Рекомендации по расчету уставок дистанционных ступеней защиты терминала МР771

Редакция 1.3 от 20.01.2020
для МР771 версий ПО 1.02 - 1.12.

СОДЕРЖАНИЕ

стр.
1 ПАРАМЕТРЫ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ 4
1.1 Выбор сопротивления срабатывания 4
1.1.1 Первая ступень 5
1.1.2 Вторая ступень 5
1.1.3 Третья ступень. 6
1.1.4 Обратная ступень 7
1.1.5 Ступень ускорения. 8
1.2 Выбор времени срабатывания 10
1.2.1 Время срабатывания первой ступени 10
1.2.2 Время срабатывания второй ступени 10
1.2.3 Время срабатывания третьей ступени 10
1.2.4 Время ускорения 13
1.2.5 Время срабатывания обратной ступени 13
2 РАСЧЁТ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ 14
2.1 Особенности защиты от междуфазных КЗ 14
2.2 Отстройка от нагрузочного режима 14
2.3 Выбор направления ступеней дистанционной защиты 16
2.4 Выбор характеристики срабатывания дистанционного органа 17
2.4.1 Угол наклона полигональной характеристики 18
2.4.2 Уставка по оси реактивного сопротивления 18
2.4.3 Блокировка при качаниях 18
2.4.4 Уставка по оси активного сопротивления с учётом отстройки от сопротивления дуги 21
2.4.5 Уставка по оси активного сопротивления с учётом отстройки от нагрузочного режима 22
3 РАСЧЁТ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ 24
3.1 Особенности защиты от однофазных КЗ на землю. 24

3.2 Выбор характеристики срабатывания для дистанционной защиты от КЗ на землю 26
3.2.1 Угол наклона полигональной характеристики f 26
3.2.2 Уставка по оси реактивного сопротивления 26
3.2.3 Уставка по оси активного сопротивления с учётом отстройки от сопротивления дуги 27
3.2.4 Уставка по оси активного сопротивления с учётом отстройки от активного сопротивления нагрузки 28
3.3 Задание направленности ступеней дистанционной защиты 29
4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ УСТАВОК КОНТРОЛЯ ЦЕПЕЙ ТН 30
5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ УСТАВОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОФРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ 32
ПРИЛОЖЕНИЕ А 33
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 49

1 ПАРАМЕТРЫ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ

1.1 Выбор сопротивления срабатывания

Сопротивления срабатывания по индуктивной оси выбираются одинаковыми для ступеней от междуфазных и однофазных КЗ, так как для ступеней от однофазных КЗ в устройстве МР771 осуществляется компенсация токов нулевой последовательности. Рекомендации по расчёту сопротивлений ступеней представлены для общего случая (рисунок 1.1). Для конкретных ситуаций уставки выбираются в соответствии с [1].

Выбор уставок защиты приведен для:

3-х ступеней в прямом направлении, одной в обратном и ступени ускорения от междуфазных КЗ;

2-х ступеней в прямом направлении, одной в обратном и ступени ускорения от однофазных КЗ.

Первичные сопротивления срабатывания ступеней дистанционной защиты определяются для случаев металлических коротких замыканий. Участок сети приведён на рисунке 1.1.

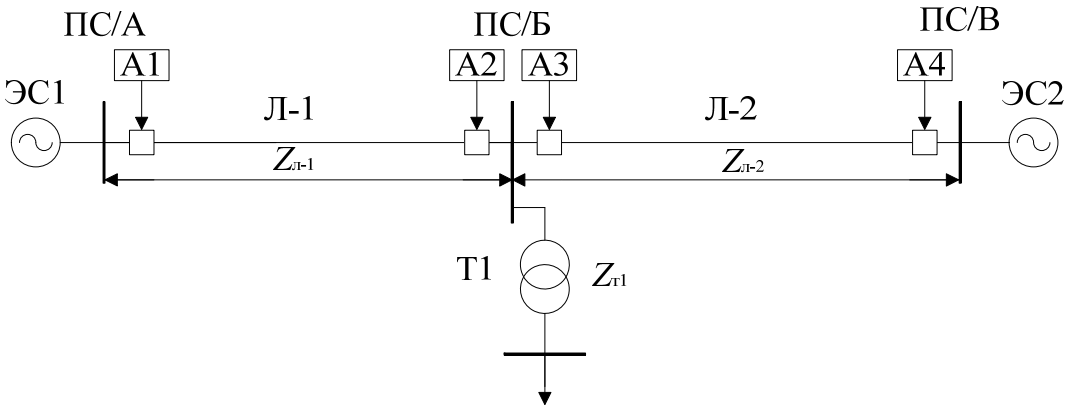

Рисунок 1.1 – Участок сети

На рисунке 1.1 приняты следующие обозначения: ЭС – энергосистема; ПС/А, ПС/Б, ПС/В – подстанции А, Б, и В соответственно; А1, А2, А3, А4 – комплекты защит установленные на соответствующих линиях; $Z_{л-1}$; $Z_{л-2}$ – сопротивления соответствующей линии; $Z_{т1}$ – сопротивление трансформатора; Л-1, Л-2, Т1 – линия 1, линия 2 и трансформатор 1 соответственно.

1.1.1 Первая ступень

Первая ступень защиты отстраивается от КЗ на шинах подстанции ПС/Б [1]:

$$Z^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А1}} \leq \frac{Z_{\text{л}-1}}{1+\beta+\delta}, \tag{1.1}$$

где $Z^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А1}}$ – сопротивление срабатывания первой ступени защиты А1; $Z_{\text{л}-1}$ – сопротивление линии 1; δ – погрешность, вызванная неточностью расчёта первичных электрических величин; β – погрешность трансформаторов тока, трансформаторов напряжения и релейной аппаратуры (в сторону увеличения защищаемой зоны).

1.1.2 Вторая ступень

Сопротивление срабатывания принимается наименьшим из:

– сопротивления срабатывания полученного с учётом отстройки от сопротивления линии 1, и минимального сопротивления трансформатора Т1 [1]:

$$Z^{`\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}} \leq \frac{Z_{\text{л}-1} + Z_{\text{т1.min}}/k_{\text{т.тр}}}{1+\beta+\delta}, \tag{1.2}$$

где $Z_{\text{т1.min}}$ – минимальное сопротивление трансформатора Т1; $k_{\text{т.тр}}$ – коэффициент токораспределения при КЗ за трансформатором Т1;

– сопротивления срабатывания, полученного с учётом отстройки от сопротивления срабатывания первой ступени защиты А3 [1]:

$$Z^{``\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}} \leq \frac{Z_{\text{л}-1} + (\frac{1-\alpha}{k_{\text{т.л}}}) \cdot Z^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А3}}}{1+\beta+\delta}, \tag{1.3}$$

где $Z^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А3}}$ –сопротивление срабатывания первой ступени защиты смежного объекта; α – погрешности трансформаторов тока, трансформаторов напряжения и релейной аппаратуры (в сторону уменьшения защищаемой зоны); $k_{\text{т.л}}$ – коэффициент токораспределения при КЗ на л-2.

Значения коэффициентов принимаются: α=0,1; δ=0,1 и β=0,05 [1].

Коэффициент токораспределения $k_{\text{т}}$ равен отношению тока, протекающего в месте установки защиты, к току, протекающему на рассматриваемом участке при КЗ в конце защищаемой зоны.

Исходя из условий, представленных выше, сопротивление срабатывания для второй ступени выбирается по формуле:

$$Z^{\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}} \leq \min\left(Z^{`\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}}, Z^{``\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}}\right), \tag{1.4}$$

где $Z^{\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}}$ – сопротивление срабатывания второй ступени защиты А1.

Коэффициент чувствительности для второй ступени должен быть не меньше 1,25:

$$K^{\mathrm{II}}_{\text{ч.}} = \frac{Z^{\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}}}{Z_{\text{л}-1}} \geq 1{,}25, \tag{1.5}$$

где $K_{ч.}^{II}$ – коэффициент чувствительности для второй ступени защиты.

1.1.3 Третья ступень.

Для защит от замыканий на землю третья ступень обычно не рассчитывается. Для защит от междуфазных КЗ выбирается с учётом отстройки от сопротивления самозапуска двигателей в месте установки защиты в соответствии с [1]:

$$Z_{с.з.А1}^{III} \leq \frac{Z_{сзп}}{K_{вз} \cdot K_{отс} \cdot \cos(f_л - y)}, \quad (1.6)$$

где $Z_{сзп}$ – минимальное значение сопротивления в условиях самозапуска электродвигателей; $K_{вз}$ – коэффициент возврата для устройств МР771 принимается равным 1,05; $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 1,2; $f_л$ – угол линии; y – угол нагрузки.

Если по условию отстройки от сопротивления самозапуска не обеспечивается требуемая чувствительность, то третью ступень рекомендуется отстраивать от максимального из сопротивлений срабатывания третьих ступеней защит смежных объектов с учётом коэффициента токораспределения[1]:

$$Z_{с.з.А1}^{III} \leq \frac{Z_{л-1} + (\frac{1-\alpha}{k_{т.л}}) \cdot Z_{с.з.А3}^{III}}{1 + \beta + \delta}, \quad (1.7)$$

где $Z_{с.з.А1}^{III}$ – сопротивление срабатывания третьей ступени защиты А1; $Z_{с.з.А3}^{III}$ – сопротивление срабатывания третьей ступени защиты А3.

При невозможности произвести отстройку от сопротивлений срабатывания третьих ступеней, уставку рекомендуется выбирать, исходя из требуемой чувствительности.

При необходимости уменьшения выдержек времени, третью ступень допускается отстраивать от минимального сопротивления срабатывания вторых ступеней дистанционных защит смежных объектов при условии, что будет обеспечиваться требуемая чувствительность [1]:

$$Z_{с.з.А1}^{III} \leq \frac{Z_{л-1} + (\frac{1-\alpha}{k_{т.л}}) \cdot Z_{с.з.А3}^{II}}{1 + \beta + \delta}, \quad (1.8)$$

где $Z_{с.з.А3}^{II}$ – сопротивление срабатывания второй ступени защиты А3.

Коэффициент чувствительности для зоны ближнего резервирования должен быть не менее 1,5:

$$K_{ч.б.р}^{III} = \frac{Z_{с.з.А1}^{III}}{Z_{л-1}} \geq 1{,}5, \quad (1.9)$$

где $K_{ч.б.р}^{III}$ – коэффициент чувствительности для зоны ближнего резервирования.

Коэффициент чувствительности для зоны дальнего резервирования должен быть не менее 1,25:

$$K_{\text{ч.д.р}}^{\text{III}} = \frac{Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}}}{Z_{\text{л}-1} + Z_{\text{л}-2}/k_{\text{т.}}} \geq 1{,}25, \quad (1.10)$$

где $K_{\text{ч.д.р}}^{\text{III}}$ – коэффициент чувствительности для зоны дальнего резервирования; $Z_{\text{л}-2}/k_{\text{т.}}$ – максимальное сопротивление объекта дальнего резервирования с учётом токораспределения.

1.1.4 Обратная ступень

Обратную ступень рекомендуется задавать при защите участка сети с двух и более сторонним питанием. Данная ступень может осуществлять функцию резервирования дифференциальной защиты шин (ДЗШ) подстанции, находящихся за спиной рассматриваемой защиты или функцию посылки блокирующего телесигнала.

Если данная ступень осуществляет функцию резервирования ДЗШ, то сопротивление срабатывания выбирается:

– как 10 – 30 % сопротивления защищаемой линии [2]:

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{`об}} = \frac{10 \div 30}{100} \cdot Z_{\text{л}-1}; \quad (1.11)$$

– не выше 50 % сопротивления самой короткой линии отходящей от шин подстанции [2]:

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{``об}} = 0{,}5 \cdot Z_{\text{л.min}}, \quad (1.12)$$

где $Z_{\text{л.min}}$– минимальное сопротивление линии отходящей от шин подстанции.

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{об}} \leq \min\left(Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{`об}}, Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{``об}}\right). \quad (1.13)$$

Если данная ступень осуществляет функцию блокировки ступени защиты, расположенной с противоположного конца защищаемой линии (рисунок 1.2), в соответствии с [2] сопротивление срабатывания выбирается:

– больше на 10 – 20% зоны действия защиты А2 (рисунок 1.2):

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{`об}} = Z_{\text{с.з.А2}}^{\text{II}} - Z_{\text{л}-2} + (0{,}1 \div 0{,}2) \cdot Z_{\text{с.з.А2}}^{\text{II}}; \quad (1.14)$$

– не более 50 % длины самой короткой линии за спиной:

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{``об}} = 0{,}5 \cdot Z_{\text{л.min}}, \quad (1.15)$$

где $Z_{\text{с.з.А2}}^{\text{II}}$ – сопротивление срабатывания второй ступени защиты (защита А2 рисунок 1.2) с противоположного конца линии; $Z_{\text{л}-2}$ – сопротивление линии, которая защищается основными ступенями защиты (Iст. IIст. IIIст.); $Z_{\text{л.min}}$ – минимальное сопротивление линий находящихся за спиной.

Из сопротивлений рассчитанных по формулам (1.14) и (1.15) выбирается наименьшее:

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{об}} \leq \min\left(Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{`об}}, Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{``об}}\right). \quad (1.16)$$

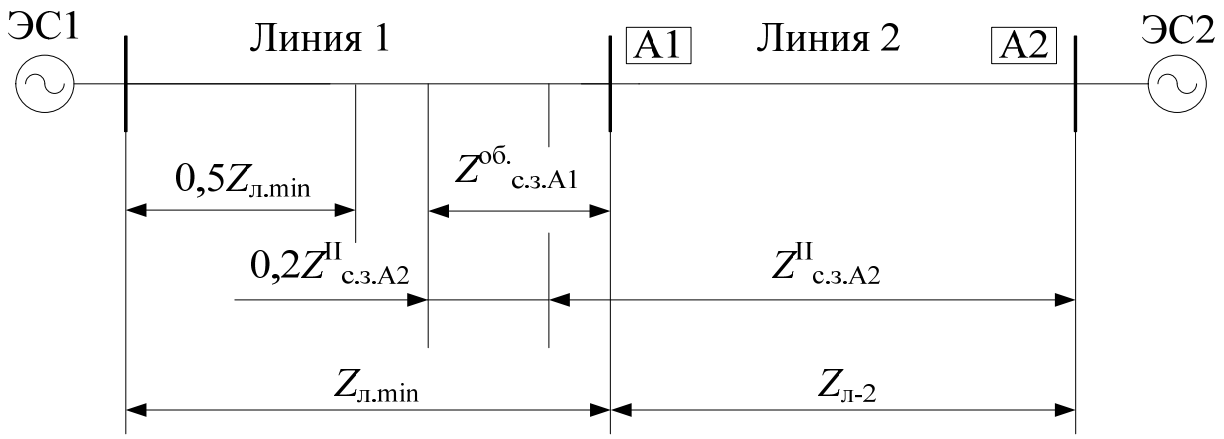

Рисунок 1.2 – Обратная ступень защиты

1.1.5 Ступень ускорения.

Сопротивление срабатывания $Z^{уск}_{с.з.A1}$ данной ступени выбирается равным сопротивлению срабатывания второй ступени защиты.

Графическое представление ступеней дистанционной защиты проиллюстрировано на рисунке 1.3. Формулы для расчета сопротивлений срабатывания ступеней защиты сведены в таблице 1.1.

