0,4 кВ, указанных на рис. 2.23, при условии, что сопротивления элементов схемы электроснабжения высокого напряжения до цехового трансформатора составляют $r_{\Sigma 10} = 338 \text{ мОм}$, $x_{\Sigma 10} = 447,9 \text{ мОм}$. Длина шинпровода типа ШМА до точки К2 равна 10 м, до точки К3 – 20 м; длина шинпровода типа ШРА до точки присоединения ШР1 составляет 20 м, до М1 – 15 м; длина кабельной линии до ШР1 – 10 м, сечение алюминиевых жил – 35 мм^2 ; до ШР2 – 20 м, сечение алюминиевых жил – 50 мм^2 ; двигатели М2 и М3 подключены кабелем АНРГ-(4×25) длиной по 12 м.

