

5 РАСЧЕТ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

5.1. Основные понятия и определения

В зависимости от вида электроустановки, номинального напряжения, режима нейтрали, условий среды помещения и доступности электрооборудования применяют определенный комплекс необходимых защитных мер, обеспечивающих достаточную безопасность. Применение защитных мер регламентируется Правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

Различают электроустановки напряжением до 1000 В и выше 1000 В; с изолированной и заземленной нейтралью. В электроустановках применяют следующие технические защитные меры: 1) защитное заземление; 2) зануление; 3) выравнивание потенциалов; 4) защитное отключение; 5) малое напряжение и другие.

Наиболее распространенными техническими средствами для защиты людей при появлении напряжения на нетоковедущих частях оборудования из-за повреждения изоляции являются *защитное заземление* и *зануление*.

Защитным заземлением называется преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением. Принцип действия — снижение до безопасных значений напряжений прикосновения и шага, обусловленных замыканием на корпус. Это достигается уменьшением потенциала заземленного оборудования, а также выравнивания потенциалов за счет подъема потенциала основания, на котором стоит человек до потенциала, близкого к потенциалу заземленного оборудования. Схема защитного заземления приведена на рисунке 5.1.

Защитное заземление применяют в сетях напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью и в сетях напряжением свыше 1000 В как с изолированной нейтралью, так и с заземленной нейтралью.

Заземляющее устройство — совокупность заземлителей, металлических проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с землей, и заземляющих проводников, соединяющих электроустановку с системой заземлителей.

По расположению заземлителей относительно заземленных корпусов заземления делят на *выносные* и *контурные*. В первом случае заземлители располагаются на некотором удалении от заземляемого оборудования, во втором - по контуру вокруг заземленного оборудования на небольшом (несколько метров) расстоянии друг от друга. В качестве искусственных заземлителей используют вертикально расположенные стержни из уголкового стали или стальных труб. Заземлители соединяют стальной полосой, которую приваривают к каждому заземлителю. Заземлители с заземляемым оборудованием соединяют металлическими проводниками. *Сопротивления заземления*, согласно ПУЭ, нормируются в зависимости от напряжения, режима работы нейтрали, мощности и других данных электроустановки.

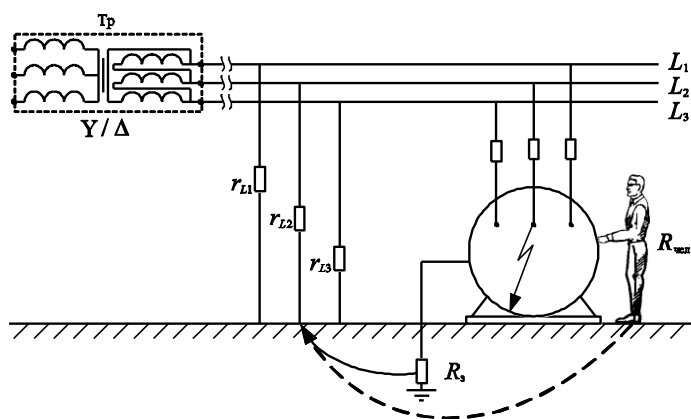


Рис. 5.1. Схема защитного заземления

Занулением называется преднамеренное электрическое соединение с нулевым защитным проводником металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением. Цель зануления - обеспечить быстрое отключение установки от сети при замыкании фазы (или фаз) на ее корпус, а также снизить напряжение на корпусе в аварийный период. Это достигается путем превращения замыкания на корпус в *однофазное короткое замыкание* с созданием в этой цепи значения тока, достаточного для срабатывания защиты. Зануление применяется в трехфазных четырехпроводных сетях напряжением до 1000 В с заземленной нейтралью. Полная проводимость

нулевого провода во всех случаях должна быть не менее 50 % проводимости фазного провода. Если эти требования по каким-либо причинам не удовлетворяются, отключение при замыкании на корпус должно обеспечиваться специальными защитами, например, защитным отключением.

Принципиальная схема зануления представлена на рис. 5.2.

