

Министерство образования и науки РФ
Нижекамский химико-технологический институт (филиал)
Государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Казанский государственный технологический университет»

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

**Нижекамск
2011**

УДК 621.3
Э 45

Электробезопасность короткого замыкания : методические указания для практических работ / сост.: Г.Ф. Нафиков, Э.Г. Гарайшина. – Нижнекамск : Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ГОУ ВПО «КГТУ», 2011. - 28 с.

Изложены методики расчетов токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ и выше 1 кВ, для выбора токоведущих частей и аппаратов, заземляющих устройств, зануления, релейной защиты, силовых транспортеров, линии и электродвигателей, а также защиты от перенапряжения удара молнии.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальностям «Электроснабжение» и «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

Подготовлены на кафедре «Процессы и аппараты химической технологии».

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Нижнекамского химико-технологического института (филиала) КГТУ.

Рецензенты:

Гарипов М.Г., кандидат технических наук, доцент;

Булатова В.М., кандидат педагогических наук, доцент.

УДК 621.3

© Нижнекамский химико-технологический
институт (филиал) КГТУ, 2011

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

При проектировании системы электроснабжения и электроприводов учитываются не только нормальные режимы работы электроустановок, но и их аварийные режимы. Одним из аварийных режимов является короткое замыкание (КЗ) и перенапряжение.

Последствиями коротких замыканий являются резкое увеличение тока и перенапряжения в короткозамкнутой цепи, которые приводят к снижению напряжения в отдельных точках системы и к разрушению аппаратов, машин и других устройств.

Причинами коротких замыканий могут быть: механические повреждения изоляции, падение опор воздушной линии, старение и увлажнение изоляции, перекрытие между фазами вследствие атмосферных перенапряжений и др.

Для уменьшения последствий КЗ необходимо как можно быстрее отключить поврежденный участок, что достигается применением быстродействующих выключателей и релейной защиты. Немаловажную роль играют автоматические регулирование и форсирование возбуждения генераторов, позволяющие поддерживать напряжение в аварийном режиме на необходимом уровне. Все электрические аппараты и токоведущие части электрических установок должны быть выбраны таким образом, чтобы исключалось их разрушение при прохождении по ним наибольших возможных токов КЗ, в связи с чем возникает необходимость расчета этих величин.

1. Расчет токов короткого замыкания

Пример 1. Определить токи КЗ в точках К1 и К2 по заданной схеме (рис. 1). Генераторы G1, G2 типа ТВФ-63, $S_{\text{ном}} = 78,75 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $x_d = 15,3 \%$; G3 типа ТВФ-120, $S_{\text{ном}} = 125 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $x_d = 21,4 \%$, трансформаторы Т1, Т2 типа ТДЦ – 63000/110, $S_{\text{ном}} = 63000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $u_k = 10,5 \%$; трансформаторы Т3 типа ТДЦ – 125000/110, $S_{\text{ном}} = 125000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $u_k = 10,5 \%$; трансформаторы Т4, Т5 типа ТР ДЦН – 25000/110, $S_{\text{ном}} = 25000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $u_{\text{кв} \cdot \text{м}} = 10,5 \%$, реактор LR РБСГ $\cdot 10 \cdot 2 \times 1000 - 0,35$, $J_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$, $x_p = 0,35 \text{ Ом}$, $k_{\text{св}} = 0,55$; линия 10 кВ выполнена кабелем АСБ 3х185, $r_0 = 0,169 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 0,073 \text{ Ом/км}$, $l = 1100 \text{ м}$; линия 110 кВ W1, W2 воздушные, $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$, $l = 10 \text{ км}$. Секционный выключатель на шинах 10 кВ ГПП нормально отключен.

Решение. Составим схему замещения и определим сопротивления всех элементов в относительных единицах, принимая $S_0 = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. В схему замещения не войдет трансформатор Т5, питающая его линия, так как секционный выключатель нормально включен. На схеме замещения указаны порядковый номер (в числителе) и сопротивление (в знаменателе) - рис. 2.

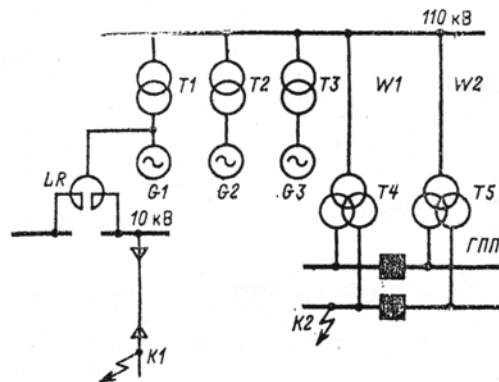


Рис. 1. Расчетная схема к примеру 1

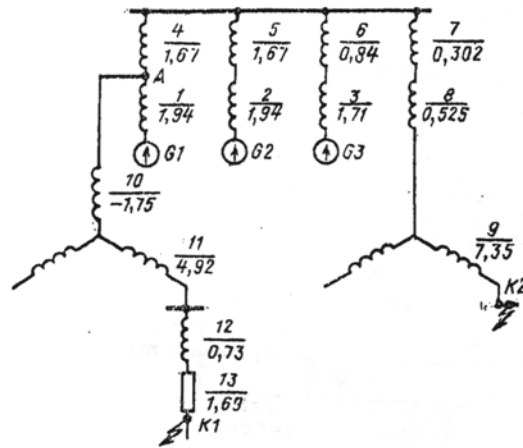


Рис. 2. Общая схема замещения к примеру 1

Определим относительные единицы сопротивлений

$$x_1 = x_2 = \frac{x_d \cdot S_{\phi}}{100 \cdot S_H} = \frac{15,3 \cdot 1000}{100 \cdot 78,75} = 1,94;$$

