

В. С. Пастухов

# РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания



**В. С. Пастухов**

**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И  
АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

Владивосток  
ДВГТУ  
2008

## **1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

1. Расчет релейной защиты заключается в выборе рабочих параметров срабатывания (уставок) как отдельных реле, так и комплексных устройств релейной защиты при соблюдении требований селективности, чувствительности.

2. На каждом участке в общем случае должна устанавливаться основная и резервная защиты. При использовании защит со ступенчатыми характеристиками, их первые ступени выполняют функции основной. Резервной является только последняя ступень.

3. Расчет защит проводится начиная с наиболее удаленного от источника питания участка.

4. Устройства релейной защиты должны обеспечивать минимально-возможное время отключения короткого замыкания (КЗ) в целях сохранения бесперебойной работы неповрежденной части системы и ограничения степени повреждения элемента системы.

5. По возможности рекомендуется применять защиты с использованием реле прямого действия и защиты на переменном оперативном токе, так как это приводит к удешевлению устройств.

## **2. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

### **2.1. Общие положения**

Расчет токов КЗ выполняется в соответствии с [3] в объеме, необходимом для выбора принципов и основных параметров защиты.

1. В целях упрощения расчетов допустимо определять значения всех величин для начального момента КЗ.

2. Расчеты выполняются без учета переходных сопротивлений в месте короткого замыкания.

3. Для расчета параметров срабатывания защит должны быть рассчитаны, как правило, максимальные токи КЗ, а для оценки чувствительности - минимальные.

### **2.2. Расчет токов короткого замыкания для выбора параметров защит элементов электрических сети**

#### **2.2.1. Определение токов КЗ при питании от системы бесконечной мощности.**

Сопротивление системы бесконечной мощности принимаем равным нулю. Определяем ток короткого замыкания  $I_k$ :

$$I_k = U_c / (\sqrt{3} \cdot X_\Sigma), \quad (2.1)$$

где  $U_c$  - междуфазное напряжение на шинах системы;  $X_\Sigma$  - результирующее сопротивление до точки КЗ.

#### **2.2.2. Определение токов КЗ при питании от системы ограниченной мощности.**

Если сопротивление системы, питающей точку короткого замыкания, сравнительно велико, его необходимо учитывать при определении тока КЗ. В этом случае в схему замещения вводят сопротивление системы и принимают, что за ним находятся шины неизменного напряжения.

Ток КЗ определяется по (3.1) только  $X_\Sigma$  рассчитывается с учетом сопротивления системы  $X_{сист.}$ , т.е.

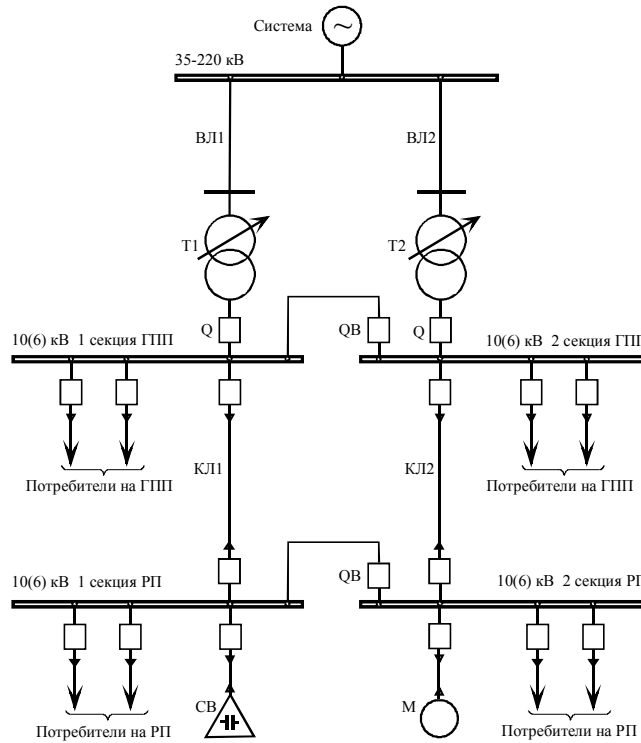


Рис. 2.1 Схема первичных соединений системы электроснабжения

$$X_{\Sigma} = X_{сист.} + X_{вн}, \quad (2.2)$$

где  $X_{вн}$  - сопротивление цепи от системы до точки КЗ.

Система может быть задана током трехфазного КЗ ( $I_{к.зад.}$ ) на ее шинах, тогда сопротивление системы определяется по выражению:

$$X_{сист.} = U_c / (\sqrt{3} \cdot I_{к.зад.}). \quad (2.3)$$

Система может быть задана мощностью короткого замыкания ( $S_k$ ). В этом случае сопротивление системы определяется по выражению:

$$X_{сист.} = U_c^2 / S_k, \quad (2.4)$$

где  $S_k = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_{к.зад.}$ .

### 2.2.3. Определение сопротивлений трансформаторов с большим диапазоном регулирования напряжения (РПН).

На трансформаторах напряжением 35кВ и выше устанавливаются автоматические регуляторы напряжения, которые предназначены для поддержания требуемого уровня напряжения на шинах низшего напряжения (НН) при эксплуатационных изменениях напряжения на стороне высшего напряжения (ВН).

При регулировании напряжения изменяется сопротивление рассеяния трансформатора  $X_{тр}$ . В общем случае при уменьшении коэффициента трансформации ( $-\Delta U_{РПН}$ ) сопротивление  $X_{тр}$  уменьшается по сравнению со средним его значением, а при увеличении коэффициента трансформации ( $+\Delta U_{РПН}$ ) - увеличивается. При этом изменяются значения напряжений КЗ  $U_{к\%}$  по сравнению с  $U_{к.ср\%}$ , соответствующим среднему положению РПН. Крайнему “минусо-

вому” ответвлению регулируемой обмотки соответствует  $U_{к.мин\%}$ , а крайнему “плюсовому” ответвлению -  $U_{к.макс\%}$ .

Определяем сопротивления трансформатора с РПН, приведенные к регулируемой стороне ВН:

$$X_{тр.ср} = U_{к.ср\%} \cdot U_{ср.вн}^2 / (100 \cdot S_{н.тр}) ; \quad (2.5)$$

$$X_{тр.мин} = U_{к.мин\%} \cdot U_{мин.вн}^2 / (100 \cdot S_{н.тр}) ; \quad (2.6)$$

$$X_{тр.макс} = U_{к.макс\%} \cdot U_{макс.вн}^2 / (100 \cdot S_{н.тр}) , \quad (2.7)$$

а  $U_{мин.вн}$  и  $U_{макс.вн}$  определяем по выражениям:

$$U_{мин.вн} = U_{ср.вн} \cdot (1 - \Delta U_{*РПН}) ; \quad (2.8)$$

$$U_{макс.вн} = U_{ср.вн} \cdot (1 + \Delta U_{*РПН}) , \quad (2.9)$$

где  $U_{ср.вн}$  -среднее напряжение на стороне ВН, кВ;  $S_{н.тр}$  - номинальная мощность трансформатора, МВА;  $\Delta U_{*РПН}$  половина полного диапазона регулирования на стороне ВН трансформатора, о.е. Сопротивление трансформатора получаем в Ом.

Если напряжение  $U_{макс.вн}$ , рассчитанное по формуле (2.9), оказывается больше наибольшего значения, указанного в табл.2.1, то  $U_{макс.вн}$  следует принять по таблице.

**Т а б л и ц а 2.1. Номинальные, наибольшие и средние междупазные напряжения электрических распределительных сетей**

$U_{ном.}, \text{ кВ}$	$U_{макс.}, \text{ кВ}$	$U_{ср.}, \text{ кВ}$
6	6,9	6,3
10	11,5	10,5
35	40,5	37,0
110	125,0	116,0
150	172,0	154,0
220	252,0	230,0

При отсутствии паспортных данных по  $U_{к.макс\%}$  и  $U_{к.мин\%}$  их можно принять по табл.2.2.

