



Кафедра электроснабжения ЮЗГУ



Программа повышения квалификации

Практическое занятие

Расчет ТКЗ в электрических сетях



РАСЧЕТ ТОКОВ КЗ В ЦЕХОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Цель работы: изучение методов расчета токов КЗ в цеховой электрической сети напряжением 380 В.

Краткие методические указания

Расчет токов КЗ в цеховой сети производим в соответствии с ГОСТ 28249-93. Также можно руководствоваться РД 153-34.0-20.527-98. В электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ расчет токов КЗ выполняют с целью проверки коммутационной аппаратуры и проводников на стойкость к токам КЗ, проверки чувствительности и селективности действия защит.

В общем случае для выбора и проверки электрооборудования по условиям КЗ следует определить:

- 1) начальное значение периодической составляющей тока КЗ;
- 2) апериодическая составляющая тока КЗ;
- 3) ударный ток КЗ;
- 4) действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени, вплоть до расчетного времени размыкания поврежденной цепи.

При расчете токов КЗ учитывают все активные и индуктивные сопротивления короткозамкнутой цепи, включая активные сопротивления различных контактов и контактных соединений, а также сопротивлений электрической дуги в месте КЗ – п.1.4 ГОСТ 32144-2013.

Для расчета токов КЗ составляется схема замещения, замещения, в которую входят все сопротивления цепи до точки КЗ. Расчет сопротивлений отдельных элементов выполняется по соотношениям, приведенным в ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии

в системах электроснабжения общего назначения. Для примера приведены расчеты сопротивлений питающих системы и трансформаторов.

Сопротивление питающей системы, представляющей собой источник неизменного по амплитуде напряжения, подключенный к обмотке высшего напряжения трансформатора, питающего рассматриваемую сеть, в миллиОмах :

$$x_c = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{\sqrt{3} I_{\text{к.ВН}} U_{\text{ср.ВН}}} = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{S_{\text{к}}} \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ср.НН}}$ – среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке низшего напряжения трансформатора, В;

$U_{\text{ср.ВН}}$ - среднее номинальное напряжение сети, к которой подключена обмотка высшего напряжения трансформатора, В;

$I_{\text{к.ВН}}$ – действующее значение периодической составляющей тока при трехфазном КЗ у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, кА;

$S_{\text{к}}$ – условная мощность короткого замыкания у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, МВ·А.

При отсутствии указанных данных эквивалентное индуктивное сопротивление системы в миллиОмах допускается рассчитывать по формуле

$$x_c = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{\sqrt{3} I_{\text{ном.откл}} U_{\text{ср.ВН}}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{ном.откл}}$ – номинальный ток отключения выключателя, установленного на стороне высшего напряжения понижающего трансформатора.

Активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности понижающих трансформаторов ($r_{\text{Т}}$, $x_{\text{Т}}$) в миллиомах, приведенные к ступени низшего напряжения сети, рассчитывают по формулам:

$$r_{\text{Т}} = \frac{P_{\text{к.ном}} U_{\text{НН.ном}}^2}{S_{\text{Т.ном}}^2} \cdot 10^6 \quad (3)$$

$$x_{\text{Т}} = \sqrt{\mu_{\text{к}}^2 - \left(\frac{100 P_{\text{к.ном}}}{S_{\text{Т.ном}}} \right)^2} \cdot \frac{U_{\text{НН.ном}}^2}{S_{\text{Т.ном}}} \cdot 10^4,$$

где $S_{T,ном}$ – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

$P_{к,ном}$ – потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт;

$U_{НН,ном}$ – номинальное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ;

U_k – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности понижающих трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме Δ/Y_0 , при расчете КЗ в сети низшего напряжения следует принимать равными соответственно активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности. При других схемах соединения обмоток трансформаторов активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности принимаются по данным заводов изготовителей.