$$x_3 = \frac{21,4 \cdot 1000}{100 \cdot 125} = 1,71;$$

$$x_4 = x_5 = \frac{u \cdot S_{\phi}}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 63} = 1,67;$$

$$x_6 = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 125} = 0,84;$$

$$x_7 = x_0 \cdot l \frac{S_{\phi}}{u_{cp}^2} = 0,4 \cdot 10 \frac{1000}{115^2} = 0,302;$$

$$x_8 = \frac{0,125 \cdot u_{кв-н} \cdot S_{\phi}}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{0,125 \cdot 10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 25} = 0,525;$$

$$x_9 = \frac{1,75 \cdot u_{кв-н} \cdot S_{\phi}}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{1,75 \cdot 10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 25} = 7,35;$$

$$x_{10} = -x_p \cdot \kappa_{c\theta} \frac{S_{\theta}}{u_{cp}^2} = -0,35 \cdot 0,55 \frac{1000}{10,5^2} = -1,75;$$

$$x_{11} = (1 + \kappa_{c\theta}) \cdot \frac{S_{\theta}}{u_{cp}^2} = 0,35 \cdot (1 + 0,55) \frac{1000}{10,5^2} = 4,92;$$

$$x_{12} = x_0 \cdot l \frac{S_{\theta}}{u_{cp}^2} = 0,073 \cdot 1,1 \frac{1000}{10,5^2} = 0,73;$$

$$x_{13} = r_0 \cdot l \frac{S_{\theta}}{u_{cp}^2} = 0,169 \cdot 1,1 \frac{1000}{10,5^2} = 1,69;$$

Преобразуем схему для точки К1 (рис. 3 а, б). Блоки G2, G3 включены параллельно на шины 110 кВ, следовательно, их результирующее сопротивление:

$$\tilde{\theta}_{14} = \frac{(\tilde{\theta}_2 + \tilde{\theta}_3)(\tilde{\theta}_3 + \tilde{\theta}_6)}{(\tilde{\theta}_2 + \tilde{\theta}_5) + (\tilde{\theta}_3 + \tilde{\theta}_6)};$$

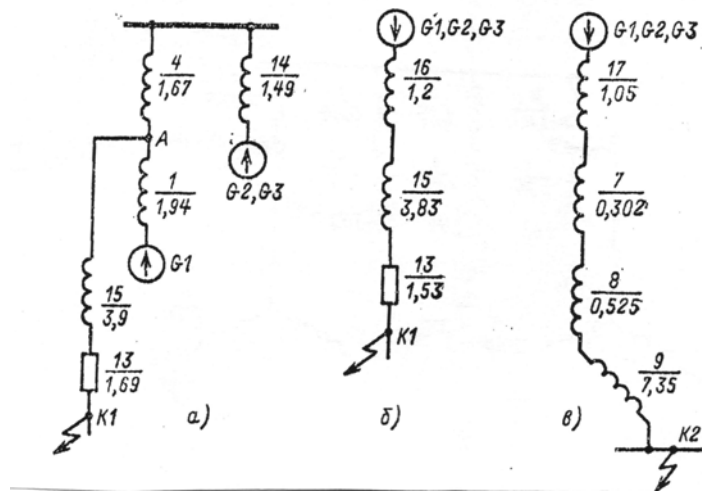


Рис. 3. Схема замещения к примеру 1

Соединения x_{10} , x_{11} , x_{12} соединены последовательно:

$$x_{15} = \tilde{\delta}_{10} + \tilde{\delta}_{11} + \tilde{\delta}_{12};$$

Токи КЗ от генераторов G2, G3 и G1 подходят к узловой точке А, следовательно, результирующее сопротивление от генераторов до точки А:

$$x_{16} = \frac{(x_4 + x_{14})}{x_4 + x_{14} + x_1}.$$

Результирующее индуктивное сопротивление до точки К1:

$$x_{рез} = x_{16} + x_{15}.$$

Результирующее активное сопротивление (учтено только сопротивление кабеля):

$$r_{рез} = \frac{1}{3} x_{рез},$$

Поэтому ток КЗ определим с учетом активного сопротивления:

$$J_{n-o} = \frac{J_{\bar{\delta}}}{Z_{рез}} = \frac{J_{\bar{\delta}}}{\sqrt{x_{рез}^2 + r_{рез}^2}},$$

$$\text{где } J_{\bar{\delta}} = \frac{S_{\bar{\delta}}}{\sqrt{3} \cdot U_{cp}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 55,05 \text{ А, } K_y = 133$$

$$\text{по } \frac{\tilde{\delta}}{r} = \frac{5.1}{1.69} = 3.01 \text{ по таблице.}$$

Ударный ток КЗ:

$$i_y = \sqrt{2} K_y J_{n-o} = \sqrt{2} \cdot 1,33 \cdot 10,25 = 19,25 \text{ кА.}$$

Преобразуем схему замещения для точки К2 (рис. 3 в). По отношению к точке К2 блоки G1, G2, G3 включены параллельно на шины 110 кВ, их результирующее сопротивление:

$$x_{14} = \frac{x_{14}(x_1 + x_4)}{x_{14} + x_1 + x_4}$$

Расчет ведем без учета активного сопротивления, так как для линий 110 кВ и трансформаторов большой мощности оно относительно невелико

$$x_{рез} = x_{17} + x_7 + x_8 + x_9$$

$$J_{n-o} = \frac{J_{\bar{o}}}{x_{рез}}$$

$$i_y = \sqrt{2} K_y \cdot J_{n-o},$$

где $K_y = 1,8$ по таблице.

Пример 2. Определить токи КЗ на шинах 6,3 кВ ГПП, РП и цеховых подстанций ТП1, ТП2 по схеме, изображенной на рис. 4. На ГПП установлены трансформаторы ТДН-16000/110, $u_k = 10,5\%$. На вводе питающей линии 110 кВ установлен МКП-110 с $J_{отк. ном} = 20$ кА. Марки кабелей указаны на рис.4. Секционные выключатели 6,3 кВ на ГПП и РП нормально отключены.

