

## Практический метод расчета тока однофазного короткого замыкания в сетях напряжением до 1 кВ

Белов А. В., Ильин Ю. П., кандидаты техн. наук

ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия»

Предложен практический метод расчета тока однофазного КЗ (ОКЗ) в сетях напряжением до 1 кВ. В нем в отличие от метода, рекомендованного ГОСТ 28249–93, не используется трудноопределяемое на практике значение индуктивного сопротивления нулевой последовательности линии электропередачи. За основу взята упрощенная формула, в которую входит индуктивное сопротивление петли фаза – нуль, сравнительно легкоопределяемое как при расчетах, так и при натурных измерениях. Изменения, внесенные в эту формулу, позволяют достичь такой же точности расчета, что и при вычислениях методом, приведенным в ГОСТ.

**Ключевые слова:** ток ОКЗ, сопротивление прямой последовательности, сопротивление обратной последовательности, сопротивление нулевой последовательности, сопротивление петли фаза – нуль.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока ОКЗ  $I_{п0}^{(1)}$ , кА, в сетях напряжением до 1 кВ при питании электроустановки от энергосистемы через понижающий трансформатор в соответствии с ГОСТ [1] рассчитывают из выражения

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{срНН}}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}, \quad (1)$$

где  $U_{срНН}$  – среднее номинальное напряжение на стороне КЗ, В.

Входящие в это выражение суммарные активные  $r_{1\Sigma}$  и  $r_{0\Sigma}$  и индуктивные  $x_{1\Sigma}$  и  $x_{0\Sigma}$  сопротивления, мОм, соответственно прямой и нулевой последовательностей цепи КЗ с учетом некоторых обобщений, сделанных для удобства дальнейшего изложения, определяют следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} r_{1\Sigma} &= r_T + r_{в.э} + r_L + r_D; \\ x_{1\Sigma} &= x_C + x_T + x_{в.э} + x_L; \\ r_{0\Sigma} &= r_{0T} + r_{в.э} + r_{0L} + r_D; \\ x_{0\Sigma} &= x_{0T} + x_{в.э} + x_{0L}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $r_T$ ,  $x_T$  и  $r_{0T}$ ,  $x_{0T}$  – активные и индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательностей понижающего трансформатора;  $x_C$  – эквивалентное индуктивное сопротивление энергосистемы до понижающего трансформатора, приведенное к ступени низшего напряжения;  $r_D$  – активное сопротивление дуги;  $r_{в.э}$  и  $x_{в.э}$  – активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности второстепенных элементов;  $r_L$ ,  $x_L$  и  $r_{0L}$ ,  $x_{0L}$  – активные и индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательностей линии электропередачи.

Активное и индуктивное сопротивления второстепенных элементов находят из выражений:

$$\left. \begin{aligned} r_{в.э} &= r_{Т.Т} + r_p + r_{к.в} + r_k; \\ x_{в.э} &= x_{Т.Т} + x_p + x_{к.в}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $r_{Т.Т}$ ,  $x_{Т.Т}$ ,  $r_p$ ,  $x_p$ ,  $r_{к.в}$ ,  $x_{к.в}$  – активные и индуктивные сопротивления прямой последовательности соответственно первичных обмоток трансформаторов тока, реакторов и токовых катушек автоматических выключателей;  $r_k$  – суммарное активное сопротивление различных контактов.

Сопротивления линии электропередачи (любого вида) вычисляют по формулам:

$$\left. \begin{aligned} r_L &= r_{ш} + r_{ВЛ} + r_{КЛ}; \\ x_L &= x_{ш} + x_{ВЛ} + x_{КЛ}; \\ r_{0L} &= r_{0ш} + r_{0ВЛ} + r_{0КЛ}; \\ x_{0L} &= x_{0ш} + x_{0ВЛ} + x_{0КЛ}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $r_{ш}$ ,  $x_{ш}$  и  $r_{0ш}$ ,  $x_{0ш}$  – активные и индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательностей шин и шинопроводов;  $r_{ВЛ}$ ,  $x_{ВЛ}$  и  $r_{0ВЛ}$ ,  $x_{0ВЛ}$  – активное и индуктивное сопротивления прямой и нулевой последовательности воздушных линий (ВЛ);  $r_{КЛ}$ ,  $x_{КЛ}$  и  $r_{0КЛ}$ ,  $x_{0КЛ}$  – активные и индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательностей кабельных линий (КЛ).