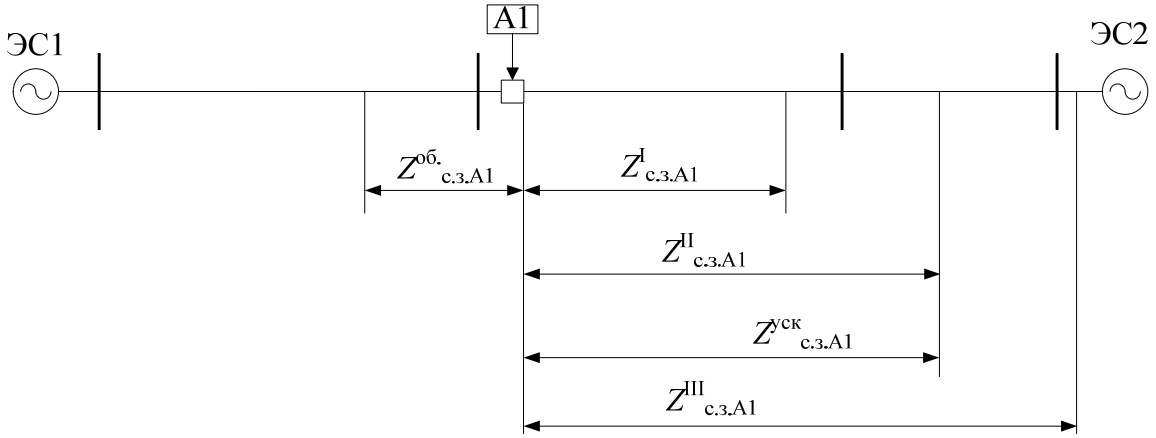

Рисунок 1.3. – Ступени дистанционной защиты

Таблица №1.1 – Сопротивления срабатывания защиты.

Ступени защиты		Формула расчёта
Первая ступень защиты (Iст.)		$Z^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А1}} \leq \dfrac{Z_{\text{л}-1}}{1+\beta+\delta}$
Вторая ступень защиты (IIст.)		$Z^{``\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}} = \dfrac{Z_{\text{л}-1} + Z_{\text{тр.min}}/k_{\text{т.тр}}}{1+\beta+\delta}$ $Z^{```\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}} = \dfrac{Z_{\text{л}-1} + (\frac{1-\alpha}{k_{\text{т.л}}}) \cdot Z^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А3}}}{1+\beta+\delta}$
		$Z^{\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}} \leq \min(Z^{`\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}}, Z^{``\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}})$
Третья ступень защиты (IIIст.)		$Z^{\mathrm{III}}_{\text{с.з.А1}} = \dfrac{Z_{\min}}{K_{\text{вз}} \cdot K_{\text{отс}} \cdot \cos(f_{л} - y)}$ $Z^{\mathrm{III}}_{\text{с.з.А1}} = \dfrac{Z_{\text{л}-1} + (\frac{1-\alpha}{k_{\text{т.л}}}) \cdot Z^{\mathrm{III}}_{\text{с.з.А3}}}{1+\beta+\delta}$ или $Z^{\mathrm{III}}_{\text{с.з.А1}} = \dfrac{Z_{\text{л}-1} + (\frac{1-\alpha}{k_{\text{т.л}}}) \cdot Z^{\mathrm{II}}_{\text{с.з.А3}}}{1+\beta+\delta}$
Обратная ступень (об. ст.)	Резервирование ДЗШ	$Z^{`\text{об}}_{\text{с.з.А1}} = \dfrac{10 \div 30}{100} \cdot Z_{\text{л}-1}$ $Z^{``\text{об}}_{\text{с.з.А1}} = 0{,}5 \cdot Z_{\text{л.min}}$
		$Z^{\text{об}}_{\text{с.з.А1}} \leq \min(Z^{`\text{об}}_{\text{с.з.А1}}, Z^{``\text{об}}_{\text{с.з.А1}})$
	Телеблоки-ровка	$Z^{`\text{об}}_{\text{с.з.А1}} = Z^{\mathrm{II}}_{\text{с.з.А2}} - Z_{\text{л}-2} + (0{,}1 \div 0{,}2) \cdot Z^{\mathrm{II}}_{\text{с.з.А2}}$ $Z^{``\text{об}}_{\text{с.з.А1}} = 0{,}5 \cdot Z_{\text{л.min}}$
		$Z^{\text{об}}_{\text{с.з.А1}} \leq \min(Z^{`\text{об}}_{\text{с.з.А1}}, Z^{``\text{об}}_{\text{с.з.А1}})$
Ступень ускорения		$Z^{\text{уск}}_{\text{с.з.А1}} = Z^{\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}}$

1.2 Выбор времени срабатывания

1.2.1 Время срабатывания первой ступени

Выдержка времени для первой ступени защиты специально не задаётся:

$$t^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А1}} = 0 \text{ с}, \tag{1.17}$$

где $t^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А1}}$ – выдержка времени для первой ступени защиты А1.

1.2.2 Время срабатывания второй ступени

Выдержка времени второй ступени принимается на ступень селективности больше выдержки времени первой ступени защиты А3 (рисунок 1.1):

$$t^{\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}} = t^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А3}} + \Delta t, \tag{1.18}$$

где $t^{\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}}$ – выдержка времени для второй ступени; Δt – ступень селективности, рекомендуется принимать 0,3 с.

Если на подстанции ПС/Б (рисунок 1.1) смежного участка предусмотрено УРОВ, то время срабатывания второй ступени защиты А1 (рисунок 1.1) необходимо отстраивать от выдержки времени УРОВ [2]:

$$t^{\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}} = t^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А3}} + t_{\text{УРОВ.А3}} + \Delta t, \tag{1.19}$$

где $t_{\text{УРОВ.А3}}$ – выдержка времени УРОВ терминала защиты А3.

1.2.3 Время срабатывания третьей ступени

Выбор выдержки времени третьей ступени производится по ступенчатому принципу, для участков сети с односторонним питанием (рисунок 1.3).

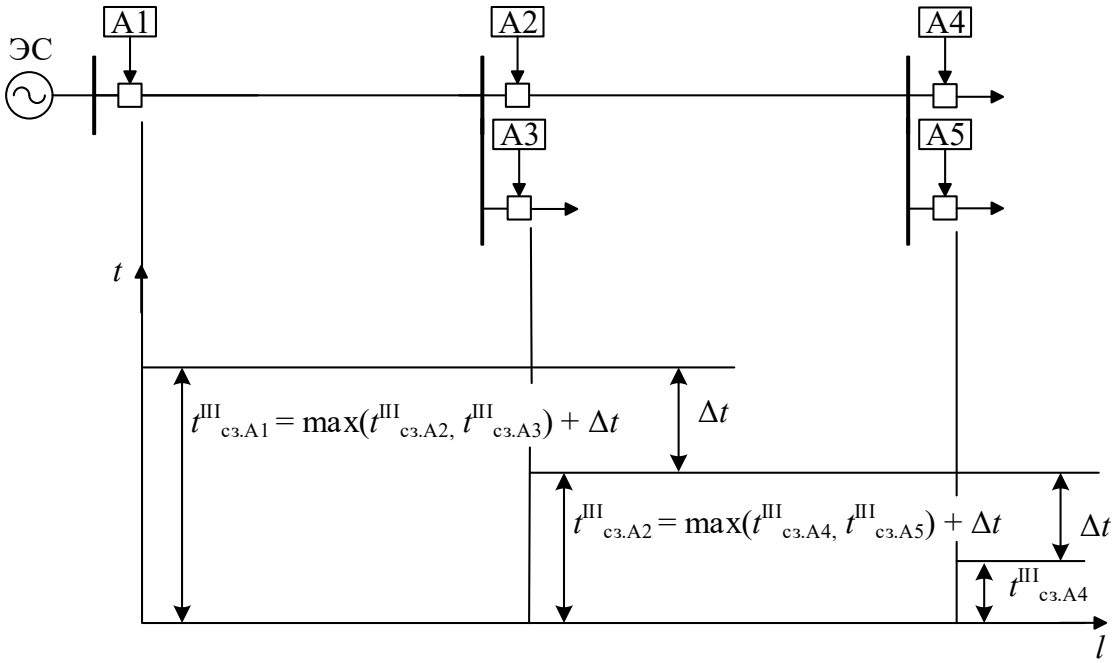

Рисунок 1.3 – Выбор выдержек времени третьих ступеней для участка сети с односторонним питанием

Для участков сети с двухсторонним питанием, выбор выдержек времени производится по встречно-ступенчатому принципу (рисунок 1.4).

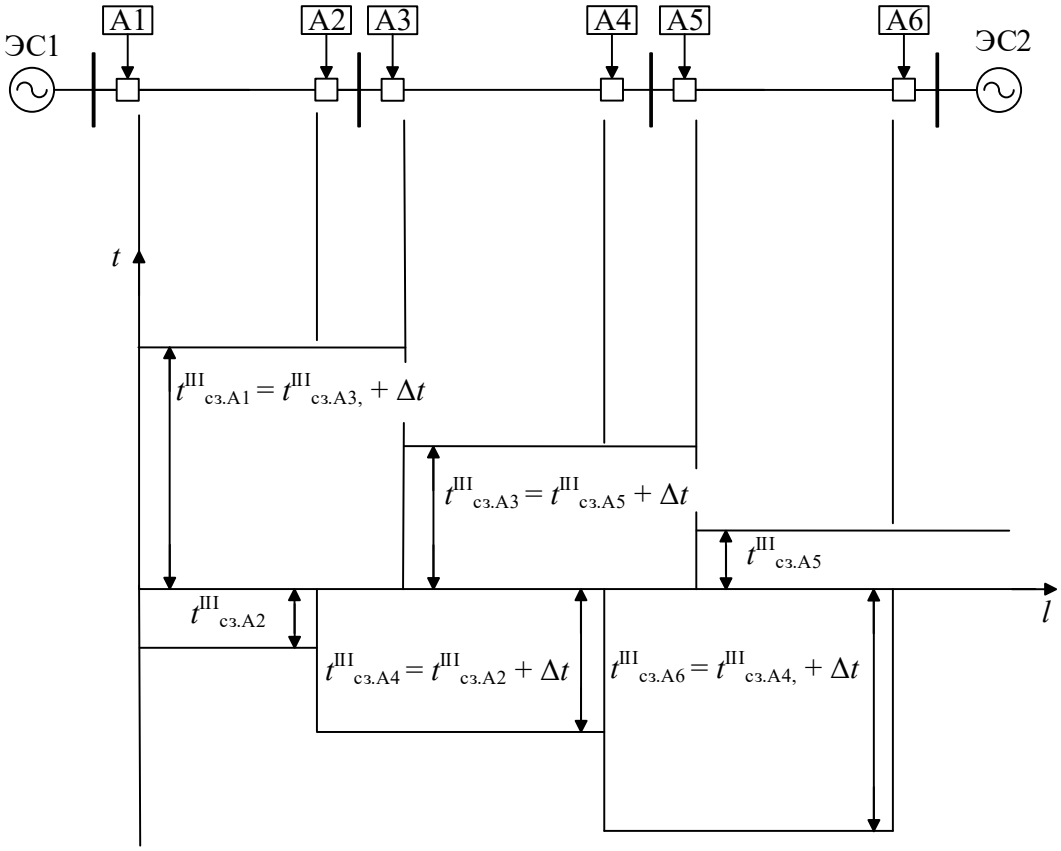

Рисунок 1.4 – Выбор выдержек времени третьих ступеней для участка сети с двухсторонним питанием

На выбор выдержек времени третьих ступеней дистанционных защит влияет сопротивление срабатывания третьей ступени защиты. Если при выборе уставок зона третьей ступени полностью охватывает зону второй ступени защит смежного объекта (рисунок 1.5), то время срабатывания ступени выбирается с учётом времени срабатывания третьих ступеней защиты смежного объекта:

$$t^{III}_{с.з.А1} = t^{III}_{с.з.см} + \Delta t, \tag{1.20}$$

где $t^{III}_{с.з.см}$ – время срабатывания третьей ступени дистанционной защиты смежного объекта.

Если при выборе уставок зона третьей ступени не полностью охватывает зону второй ступени защит смежного объекта (рисунок 1.6), то время срабатывания ступени выбирается с учётом времени срабатывания второй ступени защиты смежного объекта:

$$t^{III}_{с.з.А1} = t^{II}_{с.з.см} + \Delta t, \tag{1.21}$$

где $t^{II}_{с.з.см}$ – время срабатывания второй ступени защиты смежного объекта.

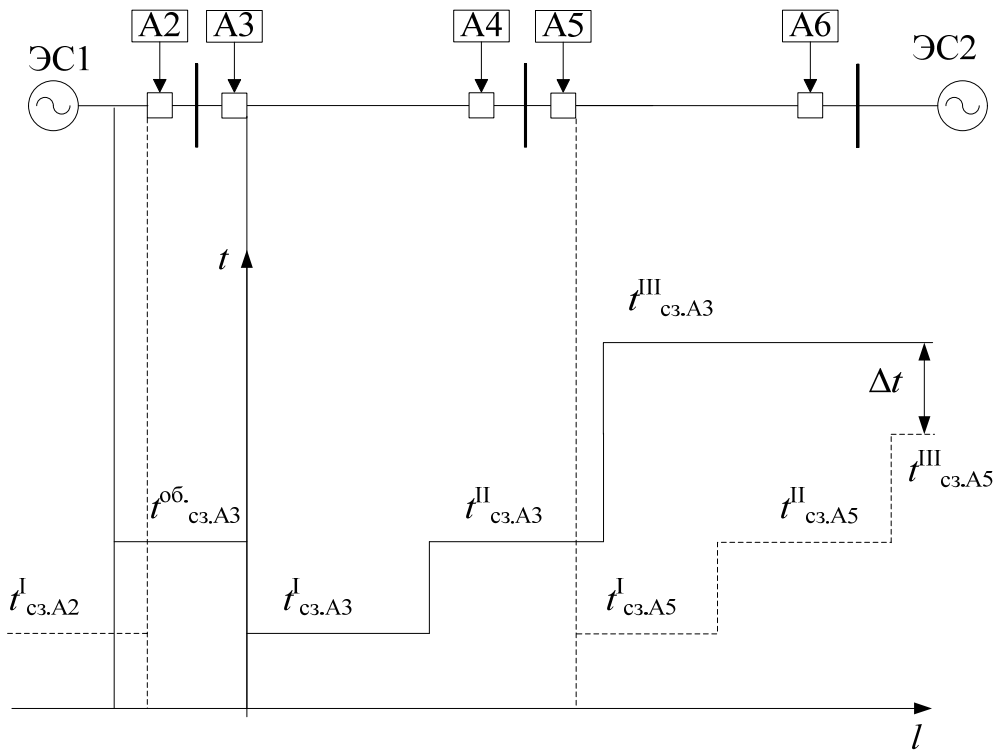

Рисунок 1.5 – Выбор выдержек времени ступеней защиты

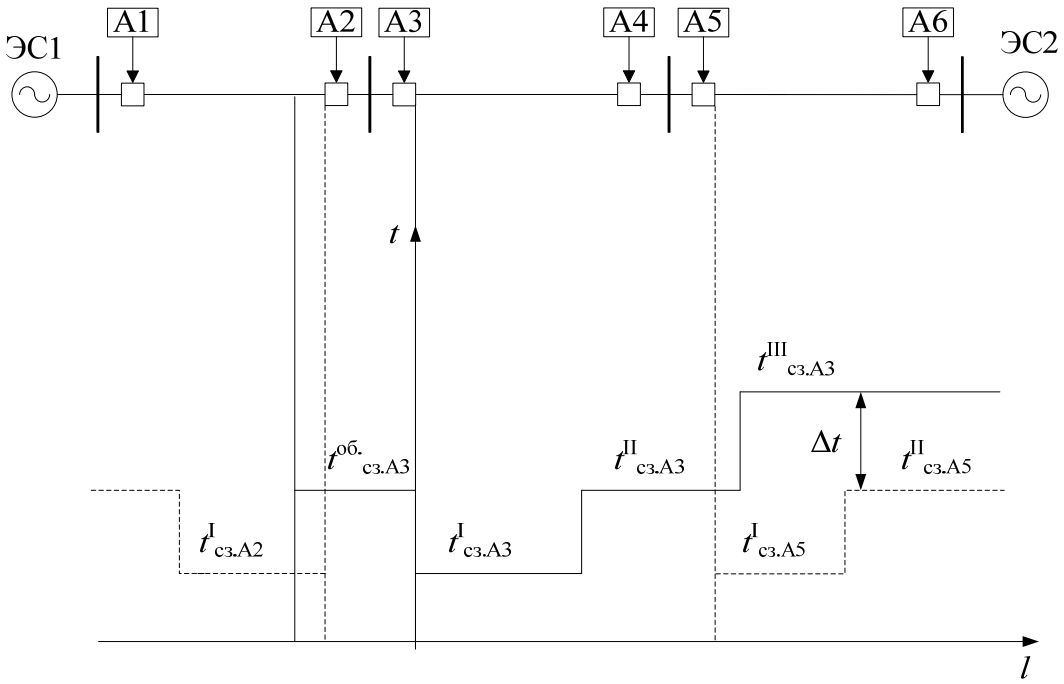

Рисунок 1.6 – Выбор выдержек времени ступеней защиты

1.2.4 Время ускорения

Выдержка времени ступени ускорения зависит от способа запуска ступени ускорения в соответствии с [2]:

– ускорение запускается автоматически:

$$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск}} = 0 \text{ с}; \tag{1.22}$$

– ускорение осуществляется телесигналом:

$$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск}} = 0{,}03 \div 0{,}05 \text{ с}; \tag{1.23}$$

– оперативное ускорение:

$$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск}} = 0{,}3 \text{ с}. \tag{1.24}$$

1.2.5 Время срабатывания обратной ступени

Выдержка времени для обратной ступени выбирается также, как и выдержка времени для второй ступени в общем случае с учётом времени работы УРОВ на ПС/А (рисунок 1.1):

$$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{об}} = t_{\text{с.з.А3}}^{\text{I}} + t_{\text{УРОВ}} + \Delta t, \tag{1.19}$$

где $t_{\text{УРОВ}}$ – выдержка времени УРОВ на ПС/А.