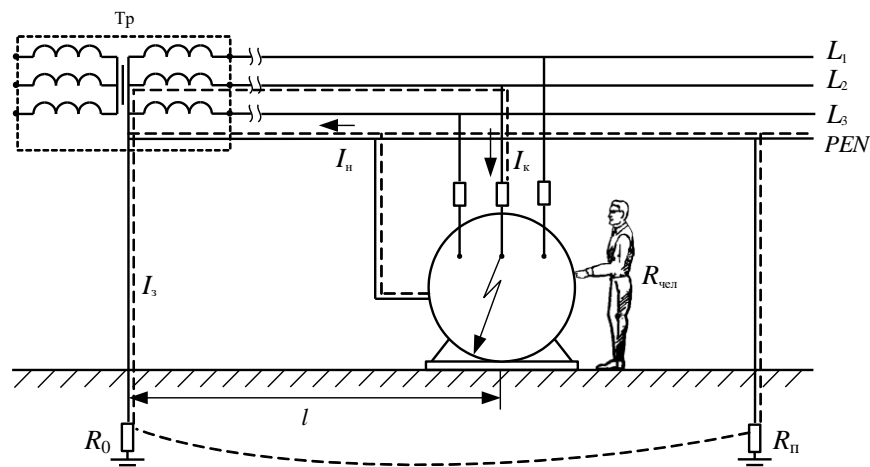


Рис. 5.2. Схема зануления установки

При замыкании на зануленный корпус электроустановки ток однофазного короткого замыкания I_k складывается из токов двух параллельных участков цепи: 1) по ветви – фазный провод L_2 , обмотки трансформатора Тр, нулевой проводник PEN - протекает ток I_n , 2) по параллельной ветви - заземление нейтрали R_0 , участок грунта, повторное заземление R_p - течет ток $I_з$. Сопротивление петли «фаза-нуль» обычно не превышает 2 Ом, а сопротивление $(R_0 + R_p)$, согласно ПУЭ должно быть в пределах 7...28 Ом в зависимости от напряжения сети. Поэтому ток $I_з$, протекающий через землю, много меньше тока I_n , проходящего по нулевому проводнику, и можно считать $I_k = I_n$.

5.2. Расчет защитного заземления

Цель расчета заземления - определить параметры заземляющего устройства: число и длину вертикальных элементов (стержней), длину горизонтальных элементов (соединительных полос) и разместить заземлители на плане электроустановки, исходя из значений допустимых сопротивления и максимального потенциала заземлителя.

Методика расчета защитного заземления

1. Определяют нормативное значение сопротивления заземления R_n . В электроустановках напряжением до 1000 В сопротивление защитного заземления должно быть не более 4 Ом, если суммарная мощность источников тока (трансформаторов, генераторов), подключенных к сети, не превышает 100 кВ·А, сопротивление должно быть не более 10 Ом. В электроустановках напряжением выше 1000 В с малым током замыкания (менее 500 А) допускается сопротивление заземления не более 10 Ом, а с большим током замыкания (более 500 А) – не более 0,5 Ом.

2. Определяют расчетное удельное сопротивление грунта $\rho_{расч}$ с учетом климатического коэффициента $\rho_{расч} = \rho_{табл} \cdot \psi$, где $\rho_{табл}$ – удельное сопротивление грунта (табл. 5.1); ψ – климатический коэффициент (табл. 5.2). Расчетное удельное сопротивление определяют для вертикальных элементов заземляющего устройства (стержней) $\rho_{расч}^c$ и для горизонтальных элементов (полосы) $\rho_{расч}^g$. При определении значения климатических коэффициентов из табл. 5.2 выбирают верхнее значение (пример: 1,8...2,0 – следует выбрать 2,0), как наиболее опасное.

Таблица 5.1

Значения удельных сопротивлений грунтов при влажности 10...12 % к массе грунта

Грунт	Удельное сопротивление, Ом·м	Грунт	Удельное сопротивление, Ом·м
Глина	40	Супесок	300
Суглинок	100	Песок	700
Чернозем	200	Скалистый	2000

Таблица 5.2

Значения климатических коэффициентов и признаки зон

Тип заземлителя	Климатические зоны			
	I	II	III	IV
Вертикальные стержни длиной $l_c = 2...3$ м и при глубине заложения $H_0 = 0,5...0,8$ м	1,8...2,0	1,5...1,8	1,4...1,6	1,2...1,4
Горизонтальные полосовые заземлители при глубине заложения $H_1 = 0,8$ м	4,5...7,0	3,5...4,5	2,0...2,5	1,5...2,0
Признаки климатических зон				
Средняя температура января, °С	-20...-15	-14...-10	-10...0	0...5
Средняя температура июля, °С	16...18	18...22	22...24	24...28

3. Определяют сопротивление одиночного вертикального заземлителя R_c с учетом удельного сопротивления грунта:

$$R_c = \frac{\rho_{\text{расч}}}{2\pi l_c} \left(\ln \frac{2l_c}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H + l_c}{4H - l_c} \right), \quad (5.1)$$

где d - диаметр стержня, м; $H = H_0 + l_c/2$; l_c, H_0 - см. табл. 5.2.