Выражение (1) выводится исходя из правила эквивалентности прямой последовательности, которое для тока ОКЗ имеет вид:

$$i_{п0}^{(1)} = \frac{3\dot{U}_\Phi}{\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}}, \quad (5)$$

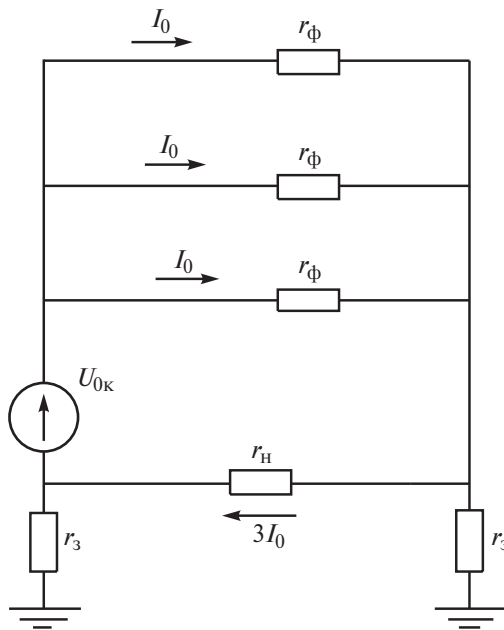


Рис. 1. Схема замещения при расчете активного сопротивления нулевой последовательности воздушной линии электропередачи

где  $\dot{U}_\phi$  — фазное напряжение сети, модуль которого, В,

$$U_\phi = U_{\text{ср}} \text{нн} / \sqrt{3}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{1\Sigma} &= r_{1\Sigma} + jx_{1\Sigma}; & \underline{Z}_{2\Sigma} &= r_{2\Sigma} + jx_{2\Sigma}; \\ \underline{Z}_{0\Sigma} &= r_{0\Sigma} + jx_{0\Sigma} \end{aligned} \quad (7)$$

— суммарные сопротивления соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей цепи КЗ в комплексной форме.

Поскольку питание осуществляется от энергосистемы, то  $\underline{Z}_{1\Sigma} = \underline{Z}_{2\Sigma}$  и на практике с определением сопротивлений обратной последовательности проблем обычно не бывает. Что же касается суммарного сопротивления нулевой последовательности  $\underline{Z}_{0\Sigma} = r_{0\Sigma} + jx_{0\Sigma}$ , то здесь возникают определенные сложности. Например, если в цепи КЗ имеется четырехпроводная ВЛ электропередачи (рис. 1), то активное сопротивление нулевой последовательности линии с достаточной точностью (полагая при этом, что ток возвращается к источнику только по нулевому проводу, а не через землю, так как сопротивление заземлителей растеканию тока  $r_3$  обычно намного больше сопротивления нулевого провода  $r_n$  и практически не влияет на значение сопротивления нулевой последовательности линии электропередачи  $r_{0л}$ ) можно рассчитать из выражения

$$r_{0л} = \frac{U_{0к}}{I_0} = \frac{I_0 r_\phi + 3I_0 r_n}{I_0} = r_\phi + 3r_n, \quad (8)$$

где  $U_{0к}$  и  $I_0$  — напряжение и ток нулевой последовательности;  $r_\phi$  и  $r_n$  — активные сопротивления фазного и нулевого проводников прямой последовательности.

Что касается индуктивного сопротивления нулевой последовательности  $x_{0л}$  той же линии электропередачи, оно определяется в основном взаимной индуктивностью между фазными проводниками (токи в которых одинаковы по значению и направлению) и нулевым проводником (ток в котором противоположен токам в фазных проводниках). Аналитический расчет индуктивного сопротивления нулевой последовательности такой ВЛ весьма сложен и на практике не применяется. Для его расчета обычно используют коэффициенты  $k_0 = x_{0л}/x_{1л}$ , показывающие, во сколько раз это сопротивление превышает индуктивное сопротивление прямой последовательности. В ГОСТ [1] для ВЛ напряжением до 1 кВ рекомендуется принимать  $k_0 = 3$  (очевидно, это его приближенное значение).