Критерии выбора выдержки времени сведены в таблице № 1.2

Таблица № 1.2 – Время срабатывания

Ступень		Время срабатывания
Первая ступень (Iст.)		$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{I}} = 0$ с
Вторая ступень (II ст.)		$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{II}} = t_{\text{с.з.А3}}^{\text{I}} + \Delta t$ или $t_{\text{с.з.А1}}^{\text{II}} = t_{\text{УРОВ.А3}} + \Delta t$ см. 1.2.2
Третья ступень (III ст.)		$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}} = t_{\text{с.з.см}}^{\text{III}} + \Delta t$ или $t_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}} = t_{\text{с.з.см}}^{\text{II}} + \Delta t$ см. 1.2.3
Ступень ускорения (ст. уск.)	Автоускорение	$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск}} = 0$ с
	Телеускорение	$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск}} = 0{,}03 \div 0{,}05$ с
	Оперативное ускорение	$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск}} = 0{,}3$ с
Обратная ступень (об. ст.)		$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{об}} = t_{\text{УРОВ}} + \Delta t$

2 РАСЧЁТ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

2.1 Особенности защиты от междуфазных КЗ

При междуфазных КЗ замер сопротивления осуществляется по контуру фаза-фаза:

$$\underline{Z}_{\text{Ф}-\text{Ф}} = \frac{\underline{U}_{\text{л}}}{\underline{I}_{\text{л}}} = \frac{\underline{U}_{\text{ф}1} - \underline{U}_{\text{ф}2}}{\underline{I}_{\text{ф}1} - \underline{I}_{\text{ф}2}}, \tag{2.1}$$

где $\underline{U}_{\text{л}}$ – линейное напряжение повреждённых фаз; $\underline{U}_{\text{ф}1}$, $\underline{U}_{\text{ф}2}$ – фазные напряжения повреждённых фаз; $\underline{I}_{\text{л}}$ – линейный ток повреждённых фаз; $\underline{I}_{\text{ф}1}$, $\underline{I}_{\text{ф}2}$ – фазный ток повреждённых фаз.

2.2 Отстройка от нагрузочного режима

Характеристика нагрузочного режима приведена на рисунке 2.1. Отстройка от нагрузочного режима в устройстве МР771 производится посредством выреза характеристики нагрузочного режима из характеристики срабатывания (рисунок 2.2).

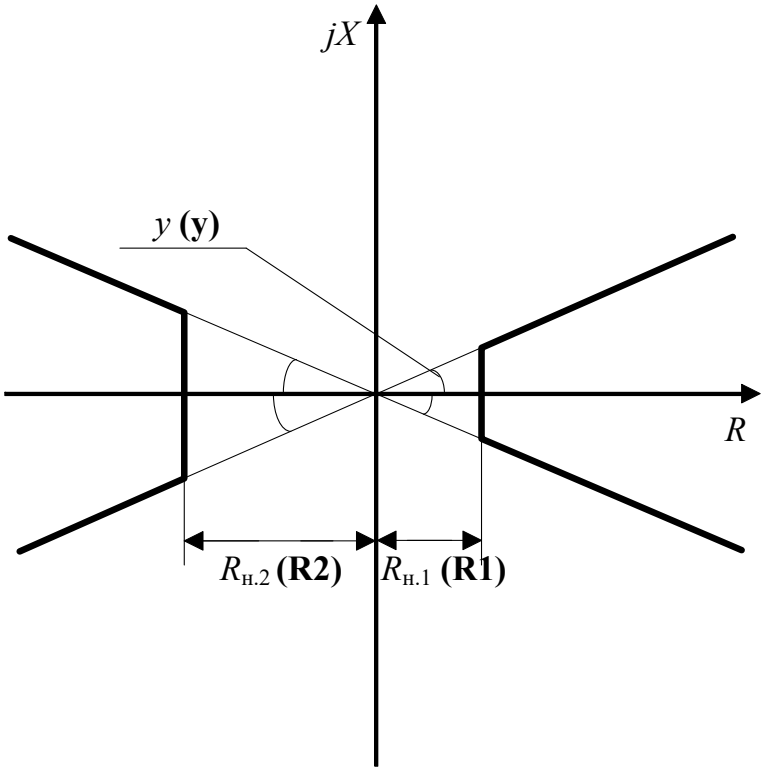

Рисунок 2.1 – Характеристика нагрузочного режима

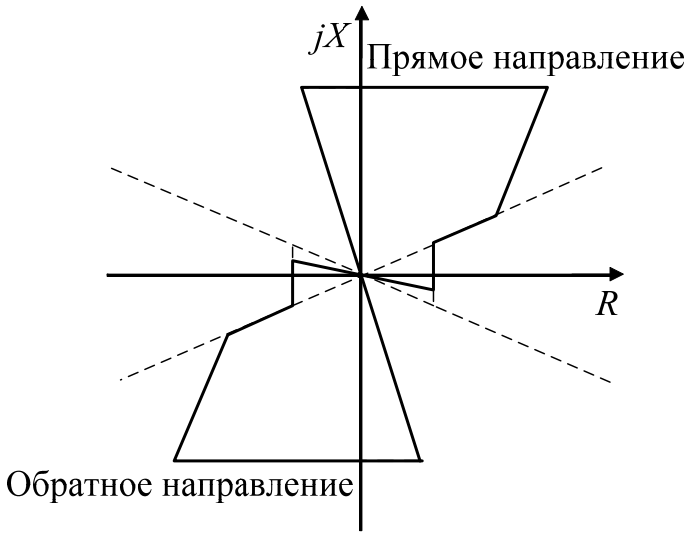

Рисунок 2.2 – Направленная характеристика срабатывания дистанционного органа при отстройке от нагрузочного режима

Для задания нагрузочной характеристики необходимо определить максимальный угол нагрузки y (**y**), минимальное активное сопротивление нагрузочного режима в прямом направлении $R_{н.1}$ (**R1**) и минимальное активное сопротивления нагрузочного режима в обратном направлении $R_{н.2}$ (**R2**).

y (**y**) – максимальный угол нагрузки, соответствующий номинальной нагрузке сети, задаётся в градусах [2]:

$$\mathbf{y} = y = \mathrm{arctg}\left(\frac{Q_{\text{наг}}}{P_{\text{наг}}}\right) + 5^{\circ}. \tag{2.2}$$

Если данные по активной и реактивной мощности не известны, то рекомендуется принимать угол нагрузки равным 25° в соответствии с [2].

$R_{н.1}$ (**R1**) – уставка для нагрузочной характеристики в прямом направлении по оси активных сопротивлений:

$$\mathbf{R1} = R_{\text{н.1}} = K_{\text{отс}} \cdot Z_{\text{мин.1}} \cdot \cos y, \tag{2.3}$$

где $Z_{\text{мин.1}}$ – минимальное сопротивление в месте установки защиты, соответствующее режиму передачи максимальной активной мощности в прямом направлении; $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 0,85.

$R_{н.2}$ (**R2**) – уставка для нагрузочной характеристики в обратном направлении по оси активных сопротивлений:

$$\mathbf{R2} = R_{\text{н.2}} = K_{\text{отс}} \cdot Z_{\text{мин.2}} \cdot \cos y, \tag{2.4}$$

где $Z_{\text{мин.2}}$ – минимальное сопротивление в месте установки защиты, соответствующее режиму передачи максимальной активной мощности в обратном направлении.

Минимальное сопротивление в месте установки защиты, соответствующее режиму передачи максимальной мощности, рассчитывается с учётом самозапуска электродвигателей:

$$Z_{\text{мин}} = \frac{U_{\text{мин}}}{\sqrt{3} \cdot K_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{макс}}}, \tag{2.5}$$

где $U_{\text{мин}}$ – минимально допустимое напряжение, принимается равным $0{,}9 \cdot U_{\text{ном}}$; $I_{\text{макс}}$ – максимальный рабочий ток нагрузки; $K_{\text{сзп}}$ – коэффициент учитывающий увеличение тока при самозапуске электродвигателей, ориентировочно может приниматься равным 1,5 – 2,0, в зависимости от конкретных условий должен уточнятся расчётом.

При недостаточности информации о максимальном токе нагрузки допускается принимать его значение равным номинальному току трансформатора тока.

2.3 Выбор направления ступеней дистанционной защиты

Для участков сети с двухсторонним питанием (рисунок 1.1) характеристику срабатывания дистанционной защиты рекомендуется выполнять направленной. На рисунке 2.3 приведена направленная полигональная характеристика срабатывания.

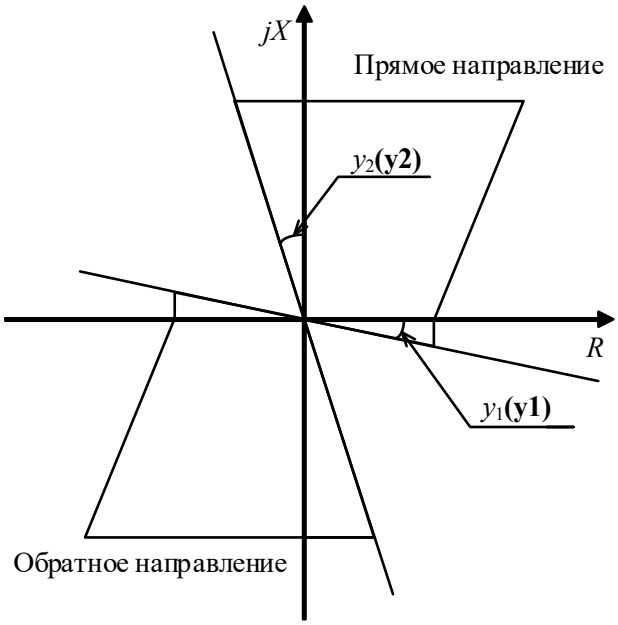

Рисунок 2.3 – Направленная полигональная характеристика срабатывания

Направленная характеристика срабатывания задаётся углами y_1 (**y1**) и y_2 (**y2**):

– y_1 (**y1**) откладывается от оси активных сопротивлений R по часовой стрелке, задаётся в градусах, рекомендуется принимать:

$$\mathrm{y}\mathbf{1} = y_1 = 22^{\circ}; \tag{2.6}$$

– y_2 (**y2**) откладывается от оси реактивных сопротивлений jX против часовой стрелки, задаётся в градусах, рекомендуется принимать:

$$\mathrm{y}\mathbf{2} = y_2 = 30^{\circ}. \tag{2.7}$$

2.4 Выбор характеристики срабатывания дистанционного органа

Уставки в устройстве МР771 задаются во вторичных величинах. Приведение первичного сопротивления к вторичному осуществляется по формуле (2.8):

$$Z_{\text{рас}} = \frac{Z_{\text{с.з}} \cdot n_{\text{TA}}}{n_{\text{TV}}}, \tag{2.8}$$

где $Z_{\text{с.з}}$ – первичное сопротивление срабатывания; $Z_{\text{рас}}$ – расчётное сопротивление срабатывания; n_{TA} – коэффициент трансформации трансформатора тока; n_{TV} – коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

В программе «Уникон» для настройки МР771 предусмотрена возможность задавать параметры срабатывания в первичных величинах. В дальнейших пояснениях, для простоты восприятия, выбор параметров будет осуществляется для первичных величин.

В устройстве МР 771 есть два типа характеристик срабатывания:

а) круговая;

б) полигональная.

Круговая характеристика рассчитывается в соответствии с [1].

Для полигональной характеристики задаются:

– активное сопротивление (**R**);

– реактивное сопротивление (**X**);

– угол наклона характеристики (**f**), задаётся в градусах;

Вид полигональной характеристики представлен на рисунке 2.4.

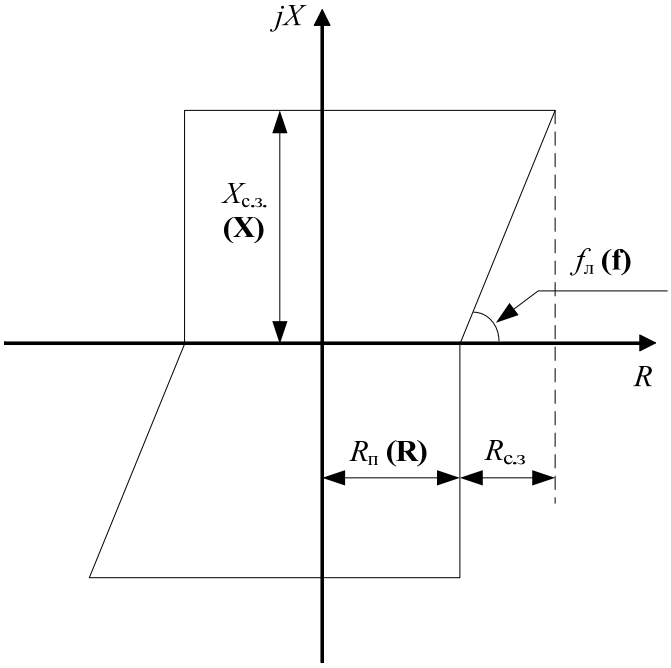

Рисунок 2.4 – Вид полигональной характеристики

2.4.1 Угол наклона полигональной характеристики

В общем случае угол наклона полигональной характеристики выбирается равным углу линии:

$$\mathbf{f} = f_л = \mathrm{arctg}\left(\frac{x_{уд.л}}{r_{уд.л}}\right), \tag{2.9}$$

где $x_{уд.л}$ – удельное индуктивное сопротивление линии; $r_{уд.л}$– удельное активное сопротивление линии; $f_л$ – угол линии.