Расчет токов трехфазного КЗ

При электроснабжении электроустановки от энергосистемы через понижающий трансформатор начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока КЗ ($I_{ПО}$) в килоамперах без учета подпитки от электродвигателей рассчитывается по формуле

$$I_{ПО} = \frac{U_{ср.НН}}{\sqrt{3} \sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}}, \quad (4)$$

где $U_{ср.НН}$ - среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло короткое замыкание, В;

$r_{1\Sigma}$, $x_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, мОм.

Наибольшее начальное значение апериодической составляющей тока КЗ (i_{a0}) в общем случае считают равным амплитуде периодической составляющей тока в начальный момент КЗ

$$i_{a0} = \sqrt{2} I_{ПО}. \quad (5)$$

Ударный ток трехфазного КЗ ($i_{уд}$) в электроустановках с одним источником энергии (энергосистема или автономный источник) рассчитывают по формуле

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{по} K_{уд}, \quad (6)$$

где $K_{уд}$ – ударный коэффициент, определяемый по следующей формуле

$$K_{уд} = (1 + \sin \varphi_k e^{-t_{уд}/T_a}), \quad (7)$$

где T_a – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока

КЗ, рассчитывается как

$$T_a = \frac{x_\Sigma}{\omega_c r_\Sigma}, \quad (8)$$

где x_Σ и r_Σ – результирующие индуктивное и активное сопротивления цепи КЗ, мОм;

ω_c – синхронная угловая частота напряжения сети, рад/с.

φ_k – угол сдвига по фазе напряжения или ЭДС источника и периодической составляющей тока КЗ, который рассчитывают по формуле

$$\varphi_k = \arctg x_{1\Sigma} / r_{1\Sigma}; \quad (9)$$

$t_{уд}$ – время от начала КЗ до появления ударного тока, с, равно

$$t_{уд} = 0,01 \frac{\pi/2 + \varphi_k}{\pi}. \quad (10)$$

Расчет токов однофазного КЗ

Расчет токов несимметричных КЗ, к которым относится однофазное КЗ, выполняют с использованием метода симметричных составляющих. При этом предварительно необходимо составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Значения токов однофазного КЗ чаще всего используется для проверки чувствительности защитных аппаратов к токам КЗ.

В схему замещения прямой последовательности должны быть введены

все элементы расчетной схемы. Схема замещения обратной последовательности также должна включать все элементы расчетной схемы. Сопротивление обратной последовательности трансформаторов, реакторов, воздушных и кабельных линий следует принимать равным сопротивлению прямой последовательности.

Параметры элементов схемы замещения нулевой последовательности определяются согласно п. 8.2.1 ГОСТ 32144-2013.

Если электроснабжение осуществляется от энергосистемы через понижающий трансформатор, то начальное значение периодической составляющей тока однофазного КЗ от системы ($I_{по}^{(1)}$) в килоамперах рассчитывается по формуле

$$I_{по}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{ср.НН}}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}, \quad (11)$$

где $r_{1\Sigma}$ и $x_{1\Sigma}$ определяют как для расчета тока трехфазного КЗ;

$r_{0\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$ - суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивление нулевой последовательности расчетной схемы относительно точки КЗ, мОм.

Порядок выполнения работы

1. Для заданного цеха в практическом занятии раздела 3 «Расчет электрических нагрузок» и выбранного электрооборудования в практическом занятии раздела 4 «Выбор электрооборудования» составить схему замещения.

2. Рассчитать параметры схемы замещения.

3. Для заданных точек КЗ рассчитать значения токов.

Контрольные вопросы

1. Назначение расчетов токов КЗ в цеховой сети.

2. Основные особенности расчетов токов КЗ в сетях напряжением до 1000 В.

3. Составление схемы замещения для расчета токов трехфазных КЗ.

4. Составление схемы замещения для расчета токов однофазных КЗ.

Пример выполнения практического задания

Составление схемы замещения

Расчет выполняется с целью выбора коммутационной аппаратуры, шинпроводов, кабелей и другого электрооборудования, а также для проверки чувствительности защит.