Еще сложнее определить индуктивное сопротивление нулевой последовательности кабельной линии. Можно использовать справочные данные, но их мало и, как правило, они не содержат описания условий проведения измерений. Между тем, как было справедливо отмечено в [2], значение сопротивления нулевой последовательности в сети до 1 кВ, выполненной кабелем, зависит от характера повреждений при однофазном КЗ (фаза — нулевой рабочий проводник, фаза — нулевой защитный проводник, фаза — сторонняя токопроводящая часть). Понятно, что каждый из перечисленных случаев требует отдельного расчета тока однофазного КЗ, и для каждого из них необходимы свои справочные данные.

В учебниках, вышедших до вступления в силу ГОСТ [1] (1995 г.), и в более поздних изданиях (например, в [3]) приводится другая методика определения тока ОКЗ (ее называют **упрощенной**), согласно которой расчет выполняется по формуле

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{U_\phi}{\frac{1}{3} Z_T^{(1)} + Z_{п}}, \quad (9)$$

где  $Z_T^{(1)}$  — модуль полного сопротивления трансформатора току ОКЗ, комплекс которого получен из выражения  $\underline{Z}_T^{(1)} = \underline{z}_{1Т} + \underline{z}_{2Т} + \underline{z}_{0Т}$ ;  $\underline{z}_{1Т}$ ,  $\underline{z}_{2Т}$  и  $\underline{z}_{0Т}$  — соответственно комплексные

сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей трансформатора;

$$Z_{\Pi} = \sqrt{(r_{\Phi} + r_{\Pi})^2 + x_{\Phi-\Pi}^2} \quad (10)$$

— модуль полного сопротивления петли фаза — нуль;  $x_{\Phi-\Pi}$  — индуктивное сопротивление петли фаза — нуль.

Отметим, что это сопротивление в комплексной форме имеет вид:

$$\underline{Z}_{\Pi} = r_{\Phi} + r_{\Pi} + jx_{\Phi-\Pi}. \quad (11)$$

Значение погонного индуктивного сопротивления петли фаза — нуль для воздушной линии ( $x_{\Phi-\Pi \text{ ВЛ}}$ ) обычно принимают равным 0,6 мОм/м, для кабельной линии ( $x_{\Phi-\Pi \text{ КЛ}}$ ) — 0,15 мОм/м.

Если фазный и нулевой проводники выполнены из круглых проводов одинакового сечения и проложены параллельно, то значение погонного  $x_{\Phi-\Pi}$  можно рассчитать из выражения [1]

$$x_{\Phi-\Pi} = 0,29 \lg \frac{a}{r_{\text{пр}}}, \quad (12)$$

где  $a$  — расстояние между проводниками, мм;  $r_{\text{пр}}$  — радиус проводника, мм.

Расчеты с использованием формул (9) и (10) весьма просты. Кроме того, в справочной литературе есть много экспериментальных данных о сопротивлении петли фаза — нуль для самых разных условий. В последние годы разработаны специальные приборы, позволяющие легко проводить натурные измерения сопротивления петли фаза — нуль, причем без отключения линии от сети. С помощью некоторых из них эти измерения можно выполнять настолько быстро, что даже УЗО не успевает среагировать на ток ОКЗ.

Зная материал и сечение проводников, а также полное сопротивление петли фаза — нуль, нетрудно выделить в нем индуктивную составляющую  $x_{\Phi-\Pi}$ . Впрочем, некоторые приборы способны сами выделять активную и индуктивную части в  $Z_{\Pi}$ .

Наконец, в соответствии с ПТЭ [4] для контроля чувствительности защит к однофазным замыканиям на землю в установках до 1000 В с глухозаземленной нейтралью необходимо обязательно выполнять измерения сопротивления петли фаза — нуль с последующим расчетом тока ОКЗ.

Существуют приборы для измерений сопротивления петли фаза — нуль в условиях

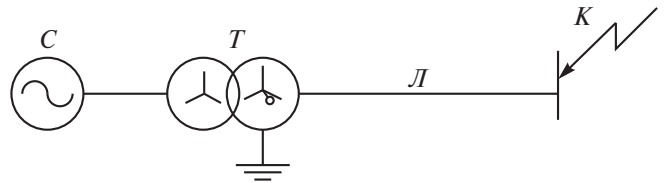


Рис. 2. Расчетная схема сети, состоящей из энергосистемы С, трансформатора Т и линии электропередачи Л

эксплуатации, но нет достаточно простой методики, и на практике не используется измерение сопротивления нулевой последовательности цепи КЗ. Поэтому, на наш взгляд, проще с самого начала, еще на этапе проектирования, оперировать понятием сопротивления петли фаза — нуль.