Решение. Составим схему замещения (рис. 4) и определим сопротивления всех элементов в именованных единицах по приведенным формулам.

Определяем сопротивление системы при заданном токе отключения выключателя $J_{отк. ном} = 20$ кА.

$$x_1 = \frac{U_{\bar{o}}^2}{\sqrt{3} J_{отк. ном} \cdot U_{cp}},$$

$$x_2 = x_3 = \frac{u_k \cdot U_{\bar{o}}^2}{100 \cdot S_{ном}},$$

$$r_{T1} = r_{T2} = \frac{P_k U_{\bar{o}}^2 \cdot 10^{-3}}{S_{ном}^2}$$

Система

МКП-110-1000-20У1

110 кВ

ГПП

6,3 кВ

К1

АСБ 3x240
l=0,8 км

6,3 кВ

К2

РП

К3

ТП1

К4

ТП2

АСБ 3x185
l=0,6 км

АСБ 3x120
l=0,8 км

Активное сопротивление трансформатора ТДН-16000 можно не учитывать, так как оно в 20 раз меньше индуктивного. Активные сопротивления кабельных линий учитываем. Значения r_0 и x_0 находим по формуле:

$$r_i = r_0 l_i, \text{ где } i = 5, 7, 9.$$

9

$$i_y = \sqrt{2} K_y J_{n.o}, \text{ где } K_y = 1,8$$

Точка К2 $x_{рез} = x_1 + x_3 + x_4$; $r_{рез} = r_5 = 0,105 \text{ Ом}$

$$J_{n.o} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \sqrt{x_{рез}^2 + r_{рез}^2}}$$

При $\frac{x_{рез}}{r_{рез}}$, $K_y = 1,34$,

$$i_y = \sqrt{2} K_y \cdot J_{n.o}$$

Точка К3 $x_{рез} = x_1 + x_3 + x_4 + x_6$; $r_{рез} = r_5 + r_7$.

Находим $J_{п.о.}$

При $\frac{x_{рез}}{r_{рез}}$, $K_y = 1,14$, находим i_y

Точка К4 $x_{рез} = x_1 + x_3 + x_4 + x_6 + x_8$; $r_{рез} = r_5 + r_7 + r_9$.

Находим $J'_{п.о.}$

При $\frac{x_{рез}}{r_{рез}}$, $K_y = 1,05$, находим i_y

Определим ток КЗ в точке К4 без учета активного сопротивления кабелей:

$$J''_{n.o} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} x_{рез}}$$

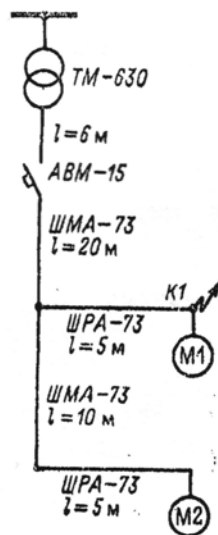
Погрешность такого расчета составит:

$$\frac{J'_{n.o} - J''_{n.o}}{J''_{n.o}} \cdot 100\%$$

2. Особенности расчета токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ

Пример 3. Определить ток КЗ в точке цеховой сети (рис.5), если на цеховой подстанции установлен трансформатор ТМ 630/6; $U_k = 5,5 \%$; $P_k = 7,6$ кВт. К шинам 0,4 кВ трансформатор присоединен алюминиевыми шинами сечением 60х8, расположенными горизонтально с расстоянием между фазами $a = 200$ мм. На вводе установлен автоматический выключатель АВМ-15. В цехе проложен магистральный шинопровод ШМА-73, ответвление от него выполнено шинопроводом ШМА-73. В точке К1 присоединена группа электродвигателей М1 общей мощностью 200 кВт; $U_{ном} = 380$ В; $\eta = 0,92$; $\cos\varphi = 0,84$.

Решение. Применяем, что напряжение на шинах 6 кВ цеховой подстанции неизменно, сопротивление от источника питания до этих шин не учитываем. Расчет сопротивлений ведем в единицах (мОм), $U_6 = 400$ В.



$$r_T = \frac{P_k \cdot U_6^2}{S_{ном}^2};$$

$$x_T = \sqrt{U_k^2 - \left(\frac{P_n}{S_{ном}}\right)^2} \frac{U_6^2}{S_{ном}};$$

Сопротивление токовой катушки автоматического выключателя $r_a = 0,12$ мОм, $x_a = 0,094$ мОм, переходное сопротивление контактов $r_k = 0,25$ мОм.

Сопротивление шин до щита 0,4 кВ, $r_{ш} = r_0 \cdot l$; $x_{ш} = x_0 \cdot l$, где $r_0 = 0,074$ мОм; $x_0 = 0,176$ при $a_{ср} = 1,26 \cdot 200 = 252$ мм.

Рис.5. Расчетная схема к примеру 3

Сопrotивление магистрального шинопровода ($r_0 = 0,031$ м·Ом/м; $x_0 = 0,017$ м·Ом/м) $r_{шма} = r_0 \cdot l$; $x_{шма} = x_0 \cdot l$.

Сопrotивление шинопровода ШРА-75 ($r_0 = 0,13$ м·Ом/м; $x_0 = 0,1$ м·Ом/м) $r_{шра} = r_0 \cdot l$; $x_{шра} = x_0 \cdot l$.