Особенности расчета токов КЗ в сетях до 1000 В:

- учитываются активные и индуктивные сопротивления всех элементов цепи до точки короткого замыкания;
- при питании от энергосистемы не учитывается затухание периодической составляющей тока КЗ ввиду большой удаленности генераторов;
- при питании от маломощных местных электростанций или от автономных генераторов напряжением выше 1000 В затухание периодической составляющей тока КЗ не учитывается, если мощность генератора превышает мощность понижающего трансформатора в пять и более раз;
- при питании от автономных или аварийных генераторов напряжением 0,4 кВ затухание учитывается независимо от мощности генератора.

В зависимости от цели расчета учитывают разные расчетные режимы работы электрической схемы. При выборе аппаратуры расчетным считается максимальный режим, так как токи КЗ имеют наибольшие значения. Этот же режим принимается и при расчетах токов пуска и самозапуска электродвигателей с целью обеспечения несрабатывания защит в сети. При проверке чувствительности защит расчетным является минимальный режим, при котором токи КЗ имеют наименьшие значения. Этот же режим используют для проверки возможности пуска и самозапуска электродвигателей.

Большинство КЗ в сетях до 1000 В происходит через электрическую

дугу, сопротивление которой существенно ограничивает ток КЗ. В 85% случаев КЗ возникают вследствие металлического контакта, однако электродинамические силы, пропорциональные квадрату тока, разбрасывают металлические проводники, разрывают закоротки небольшого сечения и КЗ переходит в дуговое.

Расчет выполним для трех точек КЗ, по ниже приведенной схеме.

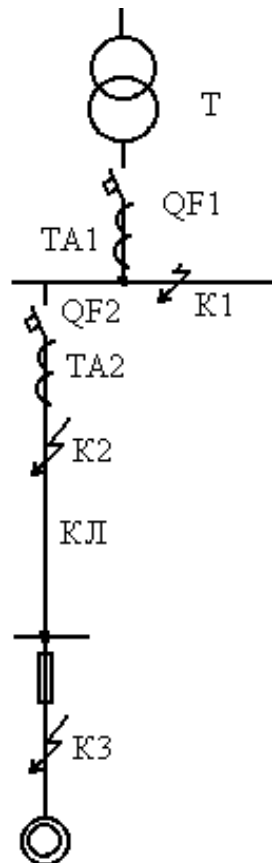


Рисунок 1. Расчетная схема

Для расчетов токов короткого замыкания составляют схему замещения, в которую входят все сопротивления цепи до точки КЗ. Расчет сопротивлений отдельных элементов выполняется по приведенным ниже соотношениям.

Составляем схему замещения для рассматриваемых точек КЗ

Точка К1 индуктивные сопротивления

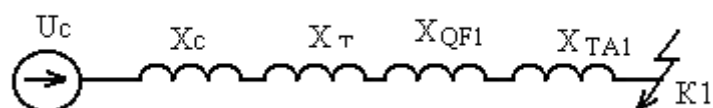


Рисунок 2. Схема замещения для индуктивных сопротивлений.