4. Учитывая норму сопротивления заземления R_n , определяют число вертикальных заземлителей без учета взаимного экранирования, округляя их число в большую сторону до целого числа:

$$n = R_c / R_n, \quad (5.2)$$

5. Разместив заземлители на плане и, задавшись отношением η расстояния между одиночными заземлителями S к их длине l_c , определяют с учетом коэффициента использования вертикальных стержней (табл. 5.3) их число $n_1 = n / \eta_c$ (также округляя в большую сторону до целого числа). В целях снижения эффекта экранирования расстояние между заземлителями при их расположении в ряд рекомендуется принимать в 2 - 3 раза больше их длины, при расположении по контуру – в три раза. Окончательное число заземлителей n_2 определяется из конкретных условий расположения заземлителей. Сопротивление заземлителей – без учета соединительной полосы:

$$R_{cc} = R_c / (n_2 \eta_c).$$

Таблица 5.3

Коэффициенты использования η_c вертикальных заземлителей

Отношение расстояния между заземлителями к их длине	Число заземлителей n							
	2	4	6	10	20	40	60	100
<i>Заземлители располагаются в ряд</i>								
1	0,85	0,73	0,65	0,59	0,48	—	—	—
2	0,91	0,83	0,77	0,74	0,67	—	—	—
<i>Заземлители располагаются по контуру</i>								
1	—	0,69	0,61	0,55	0,47	0,41	0,39	0,36
2	—	0,78	0,73	0,68	0,63	0,58	0,55	0,52
3	—	0,85	0,80	0,76	0,71	0,66	0,64	0,62

6. Определяют сопротивление соединительной полосы R_n :

$$R_{\Pi} = \frac{\rho_{\text{расч}}^{\Pi}}{2\pi l_{\Pi}} \ln \frac{2l_{\Pi}^2}{bH_1}, \quad (5.3)$$

где $l_{\Pi} = 1,05 \cdot (n_2 - 1) \cdot S$ – длина соединительной полосы, м;

b, H_1 – ширина и глубина заложения соединительной полосы, м.

С учетом коэффициента использования полосы η_{Π} (табл. 5.4) уточняют $R'_{\Pi} = R_{\Pi} / \eta_{\Pi}$.

Таблица 5.4

Коэффициенты использования η_{Π} горизонтальной полосы, соединяющей вертикальные заземлители

Отношение расстояния между заземлителями к их длине	Число вертикальных заземлителей n_2							
	2	4	6	10	20	40	60	100
<i>Вертикальные заземлители расположены в ряд</i>								
1	0,85	0,77	0,72	0,62	0,42	–	–	–
2	0,94	0,89	0,84	0,75	0,56	–	–	–
<i>Вертикальные заземлители расположены по контуру</i>								
1	–	0,45	0,40	0,34	0,27	0,22	0,20	0,19
2	–	0,55	0,48	0,40	0,32	0,29	0,27	0,23
3	–	0,70	0,64	0,56	0,45	0,39	0,36	0,33

7. Определяют общее сопротивление заземляющего устройства и соединяющей полосы

$$R = \frac{R_{\text{сс}} \cdot R'_{\Pi}}{R_{\text{сс}} + R'_{\Pi}}, \quad (5.4)$$

и проверяют, соответствует ли оно нормативному значению R_n , в случае превышения норматива – сделать повторный расчет.

Пример 5.1

Спроектировать защитное заземление оборудования лаборатории, находящейся в I климатической зоне. Заземляющее устройство заглублено на глубину 0,8 м. Грунт – суглинок. Для вертикальных заземлителей длиной $l_c = 3,0$ м использовать стальные трубы диаметром $d = 35$ мм. Для соединительной полосы использовать стальную шину сечением 40 х 4 мм. Заземлители расположить в ряд. Источник тока (трансформатор) мощностью 40 кВ·А подает напряжение в лабораторию 400 В.