**Т а б л и ц а 2.2. Напряжения короткого замыкания трансформаторов при крайних положениях РПН**

$\Delta U_{РПН\%}$	$U_{к.макс\%}$	$U_{к.мин\%}$
$\pm 16$	+15	-9
$\pm 12$	+12	-9
$\pm 9$	+10	-7

Вычисление максимально возможного тока короткого замыкания  $I_{к.макс}^{(3)}$  следует производить при наименьшем сопротивлении питающей системы  $X_{сист.мин}$  в максимальном ее режиме ( $S_{к.макс}$  или  $I_{к.зад.макс}$ ) и сопротивлении  $X_{тр.мин}$ , вычисленном по (2.6). В практических

расчетах для выбора уставок релейной защиты понижающих трансформаторов с РПН  $I_{к.макс}^{(3)}$  можно определять по выражению:

$$I_{к.макс.вн}^{(3)} = U_{ном.вн} / (\sqrt{3} \cdot (X_{сист.мин} + X_{вл} + X_{тр.мин})), \quad (2.10)$$

где  $I_{к.макс.вн}^{(3)}$  - максимальный ток трехфазного КЗ при коротком замыкании на шинах НН трансформатора, приведенный к ВН.  $U_{ном.вн}$  - номинальное междуфазное напряжение сети ВН (табл.2.1).

Приведение  $I_{к.макс}^{(3)}$  к нерегулируемой стороне НН осуществляется не по среднему коэффициенту трансформации, а по минимальному, соответствующему тому же крайнему положению РПН, при котором вычисляется этот ток:

$$I_{к.макс.нн}^{(3)} = I_{к.макс.вн}^{(3)} \cdot U_{мин.вн} / U_{ном.нн}, \quad (2.11)$$

где  $I_{к.макс.нн}^{(3)}$  - максимальный ток трехфазного КЗ при коротком замыкании на шинах НН трансформатора, приведенный к НН.

Минимальный ток короткого замыкания  $I_{к.мин}^{(3)}$  следует вычислять при наибольшем сопротивлении системы  $X_{сист.макс}$  в минимальном ее режиме и наибольшем сопротивлении трансформатора, вычисленном по (2.7).

$$I_{к.мин.вн}^{(3)} = U_{ном.вн} / (\sqrt{3} \cdot (X_{сист.макс} + X_{вл} + X_{тр.макс})), \quad (2.12)$$

где  $I_{к.мин.вн}^{(3)}$  - минимальный ток трехфазного КЗ при коротком замыкании на шинах НН трансформатора, приведенный к ВН.

Приведение  $I_{к.мин.вн}^{(3)}$  к нерегулируемой стороне НН следует осуществлять с помощью коэффициента трансформации, при котором вычисляется этот ток:

$$I_{к.мин.нн}^{(3)} = I_{к.мин.вн}^{(3)} \cdot U_{макс.вн} / U_{ном.нн}, \quad (2.13)$$

где  $I_{к.мин.нн}^{(3)}$  - минимальный ток трехфазного КЗ при коротком замыкании на шинах НН трансформатора, приведенный к НН.  $U_{макс.вн}$  - максимальное напряжение на ВН, рассчитанное по формуле (3.9), но не более, чем в табл.2.1.

Минимальный ток двухфазного КЗ  $I_{к.мин.}^{(2)}$  упрощенно вычисляется по формуле:

$$I_{к.мин.}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot I_{к.мин.}^{(3)} / 2. \quad (2.14)$$

### 3. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

#### 3.1. Общие положения по проектированию релейной защиты воздушных и кабельных линий в сетях напряжением 6-10кВ

Для линий 6-10кВ с изолированной нейтралью (в том числе и с нейтралью, заземленной через реактор) должны быть предусмотрены устройства релейной защиты от многофазных КЗ и от замыканий на землю.

Защиту от многофазных КЗ следует предусматривать в двухфазном исполнении и включать в одни и те же фазы по всей сети данного напряжения для обеспечения отключения с большей вероятностью только одного места повреждения при двойных замыканиях на землю и исключения несрабатывания защиты при двойных замыканиях в фазах, где не установлены трансформаторы тока.

На одиночных линиях с односторонним питанием от мнргофазных КЗ должна устанавливаться, как правило, двухступенчатая токовая защита, первая ступень которой выполнена в виде токовой отсечки ТО, а вторая - в виде максимальной токовой защиты МТЗ.

Защита от однофазных замыканий на землю должна быть выполнена в виде:

селективной (устанавливающей поврежденное направление), действующей на сигнал;

селективной (устанавливающей поврежденное направление), действующей на отключение, когда это необходимо по требованиям безопасности.

Защита должна быть установлена на всех линиях электрически связанной сети со стороны питания.

### 3.2. Расчет максимальной токовой защиты и токовой отсечки

Для защит линий, имеющих выключатели с пружинными или пружинно-грузовыми приводами, максимальную токовую защиту и токовую отсечку можно выполнить на встроенных в привод выключателя реле прямого действия типа РТВ, имеющего ограниченно зависимую характеристику выдержки времени, и реле типа РТМ мгновенного действия. Часто применяются также реле типа РТ-85 (95) с использованием схемы с дешунтированием катушки отключения. В качестве катушек отключения в этом случае используются встроенные в привод выключателя реле прямого действия РТМ. Если защиты, выполненные на указанных реле, не удовлетворяют требованиям чувствительности и быстродействия можно применять другие схемы и реле.

При наличии выключателей с электромагнитными приводами защита обычно выполняется на выпрямленном оперативном токе с использованием реле тока типа РТ-80 (МТЗ на индукционном элементе, ТО на электромагнитном элементе) или реле тока типа РТ-40 и реле времени с независимой характеристикой выдержки времени.

Ток срабатывания МТЗ  $I_{сз}$  определяется по выражению:

$$I_{сз} = I_{раб.макс} \cdot K_{отс} \cdot K_3 / K_в, \quad (3.1)$$

где  $I_{раб.макс}$  - максимальный рабочий ток линии;  $K_{отс}$  - коэффициент отстройки;  $K_3$  - коэффициент самозапуска;  $K_в$  - коэффициент возврата.

$K_в$  определяется типом применяемых реле.

$K_{отс}$  принимается равным 1,1-1,2 при использовании реле РТ-40 и РТ-80, и 1,2-1,4 при использовании реле РТВ.

Коэффициент  $K_3$  для линий, питающих промышленную нагрузку или аналогичную ей (сельскохозяйственные комплексы на промышленной основе), можно определить по формуле:

$$K_3 = 1 / (I_{раб.макс} / I_{к}^{(3)} + 0,4), \quad (3.2)$$

где  $I_{к}^{(3)}$  - ток трехфазного короткого замыкания в точке сети, к которой подключена нагрузка с большим количеством двигателей.

При раздельной работе двух линий (КЛ1 и КЛ2) с устройством АВР на секционном выключателе и действии АВР (АВР РП) после отключения одной из них (например КЛ2) бездействие МТЗ оставшейся в работе линии (КЛ1) будет обеспечено выбором тока срабатывания защиты:

$$I_{сз.л1} = K_{отс} \cdot (K_3 \cdot I_{раб.макс.л2} + K_{отс}^{\wedge} \cdot I_{раб.макс.л1}) / K_в, \quad (3.3)$$

где  $K_{отс}^{\wedge} = 1,5-1,6$  - коэффициент, учитывающий увеличение тока по линии Л1 из-за понижения напряжения при подключении к ней затормозившихся двигателей, ранее питавшихся от Л2.

За расчетный принимается наибольший ток срабатывания защиты, полученный по выражениям (3.1) и (3.3).

Для МТЗ, выполненных на переменном оперативном токе по схеме с дешунтированием электромагнитов отключения (ЭО) необходимо, чтобы ток срабатывания реле  $I_{ср}$  был больше, чем ток срабатывания ЭО. Возможность применения схемы с дешунтированием ЭО проверяется по трем условиям.

1. Согласование основных реле токовых защит (РТ-85) с ЭО:

$$I_{сз} \geq (K_{отс} \cdot I_{с.ЭО} + I_{нам}) \cdot K_I, \quad (3.4)$$

где  $K_{отс} = 1,2-1,4$ ;  $I_{с.ЭО}$  - ток срабатывания ЭО, равный 5 А (РТМ) или 3,5 А (ЭО<sub>ТА</sub>);  $I_{нам}$  - ток намагничивания трансформатора тока (ТА), равный 0,6 А;  $K_I$  - коэффициент трансформации ТА.

2. Обеспечение надежной работы дешунтирующих контактов РТ-85:

$$I_{к.макс}^{(3)} \cdot K_{сх}^{(3)} / K_I \leq I_{доп} = 150 \text{ А}, \quad (3.5)$$

где  $I_{к.макс}^{(3)}$  - максимальный ток КЗ в месте установки МТЗ;  $K_{сх}^{(3)}$  - коэффициент схемы в режиме трехфазного КЗ.