2.4.2 Уставка по оси реактивного сопротивления

В общем случае реактивное сопротивление **X** выбирается исходя из угла линии:

$$\mathbf{X} = X_{с.з} = Z_{с.з} \cdot \sin f_л. \tag{2.11}$$

Если сопротивление срабатывания $Z_{с.з}$ вычисляется в комплексных значениях, то уставку по оси реактивных сопротивлений рекомендуется принимать равной реактивной составляющей сопротивления срабатывания:

$$\mathbf{X} = X_{с.з} = \mathrm{Im}\left(\underline{Z}_{с.з}\right). \tag{2.12}$$

2.4.3 Блокировка при качаниях

Блокировка предназначена для предотвращения ложной работы междуфазных ступеней дистанционной защиты при качаниях мощности в энергосистеме.

Для ввода в работу данной функции необходимо задать её внутреннюю и дополнительную дельта-зоны.

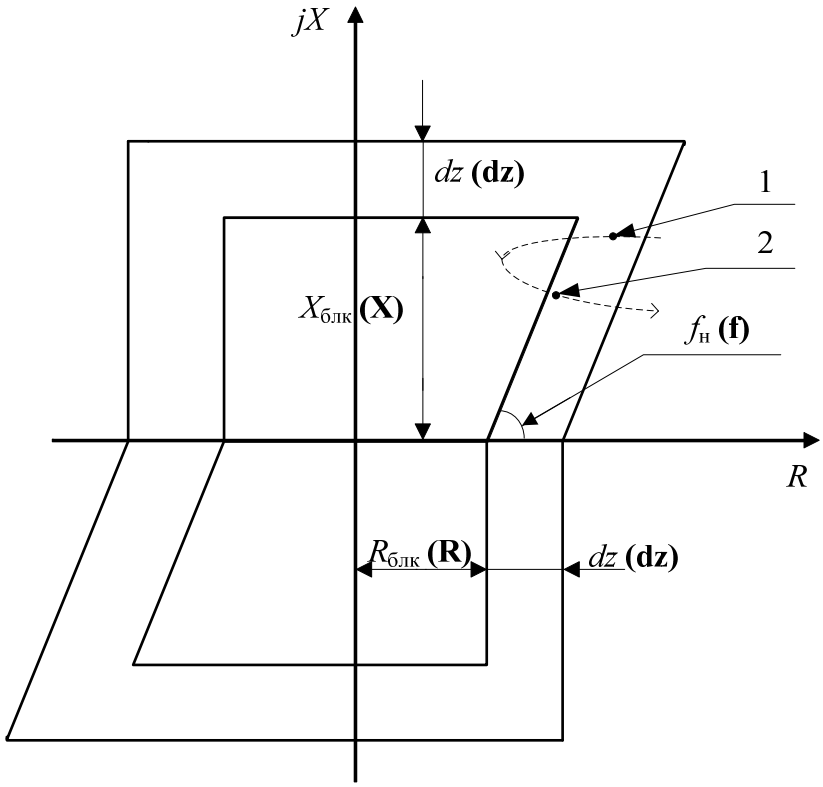

Рисунок 2.7 – Характеристика блокировки при качаниях

Зона действия блокировки определяется величиной *dz* (**dz**)**.** Сигнал блокировки формируется при одновременном выполнении следующих условий:

1) попадание рабочей точки сопротивления в зону *dz* (**dz**) (точка 1 на рисунке 2.7);

2) траектория движения рабочей точки соответствует траектории движения точки при качаниях;

3) нахождение рабочей точки в дельта-зоне больше времени, заданного уставкой T_{dz} (**Tdz**);

4) отсутствие тока нулевой последовательности (ток нулевой последовательности должен быть ниже уставки $3I_{0з}$ (**3I0з**));

5) превышение тока в фазах над уставкой $I_р$ (**Iр**).

Блокировка сбрасывается при выходе рабочей точки за пределы внутренней зоны блокировки (точка 2 на рисунке 2.7). Длительность блокировки при качаниях может быть опционально ограничена уставкой по времени $T_б$ (**Тб**).

В устройстве имеется возможность блокировать отдельно каждую ступень защиты при качаниях. Данная опция задается в настройках ступени защиты. Необходимость блокировки ступени защиты определяется выдержкой времени ступени. Если выдержка времени ступени защиты меньше 2 с, то при

качаниях рекомендуется блокировать эту ступень. Блокировать ступени с большими выдержками времени нет необходимости, так как точка сопротивления при качаниях за это время успеет выйти из зоны действия этой ступени. Чаще всего блокировке подлежит первая и вторая ступени.

Для определения режима качания необходимо задать следующие параметры:

– **R** уставка внутренней зоны блокировки по активным сопротивлениям;

– **X** уставка внутренней зоны блокировки по реактивным сопротивлениям;

– **f** уставка по углу наклона блокировочной характеристики;

– **dz** ширина зоны работы блокировки;

– **Tdz** время нахождения рабочей точки в зоне действия блокировки, задаётся в миллисекундах, минимальное значение 20 мс.;

Внутренняя зона блокировки должна быть равной наибольшей зоне из ступеней защит, которым требуется блокировка.

Уставка по оси реактивных сопротивлений принимается равной уставке ступени, которая подлежит блокировке:

$$\mathbf{X} = X_{\text{блк}} = X_{\text{с.з}}, \tag{2.13}$$

где $X_{\text{блк}}$ – уставка по оси реактивных сопротивлений для внутренней зоны блокировки (рисунок 2.7); $X_{\text{с.з}}$ – уставка по оси реактивных сопротивлений ступени защиты, которая подлежит блокировке.

Угол наклона $f_{\text{н}}$ характеристики блокировки выбирается равным углу наклона боковой стороны характеристики ступени, которая подлежит блокировке.

Уставка по оси активных сопротивлений выбирается с учётом отстройки от нагрузочного режима, и количества расчётов необходимых устройству для анализа траектории движения точки сопротивления.

Если угол наклона боковой характеристики больше 63,5°:

$$\mathbf{R} = R_{\text{блк}} = 0{,}586 \cdot R_{\text{н.мин}} - 0{,}69 \cdot R_{\text{с.з}}, \tag{2.14}$$

где $R_{\text{н.мин}}$ – минимальное активное сопротивление в месте установки защиты в режиме максимальных нагрузок; $R_{\text{с.з}}$ – активное сопротивление срабатывания ступени защиты которая подлежит блокировке при металлическом КЗ, принимается равным:

$$R_{\text{с.з}} = Z_{\text{с.з}} \cdot \cos f_{\text{н}}, \tag{2.15}$$

где $Z_{\text{с.з}}$ – сопротивление срабатывания ступени защиты; $f_{\text{н}}$ – угол наклона боковой стороны характеристики.

Минимальное активное сопротивление в месте установки защиты в режиме максимальных нагрузок рассчитывается следующим образом:

$$R_{\text{н.мин}} = Z_{\text{мин}} \cdot \cos y, \tag{2.16}$$

где $Z_{\text{мин}}$ – минимальное сопротивление нагрузочного режима в месте установки защиты с учётом самозапуска, рассчитывается по формуле (2.5); y – угол нагрузки, выбирается в соответствии с пунктом 2.1.

Если угол наклона боковой стороны характеристики меньше 63,5°:

$$\mathbf{R} = R_{\text{блк}} = \frac{0{,}85 \cdot R_{\text{н.мин}} - X_{\text{блк}} \cdot \text{tg}(90 - f_{\text{н}})}{(1{,}3 + 0{,}3 \cdot \text{tg}(90 - f_{\text{н}}))}, \tag{2.17}$$

где $X_{\text{блк}}$ – уставка для внутренней характеристики блокировки, рассчитывается по формуле (2.13).

Дельта зона выбирается исходя из уставки по активной оси внутренней зоны блокировки:

$$\mathbf{dz} = dz = 0{,}3 \cdot R_{\text{блк}}. \tag{2.18}$$

Уставку по времени нахождения рабочей точки в дельта-зоне **Tdz** рекомендуется принимать равной 20 мс.

2.4.4 Уставка по оси активного сопротивления с учётом отстройки от сопротивления дуги

Уставку по оси активного сопротивления **R** для основных ступеней рекомендуется выбирать исходя из чувствительности к КЗ с переходным сопротивлением. Переходное сопротивление (сопротивление дуги) рассчитывается:

$$r_{\text{д}} = U_{\text{д}}^{*} \cdot \frac{L_{\text{д}}}{I_{\text{д}}}, \tag{2.19}$$

где $r_{\text{д}}$ – сопротивление дуги в начальный момент времени; $L_{\text{д}}$ – длина дуги, принимается равной расстоянию между фазами; $U_{\text{д}}^{*}$ – модуль напряжения дуги на единицу длины, в различных источниках значение удельного напряжения колеблется в пределах 1000 – 3000 В/м, $I_{\text{д}}$ – действующее значение тока в дуге.

В соответствии с [3] при производстве упрощённых расчётов токов КЗ (например, в условиях проектирования релейной защиты) допустимо не учитывать влияние переходных сопротивлений на значение токов КЗ. Таким образом, на стадии проектирования ток дуги $I_{\text{д}}$ можно принять равным сумме фазных токов, подтекающих к точке КЗ от различных источников при металлическом КЗ. Для наиболее точных расчётов ток дуги необходимо рассчитывать итерационными способом или с помощью ЭВМ.

Уставка по оси активных сопротивлений выбирается следующим образом:

$$\mathbf{R} = R_{\text{п}} = K_{\text{отс}} \cdot k_{\text{разд}} \cdot \frac{r_{\text{д}}}{2 \cdot k_{\text{т.д}}}, \tag{2.20}$$

где $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 1,3; $k_{\text{т.д}}$ – коэффициент токораспределения, равен отношению тока в месте установки защиты к

току дуги [4]; $k_{разд}$ – коэффициент, учитывающий раздутие дуги с течением времени, в соответствии с [4]:

для первой ступени $k_{разд} = 1$;

для второй ступени $k_{разд} = 3 \div 5$;

для третьей ступени $k_{разд} = 7 \div 10$.

При введении блокировки в работу уставка второй ступени должна быть не больше уставки активного сопротивления внутренней характеристики блокировки, в противном случае уставку второй ступени необходимо принимать равной уставке блокировки.

Для ступени ускорения и обратной ступени уставки выбираются в соответствии с пунктом 2.4.5.

2.4.5 Уставка по оси активного сопротивления с учётом отстройки от нагрузочного режима

При невозможности учесть переходное сопротивление дуги уставку необходимо выбирать по условию отстройки от минимального сопротивления нагрузки.

При необходимости блокировать третью ступень при качаниях уставка для третьей ступени выбирается равной уставке блокировки, при этом для первой и второй ступени уставки выбираются по ступенчатому принципу с коэффициентом согласования 0,8.

При необходимости блокировать вторую ступень при качаниях или в случаях, если выполнения блокировки при качаниях не требуется, уставки могут быть выбраны следующим образом:

Уставка третьей ступени.

Уставка третьей ступени отстраивается от минимального сопротивления нагрузки:

$$\mathbf{R} = R_{п}^{III} = 0{,}85 \cdot R_{н.мин}, \tag{2.21}$$

где $R_{н.мин}$ – минимальное сопротивление нагрузки; рассчитывается по формуле (2.16).

Окончательная отстройка от минимального сопротивления нагрузки должна быть обеспечена применением выреза нагрузки.

Уставка второй ступени.

При необходимости блокировать вторую ступень при качаниях уставка для второй ступени принимается равной уставке внутренней характеристики блокировки:

$$\mathbf{R} = R_{п}^{II} = R_{блк}. \tag{2.22}$$

При отсутствии необходимости блокировать при качаниях какую-либо ступень, уставка для второй ступени выбирается следующим образом:

$$\mathbf{R} = R_{п}^{II} = 0{,}586 \cdot R_{н.мин} - 0{,}69 \cdot R_{с.з}^{II}, \tag{2.23}$$

где $R_{\text{с.з}}^{\text{II}}$ – сопротивление срабатывания второй ступени защиты (рисунок 2.4).

Уставка первой ступени.

Сопротивление срабатывания для первой ступени отстраивается от сопротивления второй ступени:

$$R_{\text{п}}^{\text{I}} = 0{,}8 \cdot R_{\text{п}}^{\text{II}}. \tag{2.24}$$

Уставка ступени ускорения.

Уставка по оси активного сопротивления для ступени ускорения выбирается равной уставке второй ступени:

$$R_{\text{п}}^{\text{уск}} = R_{\text{п}}^{\text{II}}, \tag{2.25}$$

где $R_{\text{п}}^{\text{уск}}$ – уставка по оси активных сопротивлений для ступени ускорения.

Уставка обратной ступени.

Уставка по оси активного сопротивления для обратной ступени принимается равной 0,8 сопротивления первой ступени:

$$R_{\text{п}}^{\text{об}} = 0{,}8 \cdot R_{\text{п}}^{\text{I}}, \tag{2.26}$$

$R_{\text{п}}^{\text{I}}$ – уставка первой ступени защиты за спиной.

Помимо вышеперечисленных параметров, для введения ступени защиты в работу необходимо задать минимальный пусковой ток. Пусковой ток **Iср** должен составлять не менее $0{,}3I_{\text{Н}}$ трансформатора тока.

3 РАСЧЁТ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

3.1 Особенности защиты от однофазных КЗ на землю.

Для защит от замыкания на землю обычно используют первую ступень, обратную ступень, и ступень ускорения. В некоторых случаях дополнительно применяют вторую ступень. Если вторая ступень не рассчитывается, то сопротивление срабатывания ступени ускорения принимается исходя из требуемой чувствительности:

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск}} = 1{,}25 \cdot Z_{\text{л}}, \tag{3.1}$$

где $Z_{\text{л}}$ – сопротивление защищаемой линии.

При однофазных КЗ на землю замер осуществляется по контуру фаза-земля, исходя из этого дополнительно необходимо учитывать сопротивление нулевой последовательности. Формула для определения сопротивления повреждённой фазы будет выглядеть следующим образом:

$$\underline{Z}_{\Phi-N} = \frac{\underline{U}_{\text{ф}}}{\underline{I}_{\text{ф}} + \underline{k}_0 \cdot 3 \cdot \underline{I}_0}, \tag{3.2}$$

где $\underline{Z}_{\Phi-N}$ – сопротивление контура фаза – земля; $\underline{U}_{\text{ф}}$ – фазное напряжение повреждённой фазы; $\underline{I}_{\text{ф}}$ – полный ток в повреждённой фазе; $\underline{I}_0$ – ток нулевой последовательности; $\underline{k}_0$ – коэффициент компенсации тока нулевой последовательности, вычисляется следующим образом:

$$\underline{k}_0 = \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1}{3 \cdot \underline{Z}_1}, \tag{3.3}$$

где $\underline{Z}_0$ – сопротивление короткого замыкания нулевой последовательности; $\underline{Z}_1$ – сопротивление короткого замыкания прямой последовательности.

Для компенсации нулевой последовательности в устройстве МР771 необходимо задать R_0 (**R0**), R_1 (**R1**), X_0 (**X0**) и X_1 (**X1**), где перечисленные параметры - это активные и реактивные сопротивления соответствующей последовательности, между местом установки защиты и местом действия ступени при металлическом КЗ (рисунок 3.1).

Сопротивления прямой и нулевой последовательности выбираются с учётом конфигурации сети.