Результирующее сопротивление до точки КЗ:

$$r_{рез} = r_T + r_a + r_K + r_M + r_{шма} + r_{шра};$$

$$x_{рез} = x_T + x_a + x_K + x_M + x_{шма} + x_{шра}.$$

Определяем ток КЗ от источника (системы)

$$J_{KC} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \sqrt{x_{рез}^2 + r_{рез}^2}};$$

$$i_{KC} = \sqrt{2} K_y J_{KC}, \text{ где } K_y = 1,33$$

С учетом влияния группы электродвигателей М1 на ток КЗ и вторая группа М2 удалена от места КЗ магистральным шинопроводом $l = 10$ м и распределительным шинопроводом $l = 5$ м и не оказывает влияния на ток КЗ:

$$J_{п.о.д} = 4,5 J_{ном.д} = 4,5 \frac{P_{ном.д}}{\sqrt{3} U_{ном} \eta \cdot \cos \varphi}$$

Ударный ток от электродвигателей:

$$i_{y.д} = 6,5 J_{ном.д};$$

Ток КЗ в точке К1:

$$J_K = J_{KC} + J_{п.о.д};$$

$$i_y = i_{yC} + i_{y.д}.$$

3. Выбор токоведущих частей и аппаратов

Пример 4. Определить сечение кабелей для присоединения цеховой подстанции мощностью 1000 кВт·А, $T_M = 5500$ ч. (рис.6). Кабели проложены в земле при температуре почвы $+ 20^\circ$ с расстоянием 100 мм. На шинах 10 кВ ГПП ток КЗ 9,5 кА. Время действия основной релейной защиты $t_z = 1,2$ с, полное время отключения выключателя 0,12 с.

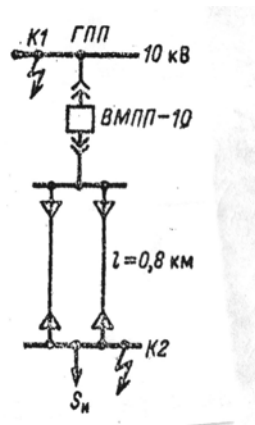


Рис.6. Схема присоединения линии к примеру 4

Решение. Определяем точки продолжительного режима:

$$J_{\text{норм}} = \frac{S_n}{n\sqrt{3}U_{\text{ном}}};$$

$$J_{\text{мах}} = \frac{S_n}{(n-1)\sqrt{3}U_{\text{ном}}}$$

Экономическое сечение кабеля по (1.10):

$$F_{\text{э}} = \frac{J_{\text{норм}}}{t_{\text{э}}} = \frac{J_{\text{норм}}}{1,2} \text{ (мм}^2\text{)}$$

Принимаем два кабеля ААБ (3х25) мм², $J_{\text{д}} = 90$ А. Поправочный коэффициент на температуру почвы $K_1 = 94$ и на число кабелей $K_2 = 0,9$. $J_{\text{д}}' = K_1 \cdot K_2 \cdot J_{\text{д}}$, если $J_{\text{д}}' > J_{\text{мах}}$, следовательно, кабель по длительному нагреву подходит.

Термическая стойкость параллельно соединенных кабелей проверяется по току КЗ непосредственно за пучком кабелей, т.е. в точке К2. Рассчитываем ток КЗ.

Сопротивление до шин ГПП по заданному току КЗ $J_{\text{п.о}} = 9,5$ А

$$x_{\text{рез}} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3}I_{\text{п.о}}}$$

Удельное сопротивление кабеля $r_0 = 1,25$ Ом/км; $x_0 = 0,099$ Ом / км; сопротивление кабеля длиной 0,8 км:

$$x = x_0 \cdot l; \quad r = r_0 \cdot l;$$

Результирующее сопротивление до точки К2

$$x_{\text{рез}} = x_{\text{с}} + x_{\text{к/2}}; \quad r_{\text{рез}} = r_{\text{н/2}}$$

Ток КЗ в точке К2

$$J_{n.o.K2} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \sqrt{x_{pez}^2 + r_{pez}^2}}$$

По одному кабелю проходит половина тока КЗ. $J_{n.o.K2}/2$, поэтому тепловой импульс с тока КЗ

$$B_k = J_{n.o}^2 (t_{отк} + T_a), \text{ где } T_a = 0,01 \text{ с.}$$

Минимальное сечение по термической стойкости:

$$F_{min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C_T}, \text{ где } C_T = 85$$

Если больше выбранного сечения (25 мм^2), то следует увеличить сечение до 50 мм^2 или принять меры для ограничения токов КЗ, например установить реакторы на ГПП.

Пример 5. Выбрать разъединитель QS1, выключатель Q, трансформаторы тока ТА и напряжения TV на стороне 10 кВ ГПП (рис. 7). Нагрузка линии $J_{норм} = 250 \text{ А}$; $J_{max} = 400 \text{ А}$; токи КЗ $J_{п.о} = 9,5 \text{ кА}$; $i_y = 22 \text{ кА}$; $t_y = 1,2 \text{ с}$; $t_a = 0,12 \text{ с}$.

Длина соединительных проводов от трансформатора тока до измерительных приборов 6 м. К трансформатору напряжения присоединены обмотки счетчиков шести линий и вольтметры сборных шин.

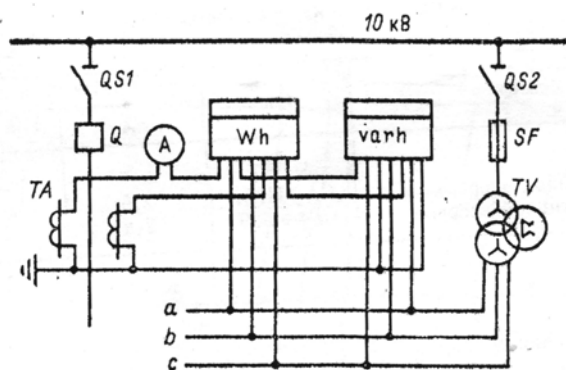


Рис. 7. Схема присоединения измерительных приборов к примеру 5

Решение. Предположим, что РУ 10кВ ГПП выполнено закрытым, поэтому выбираем маломасляный выключатель ВМП-10 со встроенным приводом, разъединитель РВЗ-10 и трансформатор тока ТЛМ-10-400. Все данные сравнения сведены в таблице 1, по которым видно, что указанные аппараты проходят по условиям продолжительного режима и короткого замыкания.