Решение

1. Определяем нормативное значение сопротивления заземления R_n . В помещении лаборатории электроустановки для которых необходимо спроектировать защитное заземление работают при напряжении 400 В, поэтому они относятся к электроустановкам напряжением до 1000 В. Поскольку мощность трансформатора невелика (40 кВ·А), то сопротивление защитного заземления должно быть не более 10 Ом. $R_n = 10$ Ом.

2. Определим расчетное удельное сопротивление грунта $\rho_{расч}$. По таблице 5.1, зная тип грунта – суглинок найдем $\rho_{табл} = 100$ Ом·м, по таблице 5.2, зная климатическую зону – I и с учетом типа заземлителя – $\psi^с = 2$, $\psi^н = 7$. $\rho_{расч} = \rho_{табл} \cdot \psi$ Расчетное удельное сопротивление вертикальных элементов заземляющего устройства (стержней) $\rho_{расч}^с = 100 \cdot 2 = 200$ Ом·м и для горизонтальных элементов (полосы) $\rho_{расч}^н = 100 \cdot 7 = 700$ Ом·м.

3. Рассчитаем сопротивление одиночного вертикального заземлителя R_c по формуле (5.1), зная диаметр стержня $d = 30$ мм = 0,03 м, длину стержня $l_c = 3$ м и $H = 0,8 + 3/2 = 2,3$ м

$$R_c = \frac{200}{2\pi \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,03} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) = 59,84 \text{ Ом}$$

4. Учитывая норму сопротивления заземления R_n , определим число вертикальных заземлителей по формуле (5.2)

$$n = \frac{59,84}{10} = 5,98 \approx 6 \text{ шт}$$

5. Поскольку в условии задачи не дан план, где необходимо разместить заземляющее устройство, примем следующее допущение: расстояние между одиночными заземлителями возьмем в два раза больше их длины, т.е. $S = 2 \cdot l = 6$ м. Тогда, $\eta = 2$. По таблице 5.3, с учетом расположения заземлителей – в ряд, коэффициент использования вертикальных стержней $\eta_c = 0,77$. Число вертикальных элементов заземлителя $n_1 = 6/0,77 = 7,8 \approx 8$ шт (округлим в большую сторону для не превышения нормативного значения сопротивления). Поскольку план расположения заземлителей не задан, корректировать число вертикальных элементов необходимости нет, поэтому $n_2 = n_1 = 8$ шт.

Сопротивление заземлителей – без учета соединительной полосы составит $R_{cc} = 59,84 / (8 \cdot 0,77) = 9,71 \text{ Ом}$.

6. Рассчитаем сопротивление соединительной полосы R_{Π} по формуле (5.3) с учетом длины соединительной полосы $l_{\Pi} = 1,05 \cdot (8-1) \cdot 6 = 44,1 \text{ м}$, ее ширины $b = 40 \text{ мм} = 0,04 \text{ м}$ и глубины заложения $H_1 = H_0 = 0,8 \text{ м}$

$$R_{\Pi} = \frac{700}{2\pi \cdot 44,1} \ln \frac{2 \cdot 44,1^2}{0,04 \cdot 0,8} = 29,59 \text{ Ом}$$

С учетом коэффициента использования полосы $\eta_{\Pi} = 0,8$ (по таблице 5.4, зная $n_2 = 8$ шт, отношение расстояния между заземлителями к их длине – два и при их расположении в ряд, используя метод интерполяции, т.к. в таблице даны коэффициенты использования для 6 шт и 10 шт) уточняют $R'_{\Pi} = 29,59 / 0,8 = 37 \text{ Ом}$.

7. Определим общее сопротивление заземляющего устройства и соединяющей полосы по формуле (5.4)

$$R = \frac{9,21 \cdot 37}{9,21 + 37} = 7,37 \text{ Ом}$$

Проверим, соответствует ли оно нормативному значению. В нашем случае $R_{н} = 10 \text{ Ом}$, следовательно расчет верен.