3. Отсутствие возврата контактов реле РТ-85, РП-341 после дешунтирования ЭО:

$$(I_{ср} - I_{нам}) \geq K_{отс} \cdot K_{в} \cdot I_{ср}, \quad (3.6)$$

где  $I_{ср}$  - ток срабатывания дешунтирующего реле;  $K_{отс} = 1,25$ ;  $K_{в} = (0,3-0,4)$  для электромагнитного элемента РТ-85;  $K_{в} = 0,4$  для реле РП-341.

Время срабатывания МТЗ выбирается из условий селективности защиты и термической стойкости защищаемого элемента. Время срабатывания последующей защиты (расположенной ближе к источнику питания):

$$t_{сз посл.} = t_{сз пред.} + \Delta t, \quad (3.7)$$

где  $t_{сз пред.}$  - время срабатывания предыдущей защиты;  $\Delta t$  - ступень селективности принимается равной (0,4-0,6)с для защит с независимой характеристикой выдержки времени и (0,6-0,7)с для защит с ограниченно зависимой характеристикой.

Коэффициент чувствительности защиты:

$$K_{ч} = I_{к.мин}^{(2)} / I_{сз}, \quad (3.8)$$

где  $I_{к.мин}^{(2)}$  - ток двухфазного КЗ в конце защищаемого участка сети в минимальном режиме;  $K_{ч}$  должен быть не менее 1,5.

Ток срабатывания токовой отсечки выбирается по условию отстройки от максимального тока трехфазного КЗ в конце линии:

$$I_{сз} = K_{отс} I_{к.макс}^{(3)}. \quad (3.9)$$

Рекомендуемые значения коэффициента отстройки для ТО без выдержки времени приведены в табл.3.1.



Т а б л и ц а 3.1. Коэффициенты отстройки  $K_{отс}$  для токовых отсечек

Тип реле	$K_{отс}$ линий	$K_{отс}$ трансформаторов
РТ-40	1,2-1,3	1,3-1,4
РТ-80	1,5-1,6	1,6
РТМ	1,4-1,5	1,6

Для токовых отсечек без выдержек времени, устанавливаемых на линиях и выполняющих функции дополнительных защит, коэффициент чувствительности должен быть около 1,2 при КЗ в месте установки отсечки в наиболее благоприятном по условию чувствительности режиме.

## 4. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

### 4.1. Общие положения по проектированию защит асинхронных и синхронных электродвигателей напряжением выше 1кВ

На электродвигателях должны предусматриваться защиты от многофазных КЗ и в случаях, оговоренных далее, защита от однофазных замыканий на землю, защита от токов перегрузки и защита минимального напряжения. На синхронных электродвигателях, кроме этого, должна предусматриваться защита от асинхронного режима, которая может быть совмещена с защитой от перегрузки.

Для защиты электродвигателей от многофазных КЗ должна предусматриваться:

1) токовая однорелейная отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, с реле прямого или косвенного действия, включенного на разность токов двух фаз - для электродвигателей мощностью менее 2 МВт;

2) токовая двухрелейная отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, с реле прямого или косвенного действия - для электродвигателей мощностью 2 МВт и более, имеющих действующую на отключение защиту от однофазных замыканий на землю, а также для электродвигателей мощностью менее 2 МВт, когда защита по п.1 не удовлетворяет требованиям чувствительности или когда двухрелейная отсечка оказывается целесообразной по исполнению комплектной защиты или применяемого привода с реле прямого действия.

При отсутствии защиты от замыканий на землю токовая отсечка электродвигателей мощностью 2 МВт и более должна выполняться трехрелейной с тремя трансформаторами тока.

3) продольная дифференциальная токовая защита - для электродвигателей мощностью 5 МВт и более, а также и на двигателях мощностью менее 5 МВт, если токовая отсечка не обеспечивает заданной чувствительности; продольная дифзащита двигателя при наличии на них защиты от замыканий на землю должна иметь двухфазное исполнение, а при отсутствии этой защиты - трехфазное.

Защита от однофазных замыканий на землю для электродвигателей мощностью до 2 МВт должна предусматриваться при токах замыкания на землю 10 А и более, а для электродвигателей мощностью 2 МВт и более - при токах 5 А и более.

Ток срабатывания защиты электродвигателя от замыкания на землю должен быть не более:

для электродвигателей мощностью до 2 МВт - 10 А;

для электродвигателей мощностью более 2 МВт - 5 А.

Защиту следует выполнять без выдержки времени с использованием трансформаторов тока нулевой последовательности, установленных, как правило, в РУ.

Защита должна действовать на отключение двигателя, а у синхронных двигателей - также на устройство АГП, если оно предусмотрено.

Защита от перегрузки должна предусматриваться на электродвигателях, подверженным технологическим перегрузкам, и на электродвигателях с особо тяжелыми условиями пуска и самозапуска (длительность прямого пуска непосредственно от сети 20 с и более), перегрузка которых возможна при чрезмерном увеличении пускового периода вследствие понижения напряжения в сети.

Защиту от перегрузки следует устанавливать в одной фазе с зависимой или независимой от тока выдержкой времени, отстроенной от длительности пуска электродвигателей в нормальных условиях и условиях самозапуска после действия АВР и АПВ.

На электродвигателях, подверженным технологическим перегрузкам, защита, как правило, должна выполняться с действием на сигнал и автоматическую разгрузку механизма.

Действие защиты на отключение электродвигателя допускается:

на электродвигателях механизмов, для которых отсутствует возможность своевременной разгрузки без останова, или на электродвигателях, работающих без постоянного обслуживающего персонала;

на электродвигателях с тяжелыми условиями пуска и самозапуска.

Защита синхронных двигателей от асинхронного режима может осуществляться с помощью реле, реагирующего на увеличение тока в обмотке статора; она должна быть отстроена по времени от пускового режима и тока при действии форсировки возбуждения.

Защита, как правило, должна выполняться с независимой от тока характеристикой выдержки времени. Допускается применение защиты с зависимой от тока характеристикой выдержки времени на электродвигателях с ОКЗ более 1, а также и других способов защиты, обеспечивающих надежное действие защиты при возникновении асинхронного режима.

Для облегчения условий восстановления напряжения после отключения КЗ и обеспечения самозапуска электродвигателей ответственных механизмов следует предусматривать отключение защитой минимального напряжения электродвигателей неответственных механизмов суммарной мощностью, определяемой возможностями источника питания и сети по обеспечению самозапуска.

Выдержка времени защиты минимального напряжения должна выбираться в пределах 0,5-1,5 с - на ступень больше времени действия быстродействующих токовых защит от многофазных КЗ, а уставки по напряжению должны быть, как правило, не выше 70% номинального напряжения.

## **4.2. Выбор уставок срабатывания защит электродвигателей**

### **4.2.1. Расчет токовой отсечки.**

Первичный ток срабатывания отсечки отстраивается от пускового тока электродвигателя по выражению:

$$I_{сз} = K_{отс} \cdot K_n \cdot I_{д.н} , \quad (4.1)$$

где  $K_{отс}$  - коэффициент отстройки, учитывающий помимо апериодических составляющих в токе реле при переходных режимах еще и погрешности реле и необходимый запас, его значения для токовых отсечек на реле РТ-40 принимаются 1.4-1.5 для асинхронных двигателей и 1.7-1.8 для синхронных двигателей. Если токовая отсечка реализована на реле РТ-80 или РТМ, то  $K_{отс} = 2$ ;

$K_n$  - кратность пускового тока;

$I_{д.н}$  - номинальный ток двигателя.

Ток срабатывания реле  $I_{ср}$  :

$$I_{ср} = K^{(3)}_{сх} \cdot I_{сз} / K_I, \quad (4.2)$$

где  $K^{(3)}_{сх}$  - коэффициент схемы в режиме трехфазного КЗ, при включении реле на фазные токи равен 1, а при включении реле на разность токов равен  $\sqrt{3}$ .

Чувствительность отсечки определяется по выражению:

$$K_{\chi} = I^{(2)}_{2 \text{ к. мин}} / I_{ср}, \quad (4.3)$$

где  $I^{(2)}_{2 \text{ к. мин}}$  - вторичный ток двухфазного КЗ на выводах двигателя при минимальном режиме питающей системы.

Коэффициент чувствительности отсечки однорелейной схемы определяется при двухфазном КЗ между фазами в одной из которых нет трансформатора тока. В этом случае ток в реле в два раза меньше, чем при КЗ между фазами с трансформаторами токов. В двухрелейной схеме токи в реле одинаковы при двухфазных КЗ между любыми фазами. Значение  $K_{\chi}$  должно быть не менее двух.