Для участка сети со сложной конфигурацией расчёт сопротивления нулевой последовательности можно производить с использованием фазных токов, токов нулевой последовательности и фазных напряжений при коротком замыкании в конце защищаемой зоны соответствующей ступени защиты:

$$\underline{Z}_0 = \frac{\underline{U}_ф + \underline{Z}_1 \cdot (\underline{I}_ф - \underline{I}_0)}{\underline{I}_0}, \quad (3.4)$$

где $U_ф$ – фазное напряжение на зажимах защиты, при КЗ в конце защищаемой зоны; $\underline{I}_ф$ – фазный ток при КЗ в конце защищаемой зоны; $\underline{I}_0$ – ток нулевой последовательности при КЗ в конце зоны действия рассматриваемой ступени защиты; $\underline{Z}_1$ – сопротивление прямой последовательности между местом установки защиты и концом зоны действия рассматриваемой ступени:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j \cdot X_1,$$

где R_1 (**R1**) – активное сопротивление прямой последовательности; X_1(**X0**) – реактивное сопротивление нулевой последовательности;

$\underline{Z}_0$ – сопротивление нулевой последовательности при КЗ в конце зоны действия рассматриваемой ступени защиты:

$$\underline{Z}_0 = R_0 + j \cdot X_0,$$

где R_0 (**R0**) – активное сопротивление нулевой последовательности; X_0(**X0**) – реактивное сопротивление нулевой последовательности.

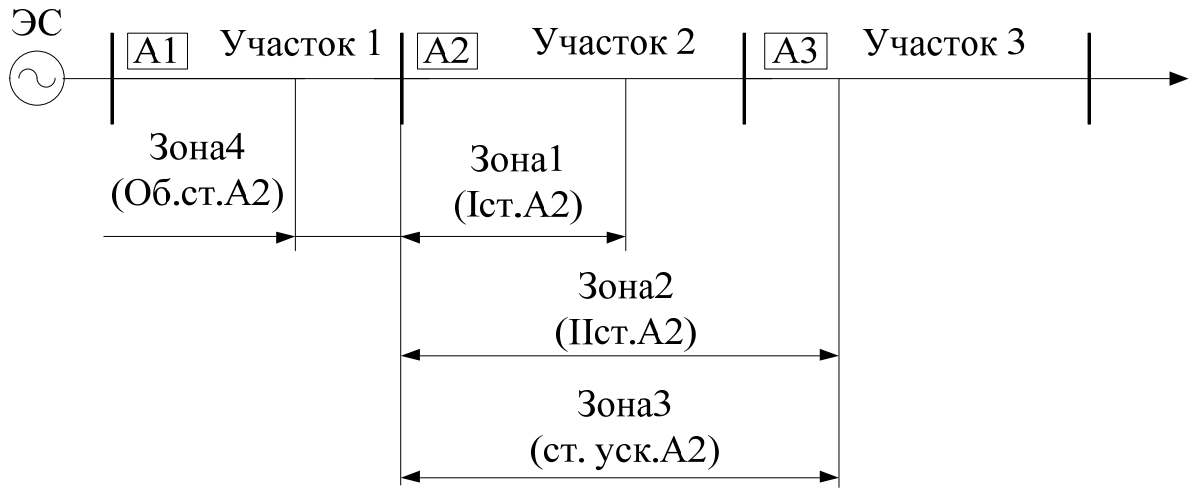

Рисунок 3.1 – Зоны для компенсации нулевой последовательности

Для участков сети с параллельными линиями на замер дистанционных защит влияет протекание токов нулевой последовательности по параллельной неповреждённой линии $\underline{I}_{0п}$ (рисунок 3.2). Это влияние обуславливается сопротивлением взаимоиндукции $\underline{Z}_{0м}$. Сопротивление взаимоиндукции $\underline{Z}_{0м}$ можно рассчитать в соответствии с [3].

В зависимости от режима работы участка сети, представленного на рисунке 3.2, коэффициенты компенсации необходимо изменять. Возможны следующие режимы работы участка сети (параметры для задания коэффициента компенсации выбираются для линии 2):

– линия 1 отключена:

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_{0л2}; \quad (3.5)$$

– линия 1 отключена и заземлена:

$$\underline{Z}_0 = \left(\underline{Z}_{0л2} - \frac{\underline{Z}_{0м}^2}{\underline{Z}_{0л1}}\right); \quad (3.6)$$

– линия 1 включена:

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_{0л2} + \underline{Z}_{0м}, \quad (3.7)$$

где $\underline{Z}_{0л1}$ – первичное сопротивление нулевой последовательности линии 1; $\underline{Z}_{0л2}$ – первичное сопротивление нулевой последовательности линии 2; $\underline{Z}_{0м}$ – сопротивление взаимоиндукции. В устройстве МР771 различные режимы работы параллельной линии могут быть учтены в разных группах уставок.

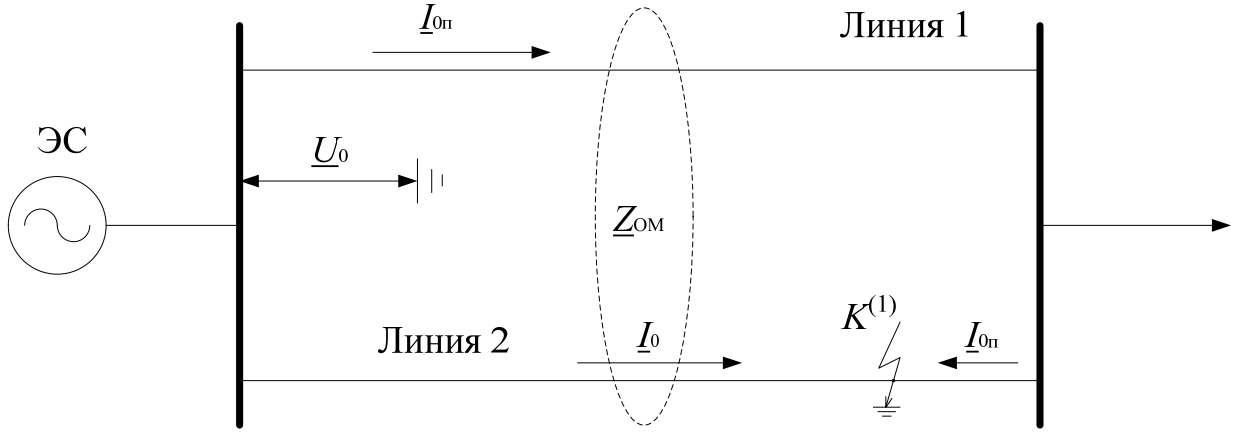

Рисунок 3.2 – Влияние взаимоиндукции при коротких замыканиях на землю.

3.2 Выбор характеристики срабатывания для дистанционной защиты от КЗ на землю

Для полигональной характеристики задаются:

– активное сопротивление (**R**);

– реактивное сопротивление (**X**);

– угол наклона характеристики (**f**), задаётся в градусах;

3.2.1 Угол наклона полигональной характеристики f

В общем случае угол наклона полигональной характеристики выбирается равным углу линии (формула 2.9).

3.2.2 Уставка по оси реактивного сопротивления

Реактивное сопротивление выбирается исходя из угла наклона линии:

$$\mathbf{X} = X_{с.з} = Z_{с.з} \cdot \sin f_л.$$

Если сопротивления срабатывания представлены в комплексных значениях, то уставку по оси реактивных сопротивлений можно выбрать следующим образом:

$$\mathbf{X} = X_{\text{с.з}} = \text{Im}\left(\underline{Z}_{\text{с.з}}\right).$$

3.2.3 Уставка по оси активного сопротивления с учётом отстройки от сопротивления дуги

Активное сопротивление **R** для основных ступеней выбирается исходя из переходного сопротивления, которое можно рассчитать по формуле:

$$r_{\text{п}} = k_{\text{разд}} \cdot U_{\text{д}}^{*} \cdot \frac{L_{\text{д}}}{I_{\text{д}}} + R_{\text{опор}}, \tag{3.8}$$

где $r_{\text{п}}$ – переходное сопротивление в месте возникновения КЗ; $L_{\text{д}}$ – длина дуги, задаётся в метрах (можно принять 1,2 длины гирлянды в соответствии с [1]); $I_{\text{д}}$ – действующее значение тока дуги; $R_{\text{опор}}$ – сопротивление опоры относительно земли (наибольшее сопротивлении заземляющих устройств опор ЛЭП сведены в таблице 3.1 в соответствии с [5]); $U_{\text{д}}^{*}$ – модуль напряжения дуги на единицу длины, в различных источниках значение удельного напряжения колеблется в пределах 1000 – 3000 В/м; $k_{\text{разд}}$ – коэффициент, учитывающий удлинение дуги с течением времени; в соответствии с [4]:

для первой ступени $k_{\text{разд}} = 1$;

для второй ступени $k_{\text{разд}} = 3 \div 5$;

для третьей ступени $k_{\text{разд}} = 7 \div 10$.

Таблица № 3.1 – Наибольшее сопротивление заземляющих устройств опор воздушных линий

Удельное эквивалентное сопротивление грунта (Ом·м)	Наибольшее сопротивление заземляющего устройства (Ом)
До 100	10
Более 100 до 500	15
Более 500 до 1000	20
Более 1000 до 5000	30

Так как для ступеней от однофазных КЗ осуществляется компенсация токов нулевой последовательности, то необходимо учитывать ошибку измерения, вносимую наличием переходного сопротивления в соответствии с [6]. С учётом этого уставка по оси активного сопротивления выбирается следующим образом:

$$\mathbf{R} = R_{\text{п}} = \frac{K_{\text{отс}}}{k_{\text{т.д}}} \cdot \text{Re}\left(\frac{r_{\text{п}}}{1 + \underline{k}_0}\right), \tag{3.9}$$

где $k_{\text{т.д}}$ – коэффициент токораспределения, равен отношению тока, протекающего в месте установки защиты, к току дуги; $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 1.3; $\underline{k}_0$ – коэффициент компенсации токов нулевой последовательности (рассчитывается по формуле 3.3).

Уставки для ступеней ускорения и обратной ступени выбираются в соответствии с пунктом 3.2.4.

3.2.4 Уставка по оси активного сопротивления с учётом отстройки от активного сопротивления нагрузки

При невозможности учесть переходное сопротивление дуги, уставку по оси активных сопротивлений рекомендуется отстраивать от сопротивления нагрузки по ступенчатому принципу. Выбор уставки начинается со второй ступени.

Вторая ступень.

Уставка активного сопротивления для второй ступени выбирается с учётом минимального активного сопротивления нагрузки:

$$R_{\text{п}}^{\text{II}} = 0{,}8 \cdot Z_{\text{мин}} \cdot \cos y, \tag{3.10}$$

где $Z_{\text{мин}}$ – сопротивление самозапуска в месте установки защиты; y – угол нагрузки рассчитывается исходя из мощности нагрузки:

$$y = \text{arctg}\left(\frac{Q_{\text{наг}}}{P_{\text{наг}}}\right) + 5^{\circ},$$

где $Q_{\text{наг}}$ – реактивная мощность нагрузки; $P_{\text{наг}}$ – активная мощность нагрузки. Если данные по активной и реактивной мощности не известны, то угол нагрузки принимается равным 25°.

Первая ступень.

Уставка по оси активного сопротивления первой ступени выбирается следующим образом:

$$R_{\text{п}}^{\text{I}} = 0{,}8 \cdot R_{\text{п}}^{\text{II}}, \tag{3.11}$$

где $R_{\text{п}}^{\text{I}}$ – уставка по оси активных сопротивлений для первой ступени защиты.

При отсутствии второй ступени уставка для первой ступени выбирается следующим образом:

$$R_{\text{п}}^{\text{I}} = 0{,}64 \cdot Z_{\text{мин}} \cdot \cos y. \tag{3.12}$$

Ступень ускорения.

Уставка по оси активного сопротивления для ступени ускорения выбирается следующим образом:

$$R_{\text{п}}^{\text{уск.}} = R_{\text{п}}^{\text{II}}, \tag{3.13}$$

где $R_{\text{п}}^{\text{уск.}}$ – уставка по оси активных сопротивлений для ступени ускорения.

При отсутствии второй ступени уставка ступени ускорения выбирается следующим образом:

$$R_{\text{п}}^{\text{уск}} = 1{,}25 \cdot R_{\text{п}}^{\text{I}}. \tag{3.14}$$

Уставка обратной ступени.

Уставка по оси активного сопротивления для обратной ступени принимается равной 0,8 сопротивления первой ступени:

$$R_{\text{п}}^{\text{об}} = 0{,}8 \cdot R_{\text{п}}^{\text{I}}, \tag{3.15}$$

где $R_{\text{п}}^{\text{I}}$ – уставка первой ступени защиты за спиной.

Помимо вышеперечисленных параметров, для введения ступени защиты в работу необходимо задать минимальный пусковой ток. Пусковой ток **Iср** должен составлять не менее $0{,}3I_{\text{Н}}$ трансформатора тока.

3.3 Задание направленности ступеней дистанционной защиты

В устройстве МР771 уставки для определения направления задаются одинаковыми для дистанционных защит от междуфазных КЗ и однофазных КЗ на землю. Характеристика срабатывания при задании направления приведена на рисунке 2.3.

– y_1(**y1**) откладывается от оси активных сопротивлений R по часовой стрелке, задаётся в градусах, рекомендуется принимать:

$$\text{y}\mathbf{1} = y_1 = 22^{\circ};$$

– y_2 (**y2**) откладывается от оси реактивных сопротивлений jX против часовой стрелки, задаётся в градусах, рекомендуется принимать:

$$\text{y}\mathbf{2} = y_2 = 30^{\circ}.$$

4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ УСТАВОК КОНТРОЛЯ ЦЕПЕЙ ТН

Функция контроля ТН служит для обнаружения неисправности вторичных цепей ТН, подключенных к аналоговым входам МР771 и предупреждения ложной работы дистанционной защиты.

Алгоритм работы на основе напряжения и тока обратной последовательности должен применяться при установке МР771 в сетях с изолированной нейтралью. Применять алгоритм на основе напряжения и тока нулевой последовательности в сетях с изолированной нейтралью не рекомендуется ввиду возможности его излишнего срабатывания при замыканиях на землю.

Алгоритм контроля цепей ТН по току и напряжению нулевой последовательности должен применяться при установке МР771 в сети с глухозаземленной нейтралью. Применять алгоритм на основе напряжения и тока обратной последовательности в сетях с глухозаземленной нейтралью не рекомендуется, поскольку в таких сетях возможно возникновение однофазных коротких замыканий с высоким уровнем токов нулевой последовательности и низким уровнем обратной тока последовательности.

В МР771 предусмотрен контроль положения автоматов цепей ТН. Блок-контакт отключенного положения соответствующего автомата необходимо завести на вход «Неиспр. ТН», «Неиспр. ТНn» или «Неиспр. ТНn1»

Таким образом для контроля целостности цепей ТН рекомендуется задавать следующие функции:

1. В сетях с глухозаземлённой нейтралью:
   – контроль цепей ТН по $\boldsymbol{3I0}$ и $\boldsymbol{3U0}$;
   – «**Обр. 3-х фаз**»;
   – контроль положения автомата цепей ТН.
2. В сетях с изолированной нейтралью:
   – контроль цепей ТН по $\boldsymbol{I2}$ и $\boldsymbol{U2}$;
   – «**Обр. 3-х фаз**»;
   – контроль положения автомата цепей ТН.

Значения уставок рекомендуется принять следующими:

– для неисправностей ТН по нулевой последовательности:

$$\boldsymbol{3I0} = 0{,}15\ I_{\text{Н}};$$

$$\boldsymbol{3U0} = 45\ \text{В};$$

– для неисправностей ТН по обратной последовательности:

$$\boldsymbol{I2} = 0{,}05\ I_{\text{Н}};$$

$$\boldsymbol{U2} = 15\ \text{В};$$

– для контроля обрыва трех фаз цепей ТН:

$$\boldsymbol{dI} = 5\ \%;$$

$$\boldsymbol{dU} = 60\ \%;$$

$$\boldsymbol{I_{min}} = 0{,}05\text{Iн};$$

$$\boldsymbol{U_{min}} = 5\ \text{В};$$

$$\boldsymbol{I_{max}} = 1{,}1 I_{\text{макс}}\ ;$$

где $I_{\text{макс}}$ – максимальный ток нагрузки.