Вывод

Параметры заземляющего устройства: вертикальные элементы – трубы, диаметром 30 мм и длиной по 3 м, в количестве 8 шт. расположены в ряд. Расстояние между вертикальными элементами – 6 м. Горизонтальный элемент – полоса, сечением 40х4 мм, длиной 44,1 м. Заземляющее устройство заглублено на глубину 0,8 м. Сопротивление заземляющего устройства 7,37 Ом, что не превышает нормативного значения 10 Ом.

Задача 5.1 Спроектировать защитное заземление оборудования лаборатории. Заземляющее устройство заглублено на глубину 0,8 м. Для вертикальных заземлителей длиной $l_c = 3,0 \text{ м}$ использовать стальные трубы диаметром $d = 40 \text{ мм}$. Для соединительной

полосы использовать стальную шину сечением 40 х 4 мм. Источник тока (трансформатор) подает напряжение в лабораторию 400 В. Варианты остальных исходных данных приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5

Варианты исходных данных к задаче 5.1

№ вар.	Мощность трансформатора, кВ·А	Климатическая зона	Грунт	Расположение вертикальных заземлителей
1	100	III	чернозем	в ряд
2	630	I	супесок	по контуру
3	40	IV	песок	по контуру
4	63	III	суглинок	по контуру
5	250	II	глина	в ряд
6	100	I	чернозем	в ряд
7	250	III	суглинок	в ряд
8	630	II	суглинок	в ряд
9	250	III	супесок	по контуру
10	63	II	глина	в ряд
11	100	II	супесок	по контуру
12	630	IV	чернозем	в ряд
13	40	II	глина	в ряд
14	250	IV	песок	в ряд
15	630	II	глина	по контуру
16	63	I	песок	в ряд
17	100	IV	суглинок	в ряд
18	40	III	супесок	в ряд
19	630	III	песок	по контуру
20	100	III	глина	по контуру
21	250	II	чернозем	в ряд
22	63	III	чернозем	по контуру
23	100	II	песок	в ряд
24	40	II	чернозем	по контуру
25	63	IV	супесок	в ряд

5.3. Расчет зануления

Цель расчета зануления – определить сечение защитного нулевого провода, удовлетворяющее условию срабатывания максимальной токовой защиты, при известных остальных параметрах сети и заданных параметрах автоматического выключателя или плавкой вставки.

Методика расчета зануления

1. Определяют сопротивление трансформатора Z_T , Ом. Значения Z_T в зависимости от мощности трансформатора P и схемы соединения обмоток «звезда-звезда» Y/Y_n или «треугольник-звезда» Δ/Y_n с четвертым нулевым защитным проводником с низкой стороны трансформатора приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Расчетные сопротивления трансформаторов при вторичном напряжении 380/220 В^{*}

P , кВт	Z_T		P , кВт	Z_T	
	Y/Y_n	Δ/Y_n		Y/Y_n	Δ/Y_n
25	3,110	0,906	250	0,312	0,090
40	1,950	0,562	400	0,195	0,056
63	1,240	0,360	630	0,129	0,042
100	0,800	0,266	1000	0,081	0,029
160	0,487	0,141	1600	0,054	0,017
* ⁾ Для трансформаторов с вторичным напряжением 220/128 В Z_T следует уменьшить в 3 раза.					

2. Рассчитывают ток однофазного короткого замыкания I_K по формуле:

$$I_K = k \cdot I_{ном} , \quad (5.5)$$

где $I_{ном}$ – номинальный ток срабатывания устройства защиты (плавкой вставки (П)

или автоматического выключателя (АВ)), А;

k – коэффициент кратности номинального тока.

Согласно ПУЭ значение тока I_K должно превышать в 3 раза значение номинального тока срабатывания плавкой вставки. При защите сети автоматическими выключателями, имеющими только электромагнитный расцепитель, коэффициент кратности тока выключателей с номинальным током до 100 А следует принимать равным 1,4, а для прочих – 1,25.