#### 4.2.2. Расчет дифференциальной токовой защиты.

Первичный ток срабатывания дифзащиты с применением реле типа РНТ-565:

$$I_{сз} = K_{отс} \cdot I_{*нб} \cdot K_n \cdot I_{д.н}, \quad (4.4)$$

где  $K_{отс} = 1,1$ ;

$I_{*нб}$  - ток небаланса в о.е., для схемы неполная звезда - неполная звезда

$I_{*нб} = 0,37$ ; для схемы звезда - звезда  $I_{*нб} = 0,3$ .

Число витков рабочей обмотки реле:

$$\omega_{р.расч} = F_{ср} / I_{ср} = 100 / I_{ср}, \quad (4.5)$$

где  $F_{ср} = 100$  А - МДС срабатывания реле типа РНТ-565.

Для установки на коммутаторе реле выбирается целое число витков  $\omega_p$ , ближайшее меньшее к  $\omega_{р.расч}$ .

Проверка чувствительности дифзащиты производится при тех же условиях, что и токовой отсечки, когда при двухфазном КЗ на линейных выводах обмотки статора в реле протекает наименьший ток.

$$K_{\chi} = I^{(2)}_{2 \text{ к. мин}} \cdot \omega_p / 100 \geq 2.. \quad (4.6)$$

#### 4.2.3. Расчет защиты от замыканий на землю обмотки статора

Защита от замыканий на землю электродвигателей напряжением 6-10 кВ, работающих в сети с изолированной нейтралью, выполняется с помощью одного реле типа РТЗ-51, подключенного к трансформатору тока нулевой последовательности (ТНП) типа ТЗ, ТЗЛ, ТЗР. В случае, когда питание двигателя осуществляется по двум параллельным кабелям, вторичные обмотки ТНП каждого кабеля соединяют последовательно и подключают к одному реле.

Ток срабатывания защиты выбирают из условия несрабатывания защиты при внешнем однофазном замыкании на землю:

$$I_{cз} = K_{омс} \cdot K_{б} \cdot I_c, \quad (4.7)$$

где  $K_{омс} = 1,2-1,3$  - коэффициент отстройки;  $K_{б} = 2-2,5$  - коэффициент, учитывающий бросок собственного емкостного тока в момент зажигания дуги;

$I_c$  - установившееся значение собственного емкостного тока защищаемого присоединения.

Значение  $I_c$  определяется как сумма емкостных токов двигателя  $I_{сд}$  и линии  $I_{сл}$  от места установки ТНП до линейных выводов двигателя:

$$I_c = I_{сд} + I_{сл}. \quad (4.8)$$

Собственный емкостной ток электродвигателя:

$$I_{сд} = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot 3 \cdot C_{\phi} \cdot U_n / \sqrt{3}. \quad (4.9)$$

Значение  $I_{сд}$  по (5.9) получают в амперах, если номинальная частота сети  $f_n$  выражена в герцах, емкость фазы статора  $C_{\phi}$  - в фарадах, а номинальное напряжение двигателя  $U_n$  - в вольтах.

При отсутствии сведений завода изготовителя для практических расчетов емкость фазы статора можно определять:

для неявнополюсных синхронных двигателей и асинхронных с короткозамкнутым ротором:

$$C_{\phi} = (0,0187 \cdot S_n \cdot 10^{-6}) / (1,2 \cdot \sqrt{U_n \cdot (1 + 0,08 U_n)}), \quad (4.10)$$

где  $S_n$  - номинальная полная мощность двигателя, МВА;

$U_n$  - номинальное напряжение, кВ;

для остальных электродвигателей:

$$C_{\phi} = 40 \cdot S_n^{3/4} \cdot 10^{-6} / (3000 \cdot (U_n + 3,6) \cdot n_n^{1/3}), \quad (4.11)$$

где  $n_n$  - номинальная скорость вращения ротора, об/мин.

Емкостной ток кабельной линии  $I_{сл}$  можно рассчитать, А:

$$I_{сл} = I_{с0} \cdot L \cdot m, \quad (4.12)$$

где  $I_{с0}$  - удельный емкостной ток однофазного замыкания на землю (табл.4.2), А/км;  $L$  - длина линии, км;  $m$  - число кабелей в линии.

Если  $I_{сз}$ , вычисленное по формуле (4.7), окажется меньше минимального значения, указанного в табл.4.1, то  $I_{сз}$  следует принять по таблице.

**Т а б л и ц а 4.1. Минимальные и максимальные токи срабатывания защиты от замыканий на землю**

Кол-во Тип ТНП	1	2
ТЗЛ	0,68-3,96	1,25-6,8
ТЗЛМ	0,6-3,26	1,06-6,35
ТЗР	0,9-3,8	1,26-6,2
ТЗРЛ	0,81-4,17	1,34-7,9

**Т а б л и ц а 4.2. Удельные емкостные токи однофазного замыкания на землю кабелей 6-10 кВ, А/км**

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	6 кВ	10 кВ	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	6 кВ	10 кВ
10	0,33	-	95	0,82	1,0
16	0,37	0,52	120	0,89	1,1
25	0,46	0,62	150	1,1	1,3
35	0,52	0,69	185	1,2	1,4
50	0,59	0,77	240	1,3	1,6
70	0,71	0,9			

При определении окончательной уставки реле, подключенного к ТНП в КРУ, необходимо помнить, что ток срабатывания защиты должен быть не только с определенным запасом меньше опасного для электродвигателей тока (10 А - мощностью до 2 МВт и 5 А - мощностью 2 МВт и более), но и обеспечивать чувствительность защиты линии, питающей двигатель. Эти требования в сети без компенсации емкостного тока замыкания на землю выполняются при условиях:

$$K_u = (I_{c\Sigma} - I_c) / I_{c3} \geq 2 \quad (4.13)$$

Если условия (4.13) не выполняются из-за большого собственного емкостного тока линии, то ТНП следует перенести к линейным выводам двигателя и расчет повторить, принимая  $I_c = I_{cd}$ .

#### **4.2.4. Расчет защиты от токов перегрузки.**

Ток срабатывания защиты от перегрузки определяется по условию отстройки от номинального тока двигателя  $I_n$ :

$$I_{c3} = K_{omc} \cdot I_n / K_\epsilon, \quad (4.14)$$

где  $K_{omc} = 1,05$  при действии защиты на сигнал;  $K_{omc} = 1,1-1,2$  - при действии на отключение.

Выдержка времени защиты от перегрузки  $t_{c3}$  выбирается из условия надежного несрабатывания при пуске или самозапуске двигателя:

$$t_{c3} = K_{omc} \cdot t_n, \quad (4.15)$$

где  $K_{omc} = 1,2-1,3$ ;  $t_n$  - время пуска двигателя, не подлежащего самозапуску (или время самозапуска двигателя с самозапуском).

#### **4.2.5. Расчет защиты от асинхронного режима.**

Ток срабатывания защиты от асинхронного режима выбирают по выражению (4.14) с учетом  $K_{omc} = 1,1-1,2$ .

Время действия ступени защиты, действующей на перевод синхронного двигателя в асинхронный режим без возбуждения и разгрузку механизма, принимается на ступень селективности больше времени отключения коротких замыканий в сети, сопровождающихся протеканием тока  $I \geq I_{c3}$ , но не менее 1,5 с. Время действия ступени защиты, действующей на отключение, определяется по (4.15).

Время возврата промежуточного реле, обеспечивающего устойчивое действие защиты при колебаниях тока статора в асинхронном режиме, принимается наибольшим возможным для данного типа реле (РП-252):  $t_\epsilon = 1,1-1,4$  с.

#### 4.2.6. Расчет защиты минимального напряжения.

Защита от потери питания выполняется обычно групповой (один комплект защиты на несколько присоединений).

Если для электродвигателя самозапуск предусматривается и обеспечивается при любых реальных режимах (время перерыва питания  $t_{nn}$ ), то первичное напряжение срабатывания:

$$U_{cз} = U_з / (K_{омс} \cdot K_г), \quad (4.16)$$

где  $U_з$  - напряжение самозапуска;  $K_{омс} = 1,2$ ;  $K_г = 1,25$ .

Время срабатывания защиты  $t_{cз}$ :

$$t_{cз} \geq t_{nn}. \quad (4.17)$$

Если самозапуск невозможен по условиям технологии при любых перерывах питания продолжительностью более  $t_{nn}$  и снижении напряжения до  $0,7 U_n$ , то

$$U_{cз} = 0,7 \cdot U_n, \quad (4.18)$$

$$\text{а} \quad t_{cз} < t_{nn}. \quad (4.19)$$

Если самозапуск после отключения близкого КЗ со временем  $t_k$  возможен и обеспечивается, а после перерывов электроснабжения длительностью  $t > t_{nn}$  не обеспечивается или не предусматривается, то

$$U_{cз} \leq U_{з.к} / (K_{омс} \cdot K_г), \quad (4.20)$$

где  $U_{з.к}$  - напряжение самозапуска после отключения КЗ.