Для проверки трансформатора тока по вторичной нагрузке подсчитаем нагрузку приборов (табл. 2)

Таблица 1

Сравнение данных

Расчетные данные	Каталожные данные		
	Выключатель ВМП-10	Разъединитель РВЗ-10	Трансформатор тока ТЛМ-10
$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$ $J_{max} = 400 \text{ А}$ $J_{п.о} = 9,6 \text{ кА}$ $i_y = 22 \text{ кА}$ $B_k = J_{п.о}(t_{отк} + T_a) = 9,5^2 \cdot 1,33 = 120 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ $J_{ном} = 630 \text{ А}$ $J_{отк.ном} = 20 \text{ кА}$ $i_{дин} = 52 \text{ кА}$ $J_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 20^2 \cdot 4 = 1600 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ $J_{ном} = 630 \text{ А}$ $-$ $i_{дин} = 60 \text{ кА}$ $J_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 20^2 \cdot 4 = 1600 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ $J_{ном} = 100 \text{ А}$ $-$ $i_{дин} = 100 \text{ кА}$ $J_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 18,4^2 \cdot 3 = 1015 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

Таблица 2

Вторичная нагрузка трансформаторов тока

Прибор	Тип	Нагрузка, В·А, фазы	
		А	С
Амперметр	Э-350	0,5	-
Счетчик активной энергии	САЗ-И 681	2,5	2,5
Счетчик реактивной энергии	САЧ-И 689	2,5	2,5
Итого		5,5	5

Наиболее загружена фаза А (5,5 В·А), сопротивление приборов:

$$r_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{J_{2\text{ном}}^2}$$

Сопротивление провода

$$r_{\text{пр}} = r_{2\text{ном}} - r_{\text{приб}} - r_k = 0,4 - 0,22 - 0,05 = 0,13 \text{ Ом},$$

где $r_{2\text{ном}} = 0,4 \text{ Ом}$ в классе точности 0,5 для ТЛМ – 10 – 400;
 $r_k = 0,05 \text{ Ом}$.

Сечения соединительных проводов

$$F = \frac{\rho \cdot \ell_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}} = \frac{0,0283\sqrt{3} \cdot 6}{0,13} = 2,25 \text{ мм}^2.$$

Принимаем контрольный кабель с алюминиевыми жилами 4 мм².

Выбираем трансформатор напряжения ЗНОЛ.09, $U_{\text{ном}} = 10/\sqrt{3}$, $S_{\text{ном}} = 75 \text{ В·А}$ в классе точности 0,5.

По условию к трансформатору напряжения присоединены два вольтметра (Э-335, $S_2 = 2 \text{ В·А}$) и по шесть счетчиков активной и реактивной энергий ($S_2 = 2 \cdot 2,0 \text{ Вт}$, $\cos\varphi = 0,38$).
 Нагрузки этих приборов:

$$P_{\text{приб}} = 2 \cdot 2,0 + 6 \cdot 4 + 6 \cdot 4 = 52 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{приб}} = P_{\text{приб}} \cdot \text{tg}\varphi = 6 \cdot 4 \cdot 2,43 + 6 \cdot 4 \cdot 2,43 = 116,64 \text{ вар};$$

$$S_{\text{приб}} = \sqrt{Q_{\text{приб}}^2 + P_{\text{приб}}^2} = 127 \text{ В·А}$$

что меньше мощности трех однофазных трансформаторов напряжения (3·75 В·А).

4. Расчет заземляющих устройств

Пример 6. Рассчитать заземляющее устройство заводской подстанции 35/10 кВ, находящееся во второй климатической зоне. Сети 35 и 10 кВ работают с наземной нейтралью. На стороне 35 кВ $J_3 = 8$ А, на стороне 10 кВ $J_3 = 19$ А. Собственные нужды подстанции получают питание от трансформатора 10/0,4 кВ с заземленной нейтралью на стороне 0,4 кВ. Естественных заземлителей нет. Удельное сопротивление грунта при нормальной влажности $\rho = 62$ Ом·м. Электрооборудование подстанции занимает площадь 18×8 м².

Решение. Сопротивление заземляющего устройства для установок 35 кВ.

$$R_3 \leq \frac{250}{J_3}$$

Сопротивление заземляющего устройства нейтрали трансформатора 0,4 кВ должно быть не более 4 Ом.

Заземляющее устройство выполняется общим, поэтому последнее требование является определяющим для расчета $R_3 \leq 4$ Ом.

Заземляющее устройство выполняем в виде контура из полосы 40х4 мм, проложенной на глубине 0,7 м вокруг оборудования подстанции, и стержнем длиной 5 м и диаметром 12 мм на расстоянии 5 м друг от друга. Общая длина полосы по плану 60 м, предварительное число стержней 12.

Сопротивление одного стержня:

$$r_6 = 0,27 \cdot \rho_{расч} = 0,27 \cdot 89,9 = 24,3 \text{ Ом};$$

здесь $\rho_{расч} = K_{сез} \cdot \rho = 1,45 \cdot 62 = 89,9$ Ом·м;

$K_{сез} = 1,45$ для второго климатического района.

Необходимое число вертикальных заземлений

$$n_6 = \frac{r_6}{R_a \cdot \eta_6},$$

где $\eta_b = 0,52$ для $\dot{a}/\ell = 1$.

Сопротивление заземляющей полосы

$$r_r = \frac{0,366 \cdot \rho_{расч}}{\ell} \lg \frac{2\ell^2}{\pi t} ;$$

где $\rho_{расч} = K_{сез} \cdot \rho$, $K_{сез} = 3,5$, $\pi = 40 \cdot 10^{-3}$ м, $t = 0,7$ м.