3. Выбирают площадь сечения нулевого провода по таблице 5.7. При выборе сечения нулевого проводника следует обеспечить плотность тока в нулевом проводнике $i_n = 0,5 \dots 2,0 \text{ А/мм}^2$ по формуле:

$$i_n = I_K / S_n . \quad (5.6)$$

Таблица 5.7

Значения r_1 и x_1 , Ом/км стальных проводников при переменном токе ($f = 50$ Гц)

Размеры сечения, мм	S_n , мм ²	Плотность тока в проводнике i_n , А/мм ²							
		$i_n = 0,5$		$i_n = 1,0$		$i_n = 1,5$		$i_n = 2,0$	
		r_1	x_1	r_1	x_1	r_1	x_1	r_1	x_1
20x4	80	5,24	3,14	4,20	2,52	3,48	2,09	2,97	1,78
30x4	120	3,66	2,20	2,91	1,75	2,38	1,43	2,04	1,22
30x5	150	3,38	2,03	2,56	1,54	2,08	1,25	1,60	0,98
40x4	160	2,80	1,68	2,24	1,34	1,81	1,09	1,54	0,92
50x4	200	2,28	1,37	1,79	1,07	1,45	0,87	1,24	0,74
50x5	250	2,10	1,26	1,60	0,96	1,28	0,77	–	–
60x5	300	1,77	1,06	1,34	0,80	1,08	0,65	–	–

4. По таблице 5.7 устанавливают значения активного r_1 (Ом/км) и внутреннего индуктивного сопротивления x_1 (Ом/км) одного километра стального проводника. Они зависят от его профиля и площади сечения S_n (мм²), а также от ожидаемой плотности тока в нулевом проводнике i_n (А/мм²).

5. Определяют значения активного и индуктивного сопротивления нулевого защитного проводника. Если нулевой защитный проводник выполнен из стали прямоугольного или круглого сечения, то активное сопротивление нулевого провода

$$R_n = r_1 \cdot l, \quad (5.7)$$

а индуктивное сопротивление

$$X_n = x_1 \cdot l, \quad (5.8)$$

где r_1 и x_1 – активное и внутреннее индуктивные сопротивления одного километра стального проводника, Ом/км.

6. Для медных и алюминиевых проводников фаз по известным данным: сечению S_ϕ (мм²), длине l (м) и удельному сопротивлению проводника ρ (Ом·мм²/м) (для меди $\rho = 0,018$, а для алюминия $\rho = 0,028$) – определяется активное сопротивление фазы R_ϕ :

$$R_\phi = \frac{\rho \cdot l}{S_\phi}. \quad (5.9)$$

Значение внутреннего индуктивного фазного сопротивления X_ϕ для медных и алюминиевых проводников мало, поэтому им можно пренебречь.

7. По формуле полного сопротивления проводников

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (5.10)$$

определяют полное сопротивление фазного Z_{ϕ} (Ом) и нулевого защитного проводника Z_n (Ом).

8. Материал и сечение нулевого защитного проводника – должны удовлетворять условию:

$$Z_n \leq 2 \cdot Z_{\phi}, \quad (5.11)$$

где Z_n и Z_{ϕ} – полные сопротивления соответственно нулевого и фазного проводника, Ом.

9. Внешнее индуктивное сопротивление X_n , Ом, петли «фаза-нуль», если используется воздушная линия электропередачи и частота тока $f = 50$ Гц, можно определить по формуле:

$$X_n = 0,1256 \cdot l \cdot \ln(2 \cdot D / d), \quad (5.12)$$

где l – длина линии, км;

D – расстояние между проводниками линии, м;

d – диаметр проводников, м.

Для грубых расчетов используют формулу $X_n = 0,6 \cdot l$, что соответствует $D = 1$ м. Для уменьшения значения X_n нулевой защитный проводник следует прокладывать рядом с фазным. Если нулевой проводник является четвертой жилой кабеля или металлической трубой, в которой расположены фазные проводники, то X_n мало по величине и им можно пренебречь.

10. Полное сопротивление проводников петли «фаза-нуль» Z_n (Ом) определяется по формуле

$$Z_n = \sqrt{(R_{\phi} + R_n)^2 + (X_{\phi} + X_n + X_n)^2}, \quad (5.13)$$

где R_{ϕ} , R_n – активные сопротивления фазного и нулевого провода, Ом;

X_{ϕ} , X_n – внутренние индуктивные сопротивления фазного и нулевого проводов, Ом;

X_n – внешнее индуктивное сопротивление петли «фаза-нуль», Ом.

11. Расчетный ток петли «фаза-нуль» равен отношению напряжения в этой цепи к полному сопротивлению цепи:

$$I_n = \frac{U_\phi}{\frac{Z_T}{3} + Z_n}, \quad (5.14)$$

где U_ϕ – фазное напряжение сети, В;

Z_T – сопротивление трансформатора, Ом;

Z_n – полное сопротивление петли «фаза-нуль», Ом.