Время срабатывания защиты в этом случае:

$$t_k < t_{cз} < t_{nn}. \quad (4.21)$$

В узлах нагрузки, где имеются синхронные двигатели, в дополнение к защите минимального напряжения предусматривается защита минимальной частоты с блокировкой по направлению мощности. Частота срабатывания минимального реле частоты выбирается из условия отстройки от минимально возможного в нормальном режиме значения частоты в энергосистеме. При отсутствии таких данных частота срабатывания реле  $f_{ср}$  принимается равной 48,5-49 Гц.

Выдержка времени защиты минимальной частоты при установке ее на первых ступенях системы электроснабжения может быть выбрана 0,3-0,5 с из условия несрабатывания защиты при кратковременных снижениях частоты во время КЗ, когда действие защиты не требуется.

## 5. ЗАЩИТА КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК

### 5.1. Общие положения по проектированию защит конденсаторных установок напряжением 6-10 кВ

Основной вид повреждений конденсаторных установок - пробой конденсаторов - приводит к двухфазному КЗ. В условиях эксплуатации возможны также ненормальные режимы, связанные с перегрузкой конденсаторов высшими гармоническими тока и повышением напряжения. От повреждений и ненормальных режимов конденсаторных установок предусматривается защита, действующая при многофазных КЗ, перегрузках и повышении напряжения. Конденсаторная установка состоит из одного или нескольких отдельно установленных еди-

ничных конденсаторов, присоединенных к сети через коммутационные аппараты. Электрически соединенные между собой единичные конденсаторы образуют конденсаторную батарею с единым коммутационным аппаратом. В общем случае конденсаторная установка может содержать и единичные конденсаторы, и конденсаторные батареи.

## 5.2 Выбор уставок срабатывания защит

### 5.2.1. Защита от многофазных коротких замыканий

Защита предусматривается для всей конденсаторной установки в целом. В сетях напряжением выше 1 кВ она выполняется плавкими предохранителями или двухфазной токовой отсечкой. Кроме того, предусматривается групповая защита батарей, из которых состоит установка. Групповая защита не требуется, если конденсаторы снабжены индивидуальной защитой. Групповая защита и защита конденсаторов выполняются предохранителями.

Номинальный ток плавкой вставки предохранителя  $I_{вс.ном.}$  и ток срабатывания защиты  $I_{сз}$  выбирают с учетом отстройки от токов переходного процесса при включении конденсаторной установки и толчков тока при перенапряжениях по условию:

$$I_{сз} = I_{вс.ном.} = K_{отс} \cdot I_{ку.ном.}, \quad (5.1)$$

где  $I_{ку.ном.}$  - номинальный ток конденсаторной установки или отдельных ее элементов (для групповой защиты и защиты секций);

$K_{отс} = 2,0-2,5$ . Большие значения коэффициента отстройки  $K_{отс}$  принимают для плавких вставок.

Чувствительность защиты считается достаточной при  $K_u \geq 2$ .

### 5.2.2. Защита от перегрузки

Данная защита предусматривается в тех случаях, когда возможна перегрузка конденсаторов высшими гармоническими тока из-за непосредственной близости мощных выпрямительных установок. Защита выполняется общей для всей конденсаторной установки и действует на ее отключение с выдержкой времени порядка  $t_{сз} = 9$  с. Ток срабатывания защиты определяется условием:

$$I_{сз} \geq 1,3 \cdot I_{ку.ном.} \quad (5.2)$$

### 6.2.3. Защита от повышения напряжения

Защита устанавливается, если при повышении напряжения к единичному конденсатору может быть длительно приложено напряжение более  $1,1 U_{ном}$ . Защита выполняется одним максимальным реле напряжения и реле времени. Напряжение срабатывания определяется условием:

$$U_{сз} = 1,1 \cdot U_{ном}. \quad (5.3)$$

Выдержка времени принимается равной  $t_{сз} = 3-5$  мин. Предусматривается автоматическое повторное включение конденсаторной установки после восстановления первоначального уровня напряжения, но не ранее чем через 5 мин. после ее отключения.

## 6. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ПОНИЖАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Согласно [1] на трансформаторах должны быть предусмотрены следующие защиты:

1) защита от многофазных коротких замыканий в обмотках и на выводах;

- 2) защита от однофазных КЗ в обмотке и на выводах, присоединенных к сети с глухозаземленной нейтралью;
- 3) защита от витковых замыканий в обмотках;
- 4) защита от токов в обмотках, обусловленных внешними КЗ;
- 5) защита от токов в обмотках, обусловленных перегрузкой;
- 6) защита от понижений уровня масла;
- 7) защита от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью, если трансформатор питает сеть, в которой отключение однофазных замыканий на землю необходимо по требованиям безопасности.

## **6.1. Защита трансформаторов от многофазных коротких замыканий в обмотках и на выводах**

Для защиты от повреждений в обмотках и на выводах должны быть предусмотрены следующие виды защит.

1. Продольная дифференциальная защита на трансформаторах мощностью 6,3 МВА и более. Дифференциальная защита может быть предусмотрена на трансформаторах меньшей мощности, но не менее 1 МВА, если токовая отсечка не удовлетворяет требованиям чувствительности, а МТЗ имеет выдержку времени более 0,5 с.

2. Токовая отсечка без выдержки времени, устанавливаемая со стороны питания и охватывающая часть обмотки трансформатора, если не предусматривается дифференциальная защита.

### **6.1.1. Продольная дифференциальная защита с реле типа РНТ-565**

Если чувствительность защиты с реле типа РНТ-565 недостаточна, применяется дифференциальная защита с торможением с реле типа ДЗТ-11.

Порядок расчета дифзащиты с реле РНТ-565 следующий.

1. Определяют первичные токи для всех обмоток защищаемого трансформатора, соответствующие его номинальной мощности:

$$I_n = S_n / (\sqrt{3} \cdot U_n) . \quad (6.1)$$

2. Выбирают типы трансформаторов тока, их коэффициенты трансформации и схемы соединений для всех сторон защищаемого трансформатора. Коэффициенты трансформации целесообразно выбирать такими, чтобы вторичные токи в плечах защиты не превышали 5 А.

3. Определяют вторичные токи в плечах защиты:

$$I_{n2} = K_{cx}^{(3)} \cdot I_n / K_I , \quad (6.2)$$

где  $K_{cx}^{(3)}$  - коэффициент схемы для симметричного режима.

4. Выбирают основную сторону защищаемого трансформатора. За основную принимают сторону, которой соответствует наибольший из вторичных токов в плечах защиты.

5. Рассчитывают первичный ток срабатывания защиты  $I_{сз}$ . Отстройка от расчетного тока небаланса  $I_{нб.расч}$  при переходном режиме внешнего КЗ производится по выражению:

$$I_{сз} \geq K_{отс} \cdot I_{нб.расч} , \quad (6.3)$$

где  $I_{нб.расч}$  представляет из себя сумму вида:

$$I_{нб.расч} = I_{нб.расч}^{\cdot} + I_{нб.расч}^{\cdot\cdot} + I_{нб.расч}^{\cdot\cdot\cdot} , \quad (6.4)$$



$I_{нб.расч}^{'}$  - составляющая тока небаланса, обусловленная погрешностью трансформатора тока;

$I_{нб.расч}^{''}$  - составляющая тока небаланса, обусловленная регулированием напряжения защищаемого трансформатора;

$I_{нб.расч}^{'''} - составляющая тока небаланса, обусловленная неточностью установки на реле расчетных чисел витков для неосновной стороны.$

$$I_{нб.расч}^{'} = K_a \cdot K_{одн} \cdot \varepsilon \cdot I_{к.макс} ; \quad (6.5)$$

$$I_{нб.расч}^{''} = \Delta U_* \cdot I_{к.макс} ; \quad (6.6)$$

$$I_{нб.расч}^{'''} = (\omega_{расч} - \omega_{\phi}) \cdot I_{к.макс} / \omega_{расч} , \quad (6.7)$$

где  $I_{к.макс}$  - периодическая составляющая тока, проходящего через трансформатор при расчетном внешнем КЗ, приведенного к основной стороне;

$K_a = 1$  - коэффициент, учитывающий влияние на быстродействующие защиты переходных процессов при КЗ, которые сопровождаются прохождением апериодических составляющих в токе КЗ;

$K_{одн} = 1$  - коэффициент однотипности ТА;

$\varepsilon = 0.1$  - погрешность ТА;

$\Delta U_*$  - половина регулировочного диапазона устройства РПН в о.е.;

$\omega_{расч}$  - расчетное число витков обмотки насыщающегося трансформатора тока (НТТ) реле неосновной стороны;

$\omega_{\phi}$  - фактическое (целое) число витков обмотки НТТ неосновной стороны.