– для контроля наличия фазных напряжений:

$$\boldsymbol{U_{max}} = 50\ \text{В}.$$

– **Уставка $\boldsymbol{Td}$** (задержка формирования сигнала неисправности). При обнаружении неисправности цепей ТН с уставкой по времени таймера ($\boldsymbol{Td}$) формируется сигнал «НЕИСПР. ТН», который служит для формирования общего сигнала «НЕИСПР.». Необходимо задавать не менее 100 мс, базовое значение уставки следующее:

$$\boldsymbol{Td} = 1000\text{мс}.$$

– **Уставка $\boldsymbol{Ts}$**. Если неисправность цепей ТН определяется более времени задаваемого уставкой ($\boldsymbol{Ts}$), то сигнал становится на самоподхват. Сброс сигнала может осуществляться вручную или автоматически. Задавать не менее 100 мс, базовое значение уставки следующее:

$$\boldsymbol{Ts} = 500\text{мс}.$$

5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ УСТАВОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОФРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ

Для определения поврежденной фазы (ОПФ) в устройствах МР771 в.1.11 и выше реализован алгоритм на основе сравнения: напряжений и токов каждой фазы; отношений углов обратной, нулевой и прямой последовательностей токов; приращений линейных токов; отношения фазных напряжений.

Обнаружение режима трёхфазного КЗ выполняется двумя способами:

– по наличию изменения всех линейных токов;

– по превышению токов трёх фаз уставки $\boldsymbol{I_{max}}$ и снижению напряжения трёх фазы ниже уставки $\boldsymbol{U_{min}}$.

Значения уставок $\boldsymbol{U_{min}}$ и $\boldsymbol{I_{max}}$ рассчитываются следующим образом:

$$\boldsymbol{I_{max}} = 1{,}1 \cdot \frac{I_{\text{макс}}}{I_{\text{ТТ}}},$$

где $I_{\text{макс}}$ – максимальный рабочий ток нагрузки.

$$\boldsymbol{U_{min}} = 0{,}8 \cdot U_{\text{ном}},$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное фазное напряжение.

Остальные алгоритмы ОПФ реализуются на относительном принципе и не требуют расчета уставок.

В МР771 реализован алгоритм обнаружения перехода однофазного КЗ в междуфазное. Если уставка «**Сброс 1-го КЗ при МФКЗ**» введена, то при пуске ступеней от однофазных КЗ с последующим определением МФ КЗ алгоритм сбрасывает пуск (отсчёт выдержки времени) ступени от однофазных повреждений.

Базовое значение уставки «**Сброс 1-го КЗ при МФКЗ**» – выведен. При такой уставке при переходе однофазного КЗ в междуфазное КЗ разрешается параллельная работа дистанционных защит по соответствующим междуфазному и однофазному контурам.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Пример расчёта характеристик срабатывания для терминалов МР771

В данном приложении приведен пример выбора характеристик срабатывания для терминала МР771. Схема участка энергосистемы представлена на рисунке А.1.

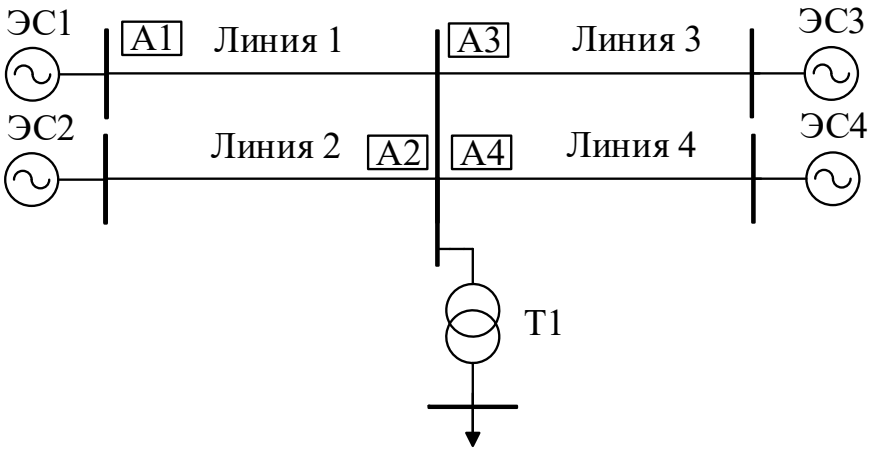

Рисунок А.1 – схема участка энергосистемы

Параметры линии 1:
$X_{л.1} = 4{,}81$ Ом; $R_{л.1} = 1{,}99$ Ом; $Z_{л.1} = 5{,}21$ Ом; $f_{л.1} = 68$ °;
$X_{л0.1} = 14{,}66$ Ом; $R_{л0.1} = 4{,}95$ Ом; $Z_{л0.1} = 15{,}47$ Ом;
$f_{л0.1} = 71{,}3$ °.
Параметры линии 2:
$X_{л.2} = 4{,}81$ Ом; $R_{л.2} = 1{,}99$ Ом; $Z_{л.2} = 5{,}21$ Ом; $f_{л.2} = 68$ °.
Параметры линии 3:
$X_{л.3} = 1{,}75$ Ом; $R_{л.3} = 0{,}73$ Ом; $Z_{л.3} = 1{,}9$ Ом; $f_{л.3} = 68$ °.
Параметры линии 4:
$X_{л.4} = 2{,}26$ Ом; $R_{л.4} = 0{,}94$ Ом; $Z_{л.4} = 2{,}5$ Ом; $f_{л.4} = 68$ °.
Параметры трансформатора Т1:
$X_{т1} = 69{,}5$ Ом.
Параметры энергосистемы ЭС 1:
$S_{кз.ЭС1} = 63{,}0$ МВА; $U_{ном.} = 110$ кВ.
Параметры энергосистемы ЭС 2:
$S_{кз.ЭС2} = 46{,}5$ МВА; $U_{ном.} = 110$ кВ.
Параметры энергосистемы ЭС 3:
$S_{кз.ЭС3} = 756$ МВА; $U_{ном.} = 110$ кВ.
Параметры энергосистемы ЭС 4:

$S_{\text{кз.ЭС4}} = 601$ МВА; $U_{\text{ном.}} = 110$ кВ.

Расчёт произведён для комплекта защиты А1.

Коэффициент трансформации трансформатора тока для защиты А1:

$n_{\text{ТА}} = 300/5$.

Коэффициент трансформации трансформатора напряжения для защиты А1:

$n_{\text{ТА}} = 110000/100$.

Сопротивление срабатывания первой ступени защиты.

Сопротивление срабатывания первой ступени выбирается в соответствии с формулой 1.1:

$$Z^{\text{I}}_{\text{с.з.А1}} = \frac{Z_{\text{л}-1}}{1+\beta+\delta} = \frac{5{,}21}{1+0{,}05+0{,}1} = 4{,}53 \text{ Ом.}$$

Сопротивление срабатывания второй ступени защиты.

Сопротивление срабатывания второй ступени выбирается в соответствии с пунктом 1.1.2:

а) По условию отстройки от сопротивления срабатывания первой ступени защиты А2. Уставка первой ступени защиты А2:

$$Z^{\text{I}}_{\text{с.з.А2}} = \frac{Z_{\text{л.2}}}{1+\beta+\delta} = \frac{5{,}21}{1+0{,}05+0{,}1} = 4{,}53 \text{ Ом.}$$

Распределение токов КЗ при коротком замыкании на линии 2 представлено на рисунке А.2

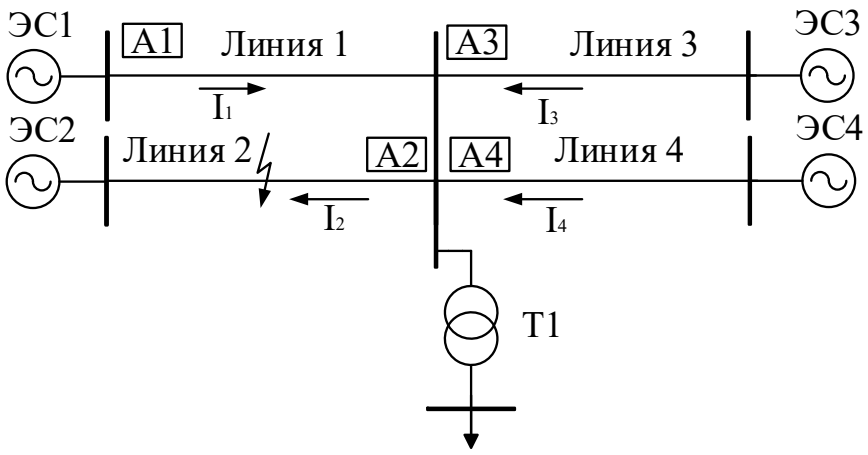

Рисунок А.2

Коэффициент токораспределения:

$I_1 = 300$ А; $I_2 = 5177$ А; $k_{\text{т.л.2}} = I_1/I_2 = 300/5177 = 0{,}058$.

Сопротивление срабатывания в соответствии с формулой 1.3:

$$Z^{`\text{II}}_{\text{с.з.А1}} = \frac{Z_{\text{л.1}} + \left(\frac{1-\alpha}{k_{\text{т.л.2}}}\right) \cdot Z^{\text{I}}_{\text{с.з.А2}}}{1+\beta+\delta} =$$

$$= \frac{1}{1+0{,}05+0{,}1} \cdot \left(5{,}21 + \frac{0{,}9}{0{,}058} \cdot 4{,}53\right) = 65{,}7 \text{ Ом.}$$

б) По условию отстройки от сопротивления срабатывания первой ступени защиты А3. Уставка первой ступени защиты А3:

$$Z^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А3}} = \frac{Z_{\text{л.3}}}{1+\beta+\delta} = \frac{1{,}9}{1+0{,}05+0{,}1} = 1{,}65 \text{ Ом.}$$

Распределение токов КЗ при коротком замыкании на линии 3 представлено на рисунке А.3

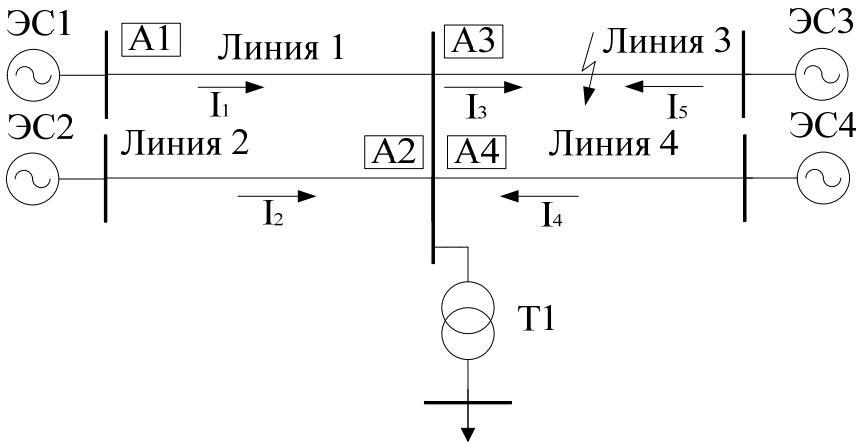

Рисунок А.3

Коэффициент токораспределения:

$$I_1 = 344 \text{ А}; I_3 = 3207 \text{ А}; I_5 = 3756 \text{ А};\ k_{\text{т.л.3}} = I_1/I_3 = 344/3207 = 0{,}107.$$

Сопротивление срабатывания в соответствии с формулой 1.3:

$$Z^{``\mathrm{II}}_{\text{с.з.А1}} = \frac{Z_{\text{л.1}} + \left(\frac{1-\alpha}{k_{\text{т.л.3}}}\right) \cdot Z^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А3}}}{1+\beta+\delta} =$$

$$= \frac{1}{1+0{,}05+0{,}1} \cdot \left(5{,}21 + \frac{0{,}9}{0{,}107} \cdot 1{,}65\right) = 16{,}6 \text{ Ом.}$$

в) По условию отстройки от сопротивления срабатывания первой ступени защиты А4. Уставка первой ступени защиты А4:

$$Z^{\mathrm{I}}_{\text{с.з.А4}} = \frac{Z_{\text{л.4}}}{1+\beta+\delta} = \frac{2{,}5}{1+0{,}05+0{,}1} = 2{,}17 \text{ Ом.}$$

Распределение токов КЗ при коротком замыкании на линии 4 представлено на рисунке А.4:

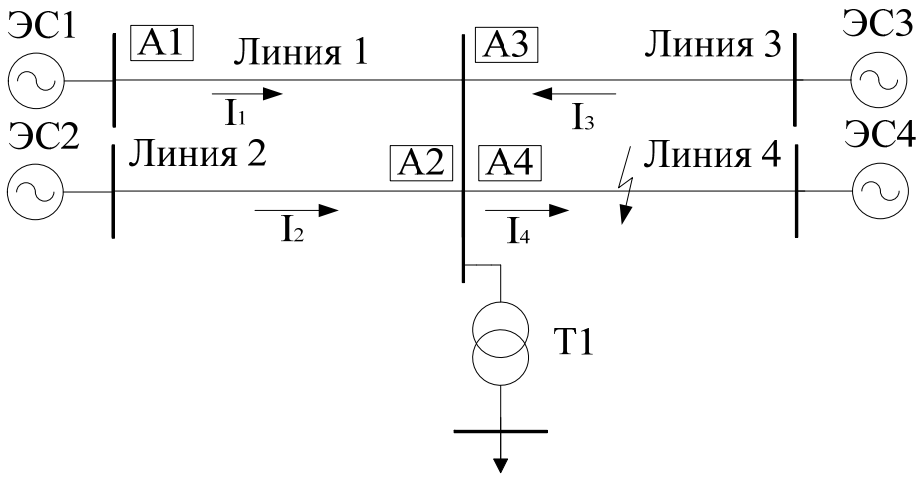

Рисунок А.4

Коэффициент токораспределения:

$I_1 = 337$ А; $I_4 = 3804$ А; $k_{\text{т.л.4}} = I_1/I_4 = 337/3804 = 0{,}0886$.

Сопротивление срабатывания в соответствии с формулой (1.3):

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{```II}} = \frac{Z_{\text{л.1}} + \left(\frac{1-\alpha}{k_{\text{т.л.4}}}\right) \cdot Z_{\text{с.з.А4}}^{\text{I}}}{1 + \beta + \delta} =$$

$$= \frac{1}{1 + 0{,}05 + 0{,}1} \cdot \left(5{,}21 + \frac{0{,}9}{0{,}0886} \cdot 2{,}17\right) = 24{,}1 \text{ Ом}.$$

г) По условию отстройки от сопротивления трансформатора Т1.

Распределение токов КЗ при коротком замыкании за трансформатором Т1 представлено на рисунке А.4:

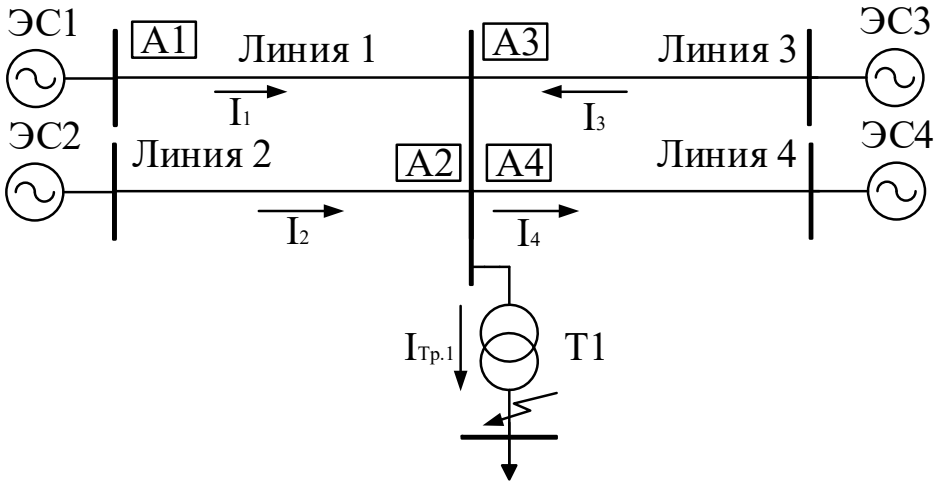

Рисунок А.5

Коэффициент токораспределения:

$I_1 = 185$ А; $I_{\text{Тр.1}} = 814$ А; $k_{\text{т.Тр.1}} = I_1/I_{\text{Тр.1}} = 185/814 = 0{,}227$.