Все это свидетельствует о том, что с практической точки зрения удобнее использовать формулу (9), а не (1), т. е. рассчитать ток ОКЗ по упрощенной методике. Однако при этом существует риск получить большую погрешность в расчетах. Следовательно, необходимо повысить точность упрощенного метода.

Для анализа возьмем расчетную схему сети на рис. 2. Приняв, что сопротивления нулевой последовательности второстепенных элементов и электрической дуги равны сопротивлениям прямой последовательности ( $r_{0\text{В.Э}} = r_{1\text{В.Э}}$ ,  $x_{0\text{В.Э}} = x_{1\text{В.Э}}$ ;  $r_{0\text{Л}} = r_{1\text{Л}}$ ), построим схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей рассматриваемой сети (рис. 3). Поскольку здесь сопротивления прямой последовательности любого элемента равны сопротивлениям обратной последовательности того же элемента ( $r_1 = r_2$  и  $x_1 = x_2$ ), индексы 1 и 2 можно не указывать, т. е.

$$r_1 = r_2 = r; \quad x_1 = x_2 = x. \quad (13)$$

Тогда получим следующие суммарные сопротивления трех последовательностей (в комплексной форме):

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{1\Sigma} &= jx_{\text{С}} + r_{\text{Т}} + jx_{\text{Т}} + r_{\text{В.Э}} + jx_{\text{В.Э}} + r_{\text{Л}} + jx_{\text{Л}} + r_{\text{Д}}; \\ \underline{Z}_{2\Sigma} &= jx_{\text{С}} + r_{\text{Т}} + jx_{\text{Т}} + r_{\text{В.Э}} + jx_{\text{В.Э}} + r_{\text{Л}} + jx_{\text{Л}} + r_{\text{Д}}; \\ \underline{Z}_{0\Sigma} &= r_{0\text{Т}} + jx_{0\text{Т}} + r_{\text{В.Э}} + jx_{\text{В.Э}} + r_{0\text{Л}} + jx_{0\text{Л}} + r_{\text{Д}}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Ток ОКЗ из формулы (5) представим в виде

$$\begin{aligned} j_{\text{п0}}^{(1)} &= \frac{3\dot{U}_{\Phi}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}} = \\ &= 3\dot{U}_{\Phi} / (j2x_{\text{С}} + 3r_{\text{В.Э}} + j3x_{\text{В.Э}} + 3r_{\text{Л}} + 2r_{\text{Т}} + \\ &+ j2x_{\text{Т}} + r_{0\text{Т}} + jx_{0\text{Т}} + 2r_{\text{Л}} + j2x_{\text{Л}} + r_{0\text{Л}} + jx_{0\text{Л}}). \end{aligned} \quad (15)$$