Сопротивление полосы в контуре из 12 электродов

$$R_r = \frac{r_r}{\eta_r}, \text{ где } \eta_r = 0,34.$$

Необходимое сопротивление вертикальных заземлений

$$R_n = \frac{R_r \cdot R_3}{R_r - R_3}.$$

Уточненное число стержней

$$n_d^1 = \frac{r_6}{R_6 \cdot \eta_6}$$

5. Расчет зануления

Пример 7. Рассчитать заземляющее устройство внутрицеховой подстанции (рис. 8) с одним трансформатором 630 кВ·А, напряжением 10 / 0,4 – 0,23 кВ. Сеть 10 кВ работает с изолированной нейтралью, ток замыкания на землю 25 А, на стороне 0,4 / 0,23 кВ нейтраль трансформатора глухозаземлена. Для оборудования цеха применяется зануление. Цеховая подстанция получает питание по двум кабелям АСБ, проложенным в земле, общей длиной 120 м. Грунт – суглинок, климатический район – второй.

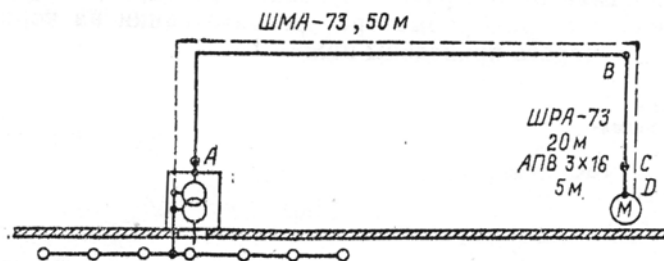


Рис. 8. Схема питания и заземляющего устройства цеховой подстанции

Решение. Выполняем общее заземляющее устройство для оборудования 10 и 0,4 кВ, тогда согласно требования ПУЭ

$$R_3 = \frac{125}{J_3} = \frac{125}{25} = 5 \text{ Ом.}$$

Сопротивление заземляющего устройства для нейтрали трансформатора с линейным напряжением 380 В должно быть не более 4 Ом. Расчетным является последнее условие.

В качестве естественного заземлителя используем свинцовую оболочку и броню кабелей 10 кВ, проложенных в земле. Сопротивление растекания тока с оболочки кабеля 2 Ом; с учетом коэффициента сезонности для второго климатического района и горизонтальных заземлителей $K_{сез} = 3,5$ имеем: $R_e = K_{сез} \cdot R = 3,5 \cdot 2 = 7 \text{ Ом}$, что больше требуемого $R_3 = 4 \text{ Ом}$, следовательно, необходимы искусственные заземлители общим сопротивлением

$$R_{иск} = \frac{R_e \cdot R_3}{R_e - R_3} = \frac{7 \cdot 4}{7 - 4} = 9,33 \text{ Ом.}$$

В качестве искусственного заземлителя применяем вертикальные заземлители – стержни длиной 5 м, диаметром 12 мм на расстоянии 5 м друг от друга и стальную полосу 25x4 мм на глубине 0,7 м, соединяющую стержни.

Сопротивление одного стержня

$$r_{\epsilon} = 0,27 \rho_{расч} = 0,27 \cdot K_{сез} \cdot \rho,$$

где $K_{сез} = 1,45$ для второго климатического района; $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ для суглинки. Принимая предварительно количество стержней 10, находим число стержней:

$$n_{\epsilon} = \frac{r_{\epsilon}}{R_{иск} \cdot \eta_{\epsilon}},$$

где $\eta_{\epsilon} = 0,59$.

Принимаем $n = 7$? Тогда уточненное значение $\eta_{\epsilon} = 0,64$; сопротивление вертикальных заземлителей

$$R_{\epsilon} = \frac{r_{\epsilon}}{n \cdot \eta_{\epsilon}} = \frac{39,15}{7 \cdot 0,64} = 8,73 \text{ Ом},$$

что меньше требуемого по расчету $R_{иск} = 9,33 \text{ Ом}$, поэтому сопротивление стальной полосы можно не учитывать, тем более, что оно велико (35,7 Ом).

Проверяем зануление, выполненное в цехе. Проверку проведем для удаленного электроприемника – электродвигателя 17 кВт, защищенного предохранителем с номинальным током плавного элемента 120 А. Определяем сопротивление фазных и нулевых проводов. Участок АВ (рис. 8) выполнен шинопроводом ШМА-73 длиной 50 м. Сопротивление петли фаза – нуль $r_{\Pi} = 0,072 \text{ Ом/км}$; $x_{\Pi} = 0,098 \text{ Ом/км}$;

$$R_{AB} = r_{\Pi} \cdot l = 0,072 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 0,0036 \text{ Ом};$$

$$X_{AB} = x_{\Pi} \cdot l = 0,098 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 0,0049 \text{ Ом}.$$

Участок ВС выполнен шинопроводом ШРА-73 длиной 20 м, сопротивление петли фаза – нуль $r_{\Pi} = 0,6 \text{ Ом/км}$; $x_{\Pi} = 0,35 \text{ Ом/км}$.

$$R_{BC} = 0,6 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,012 \text{ Ом}; X_{AB} = 0,35 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,007 \text{ Ом}.$$

Участок CD выполнен проводом АПВ в стальной трубе, сопротивление фазы алюминиевого провода длиной 5 м, сечением 15 мм^2 :

$$R_{\phi CD} = \frac{\rho \cdot \ell}{q} = \frac{0,0283 \cdot 5}{16} = 0,009 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление проводов в трубах мало и не учитывается. На участке CD нулевым защитным проводником

является стальная труба диаметром 32 мм, ее сопротивление при плотности тока $3 J_{\text{ном.вст}} / q = 3 \cdot 120 / 170,5 = 2,11 \text{ А/мм}^2$; $r_{\text{п}} = 1,4 \text{ Ом/км}$; $x_{\text{п}} = 0,84 \text{ Ом/км}$, тогда $R_{\text{пCD}} = 1,4 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,007 \text{ Ом}$; $X_{\text{пCD}} = 0,84 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,004 \text{ Ом}$.