Сопротивление срабатывания в соответствии с формулой (1.2):

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{II}} = \frac{Z_{\text{л.1}} + Z_{\text{т1.min}}/k_{\text{т.Тр1}}}{1 + \beta + \delta} = \frac{5{,}21 + 69{,}5/0{,}227}{1 + 0{,}05 + 0{,}1} = 270{,}9 \text{ Ом}.$$

Сопротивление срабатывания для второй ступени принимаем равным наименьшему из рассчитанных сопротивлений:

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{II}} = 16{,}6 \text{ Ом}.$$

Проверка чувствительности производиться по формуле (1.5):

$$K_{\text{ч}}^{\text{II}} == \frac{Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{II}}}{Z_{\text{л.1}}} = \frac{16{,}6}{5{,}21} = 3{,}19 > 1{,}25.$$

Сопротивление срабатывания третьей ступени.

Сопротивление срабатывания третьей ступени отстраивается от минимального сопротивления нагрузочного режима. Ток нагрузки принимаем равным номинальному току трансформатора тока 300 А.

Минимальное сопротивление самозапуска в соответствии с формулой 2.5:

$$Z_{\text{мин}} = \frac{0{,}9 \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot K_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{макс}}} = \frac{0{,}9 \cdot 110000}{\sqrt{3} \cdot 1{,}5 \cdot 300} = 127 \text{ Ом}.$$

Сопротивление срабатывания третьей ступени в соответствии с формулой 1.6:

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}} = \frac{Z_{\text{мин}}}{K_{\text{вз}} \cdot K_{\text{отс}} \cdot \cos(f_{л} - y)} = \frac{127}{1{,}05 \cdot 1{,}2 \cdot \cos(68 - 25)} = 138 \text{ Ом}.$$

Проверка чувствительности производиться по формулам 1.9 и 1.10.

Для зоны ближнего резервирования:

$$K_{\text{ч.б.р}}^{\text{III}} = \frac{Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}}}{Z_{\text{л.1}}} = \frac{138}{5{,}21} = 26{,}5 > 1{,}5.$$

Для зоны ближнего резервирования требуемая чувствительность обеспечивается.

Коэффициент чувствительности для зоны дальнего резервирования проверяется для зоны с наибольшим сопротивлением (с учётом токораспределения). В данном случае наибольшее сопротивление зоны дальнего резервирования будет иметь трансформатор Т1.

Коэффициент чувствительности для зоны дальнего резервирования:

$$K_{\text{ч.д.р}}^{\text{III}} = \frac{Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}}}{Z_{\text{л.1}} + Z_{\text{т1.min}}/k_{\text{т.Тр1}}} = \frac{138}{5{,}21 + 69{,}5/0{,}227} = 0{,}44 < 1{,}25.$$

По условию отстройки от нагрузочного режима требуемая чувствительность для зоны дальнего резервирования не обеспечивается.

Так как на трансформаторе Т1 не устанавливается дистанционная защиты, то выбор сопротивления срабатывания по индуктивной оси произведем исходя из требуемой чувствительности:

$$X_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}} = \left(Z_{\text{л.1}} \sin f_{л.1} + \frac{Z_{\text{т1.min}}}{k_{\text{т.Тр1}}}\right) K_{\text{ч.д.р}}^{\text{III}} = \left(5{,}21 \cdot \sin 68° + \frac{69{,}5}{0{,}227}\right) \cdot 1{,}25 =$$
$$= 389 \text{ Ом}.$$

Тогда:

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}} = \frac{X_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}}}{\sin f_{л.1}} = \frac{389}{\sin 68°} = 420 \text{ Ом}.$$

Сопротивление срабатывания ступени ускорения.

Сопротивление срабатывания ступени ускорения принимаем равным сопротивлению срабатывания второй ступени. В соответствии с пунктом 1.1.5.

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск}} = Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{II}} = 16{,}6 \text{ Ом}.$$

Сопротивление срабатывания обратной ступени.

Сопротивление срабатывания обратной ступени выбираем в соответствии с формулой 1.11:

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{об}} = \frac{30}{100} \cdot Z_{\text{л.1}} = 0{,}3 \cdot 5{,}21 = 1{,}56 \text{ Ом}.$$

Сопротивление срабатывания ступеней защиты А1 сведены в таблице А.1.

Таблица № А.1 – Сопротивление срабатывания защиты А1

Первая ступень защиты	$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{I}} = 4{,}53$ Ом
Вторая ступень защиты	$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{II}} = 16{,}6$ Ом
Третья ступень защиты	$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}} = 420$ Ом
Обратная ступень защиты (резервирование ДЗШ)	$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{об}} = 1{,}56$ Ом
Ступень ускорения защиты	$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск}} = 16{,}6$ Ом

Выбор времён срабатывания.

Выбор времени срабатывания производиться в соответствии с пунктом 1.2.

Времена срабатывания третьих ступеней защит А2, А3, А4 соответственно:

$$t_{\text{с.з.А2}}^{\text{III}} = 2{,}1 \text{ с}; t_{\text{с.з.А3}}^{\text{III}} = 3{,}4 \text{ с}; t_{\text{с.з.А4}}^{\text{III}} = 2{,}6 \text{ с}.$$

Выдержка времени первой ступени в соответствии с формулой (1.17)

$$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{I}} = 0 \text{ с}.$$

Выдержка времени второй ступени выбирается с учётом действия УРОВ и принимается в соответствии с (1.19):

$$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{II}} = t_{\text{УРОВ.А3}} + \Delta t = 0{,}3 + 0{,}3 = 0{,}6 \text{ с}.$$

Выдержка времени для третьей ступени выбирается в соответствии с формулой (1.20):

$$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}} = t_{\text{с.з.см}}^{\text{III}} + \Delta t = 3{,}4 + 0{,}3 = 3{,}7 \text{ с.}$$

Ускорение запускается автоматически, исходя из этого, выдержка времени для ступени ускорении принимается в соответствии с формулой (1.22):

$$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск}} = 0 \text{ с.}$$

Выдержка времени для обратной ступени принимается равной выдержке времени второй ступени:

$$t_{\text{с.з.А1}}^{\text{об}} = t_{\text{УРОВ}} + \Delta t = 0{,}3 + 0{,}3 = 0{,}6 \text{ с.}$$

ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИКИ СРАБАТЫВАНИЯ ДЛЯ СТУПЕНЕЙ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КЗ

Выбор характеристик срабатывания для защиты от междуфазных КЗ приведён в соответствии с пунктом 2 данного руководства.

Расчёт нагрузочной характеристики.

Расчёт нагрузочной характеристики произведён в соответствии с пунктом 2.2.

Угол нагрузки принимаем равным **y** = 25°. Минимальное активное сопротивление нагрузки принимаем одинаковым в обоих направлениях:

$$\mathbf{R2} = \mathbf{R1} = R_{\text{н}} = K_{\text{отс}} \cdot Z_{\text{мин}} \cdot \cos y = 0{,}85 \cdot 127 \cdot \cos 25° = 97{,}8 \text{ Ом.}$$

Задание направления ступени.

Углы направленной характеристики задаем в соответствии с п. 2.3.

$$\text{y}\mathbf{1} = 22°;$$
$$\text{y}\mathbf{2} = 30°.$$

Угол наклона боковой стороны характеристики.

Угол наклона боковой стороны характеристики принимается равным углу линии:

$$\mathbf{f} = f_{\text{л}} = 68°.$$

Уставки по оси реактивных сопротивлений.

Уставку по оси реактивных сопротивлений выбирается в соответствии с формулой (2.11):

$$\mathbf{X} = X_{\text{с.з.А1}}^{\text{I}} = Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{I}} \sin f_{\text{л}} = 4{,}53 \cdot \sin 68° = 4{,}20 \text{ Ом;}$$
$$\mathbf{X} = X_{\text{с.з.А1}}^{\text{II}} = Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{II}} \sin f_{\text{л}} = 16{,}6 \cdot \sin 68° = 15{,}4 \text{ Ом;}$$
$$\mathbf{X} = X_{\text{с.з.А1}}^{\text{об.}} = Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{об.}} \sin f_{\text{л}} = 1{,}56 \cdot \sin 68° = 1{,}45 \text{ Ом;}$$
$$\mathbf{X} = X_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск.}} = Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск.}} \sin f_{\text{л}} = 16{,}6 \cdot \sin 68° = 15{,}4 \text{ Ом.}$$

Уставка срабатывания по оси реактивных сопротивлений третьей ступени была рассчитана ранее:

$$\mathbf{X} = X_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}} = 389 \text{ Ом.}$$

Блокировка при качаниях.

Блокировка при качаниях выбирается в соответствии с пунктом 2.4.3. Блокировке подлежит первая и вторая ступени.

Уставка для внутренней характеристики блокировки по оси реактивных сопротивлений выбирается в соответствии с формулой (2.13):

$$\mathbf{X} = X_{\text{блк}} = X_{\text{с.з.А1}}^{\text{II}} = 15{,}4 \text{ Ом}.$$

Угол наклона характеристики блокировки принимаем равным 68°.

Уставка по оси активных сопротивлений для внутренней характеристики рассчитываются по формуле (2.14) так как угол наклона боковой стороны характеристики больше 63,5°:

$$R_{\text{с.з.А1}}^{\text{II}} = Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{III}} \cos f_{\text{л}} = 16{,}6 \cdot \cos 68^{\circ} = 6{,}22 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{н.мин}} = Z_{\text{мин}} \cdot \cos y = 127 \cdot \cos 25^{\circ} = 115 \text{ Ом};$$

$$\mathbf{R} = R_{\text{блк}} = 0{,}586 \cdot R_{\text{н.мин}} - 0{,}69 \cdot R_{\text{с.з}} = 0{,}586 \cdot 115 - 0{,}69 \cdot 6{,}36 = 63{,}0 \text{ Ом}.$$

Ширина дельта зоны выбирается по формуле (2.17):

$$\mathbf{dz} = dz = 0{,}3 \cdot R_{\text{блк}} = 0{,}3 \cdot 63{,}0 = 18{,}9 \text{ Ом}.$$

Уставку по времени нахождения рабочей точки в дельта-зоне **Tdz** принимаем равной 20 мс.

Уставки для задания блокировочной характеристики сведены в таблице А.2.

Таблица № А.2. – Уставки для блокировочной характеристики.

R, Ом/Ом втор.	**X**, Ом/Ом втор.	**f**, °	**dz**, Ом/Ом втор.	**Tdz**, мс
63,0/3,44	15,4/0,84	68	18,9/1,03	20

Вариант 1. Расчет уставки по оси активных сопротивлений по условию отстройки от сопротивления дуги.

Уставки по оси активных сопротивлений выбираются в соответствии с пунктом 2.4.4.

Переходное сопротивление для третьей ступени защиты для данного примера рассчитывается при КЗ в конце зоны дальнего резервирования в соответствии с рисунком А.5. Ток дуги принимается равным току металлического КЗ:

$$I_{\text{д}} = I_{\text{Тр.1}} = 814 \text{ А}.$$

Коэффициент токораспределения:

$$k_{\text{т.д}} = k_{\text{т.Тр.1}} = 0{,}227.$$

Напряжение дуги принимаем равным 1050 В/м. Расстояние между фазами 6,5 метров. Сопротивление дуги в соответствии с (2.19):

$$r_д = U_д^* \cdot \frac{L_д}{I_д} = 1050 \cdot \frac{6,5}{814} = 8,38 \text{ Ом}.$$

Уставка по оси активных сопротивлений для третьей ступени в соответствии с (2.20):

$$\mathbf{R} = R_{п.А1}^{III} = K_{отс} \cdot k_{разд} \cdot \frac{r_д}{2 \cdot k_{т.д}} = 1,3 \cdot 9 \cdot \frac{8,38}{2 \cdot 0,227} = 216 \text{ Ом}.$$

Переходное сопротивление для второй ступени защиты рассчитывается при КЗ в конце защищаемой зоны в соответствии с рисунком А.3.

$$I_д = I_3 + I_5 = 3207 + 3756 = 6963 \text{ А}.$$

Коэффициент токораспределения:

$$k_{т.д} = \frac{I_1}{I_д} = \frac{344}{6963} = 0,0494.$$

Сопротивление дуги в соответствии с (2.19):

$$r_д = U_д^* \cdot \frac{L_д}{I_д} = 1050 \cdot \frac{6,5}{6963} = 0,98 \text{ Ом}.$$

Уставка по оси активных сопротивлений для второй ступени в соответствии с (2.20):

$$R_{п.А1}^{II} = K_{отс} \cdot k_{разд} \cdot \frac{r_д}{2 \cdot k_{т.д}} = 1,3 \cdot 3 \cdot \frac{0,98}{2 \cdot 0,0494} = 38,7 \text{ Ом}.$$

Сопротивление срабатывания второй ступени принимаем равным:

$$\mathbf{R} = R_{п.А1}^{II} = 38,7 \text{ Ом}.$$

Для первой ступени защиты расчёт тока дуги производится при КЗ в конце первой зоны рисунок А.6.

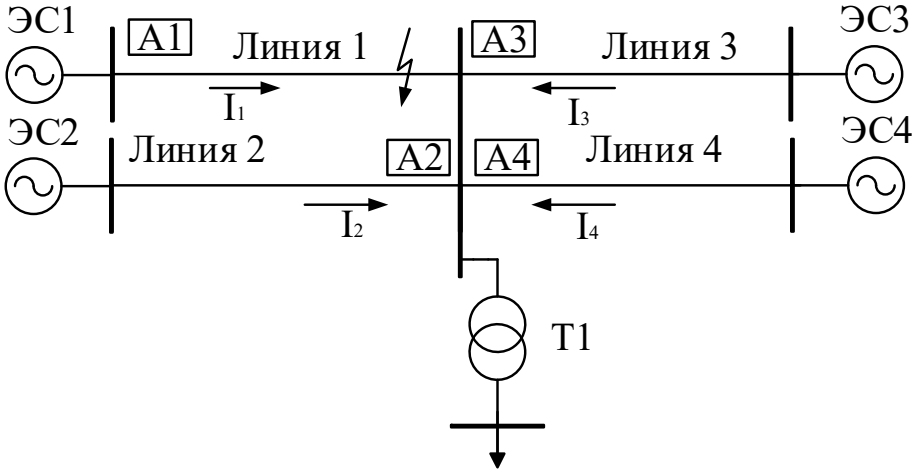

Рисунок А.6

$$I_1 = 359 \text{ А}; I_2 = 265 \text{ А}; \ I_3 = 3569 \text{ А}; \ I_4 = 2816 \text{ А};$$
$$I_д = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 359 + 265 + 3569 + 2816 = 7009 \text{ А}.$$

Коэффициент токораспределения:

$$k_{\text{т.д}} = \frac{I_1}{I_{\text{д}}} = \frac{359}{7009} = 0{,}0512.$$

Сопротивление дуги в соответствии с (2.19):

$$r_{\text{д}} = U_{\text{д}}^{*} \cdot \frac{L_{\text{д}}}{I_{\text{д}}} = 1050 \cdot \frac{6{,}5}{7009} = 0{,}974 \text{ Ом}.$$

Уставка по оси активных сопротивлений для первой ступени в соответствии с (2.20):

$$\mathbf{R} = R_{\text{п.А1}}^{\text{I}} = K_{\text{отс}} \cdot k_{\text{разд}} \cdot \frac{r_{\text{д}}}{2 \cdot k_{\text{т.д}}} = 1{,}3 \cdot 1 \cdot \frac{0{,}974}{2 \cdot 0{,}0512} = 12{,}4 \text{ Ом}.$$

Уставка для ступени ускорения принимается в соответствии с (2.25):

$$\mathbf{R} = R_{\text{п.А1}}^{\text{уск}} = R_{\text{п.А1}}^{\text{II}} = 38{,}7 \text{ Ом}.$$

Устатку для обратной ступени выбирается по формуле (2.26):

$$\mathbf{R} = R_{\text{п.А1}}^{\text{об}} = 0{,}8 \cdot R_{\text{п.А1}}^{\text{I}} = 0{,}8 \cdot 12{,}4 = 9{,}92 \text{ Ом}.$$

Уставки для задания характеристики сведены в таблице А.3. Вид характеристики для первой и второй ступени представлен на рисунки А.6. Вид третьей ступени представлен на рисунке А.7.