Так как число витков  $\omega_{расч}$  заранее не определено, вначале  $I_{нб.расч}$  рассчитывается как сумма двух составляющих:

$$I_{нб.расч} = I_{нб.расч}^{'} + I_{нб.расч}^{''} . \quad (6.8)$$

Затем, после выбора тока срабатывания и определения расчетных чисел витков НТТ реле РНТ определяется суммарный ток небаланса по (7.4) и уточняется ранее выбранный ток срабатывания.

Отстройка от броска намагничивающего тока при включении трансформатора в холостом режиме или при восстановлении напряжения после отключения короткого замыкания производится по выражению:

$$I_{сз} \geq K_{отс} \cdot I_n , \quad (6.9)$$

где  $I_n$  - номинальный ток, соответствующий номинальному напряжению среднего ответвления устройства РПН и номинальной мощности трансформатора (ток должен быть приведен к высокой стороне);  $K_{отс} = 1,3$  - коэффициент отстройки от броска намагничивающего тока.

Из двух значений, полученных по (7.3) и (7.9), принимается большее.

Если для трансформатора мощностью 25 МВА и более окажется, что  $I_{сз} > 1,5 I_n$ , то согласно ПУЭ защиту следует выполнять с реле ДЗТ-11.

6. Предварительная проверка чувствительности выполняется по выражению:

$$K_{\chi} = K_{cx}^{(m)} \cdot I_{к.мин}^{(m)} / (K_{cx}^{(3)} \cdot I_{сз}) , \quad (6.10)$$

где  $I_{к.мин}^{(m)}$  - минимальное значение периодической составляющей тока КЗ рассматриваемого вида ( $m$ ) в защищаемой зоне, приведенного к стороне основного питания;  $I_{сз}$  - ток срабатывания защиты, приведенный к стороне основного питания;  $K_{cx}^{(m)}$  - коэффициент схемы, определяемый видом повреждения ( $m$ ), схемой соединений ТА на стороне основного питания и схемой соединений обмоток защищаемого трансформатора, При схеме соединений обмоток

трансформатора Y/Δ-11 расчетный вид повреждения - двухфазное КЗ и выражение (6.10) будет выглядеть следующим образом:

$$K_{\eta} = 1,5 \cdot I_{\kappa, \min}^{(3)} / (\sqrt{3} \cdot I_{\text{сз}}). \quad (6.11)$$

Коэффициент чувствительности должен быть не менее 2. Если  $K_{\eta}$  окажется меньше 2, а определяющим для выбора тока срабатывания являлась отстройка от тока небаланса при внешних КЗ, то следует выполнять защиту с реле ДЗТ-11.

7. Определяют ток срабатывания реле, приведенный к основной стороне:

$$I_{\text{ср.осн}} = I_{\text{сз}} \cdot K_{\text{сх}}^{(3)} / K_I. \quad (6.12)$$

8. Определяют число витков обмотки НТТ реле для основной стороны:

$$\omega_{\text{осн.расч.}} = F_{\text{ср}} / I_{\text{ср.осн}}, \quad (6.13)$$

где  $F_{\text{ср}}$  - магнитодвижущая сила (МДС) срабатывания реле РНТ-565, принимается равной 100 А.

Принимается ближайшее меньшее число витков  $\omega_{\text{осн}}$ , которое может быть установлено на НТТ реле.

9. Определяют число витков обмоток неосновной стороны защищаемого трансформатора:

$$\omega_{\text{расч}} = \omega_{\text{осн}} \cdot I_{\text{осн.2}} / I_2, \quad (6.14)$$

где  $I_{\text{осн.2}}$ ,  $I_2$  - токи в плечах дифзащиты для основной и неосновной сторон, рассчитанные по (6.2)

Принимается ближайшее целое число витков  $\omega_{\text{ф}}$ .

10. Определяют первичный уточненный ток небаланса  $I_{\text{нб.расч}}$  с учетом составляющей  $I_{\text{нб.расч}}^{\dots}$  по (6.4).

11. Определяют ток срабатывания защиты по уточненному значению тока небаланса по (6.3).

12. Определяют коэффициент чувствительности защиты по (6.10), который должен удовлетворять требованиям ПУЭ.

### 7.1.2. Продольная дифференциальная защита с реле типа ДЗТ-11

Порядок расчета дифзащиты с реле типа ДЗТ-11 следующий.

Выполняют пп. 1-4 предыдущего раздела без изменений.

В п.5 определяют ток срабатывания защиты по (6.9), где  $K_{\text{отс}}$  следует принять равным 1,5.

В п.6 выбирают сторону, к трансформаторам тока которой присоединяется тормозная обмотка НТТ реле  $\omega_{\text{торм.}}$ . Тормозную обмотку целесообразно присоединять: на двухобмоточных трансформаторах к ТА, установленным на стороне низшего напряжения, на двухобмоточных трансформаторах с расщепленной обмоткой - на сумму токов ТА, установленных в цепи каждой из расщепленных обмоток.

Выполняют пп.7-9.

Определяют расчетный ток небаланса по (7.4).

Определяют необходимое число витков тормозной обмотки НТТ реле:

$$\omega_{\text{торм}} = K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб.расч}} \cdot \omega_{\text{раб.}} / (I_{\text{торм}} \cdot \text{tg} \alpha), \quad (6.15)$$

где  $\omega_{раб.}$  - число витков рабочей обмотки НТТ реле на стороне, к которой присоединена тормозная обмотка. При этом учитывают принятое число витков, если рассматриваемая сторона является основной  $\omega_{осн.}$ , и расчетное число витков, если - неосновной  $\omega_{расч.}$ ;

$I_{нб.расч.}$  и  $I_{торм.}$  - первичный ток небаланса, найденный в п.10, и первичный тормозной ток при внешнем КЗ, приведенные к одной ступени напряжения;

$$I_{торм.} = I_{к.макс.};$$

$$K_{отс} = 1,5 - \text{коэффициент отстройки};$$

$tg\alpha$  - тангенс угла наклона к оси абсцисс касательной, проведенной из начала координат к характеристике срабатывания реле (тормозной), соответствующей минимальному торможению (кривая 2 на рис.7.1), для реле ДЗТ-11 принимается равным 0,75-0,8.

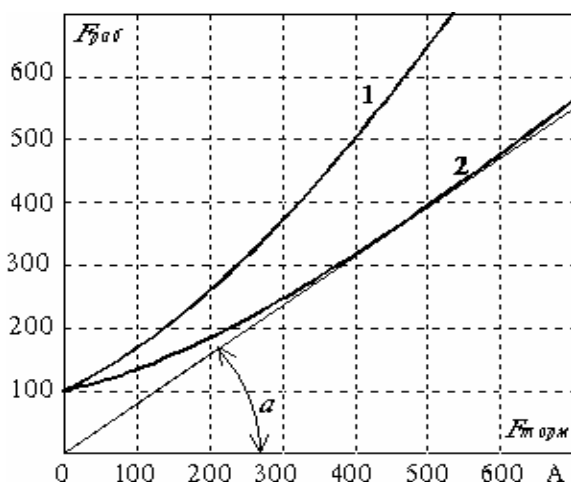


Рис. 6.1. Тормозные характеристики реле ДЗТ-11

Принимают целое большее число витков  $\omega_{торм.}$ , которое реально можно установить на НТТ реле [4].

Определяют коэффициент чувствительности по (6.10), так как при одностороннем питании торможение отсутствует при внутреннем КЗ.

Тормозные характеристики реле ДЗТ-11 (рис.6.1) построены при нормальной затяжке противодействующей пружины для таких углов между рабочим ( $I_{раб.}$ ) и тормозным ( $I_{торм.}$ ) токами в реле, при которых обеспечивается максимальное (кривая 1) и минимальное (кривая 2) торможение. Область, расположенная ниже характеристики 2, является областью надежного несрабатывания реле; область, расположенная выше характеристики 1, - областью надежного срабатывания. При этом для обеспечения чувствительности защиты точка, соответствующая расчетным случаям КЗ в зоне действия защиты и определяемая величинами  $F_{раб.}$  и  $F_{торм.}$  должна находиться не менее чем на 10% своих координат выше характеристики 1 [2].