Общее активное сопротивление петли фазных и нулевых проводников

$$R_{\text{п}} = R_{\text{AB}} + R_{\text{BC}} + R_{\text{ф,CD}} + R_{\text{н CD}}.$$

Общее индуктивное сопротивление тех же участков $X_{\text{п}} = 0,0049 + 0,0007 + 0,004 = 0,0159 \text{ Ом}$.

Полное сопротивление петли фаза-нуль

$$Z_{\text{п}} = \sqrt{R_{\text{п}}^2 + X_{\text{п}}^2}$$

Расчетное сопротивление трансформатора мощностью 630 кВ А при однофазном КЗ 0,043 Ом.

Ток однофазного КЗ:

$$J_k = \frac{U_{\phi}}{Z_{\text{п}} + Z_T} = \frac{220}{0,035 + 0,013} = 2820,5 \text{ А}.$$

Краткость тока КЗ по отношению к номинальному току плавного элемента предохранителя, защищающего электродвигатель:

$$k = \frac{J_k}{J_{\text{ном.вст}}}.$$

Если k больше требуемой кратности 3, тогда при однофазном КЗ произойдет надежное отключение.

6. Расчет релейной защиты

Пример 8. Рассчитать для линии 10 кВ максимально-токовую защиту и токовую отсечку, выполняемую с реле РТМ и РТВ, если заданы: максимальный расчетный ток линии 260 А, ток КЗ в начале линии 6000 А. Двигателя на линии нет.

Коэффициент трансформации трансформаторов тока $K_y = 300 / 5 = 60$.

Решение. Определяем ток срабатывания реле РТВ максимально-токовой защиты (защиты от перегрузки):

$$J_{сраб} = K_n K_{cx} K_A / (K_g \cdot K_y) = \frac{1,4 \cdot 1 \cdot 260}{0,86 \cdot 60} = 7,1 \text{ А}$$

Принимаем ток реле 8 А.

Определяем коэффициент чувствительности защиты от перегрузки:

$$K_r = J_{K \min} / (J_{сраб} \cdot K_y) \geq 1,2 \div 1,5$$

$$\hat{E}_r = \frac{1000}{60 \cdot 8,0} = 2,1,$$

что больше допустимого $K_r = 1,5$.

Определяем коэффициент срабатывания реле токовой отсечки (РТМ):

$$J_{с.раб.т.о} = K_{cx} J_{K3 \max} / K_y = \frac{2 \cdot 1,73 \cdot 1000}{60} = 57,5 \text{ А.}$$

Принимаем $J_{с.раб.т.о} = 60 \text{ А}$.

Определяем коэффициент чувствительности токовой отсечки:

$$K_{r_2} = J_{K \min} / (J_{сраб} \cdot K_y) = \frac{6000}{60 \cdot 60} = 1,67,$$

что удовлетворяет допускаемому значению чувствительности.

7. Защита силовых трансформаторов, линии и электродвигателей

Пример 9. Рассчитать ДТЗ двух обмоточного силового трансформатора мощностью 16 кВ·А напряжением 115/11 кВ, имеющего РПН с пределами $\pm 16\%$ в нейтрали ВН. Максимальный ток трех фазного КЗ на шинах 10 кВ $J_{K\max} = 840$ А. Минимальный ток аномального режима $J_{K\min} = 820$ А.

Решение. Определяем токи силового трансформатора на стороне ВН и НН

$$J_{110} = 16000 / (\sqrt{3} \cdot 115) = 80,3 \text{ А};$$

$$J_{10} = 16000 / (\sqrt{3} \cdot 11) = 840 \text{ А}.$$

Принимаем коэффициенты трансформации трансформаторов тока

$$K_y = 150/5 = 30; \quad K_{y10} = 1000/5 = 200.$$

Определяем вторичный ток в плечах ОТЗ, соответствующий номинальной мощности трансформатора по формуле

$$J_2 = J_1 K_{cx} / K_1 :$$

$$J_{2ВН} = 80,3 \sqrt{3} / 30 = 4,6 \text{ А}$$

$$J_{1НН} = 840 \cdot 1 / 200 = 4,2 \text{ А}.$$

Определяем ток небаланса по формуле

$$J_{нб.расч} = K_a K_{одн} + J_{K\max} :$$

$$J_{нб.расч} = (1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,1 + 0,16) \cdot 840 = 218,4 \text{ А}.$$

Определяем ток срабатывания реле КА1-КА3 по условно отстройки от тока небаланса с коэффициентом надежности $K_n =$

1,3 по формуле $J_{сраб.р} = K_{зан} \cdot K_n \cdot K_{cx} \cdot J_n / (K_n \cdot K_y)$ и без учета K_B :

$$J_{сраб.р} = 1,3\sqrt{3} \cdot 218,4 / 30 = 16,4 \text{ А.}$$

Определяем число витков основной обмотки БНТ по формуле $\omega_1 = 100 / J_{сраб.р} = 100 / 16,4 = 6,1 \approx 6$

Предварительно принимаем число витков первой уравнивающей обмотки $\omega_{ур1} = 6$ витков. На вторичной стороне число витков определяется по формуле

$$\omega_2 = \omega_1 J_1 / J_2 = \omega_{раб} + \omega_{ур2}$$

$$\omega_{2 расч} = 6 \cdot 4,6 / 4,2 = 6,6.$$

Принимаем предварительно $\omega_2 = \omega_{ур2} = 7$ витков.

