

1.3. Расчет ожидаемого тока короткого замыкания

Важным параметром при выборе защитной аппаратуры является ожидаемый ток короткого замыкания (КЗ).

Причем ожидаемый ток КЗ может иметь как минимальное, так и максимальное значения.

Для того чтобы рассчитать максимальный ожидаемый ток короткого замыкания в реальной цепи (в дальнейшем ток КЗ), необходимо знать параметры соединительных кабелей и энергосистемы. Параметры соединительных кабелей определяются из условий номинальной работы потребителя (см. выше).

Токи КЗ могут быть рассчитаны для заданной схемы электроснабжения или определены по расчетным кривым для широко распространенных типов трансформаторов, мощности энергосистемы, параметров соединительных кабелей с учетом и без учета токоограничивающего действия дуги в месте повреждения. При этом не учитывается активное сопротивление энергосистемы и сопротивление шин, а переходное сопротивление в месте контакта принимается равным $r_{пк} = 15 \text{ мОм}$.

По току, протекающему в расчетной цепи в длительном режиме $I_{расч}$, выбирается тип соединительного кабеля, его сечение и удельное сопротивление кабеля ($r_{уд}$ и $x_{уд}$), что дает возможность определить активное и индуктивное сопротивление кабелей (r_k и x_k).

$$r_k = r_{уд} l; \quad (1.2)$$

$$x_k = x_{уд} l.$$

$r_{уд}$ и $x_{уд}$ выбираются из табл. П6.1.

Длина кабеля l – это длина соединительного кабеля (провода), который соединяет потребителя с распределительным устройством.

Как правило, в длинных кабельных линиях, сечение которых не превышает 16 мм^2 , удельное сопротивление кабеля слишком велико, что значительно ограничивает ток КЗ. Тем не менее, целесообразно оценить активное и индуктивное сопротивление соединительных проводов, а при расчете токов КЗ на зажимах ВРУ – это необходимо делать обязательно.

Другая составляющая сопротивления на пути тока КЗ это сопротивление вторичной обмотки питающего силового трансформатора: r_T и x_T .

Параметры вторичной обмотки трансформаторов, как правило, приводятся в технических данных на силовой трансформатор. Активное и индуктивное сопротивления трансформаторов 6(10)/0,4 кВ приведено в табл. П6.2. Они выбираются по номинальной

мощности трансформатора, напряжению КЗ $U_K\%$ и схеме соединения обмоток трансформатора.

Значительно сложнее оценить параметры энергосистемы.

Силовой трансформатор (в составе комплектной трансформаторной подстанции КТП) получает питание от источников питания (энергосистемы), причем непосредственно сами источники могут находиться на значительных расстояниях от КТП, а параметры соединительных кабелей зачастую не известны. Кроме того, на пути соединения источника и КТП существует большая группа силовых аппаратов, имеющих свои переходные сопротивления контактов. Все это затрудняет точный расчет сопротивления энергосистемы.

Существует ряд методов упрощенного расчета параметром энергосистемы. Наиболее перспективным представляется расчет параметров энергосистемы с использованием понятия **«приведенное индуктивное сопротивление энергосистемы к вторичной обмотки трансформатора - x_c »**.

На практике индуктивное сопротивление энергосистемы x_c задается в соотношении с индуктивным сопротивлением x_T вторичной обмотки трансформатора, а активным сопротивлением энергосистемы пренебрегают. Принято считать x_c/x_T равным 2; 1; 0,1 по мере роста мощности энергосистемы.

Если такое соотношение не известно (вы не знаете мощность своей питающей энергосистемы), то можно рассчитать x_c по следующей формуле:

$$x_c = U_{HH}^2 / S_K, \quad (1.3)$$

$$S_K = \sqrt{3} \cdot I_{K3B} \cdot U_{BH}, \quad (1.4)$$

где S_K – мощность КЗ у выводов обмотки высшего напряжения;

I_{K3B} – действующее значение периодической составляющей тока КЗ у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора;

U_{BH} – высшее (первичное фазное) напряжение трансформатора;

U_{HH} – низшее (вторичное фазное) напряжение трансформатора.

Суммарное активное сопротивление цепи от трансформатора до нагрузки составляет:

$$r_{K3} = r_T + r_K + r_{пк}. \quad (1.5)$$

Суммарное реактивное сопротивление цепи:

$$x_{K3} = x_c + x_T + x_K. \quad (1.6)$$

Тогда модуль полного сопротивления до точки КЗ:

$$z_{K3} = \sqrt{x_{K3}^2 + r_{K3}^2}. \quad (1.7)$$

Ток трехфазного КЗ равен:

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = U_{\text{HH}} / z_{\text{кз}} \quad (1.8)$$

Ток двухфазного КЗ в сетях с изолированной нейтралью:

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \sqrt{3} U_{\text{HH}} / (2 z_{\text{кз}}) = 0,866 I_{\text{кз}}^{(3)} \quad (1.9)$$

Ток однофазного КЗ в том же месте (между фазой и нейтралью)

$$I_{\text{кз}}^{(1)} = U_{\text{HH}} / \sqrt{(2x_1 + x_0)^2 + (r_1 + r_0)^2}, \quad (1.10)$$

где r_1 и x_1 – активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи до точки КЗ; r_0 и x_0 активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности цепи.