12. Проверяется условие на срабатывание выключателя. Если в результате расчета условие

$$I_n \geq I_k \quad (5.15)$$

выполняется, то расчет окончен, а если не выполняется, то его повторяют, выполнив одно из мероприятий: утолщают нулевой защитный проводник; изменяют параметры выключателя; изменяют параметры фазных проводников.

Пример 5.2

Подобрать площадь сечения нулевого провода, удовлетворяющая условию срабатывания максимальной токовой защиты, распределительного щитка лаборатории, к которому подведена линия (длиной $l = 400$ м) от понижающего трансформатора с 10 кВ до 0,4 кВ, мощностью 400 кВ·А, соединение обмоток Y/Y_n. Параметры «фазы» -- напряжение 220 В, площадь сечения провода из меди 12 мм². Расстояние между проводниками линии – 0,6 м. Параметры устройства защиты – тип АВ, номинальный ток $I_{ном} = 63$ А.

Решение

1. Сопротивление обмоток трансформатора Z_T определим по таблице 5.6 зная напряжение трансформатора 380 В (понижающий трансформатор с 10 кВ до 0,4 кВ), мощность 400 кВ·А и соединение обмоток трансформатора Y/Y_n. $Z_T = 0,195$.

2. По формуле (5.5), зная, что $I_{ном} = 63$ А, рассчитаем значение тока I_k (для АВ номинальным током до 100 А коэффициент кратности тока составляет 1,4). Тогда, $I_k = 63 \cdot 1,4 = 88,2$ А.

3. Плотность тока в нулевом проводнике i_n рассчитаем по формуле (5.6), выбирая площадь сечения нулевого провода 160 мм^2 (помня о необходимости обеспечения i_n от $0,5 \text{ А/мм}^2$ до 2 А/мм^2 , если не попадаем в этот диапазон, то необходимо корректировать выбор площади сечения нулевого провода). $i_n = 88,2/160 = 0,55 \text{ А/мм}^2$, следовательно менять выбранную площадь сечения необходимости нет.

4. Определим по таблице 5.7 значения r_1 и x_1 (выбирая меньшее значение i_n из таблицы: например, в нашем случае выбираем $i_n = 0,5 \text{ А/мм}^2$): $r_1 = 2,28 \text{ Ом/км}$ и $x_1 = 1,37 \text{ Ом/км}$.

5. Рассчитаем значения активного R_n и внутреннего индуктивного X_n сопротивления нулевого проводника подставляя в формулы (5.7) и (5.8) длину линии в километрах: $R_n = 2,28 \cdot 0,4 = 0,912 \text{ Ом}$ и $X_n = 1,37 \cdot 0,4 = 0,548 \text{ Ом}$.

6. Определим по формуле (5.9) активное сопротивление фазного проводника R_ϕ при заданных значениях $l = 400 \text{ м}$ и $S_\phi = 12 \text{ мм}^2$ с учетом $\rho = 0,018 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ для медного провода.

$$R_\phi = \frac{0,018 \cdot 400}{12} = 0,6 \text{ Ом}.$$

7. Определим полное сопротивление нулевого и фазного проводников по формуле (5.10): $Z_n = \sqrt{0,912^2 + 0,548^2} = 1,06 \text{ Ом}$ и $Z_\phi = \sqrt{0,6^2 + 0^2} = 0,6 \text{ Ом}$.

8. Проверим условие (5.11) $1,06 \leq 2 \cdot 0,6$, видно, что условие выполняется (в случае, если оно не выполняется, необходимо изменить площадь сечения нулевого провода).