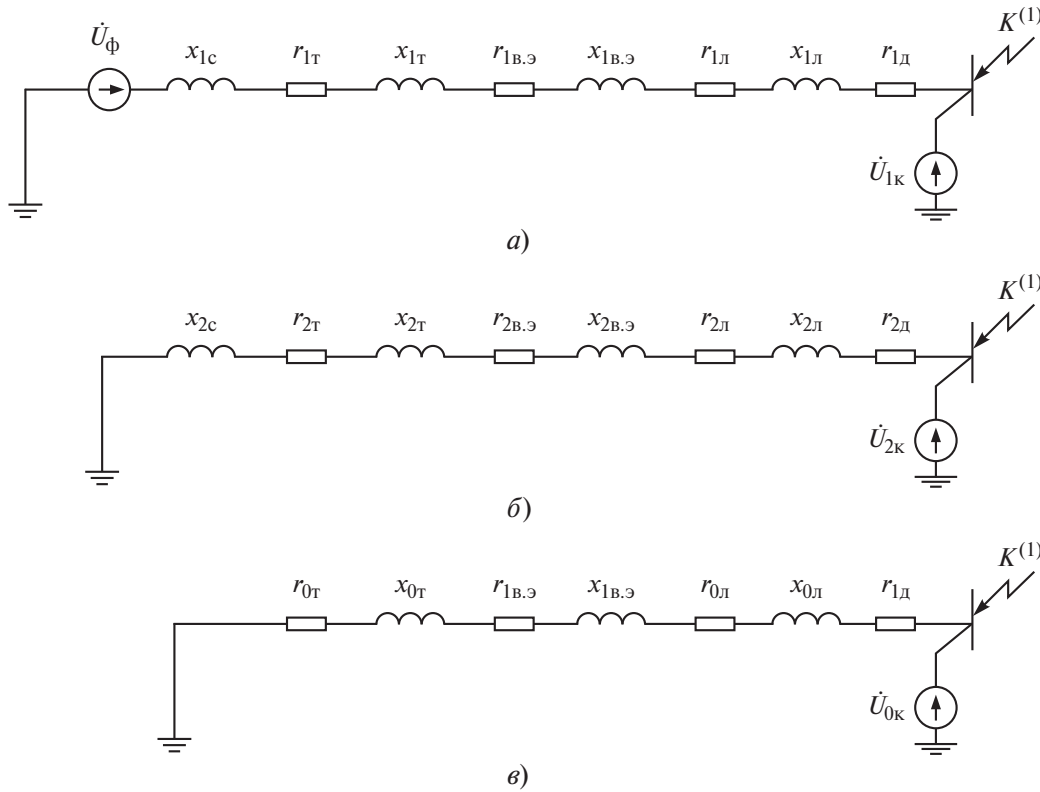


Рис. 3. Схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Выделим в знаменателе выражения (15) полное сопротивление трансформатора току ОКЗ:

$$\underline{Z}_{\Gamma}^{(1)} = 2r_{\Gamma} + j2x_{\Gamma} + r_{0\Gamma} + jx_{0\Gamma}. \quad (16)$$

Аналогично выделим полное сопротивление линии электропередачи току ОКЗ:

$$\underline{Z}_{\text{л}}^{(1)} = 2r_{\text{л}} + j2x_{\text{л}} + r_{0\text{л}} + jx_{0\text{л}}. \quad (17)$$

Подставив формулы (16) и (17) в выражение (15), получим

$$i_{\text{п}0}^{(1)} = \frac{3\dot{U}_{\Phi}}{j2x_{\text{с}} + 3r_{\text{в.э}} + j3x_{\text{в.э}} + 3r_{\text{д}} + \underline{Z}_{\Gamma}^{(1)} + \underline{Z}_{\text{л}}^{(1)}}. \quad (18)$$

Разделив числитель и знаменатель этого равенства на 3, найдем

$$i_{\text{п}0}^{(1)} = \frac{\dot{U}_{\Phi}}{j\frac{2}{3}x_{\text{с}} + r_{\text{в.э}} + jx_{\text{в.э}} + r_{\text{д}} + \frac{1}{3}\underline{Z}_{\Gamma}^{(1)} + \frac{1}{3}\underline{Z}_{\text{л}}^{(1)}}. \quad (19)$$

Следует отметить, что результаты, полученные по этой формуле, точнее, чем вычисленные по формуле (9), поскольку в ней дополнительно учтены эквивалентное сопротивление энергосистемы, сопротивления второстепенных элементов и дуги. Кроме того,

комплексная форма записи позволяет исключить погрешность в результате арифметического сложения модулей двух комплексных чисел.

Из сравнения формул (9) и (19) следует, что сопротивление петли фаза – нуль равно 1/3 полного сопротивления линии электропередачи току ОКЗ:

$$\underline{Z}_{\text{п}} = \frac{1}{3}\underline{Z}_{\text{л}}^{(1)}. \quad (20)$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности линии электропередачи  $x_{0\text{л}}$  определим через индуктивное сопротивление петли фаза – нуль  $x_{\text{ф-н}}$ , подставив в формулу (20) значения  $\underline{Z}_{\text{п}}$  и  $\underline{Z}_{\text{л}}^{(1)}$  из выражений (11) и (17):

$$r_{\text{ф}} + r_{\text{н}} + jx_{\text{ф-н}} = \frac{2}{3}r_{\text{л}} + j\frac{2}{3}x_{\text{л}} + \frac{1}{3}r_{0\text{л}} + j\frac{1}{3}x_{0\text{л}}. \quad (21)$$