Для определения тока КЗ можно воспользоваться и расчетными кривыми.

Для расчета минимального ожидаемого тока КЗ на практике вводят ряд допущений:

- рост сопротивления в силу нагрева проводника током КЗ составляет 50%;
- при КЗ напряжение источника питания снижается до 80% номинального значения.

Тогда ток трехфазного КЗ в цепях с изолированной нейтралью определяется как

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,8 \cdot \sqrt{3} U_{\text{HH}} / (1,5 \cdot \rho \cdot 2 \cdot l/S), \quad (1.11)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление жилы кабеля, Ом·мм²/м, при 20°С;

l , S – соответственно, длина (м) и сечение (мм²) соединительного кабеля.

Тогда ток трехфазного КЗ в цепях с заземленной нейтралью определяется как

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,8 U_{\text{HH}} / (1,5 \cdot \rho \cdot (1+m) \cdot l/S), \quad (1.12)$$

где m – соотношение между сопротивлением нейтрального провода и сопротивлением фазного провода или соотношение между площадью поперечного сечения фазного провода и площадью поперечного сечения нейтрального провода, если они сделаны из одного и того же материала:

ρ – принимается 0,018 [Ом·мм²/м] для меди и 0,027 [Ом·мм²/м] для алюминия;

для проводников с площадью поперечного сечения выше 95 мм² необходимо учитывать реактивное сопротивление проводников;

коэффициент 1,5 учитывает увеличение сопротивления проводников в результате повышения температуры.

По минимальному ожидаемому току КЗ выбирают ток мгновенной отсечки автоматического выключателя, величина которой должна быть не менее расчетного минимального тока КЗ.

На рис.1.5 дана приведенная схема электроснабжения здания от автономной комплектной трансформаторной подстанции (КТП).

Таблица П6.1

Удельное сопротивление (прямой последовательности кабелей с
алюминиевыми жилами при температуре проводников 65°C, мОм/м

Сечение жил, мм ²		r _{уд}	X _{уд}	
фазных	нулевой		трехжильный кабель	четырёхжильный кабель
3x4	2,5	9,610	0,092	0,098
3x6	4	6,410	0,087	0,094
3x10	6	3,840	0,082	0,088
3x16	10	2,400	0,078	0,084
3x25	16	1,540	0,062	0,072
3x35	16	1,100	0,061	0,068
3x50	25	0,769	0,06	0,066
3x70	35	0,549	0,059	0,065
3x95	50	0,405	0,057	0,064
3x120	50	0,320	0,057	0,064
3x150	70	0,256	0,056	0,063
3x185	70	0,208	0,056	0,063
3x240	-	0,160	0,055	-

Примечание. Для кабелей с медными жилами приведенные в таблице значения
активного сопротивления следует уменьшить в 1,7 раза.

Таблица П6.2

Активное и индуктивное сопротивления, мОм, трансформаторов 6(10)/0,4 кВ

Мощность трансформатора, кВ·А	$u_k, \%$	$x_{1T} = x_{2T}$	x_{0T}	$r_{1T} = r_{2T}$	r_{0T}	$Z_{T(1)3}$
Соединение обмоток «звезда/звезда с нулем»						
100	4,5	64,7	581,8	31,5	253,9	260,0
160	4,5	41,7	367,0	16,6	150,8	162,0
250	4,5	27,2	234,9	9,4	96,5	104,0
400	4,5	17,1	148,7	5,5	55,6	65,0
630	5,5	13,6	96,2	3,1	30,3	43,0
1000	5,5	8,5	60,6	2,0	19,1	27,0
1000	8,0	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 «треугольник/звезда с нулем»						
100	4,5	66,0	66,0	36,3	36,3	75,3
160	4,5	43,0	43,0	19,3	19,3	47,0
250	4,5	27,0	27,0	10,7	10,7	30,0
400	4,5	17,0	17,0	5,9	5,9	18,7
630	5,5	13,5	13,5	3,4	3,4	14,0
1000	5,5	8,6	8,6	2,0	2,0	9,0
1000	8,0	12,7	12,7	1,9	1,9	12,8
1600	5,5	5,4	5,4	1,1	1,1	5,7

Расчетные кривые для нахождения токов короткого замыкания в сетях 0,4 кВ

Рис. П8 Токи к. з. на выводах 0,4 кВ трансформаторов различной мощности (кВ·А) в зависимости от соотношения x_c/x_T (сплошные линии — с учетом переходных сопротивлений $R_0=15$ мОм, штриховые — металлическое к. з.); *а* — трехфазные; *б* — однофазные при соединении обмоток трансформатора Δ/∇ ; *в* — однофазные при соединении обмоток ∇/∇ .
Для $S=1600, 1000, 630$ кВ·А — $u_H=5,5\%$;
для $S=400$ кВ·А — $u_H=4,5\%$.