9. Определим внешнее индуктивное сопротивление проводников согласно формуле (5.12) при $d = 2 \cdot \sqrt{S_\phi/\pi} = 2 \cdot \sqrt{12/3,14} = 3,91 \text{ мм}^2 = 3,91 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$:

$$X_n = 0,1256 \cdot 0,4 \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{0,6}{(3,91 \cdot 10^{-6})} \right) = 0,635 \text{ Ом},$$

10. Рассчитаем по формуле (5.13) полное сопротивление петли «фаза – нуль» Z_n .

$$Z_n = \sqrt{(0,6 + 0,912)^2 + (0 + 0,548 + 0,635)^2} = 1,92 \text{ Ом}.$$

11. По формуле (5.14) найдем значение I_n :

$$I_n = \frac{220}{\frac{0,195}{3} + 1,92} = 110,8 \text{ А}.$$

12. Проверим условие (5.15). $I_n = 191,44 \text{ A} \geq I_k = 88,2 \text{ A}$, следовательно условие выполняется и защита обеспечивается. Если условие не выполняется, необходимо повторить расчет с другой площадью сечения нулевого провода.

Вывод

В результате расчета определена необходимая площадь сечения нулевого провода $S_n = 160 \text{ мм}^2$, которая обеспечит срабатывание автоматического выключателя.

Задача 5.2 Подобрать площадь сечения нулевого провода, удовлетворяющая условию срабатывания максимальной токовой защиты, распределительного щитка лаборатории, к которому подведена линия (длиной l , м) от понижающего трансформатора с 10 кВ до 0,4 кВ, с заданным значением мощности P , кВт·А и соединением обмоток.

Варианты остальных исходных данных приведены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Варианты исходных данных к задаче 5.2

№	Параметры трансформатора		l, м	Параметры «фазы»			D, м	Параметры устройства защиты *)	
	P, кВт·А	Соединение обмоток		U _ф , В	S _ф , мм ²			тип	I _{ном} , А
					из Cu	из Al			
1	400	Y/Y _н	450	220	—	10	0,5	AB	40
2	63	Y/Y _н	250	220	15	—	0,3	П	40
3	63	Δ/Y _н	375	220	—	8	0,4	AB	40
4	40	Y/Y _н	200	220	12	—	0,7	AB	80
5	630	Y/Y _н	100	220	20	—	0,2	П	125
6	630	Δ/Y _н	200	220	—	16	0,5	AB	50
7	400	Y/Y _н	125	220	—	15	0,2	П	100
8	630	Y/Y _н	400	220	14	—	0,6	П	80
9	63	Y/Y _н	350	220	12	—	0,4	AB	50
10	400	Δ/Y _н	100	220	10	—	0,7	П	50
11	40	Y/Y _н	425	220	18	—	0,2	П	125
12	630	Δ/Y _н	125	220	—	25	0,3	AB	63
13	63	Y/Y _н	200	220	—	8	0,4	AB	80
14	40	Δ/Y _н	375	220	—	16	0,6	AB	40
15	63	Δ/Y _н	250	220	17	—	0,2	AB	63
16	400	Δ/Y _н	350	220	—	14	0,4	AB	50
17	630	Y/Y _н	175	220	—	12	0,4	П	40
18	400	Δ/Y _н	200	220	20	—	0,6	П	80
19	40	Y/Y _н	300	220	12	—	0,3	AB	50
20	630	Y/Y _н	150	220	10	—	0,7	П	50
21	400	Y/Y _н	325	220	16	—	0,3	AB	63
22	40	Δ/Y _н	250	220	—	5	0,4	П	100
23	63	Δ/Y _н	400	220	—	20	0,3	П	80
24	63	Y/Y _н	325	220	—	18	0,2	П	125

25	40	Δ/Y_H	150	220	–	20	0,5	П	80
^{*)} Тип устройства защиты: П – предохранитель, АВ – автоматический выключатель; $I_{ном}$ – номинальный ток плавкой вставки предохранителя или номинальный ток вставки автоматического выключателя.									

Ответы к задачам

Задача 5.1

№ варианта	Число заземлителей n_2 , шт (округлить до целого числа)	Расстояния между стержнями S , м (целое число)	Длина соединительной полосы $l_{п}$, м (округлить до десятых)	Общее сопротивление заземляющего устройства R , Ом < нормативного значения сопротивления R_n , Ом (округлить до десятых)
1	14	6	81,9	6,0<10
2	66	9	614,3	3,4<4
3	41	9	378,0	7,0<10
4	7	9	56,7	5,0<10
5	8	6	44,1	2,5<4

Задача 5.2

№ варианта	Площадь сечения нулевого провода S_n , мм ²
1	120 мм ²
2	120 мм ²
3	80 мм ²
4	120 мм ² , или 150 мм ² , или 160 мм ²
5	250 мм ² или 300 мм ²