### 6.1.3. Токовая отсечка

Защита устанавливается на стороне питания, если не предусматривается дифференциальная защита. Ток срабатывания защиты:

$$I_{сз} \geq K_{отс} \cdot I_{к.макс.вн}^{(3)}, \quad (6.16)$$

где  $I_{к.макс.вн}^{(3)}$  - максимальное значение тока трехфазного КЗ за трансформатором, приведенное к стороне ВН, где установлена токовая отсечка;  $K_{отс}$  - коэффициент отстройки, значение которого зависит от типа реле:  $K_{отс} = 1,3-1,4$  - для реле типа РТ-40;  $K_{отс} = 1,6$  - для реле РТ-80 и РТМ.

## 6.2. Защита от токов, обусловленных внешними короткими замыканиями

На трансформаторах мощностью менее 1 МВА в качестве защиты от токов, обусловленных внешними КЗ, должна быть предусмотрена действующая на отключение максимальная токовая защита (МТЗ), на трансформаторах мощностью 1МВА и более - МТЗ или МТЗ с пуском по напряжению.

### 7.2.1. Максимальная токовая защита

Ток срабатывания защиты:

$$I_{сз} = K_{отс} \cdot K_3 \cdot I_{раб.макс} / K_{\epsilon} , \quad (6.17)$$

где  $I_{раб.макс}$  - значение максимального рабочего тока в месте установки защиты;

$K_3$  - коэффициент, учитывающий увеличение тока в условиях самозапуска электродвигателей.

Значение коэффициента чувствительности для МТЗ должно быть не менее 1,5 при КЗ в основной зоне и примерно 1,2 при КЗ в зоне резервирования. Время срабатывания МТЗ трансформатора определяется аналогично времени срабатывания МТЗ линий.

При наличии на стороне ВН короткозамыкателя токовая защита трансформатора выполняется с двумя выдержками времени. С первой выдержкой времени отключается выключатель на стороне НН, а со второй - включается короткозамыкатель. Время срабатывания МТЗ не должно превышать 3с для трансформаторов с  $U_{ВН} \geq 110$  кВ и 4с с  $U_{ВН} < 110$  кВ.

### 6.2.2. Максимальная токовая защита с комбинированным пусковым органом напряжения

Защита применяется в случае недостаточной чувствительности обычной МТЗ.

Защита обычно выполняется с помощью реле тока типа РТ-40, фильтр-реле напряжения обратной последовательности типа РНФ-1М и минимального реле напряжения типа РН-54.

Ток срабатывания защиты определяется по условию отстройки от номинального тока  $I_n$  трансформатора:

$$I_{сз} = K_{отс} \cdot I_n / K_{\epsilon} , \quad (6.18)$$

где  $K_{отс} = 1,25$  - коэффициент, учитывающий ошибку реле,необходимый запас и возможность увеличения тока от регулировании напряжения;

$K_{\epsilon} = 0,8$  - коэффициент возврата.

Напряжение срабатывания минимального реле напряжения, включенного на междуфазное напряжение, определяется следующим образом:

1) по условию обеспечения возврата реле после отключения внешнего КЗ

$$U_{сз} = U_{мин} / (K_{отс} \cdot K_{\epsilon} ) ; \quad (6.19)$$

2) по условию отстройки от напряжения самозапуска при включении от АПВ или АВР заторможенных электродвигателей

$$U_{сз} \leq U_3 / K_{отс} , \quad (6.20)$$

где  $U_{мин}$  - междуфазное напряжение в условиях самозапуска после отключения внешнего короткого замыкания,  $U_{мин}$  определяется при расчете режима самозапуска (в ориентировочных расчетах может быть принято  $0,85 U_{ном}$ );  $U_3$  - междуфазное напряжение в условиях самозапуска заторможенных электродвигателей при включении их от АПВ и АВР (в ориентировочных расчетах может быть принято  $0,7 U_{ном}$ );  $K_{отс} = 1,2$ .

Напряжение срабатывания фильтр-реле обратной последовательности определяется исходя из минимальной уставки устройства:

$$U_{2.c3} = 0,06 \cdot U_{ном} . \quad (6.21)$$

Коэффициент чувствительности по току определяется по выражению (6.10). Коэффициент чувствительности для минимального реле напряжения:

$$K_{ч.U} = U_{c3} \cdot K_{\epsilon} / U_{ост} , \quad (6.22)$$

где  $U_{ост}$  - междуфазное напряжение в месте установки трансформатора напряжения, от которого питаются реле, при металлическом трехфазном КЗ в расчетной точке, когда указанное напряжение имеет наибольшее значение.

Коэффициент чувствительности для фильтра-реле обратной последовательности:

$$K_{ч.2.U} = U_{2.мин} / U_{2.c3} , \quad (6.23)$$

где  $U_{2.мин}$  - междуфазное напряжение обратной последовательности в месте установки трансформатора напряжения, от которого питается фильтр-реле, при металлическом КЗ между двумя фазами в расчетной точке в режиме, при котором указанное напряжение имеет минимальное значение.

Для резервных защит требуется  $K_{ч} \geq 1,2$ .

### 6.3. Защита от токов в обмотках, обусловленных перегрузкой

Ток срабатывания защиты от перегрузки:

$$I_{c3} = K_{омс} \cdot I_n / K_{\epsilon} , \quad (6.24)$$

где  $I_n$  - номинальный ток обмотки трансформатора с учетом регулирования напряжения, на стороне которой установлено реле,  $K_{омс}$  - принимается равным 1,05.

Защита от перегрузки устанавливается в одной фазе и действует на сигнал.

### 6.4. Газовая защита

Газовая защита предназначена для защиты силовых трансформаторов с масляным заполнением, снабженных расширителями, от всех видов внутренних повреждений ( витковое замыкание, понижение уровня масла, междуфазное короткое замыкание внутри трансформатора).

При незначительном газообразовании газовая защита действует на предупредительный сигнал. При бурном газообразовании или при сильном понижении уровня масла (например, при повреждении бака и утечке масла) газовая защита дает команду на отключение трансформатора.

## 7. РАСЧЕТНАЯ ПРОВЕРКА ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Согласно ПУЭ трансформаторы тока, предназначенные для питания токовых устройств релейной защиты от коротких замыканий (КЗ), должны удовлетворять следующим требованиям:

1. В целях предотвращения излишних срабатываний защиты при КЗ вне защищаемой зоны погрешность (полная или токовая) трансформаторов тока, как правило, не должна превышать 10%. Более высокие погрешности допускаются при использовании защит, правильное

действие которых при повышенных погрешностях обеспечивается с помощью специальных мероприятий. Указанные требования должны соблюдаться:

- для ступенчатых защит - при КЗ в конце зоны действия ступени защиты, а для направленных ступенчатых защит - также и при внешнем КЗ;
- для остальных защит - при внешнем КЗ.

2. Токовая погрешность трансформаторов тока в целях предотвращения отказов защиты при КЗ в начале защищаемой зоны не должна превышать:

- по условиям повышенной вибрации контактов реле направления мощности или реле тока - значений, допустимых для выбранного типа реле;
- по условиям предельно допустимой для реле направления мощности и направленных реле сопротивлений угловой погрешности - 50%.

3. Напряжение на выводах вторичной обмотки трансформаторов тока при КЗ в защищаемой зоне не должно превышать значения, допустимого для устройства релейной защиты и автоматики.

**Расчетная проверка на 10% - ную полную погрешность.** При проектировании проверка на 10% - полную погрешность ( $\varepsilon$ ) обычно производится по кривым предельной кратности. Специальные кривые предельной кратности представляют собой зависимость допустимого по условию  $\varepsilon = 10\%$  значения сопротивления нагрузки  $Z_n$  на трансформатор тока от значения предельной кратности  $k_{10}$ , вычисляемого по выражению

$$k_{10} = I_{1\text{расч}}/I_{1\text{ном}}, \quad (7.1)$$

где  $I_{1\text{ном}}$  - первичный номинальный ток трансформатора тока,  $I_{1\text{расч}}$  - первичный расчетный ток, при котором должна обеспечиваться работа трансформаторов тока с погрешностью не более 10%.