Точка К1 активные сопротивления

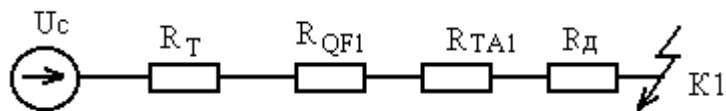


Рисунок 3. Схема замещения для активных сопротивлений

Точка К2 индуктивные сопротивления

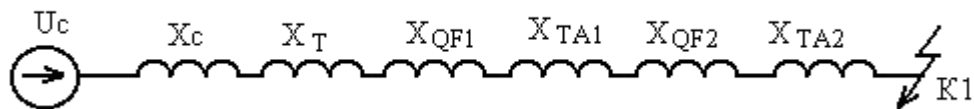


Рисунок 4. Схема замещения для индуктивных сопротивлений

Точка К2 активные сопротивления

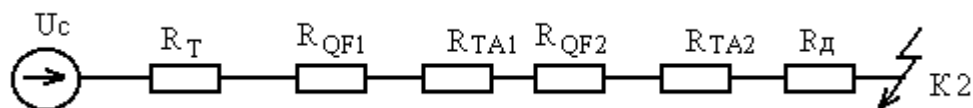


Рисунок 5. Схема замещения для активных сопротивлений

Точка К3 индуктивные сопротивления

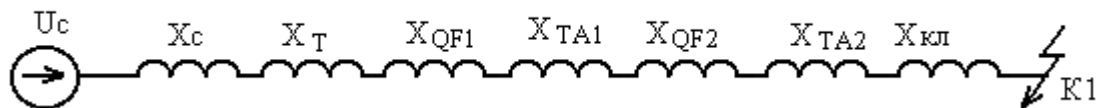


Рисунок 6. Схема замещения для индуктивных сопротивлений

Точка К3 активные сопротивления

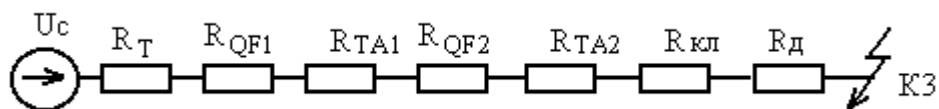


Рисунок 7. Схема замещения для активных сопротивлений

Определение сопротивлений и расчет токов КЗ

Сопротивление системы:

$$X_c = \frac{U_{\text{срНН}}^2}{\sqrt{3} * I_{\text{НОМОТКЛ}} * U_{\text{срВН}}} = \frac{380^2}{\sqrt{3} * 20 * 10000} = 0,42 \text{ мОм.} \quad (1)$$

где $U_{\text{срНН}}$ – среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке низшего напряжения, В;

где $U_{\text{срВН}}$ – среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке высшего напряжения, В;

$I_{\text{НОМОТКЛ}}$ – номинальный ток отключения выключателя на стороне ВН, кА.

Сопротивления трансформатора

$$R_T = \frac{P_{\text{кНОМ}} * U_{\text{НННОМ}}^2}{S_{\text{ТНОМ}}^2} * 10^6 = \frac{1,24 * 0,38^2}{630^2} * 10^6 = 0,45 \text{ мОм.} \quad (2)$$

$$X_m = \sqrt{U_{\text{кр}}^2 - \left(\frac{100 * P_{\text{кНОМ}}}{S_{\text{ТНОМ}}} \right)^2} * \frac{U_{\text{НННОМ}}^2}{S_{\text{ТНОМ}}} * 10^4 = \sqrt{5,5^2 - \left(\frac{100 * 1,24}{630} \right)^2} * \frac{0,38^2}{630} * 10^4 = 33,15 \text{ мОм.} \quad (3)$$

Где $S_{\text{ТНОМ}}$ - номинальная мощность трансформатора, кВА;

$P_{\text{кНОМ}}$ - потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт;

$U_{\text{НННОМ}}$ - номинальное напряжение обмотки низшего напряжения, кВ;

$U_{\text{к}}$ - напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Сопротивления автоматических выключателей и трансформаторов тока выберем по справочным данным, исходя из их номинальных токов.

$R_{\text{QF1}} = 0,41 \text{ мОм}$, $X_{\text{QF1}} = 0,13 \text{ мОм}$; $R_{\text{QF2}} = 1,1 \text{ мОм}$; $X_{\text{QF1}} = 0,5 \text{ мОм}$.

$R_{\text{ТА1}} = 0,05 \text{ мОм}$, $X_{\text{ТА1}} = 0,07 \text{ мОм}$; $R_{\text{ТА2}} = 0,42 \text{ мОм}$; $X_{\text{ТА2}} = 0,67 \text{ мОм}$.

В эти значения включены сопротивления контактных соединений.

Сопротивление кабельной линии

$$R_{\text{КЛ}} = R_0 * l = 0,12 * 30 = 3,6 \text{ мОм}, \quad (4)$$

$$4X_{\text{КЛ}} = X_0 * l = 0,08 * 30 = 2,4 \text{ мОм.} \quad (5)$$

где R_0 - удельное активное сопротивление, мОм/м;

X_0 – удельное индуктивное сопротивление, мОм/м;

l - длина линии, м.