Учитывая, что  $r_{\text{ф}} = r_{\text{л}}$ , а также подставляя в эту формулу значение  $r_{0\text{л}} = r_{\text{ф}} + 3r_{\text{н}}$  из выражения (8), получаем:

$$x_{0\text{л}} = 3x_{\text{ф-н}} - 2x_{\text{л}}. \quad (22)$$

С учетом формул (20) и (16) выражение (19) примет следующий вид:

$$i_{п0}^{(1)} = \dot{U}_\phi / \left( j \frac{2}{3} x_c + r_{в.э} + j x_{в.э} + r_d + \frac{2}{3} r_T + j \frac{2}{3} x_T + \frac{1}{3} r_{0T} + j \frac{1}{3} x_{0T} + r_\phi + r_H + j x_{\phi-H} \right). \quad (23)$$

Перейдя к скалярным величинам, получим окончательную формулу:

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}}, \quad (24)$$

где  $R_\Sigma = r_{в.э} + r_d + \frac{2}{3} r_T + \frac{1}{3} r_{0T} + r_\phi + r_H$ , мОм;  $X_\Sigma = \frac{2}{3} x_c + x_{в.э} + \frac{2}{3} x_T + \frac{1}{3} x_{0T} + x_{\phi-H}$ , мОм.

Сравнив полученную формулу (24) с формулами (1) и (9), отметим ее преимущества:

результаты расчета по ней характеризуются большей точностью, чем по формуле (9), и не меньшей, чем по формуле (1), а значит, ее уже нельзя назвать “упрощенной”;

по сравнению с формулой (1) она более удобна для практического применения при расчетах, поскольку в ней используется сравнительно легкополучаемое индуктивное сопротивление петли фаза – нуль  $x_{\phi-H}$  вместо трудноопределяемого индуктивного сопротивления нулевой последовательности линии электропередачи  $x_{0л}$ .

Указанные преимущества позволяют, на наш взгляд, рекомендовать формулу (24) для расчета тока ОКЗ в сетях напряжением до 1 кВ при питании электроустановки от энергосистемы.

Рассмотрим **практический пример**. Требуется рассчитать ток ОКЗ фазы *C* на нулевой провод по расчетной схеме на рис. 2.

Исходные данные: напряжение системы  $U_c = 10$  кВ, ток трехфазного КЗ на ее выходе  $I_{к.с}^{(3)} = 10$  кА; номинальная мощность трансформатора  $S_{т.ном} = 630$  кВ · А; напряжение на высокой стороне  $U_{ВН} = 10$  кВ (среднее номинальное напряжение  $U_{ср ВН} = 10,5$  кВ), на низкой —  $U_{НН} = 0,38$  кВ (среднее номинальное напряжение  $U_{ср НН} = 0,4$  кВ); схема соединений обмоток — Y/Y<sub>0</sub>; длина воздушной линии электропередачи (четыре провода марки А70)  $l_{ВЛ} = 100$  м (см. рис. 4).

**I вариант.** Расчет по предлагаемому практическому методу.

Сопротивление энергосистемы, приведенное к ступени  $U_{ср НН} = 0,4$  кВ, определим по формуле

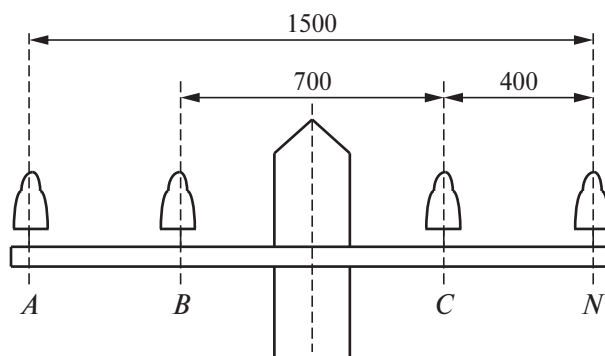


Рис. 4. Схема расположения проводов на опоре

$$x_c = \frac{U_{ср НН}^2 \cdot 10^3}{\sqrt{3} I_{к.с}^{(3)} U_{ср ВН}} = \frac{0,4^2 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10,5} = 0,88 \text{ мОм.}$$

Сопротивления трансформатора найдем по справочным данным:

$$r_T = 3,1 \text{ мОм}; \quad x_T = 13,6 \text{ мОм}; \\ r_{0T} = 30,2 \text{ мОм}; \quad x_{0T} = 95,8 \text{ мОм.}$$

Сопротивления всех второстепенных элементов примем ориентировочно:  $r_{в.э} = 7,0$  мОм;  $x_{в.э} = 7,0$  мОм.

Сопротивление дуги  $r_d$  при приближенном расчете для ОКЗ по известным рекомендациям (например, [3]) примем равным 6,0 мОм.