Значение  $I_{1\text{расч}}$  принимается:

а) для токовых защит с независимой характеристикой выдержки времени, и в том числе для токовых отсечек без выдержки времени,  $I_{1\text{расч}} = 1,1 \cdot I_{с.з.}$ , поскольку для этих защит достаточно обеспечить точную работу при токе срабатывания реле (в конце зоны действия защиты), а при близких КЗ с более высокими значениями первичных токов значения тока в реле будут всегда больше, несмотря на увеличенную токовую погрешность;

для дешунтируемых электромагнитов отключения (ЭО),

$I_{1\text{расч}} = (1,4-1,8) \cdot I_{сэо} \cdot K_I / k_{сх}^{(3)}$ , где  $I_{сэо}$  - ток срабатывания электромагнита отключения,  $K_I$  - коэффициент трансформации трансформатора тока,  $k_{сх}^{(3)}$  - коэффициент схемы в трехфазном режиме.

б) для максимальной токовой защиты с зависимой характеристикой  $I_{1\text{расч}} = 1,1 \cdot I_{согл}$ , где  $I_{согл}$  соответствует току КЗ, при котором производится согласование по времени последующей и предыдущей защит и определяется ступень селективности  $\Delta t$ ; для создания запаса по возможности принимают  $I_{согл}$  равным току, при котором начинается независимая часть характеристики;

в) для продольных дифференциальных защит  $I_{1\text{расч}}$  принимается равным наибольшему значению тока при внешнем (сквозном) КЗ;

г) для дистанционной направленной защиты линий с односторонним питанием  $I_{1\text{расч}}$  принимается равным наибольшему значению тока при КЗ в конце первой зоны защиты [2].

Расчетная проверка выполняется в следующем порядке.

1. Определяется значение предельной кратности  $k_{10}$ .
2. Подбирается кривая предельных кратностей, соответствующая типу трансформатора тока, классу обмотки и коэффициенту трансформации.
3. Для значения  $k_{10}$  по соответствующей кривой предельных кратностей [8] определяется допустимое значение сопротивления вторичной нагрузки  $Z_{н,доп}$  (рис.8.1). При этом значении  $Z_{н,доп}$  полная погрешность  $\varepsilon = 10\%$ .

4. Определяется фактическое расчетное значение сопротивление нагрузки трансформатора тока  $Z_{н.расч}$ , которое зависит от сопротивления реле и соединительных проводов, от схемы соединения трансформаторов тока и от вида КЗ. Расчетные формулы для определения вторичной нагрузки трансформаторов тока для основных схем приведены в [2].

5. Если  $Z_{н.расч} \leq Z_{н.доп}$ , то  $\varepsilon \leq 10\%$ . Если окажется  $Z_{н.расч} > Z_{н.доп}$ , следует использовать один из следующих способов уменьшения погрешности трансформаторов тока:

- а) увеличение сечения соединительных проводов;
- б) переход на больший коэффициент трансформации;
- в) переход на другую схему соединения трансформаторов тока и реле;
- г) использование вторичных обмоток двух сердечников трансформатора тока при их последовательном соединении;
- д) включение реле прямого действия типов РТМ и РТВ на разные вторичные обмотки одних и тех же трансформаторов тока.

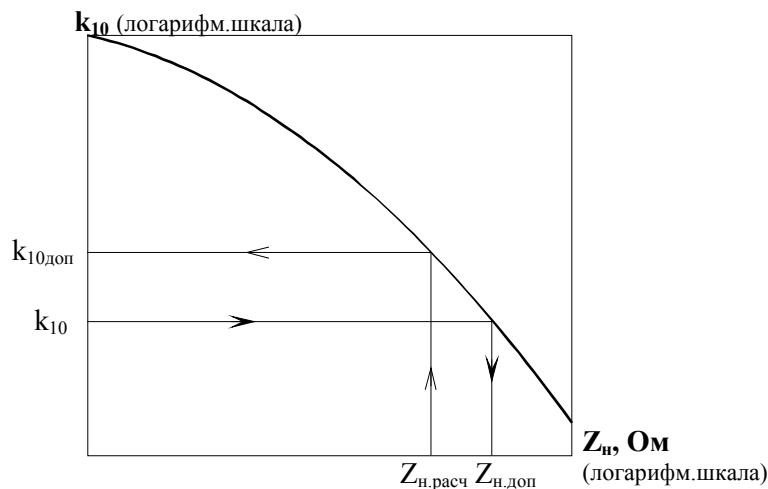


Рис.7.1. Кривая предельных кратностей (качественная кривая)

**Расчетная проверка надежного замыкания контактов электромеханических реле тока, сопротивления и направления мощности.** При КЗ в начале защищаемой зоны значения токов могут в несколько раз превышать то значение расчетного тока, при котором производилась проверка трансформаторов тока на 10%-ную погрешность. В связи с этим весьма вероятно увеличение токовых погрешностей свыше 10%. При этом увеличивается угловая погрешность, что может привести к неправильной ориентации направленных реле, и искажается форма кривой вторичного тока, что может вызывать вибрацию контактов реле и отказ срабатывания защиты. Искажение формы вторичного тока прямо связано с токовой погрешностью трансформатора тока: чем больше токовая погрешность, тем больше искажается форма вторичного тока. Значение допустимой токовой погрешности  $f_{доп}$ , при котором обеспечивается надежное замыкание контактов, зависит от типа защиты и реле. Например, для максимальной токовой защиты, выполненной на реле типа РТ-40 или типа РТ-80 (РТ-90),  $f_{доп} = 50\%$ , - на статических реле типа РСТ-11 - РСТ-13,  $f_{доп} = 80\%$ .

Максимальное значение токовой погрешности  $f_{max}$  определяется при максимальном значении тока при КЗ в месте установки защиты  $I_{1к.мах}$  в следующем порядке.

1. Рассчитывается максимальная кратность для принятого трансформатора тока с первичным током  $I_{1ном}$ :

$$k_{max} = I_{1к.мах} / I_{1ном}. \quad (7.2)$$

2. Определяется коэффициент А по выражению:

$$A = k_{max} / k_{10доп}, \quad (7.3)$$

где  $k_{10\text{доп}}$  - предельная кратность, соответствующая значению фактической расчетной нагрузки  $Z_{\text{н.расч}}$ , определяется по кривой предельных кратностей трансформатора тока данного типа, класса и коэффициента трансформации (рис.7.1).

3. По кривой  $A = \psi(f)$  (рис.7.2) определяется  $f_{\text{max}}$ .

Если  $f_{\text{max}} \leq f_{\text{доп}}$ , то второе требование к трансформаторам тока выполнено. Если  $f_{\text{max}} > f_{\text{доп}}$  необходимо либо применить другой тип реле, либо использовать один из известных способов уменьшения погрешности.

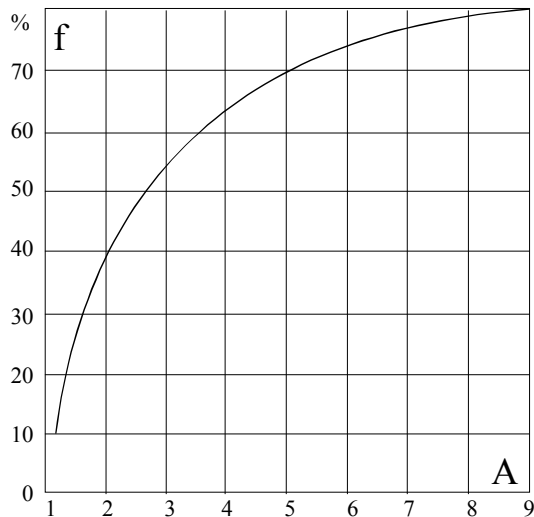


Рис.7.2. Зависимость  $A = \psi(f)$

**Предотвращение опасных перенапряжений во вторичных цепях трансформаторов тока.** Амплитудное значение напряжения на выводах вторичной обмотки трансформатора тока определяется по выражению

$$U_{2\text{max}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{max}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot Z_{\text{н.расч}}. \quad (7.4)$$

Третье требование к трансформаторам тока выполняется при условии

$$U_{2\text{max}} \leq \sqrt{2} \cdot U_{2\text{доп}}, \quad (7.5)$$

где  $U_{2\text{доп}} = 1000 \text{ В}$  [1].



## ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. Седьмое издание, с изменениями, исправлениями и дополнениями, принятыми Главгосэнергонадзором РФ. Санкт-Петербург, 2007.
2. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. -Л.: Энергоатомиздат, 2003, -296с.
3. Руководящие указания по релейной защите. Расчет токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики. -М.: Энергия, 1979, -150с.
4. Руководящие указания по релейной защите. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ. Расчеты. -М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. -М.: Высш. шк., 1991. -496с.
6. Реле защиты. /Под ред. В.С. Алексеева и др. -М.: Энергия, 1976. -464с.
7. Беркович М.А. и др. Основы автоматики энергосистем. -М.: Энергоатомиздат, 1981, -432с.
8. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. - М.: Энергия, 1980.