Уточненный ток небаланса

$$J'_{нб. расч} = (\omega_{1 расч} - \omega_1) J_{K \max} / \omega_{1 расч} = (6,1 - 6) \cdot 840 / 6,1 = 13,8 \text{ А,}$$

тогда суммарный ток небаланса:

$$J_{нб} = 218,4 + 13,8 = 232,2 \text{ А.}$$

Уточняем ток срабатывания реле:

$$J_{сраб.р} = 1,3\sqrt{3} 232,2 / 30 = 17,6 \text{ А.}$$

Принимаем $J_{сраб.р} = 18 \text{ А.}$ Определяем коэффициент чувствительности:

$$K_{\eta} = 820 / (18 \cdot 30) = 1,51 > 1,5,$$

что удовлетворяет требованиям чувствительности.

8. Защита от молнии

На изоляцию электроустановок действует также перенапряжения от грозовых разрядов, которые являются внешними перенапряжениями. В облаках накапливаются мощные заряды в результате восходящих воздушных потоков и интенсивной конденсации в них водяных паров. Нижняя часть грозового облака оказывается заряженной отрицательно, а верхняя – положительно. По мере конденсации зарядов увеличивается напряженность электрического поля, и когда она достигает критического значения (20-25 кВ/см) в зависимости от высоты облака над землей, происходит грозовой разряд.

Молния может разрядиться через сопротивление электроустановок или ударить вблизи защищаемого объекта. В этом случае возникает индуцированное перенапряжение, от которого также должна быть предусмотрена защита.

Пример 10. Рассчитать защитную зону двойного стержневого молниеотвода высотой $h = 10$ м при расстоянии между молниеотводами $a = 8$ м. Защищаемое сооружение имеет высоту $h_x = 8$ м и $c_d = 7 \times 2$ м. Взаимное расположение сооружения и молниеотводов приведено на рис. 9.

Решение. Определим активную высоту молниеотвода:

$$h_a = h - h_x = 10 - 8 = 2 \text{ м}$$

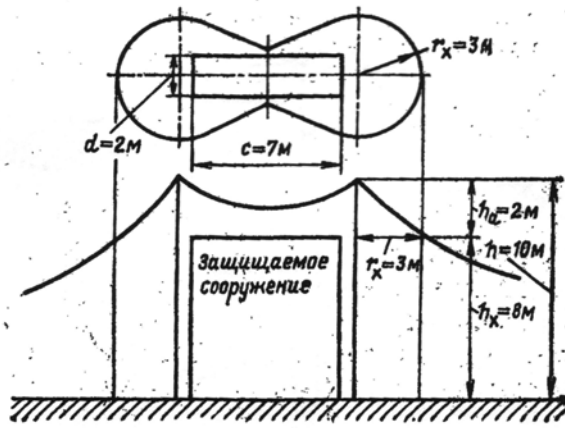


Рис. 9. Защитная зона двух стержневых молниеотводов

Коэффициент $K_p = \frac{5,5}{\sqrt{h}} = \frac{5,5}{\sqrt{10}} = 1,7$

Определим расстояние r_x , при котором защищаемый объект окажется внутри зоны защиты по формуле:

$$r_x = 1,6h_a K_p \left(1 + \frac{h_x}{h} \right),$$

где $K_p = \frac{5,5}{\sqrt{h}}$.

$$r_x = \frac{1,6 \cdot 2 \cdot 1,7}{\left(1 + \frac{8}{10} \right)} = 3 \text{ м.}$$

Определяем: $a / h_a = 8/2 = 4$; $h_x / h = 8/10 = 0,8$

По кривым рис. 10 находим: $\phi_x / 2h_a = 0,6$. откуда $\phi_x = 0,6 \cdot 2 \cdot 2 = 2,4 \text{ м.}$

Перенесем найденные значения на рис. 10

Следовательно, защищаемый объект находится внутри зоны защиты.

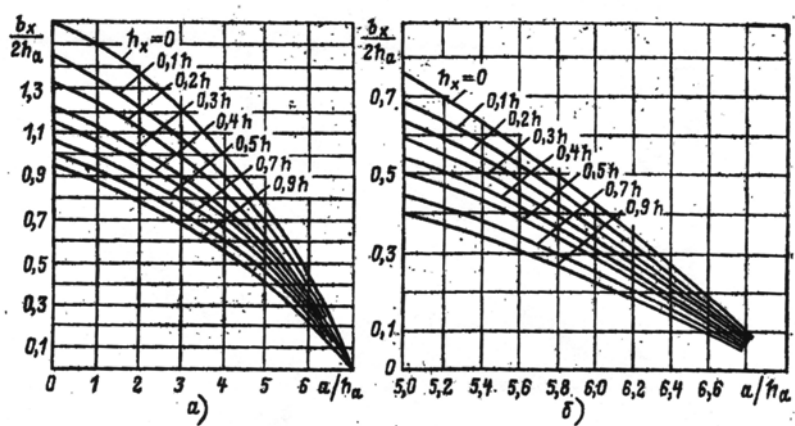


Рис. 10. Значения наименьшей ширины зоны защиты b_x двух стержневых молниеотводов

Библиографический список

1. Конюхова, Е.А. Электроснабжение объектов : учебное пособие для студентов учреждений сред. проф. образования / Е.А. Конюхова. – М. : Высшая школа, 2001, - 320 с.
2. ГОСТ 12.1.019-79 (2001). ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
3. ГОСТ 12.1.038-82 (2001). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

Учебное издание

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ**

Корректор Габдурахимова Т.М.
Худ. редактор Федорова Л.Г.

Сдано в набор 21.12.2010.
Подписано в печать 28.02.2011.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,75. Тираж 100.
Заказ №11.

НХТИ (филиал) ГОУ ВПО «КГТУ», г. Нижнекамск, 423570,
ул. 30 лет Победы, д. 5а.