Активное сопротивление линии электропередачи вычислим по рекомендациям ГОСТ — формуле (31) в [1]:

$$r_l = r_\phi = r_H = l_{ВЛ} \frac{\rho}{S} \cdot 10^3 = \\ = 100 \frac{0,02994}{70} \cdot 10^3 = 42,76 \text{ мОм}$$

(где удельное сопротивление алюминиевого провода  $\rho = 0,02994$  Ом · мм<sup>2</sup>/м, сечение провода  $S = 70$  мм<sup>2</sup>).

Индуктивное сопротивление прямой последовательности линии электропередачи (при радиусе провода  $r_{пр} = 5,35$  мм) найдем по известной формуле

$$x_l = l_{ВЛ} \left( 0,1445 \lg \frac{D_{ср}}{r_{пр}} + 0,0157 \right) = \\ = 100 \left( 0,1445 \lg \frac{675}{5,35} + 0,0157 \right) = 31,9 \text{ мОм,}$$

где среднее расстояние между фазными проводами

$$D_{ср} = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{CA}} = \sqrt[3]{400 \cdot 700 \cdot 110} = 675 \text{ мм.}$$



Индуктивное сопротивление петли фаза – нуль определим, используя выражение (12):

$$x_{\phi-H} = I_{\text{ВЛ}} \cdot 0,29 \lg \frac{a}{r_{\text{пр}}} =$$

$$= 100 \cdot 0,29 \lg \frac{400}{5,35} = 54,33 \text{ мОм},$$

где  $a = 400$  мм — расстояние между проводом фазы  $C$  и нулевым проводом.

По формуле (24) рассчитаем ток ОКЗ. Подставив

$$R_{\Sigma} = r_{\text{в.э}} + r_{\text{д}} + \frac{2}{3}r_{\text{т}} + \frac{1}{3}r_{0\text{т}} + r_{\phi} + r_{\text{н}} =$$

$$= 7,0 + 6,0 + \frac{2}{3} \cdot 3,1 + \frac{1}{3} \cdot 30,2 + 42,76 +$$

$$+ 42,76 = 110,64 \text{ мОм};$$

$$X_{\Sigma} = \frac{2}{3}x_{\text{с}} + x_{\text{в.э}} + \frac{2}{3}x_{\text{т}} + \frac{1}{3}x_{0\text{т}} + x_{\phi-H} =$$

$$= \frac{2}{3} \cdot 0,88 + 7,0 + \frac{2}{3} \cdot 13,6 + \frac{1}{3} \cdot 95,8 + 54,33 =$$

$$= 102,9 \text{ мОм},$$

получим

$$I_{\text{п0}}^{(1)} = \frac{230}{\sqrt{110,64^2 + 102,9^2}} = 1,522 \text{ кА}.$$

**II вариант.** Расчет по стандартной методике — см. формулу (1).

Активное сопротивление нулевой последовательности воздушной линии электропередачи рассчитаем по формуле (8):

$$r_{0\text{л}} = r_{\phi} + 3r_{\text{н}} = 4r_{\text{л}} = 4 \cdot 42,76 = 171,04 \text{ мОм}.$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности воздушной линии электропередачи можно определить по ГОСТ, используя коэффициент  $k_0 = 3$ :

$$x_{0\text{л}} = k_0 x_{\text{л}} = 3x_{\text{л}} = 3 \cdot 31,9 = 95,7 \text{ мОм}.$$

Здесь следует сделать замечание. Как было отмечено, коэффициент  $k_0$  носит ориентировочный характер, поскольку распространяется на все ВЛ напряжением до 1 кВ независимо от их конкретных параметров. Между тем выше была установлена зависимость индуктивного сопротивления нулевой последовательности линии электропередачи  $x_{0\text{л}}$  от индуктивного сопротивления петли фаза – нуль  $x_{\phi-H}$ . Поскольку значение  $x_{\phi-H}$  уже определено, можно более точно вычислить  $x_{0\text{л}}$  по формуле (22):

$$x_{0\text{л}} = 3x_{\phi-H} - 2x_{\text{л}} =$$

$$= 3 \cdot 54,33 - 2 \cdot 31,9 = 99,19 \text{ мОм}.$$

Расхождение между полученными значениями  $x_{0\text{л}}$  небольшое (3,5 %), но в дальнейшем расчете будем использовать последний результат, так как считаем его более точным.