Сопротивление дуги будем учитывать приблизительно в виде активного сопротивления и соответственно его значение будет (для трех точек КЗ)

$R_{Д1}$ - 10 мОм;

$R_{Д2}$ - 15 мОм;

$R_{Д3}$ - 20 мОм.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ определяем по следующей формуле

$$I_{\text{ПО}} = \frac{U_{\text{срНН}}}{\sqrt{3} \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \text{ кА}, \quad (6)$$

где $R_{1\Sigma}$, $X_{1\Sigma}$ - суммарное активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, мОм.

Точка К1

$$R_{1\Sigma} = R_{\text{T}} + R_{\text{QF1}} + R_{\text{ТА1}} + R_{\text{Д}} = 0,45 + 0,41 + 0,11 + 10 = 10,97 \text{ мОм}. \quad (7)$$

$$X_{1\Sigma} = X_{\text{C}} + X_{\text{T}} + X_{\text{QF1}} + X_{\text{ТА1}} = 0,42 + 33,15 + 0,13 + 0,17 = 33,87 \text{ мОм}. \quad (8)$$

$$I_{\text{ПО}} = \frac{380}{\sqrt{3} * \sqrt{10,97^2 + 33,87^2}} = 6,16 \text{ кА}. \quad (9)$$

Ударный ток КЗ определяем как

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot K_{\text{уд}} \quad (10)$$

где $K_{\text{уд}}$ - ударный коэффициент, определяемый по кривым в зависимости от отношения $R_{1\Sigma}$ к $X_{1\Sigma} = 10,97/33,87 = 0,32$ и равный 0,95.

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 6,16 \cdot 0,95 = 8,19 \text{ кА}. \quad (11)$$

Точка К2

$$R_{1\Sigma} = R_{\text{T}} + R_{\text{QF1}} + R_{\text{ТА1}} + R_{\text{QF2}} + R_{\text{ТА2}} + R_{\text{Д}} = \\ = 0,45 + 0,41 + 0,11 + 0,65 + 0,11 + 15 = 16,73 \text{ мОм}. \quad (12)$$

$$X_{1\Sigma} = X_{\text{C}} + X_{\text{T}} + X_{\text{QF1}} + X_{\text{ТА1}} + X_{\text{QF2}} + X_{\text{ТА2}} = \\ = 0,42 + 33,15 + 0,13 + 0,17 + 0,17 + 0,17 = 34,21 \text{ мОм}. \quad (13)$$

$$I_{\text{ПО}} = \frac{380}{\sqrt{3} * \sqrt{16,73^2 + 34,21^2}} = 5,76 \text{ кА}. \quad (14)$$

Отношение $R_{1\Sigma}$ к $X_{1\Sigma} = 16,73/34,21 = 0,45$ $K_{\text{уд}} = 0,96$.

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 5,76 \cdot 0,96 = 7,74 \text{ кА}.$$

Точка К3

$$R_{1\Sigma} = R_T + R_{QF1} + R_{TA1} + R_{QF2} + R_{TA2} + R_{KJI} + R_D = \quad (15)$$

$$= 0,45 + 0,41 + 0,11 + 0,65 + 0,11 + 4,8 + 20 = 26,53 \text{ мОм.}$$

$$X_{1\Sigma} = X_C + X_T + X_{QF1} + X_{TA1} + X_{QF2} + X_{TA2} + X_{KJI} = \quad (16)$$

$$= 0,42 + 33,15 + 0,13 + 0,17 + 0,17 + 0,17 + 3,2 = 37,41 \text{ мОм.}$$

$$I_{\text{по}} = \frac{380}{\sqrt{3} * \sqrt{26,53^2 + 37,41^2}} = 4,78 \text{ кА.} \quad (17)$$

Отношение $R_{1\Sigma}$ к $X_{1\Sigma} = 26,53/37,41 = 0,71$ $K_{yd} = 0,97$.

$$i_{yd} = \sqrt{2} \cdot 4,78 \cdot 0,97 = 6,49 \text{ кА.}$$