Найдем ток ОКЗ по формуле (1). Подставив

$$r_{1\Sigma} = r_{\text{в.э}} + r_{\text{д}} + r_{\text{т}} + r_{\text{л}} =$$

$$= 7,0 + 6,0 + 3,1 + 42,76 = 58,86 \text{ мОм};$$

$$x_{1\Sigma} = x_{\text{с}} + x_{\text{в.э}} + x_{\text{т}} + x_{\text{л}} =$$

$$= 0,88 + 7,0 + 13,6 + 31,9 = 53,38 \text{ мОм};$$

$$r_{0\Sigma} = r_{\text{в.э}} + r_{\text{д}} + r_{0\text{т}} + r_{0\text{л}} =$$

$$= 7,0 + 6,0 + 30,2 + 171,04 = 214,24 \text{ мОм};$$

$$x_{0\Sigma} = x_{\text{в.э}} + x_{0\text{т}} + x_{0\text{л}} =$$

$$= 7,0 + 95,8 + 99,19 = 201,99 \text{ мОм},$$

получим

$$I_{\text{п0}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 58,86 + 214,24)^2 + (2 \cdot 53,38 + 201,99)^2}} =$$

$$= 1,528 \text{ кА}.$$

Результаты расчета по стандартной формуле (1) и по формуле (24) практически совпадают. Это совпадение будет **абсолютным**, если в формуле (24) фазное напряжение принять не  $U_{\phi} = 230$  В, а  $U_{\text{ср НН}}/\sqrt{3} = 400/\sqrt{3} = 231$  В. Отметим, что если принять значение  $x_{0\text{л}}$  в соответствии с рекомендациями ГОСТ ( $x_{0\text{л}} = 3x_{\text{л}} = 95,7$  мОм), то ток ОКЗ  $I_{\text{п0}}^{(1)}$  станет равным 1,536 кА, а расхождение в результатах расчета по двум вариантам составит 0,5 %.

**III вариант.** Расчет по упрощенной методике — см. формулу (9).

Полное сопротивление трансформатора току ОКЗ

$$\underline{Z}_{\text{т}}^{(1)} = 2r_{\text{т}} + j2x_{\text{т}} + r_{0\text{т}} + jx_{0\text{т}} =$$

$$= 2 \cdot 3,1 + j2 \cdot 13,6 + 30,2 + j95,8 =$$

$$= (36,4 + j123) \text{ мОм}.$$

Модуль этого сопротивления

$$Z_{\text{т}}^{(1)} = |\underline{Z}_{\text{т}}^{(1)}| = \sqrt{36,4^2 + 123^2} = 128,27 \text{ мОм}.$$

Модуль полного сопротивления петли фаза – нуль

$$Z_{\Pi} = \sqrt{(r_{\Phi} + r_{\Pi})^2 + x_{\Phi-\Pi}^2} = \\ = \sqrt{(42,76 + 42,76)^2 + 54,33^2} = 101,32 \text{ мОм.}$$

Подставив в формулу (9) значения приведенных в ней величин, получим

$$I_{\Pi 0}^{(1)} = \frac{230}{\frac{1}{3} \cdot 128,27 + 101,32} = 1,596 \text{ кА.}$$

Погрешность расчета по упрощенной методике

$$\Delta = \frac{1,596 - 1,528}{1,528} \cdot 100 \% = 4,45 \%$$

Из сравнения результатов расчета по трем вариантам следует вывод: **предлагаемая формула (24)** в отличие от упрощенной формулы (9) учитывает сопротивления энергосистемы,

вспомогательных элементов и дуги, не содержит погрешность, обусловленную арифметическим сложением комплексных величин, и **обеспечивает совпадение результата расчета с результатом, полученным по стандартной методике** — см. формулу (1).

#### Список литературы

1. **ГОСТ 28249–93.** Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. — М.: Изд-во стандартов, 1994.
2. **Фишман В. И.** Силовые кабели до 1 кВ. Расчет сопротивлений нулевой последовательности. — Новости электротехники, 2007, № 2 (44).
3. **Кабышев А. В.** Электроснабжение объектов. Ч. 2. Расчет токов короткого замыкания в электроустановках до 1000 В. — Томск: Изд-во ТПУ, 2009.
4. **Библия** электрика. ПУЭ; МПОТ; ПТЭ. — Новосибирск: Изд-во Сиб. ун-та, 2010.

**belovav00@mail.ru**