Таблица № А.3. – Уставки для полигональной характеристики.

Ступень	По оси активных сопротивлений, Ом/Ом втор.	По оси реактивных сопротивлений, Ом/Ом втор.	Угол наклона характеристики, °
I	$\mathbf{R} = 12{,}4/0{,}68$	$\mathbf{X} = 4{,}20/0{,}23$	$\mathbf{f} = 68$
II	$\mathbf{R} = 38{,}7/2{,}11$	$\mathbf{X} = 15{,}4/0{,}84$	$\mathbf{f} = 68$
III	$\mathbf{R} = 216/11{,}8$	$\mathbf{X} = 389/21{,}2$	$\mathbf{f} = 68$
Уск.	$\mathbf{R} = 38{,}7/2{,}11$	$\mathbf{X} = 15{,}4/0{,}84$	$\mathbf{f} = 68$
Об.	$\mathbf{R} = 9{,}92/0{,}54$	$\mathbf{X} = 1{,}45/0{,}08$	$\mathbf{f} = 68$

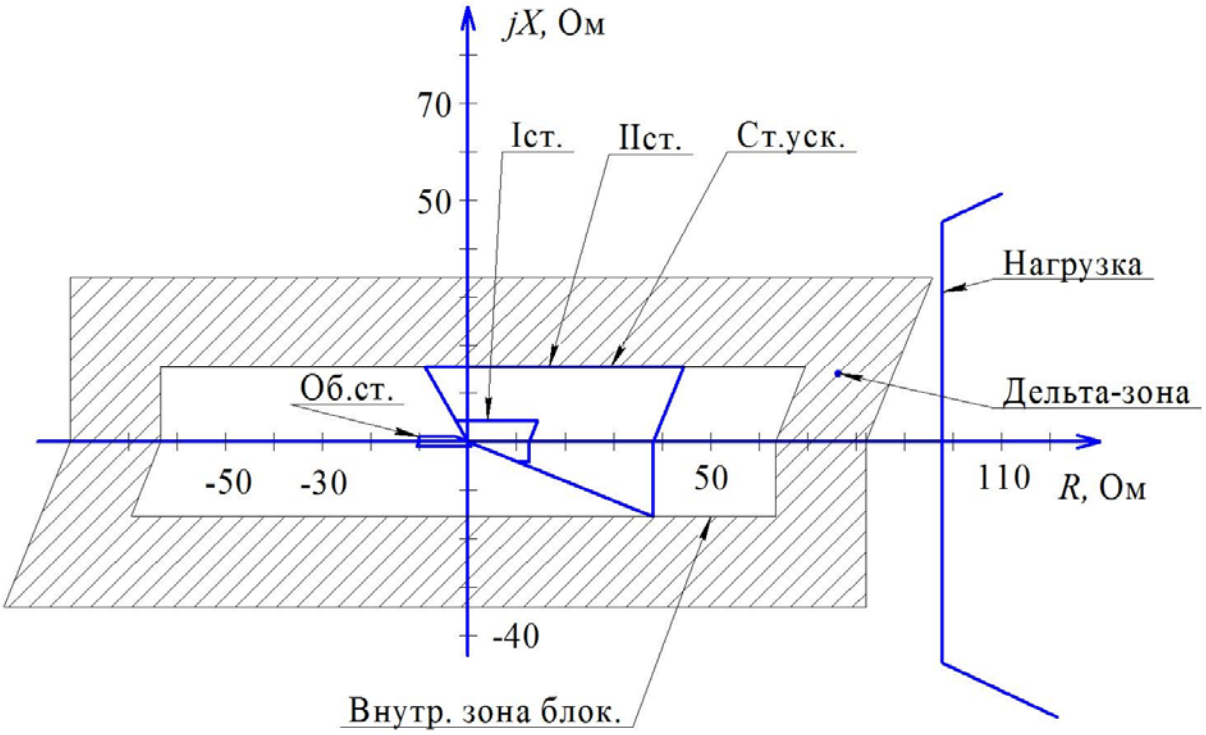

Рисунок А.7 – Первая и вторая ступени

Рисунок А.8 – Третья ступень

Вариант 2. Расчет уставок по оси активных сопротивлений по условию отстройки от нагрузочного режима.

Уставки по оси активных сопротивлений выбираются в соответствии с пунктом 2.4.5.

Так как блокировка третьей с ступени при качаниях не производиться то уставка для третьей ступени выбирается по формуле (2.21):

$$\mathbf{R} = R_{\text{п.А1}}^{\text{III}} = 0{,}85 \cdot R_{\text{н.мин}} = 0{,}85 \cdot 115 \ = 97{,}8 \text{ Ом}.$$

Так как при качаниях необходимо блокировать вторую ступень, то уставка выбирается в соответствии с формулой (2.22):

$$\mathbf{R} = R_{\text{п.А1}}^{\text{II}} = R_{\text{блк}} = 63{,}0 \text{ Ом}.$$

Уставка для первой ступени выбирается по формуле (2.24):

$$\mathbf{R} = R_{\text{п.А1}}^{\text{I}} = 0{,}8 \cdot R_{\text{п.А1}}^{\text{II}} = 0{,}8 \cdot 63{,}0 \ = 50{,}4 \text{ Ом}.$$

Уставка для ступени ускорения выбирается по формуле (2.25), равной уставке второй ступени:

$$\mathbf{R} = R_{\text{п.А1}}^{\text{уск}} = R_{\text{п.А1}}^{\text{II}} = 63{,}0 \text{ Ом}.$$

Уставка для обратной ступени выбирается по формуле (2.26):

$$\mathbf{R} = R_{\text{п.А1}}^{\text{об}} = 0{,}8 \cdot R_{\text{п.А1}}^{\text{I}} = 0{,}8 \cdot 50{,}4 = 40{,}3 \text{ Ом}.$$

Таблица № А.4. – Уставки для полигональной характеристики.

Ступень	По оси активных сопротивлений, Ом/Ом втор.	По оси реактивных сопротивлений, Ом/Ом втор.	Угол наклона характеристики, °
I	$\mathbf{R} = 50{,}4/2{,}75$	$\mathbf{X} = 4{,}20/0{,}23$	$\mathbf{f} = 68$
II	$\mathbf{R} = 63{,}0/3{,}44$	$\mathbf{X} = 15{,}4/0{,}84$	$\mathbf{f} = 68$
III	$\mathbf{R} = 97{,}8/5{,}34$	$\mathbf{X} = 389/21{,}22$	$\mathbf{f} = 68$
Уск.	$\mathbf{R} = 63{,}0/3{,}44$	$\mathbf{X} = 15{,}4/0{,}84$	$\mathbf{f} = 68$
Об.	$\mathbf{R} = 40{,}3/2{,}2$	$\mathbf{X} = 1{,}45/0{,}08$	$\mathbf{f} = 68$

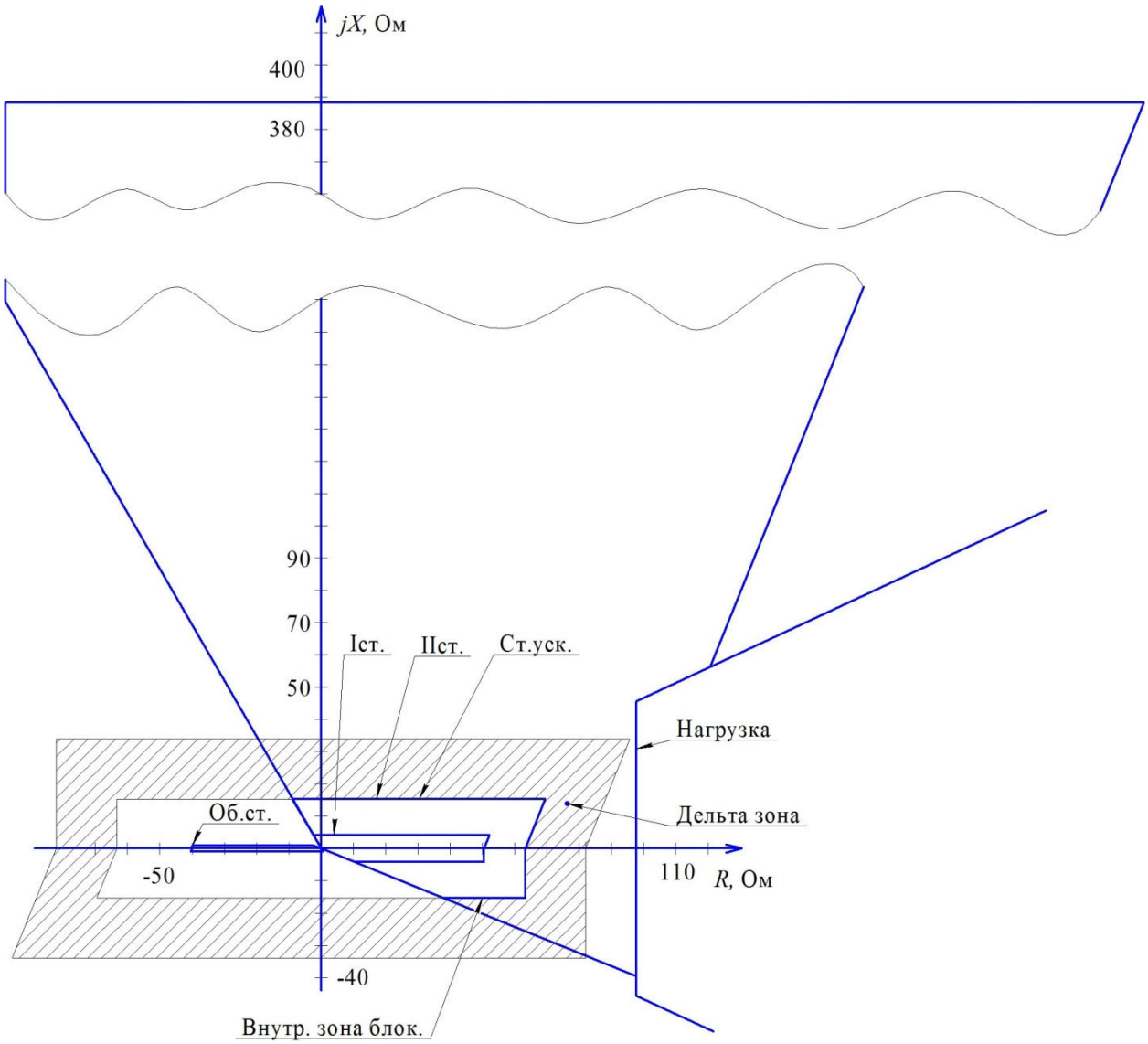

Рисунок А.9 – Ступени защиты от междуфазных КЗ

ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИКИ СРАБАТЫВАНИЯ ДЛЯ СТУПЕНЕЙ ОТ КЗ НА ЗЕМЛЮ

Выбор характеристик срабатывания для защиты от однофазных КЗ приведён в соответствии с пунктом 3 данного руководства.

В данном примере расчёт третьей и второй ступени не будет производиться. В виду этого сопротивление ступени ускорения в соответствии с формулой (3.1):

$$Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск}} = 1{,}25 \cdot Z_{\text{л}} = 1{,}25 \cdot 5{,}21 = 6{,}51 \text{ Ом}.$$

Задание коэффициента компенсации.

Коэффициент компенсации для первой, обратной ступеней и ступени ускорения от однофазных КЗ задается сопротивлениями прямой и нулевой последовательностей линии 1:

$$\mathbf{Z1} = \underline{Z}_{1\text{л}} = 1{,}99 + j4{,}81 \text{ Ом};$$

$$\mathbf{Z0} = \underline{Z}_{0\text{л}} = 4{,}95 + j14{,}66 \text{ Ом}.$$

Угол наклона боковой стороны характеристики.

Угол наклона боковой стороны характеристики принимается равным углу линии:

$$\mathbf{f} = f_{\text{л}} = 68^{\circ}.$$

Уставки по оси реактивных сопротивлений.

Уставка по оси реактивных сопротивлений выбирается в соответствии с формулой (2.11):

$$\mathbf{X} = X_{\text{с.з.А1}}^{\text{I}} = Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{I}} \sin f_{\text{л}} = 4{,}53 \cdot \sin 68^{\circ} = 4{,}20 \text{ Ом};$$

$$\mathbf{X} = X_{\text{с.з.А1}}^{\text{об}} = Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{об.}} \sin f_{\text{л}} = 1{,}56 \cdot \sin 68^{\circ} = 1{,}45 \text{ Ом};$$

$$\mathbf{X} = X_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск}} = Z_{\text{с.з.А1}}^{\text{уск.}} \sin f_{\text{л}} = 6{,}51 \cdot \sin 68^{\circ} = 6{,}04 \text{ Ом}.$$

Вариант 1. Выбор уставок по оси активных сопротивлений по условию отстройки от сопротивления дуги.

Уставки по оси активных сопротивлений выбираются в соответствии с пунктом 2.4.4.

Длину гирлянды изоляторов принимаем равной 1,4 м. Сопротивление опоры принимаем 10 Ом. Напряжение дуги принимаем равным 1050 В/м.

Для первой ступени защиты расчёт тока дуги производится при однофазном КЗ в конце первой зоны рисунок А.6.

$$I_1 = 541 \text{ А}; I_2 = 412 \text{ А}; I_3 = 3169 \text{ А}; I_4 = 2500 \text{ А};$$

$$I_{\text{д}} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 541 + 412 + 3169 + 2500 = 6622 \text{ А}.$$

Переходное сопротивление для первой ступени в соответствии с (3.8):

$$r_{\text{п}} = k_{\text{разд}} \cdot U_{\text{д}}^{*} \cdot \frac{L_{\text{д}}}{I_{\text{д}}} + R_{\text{опор}} = 1 \cdot 1050 \cdot \frac{1{,}4 \cdot 1{,}2}{6622} + 10 = 10{,}3 \text{ Ом}.$$

Коэффициент токораспределения:

$$k_{\text{т.д}} = \frac{I_1}{I_{\text{д}}} = \frac{541}{6622} = 0{,}0817.$$

Коэффициент компенсации в соответствии с (3.3):

$$k_0 = \frac{\underline{Z}_{0\text{л}} - \underline{Z}_{1\text{л}}}{3 \cdot \underline{Z}_{1\text{л}}} = \frac{4{,}95 + j14{,}66 - 1{,}99 - j4{,}81}{3 \cdot (1{,}99 + j4{,}81)} = 0{,}655 + j \cdot 0{,}066.$$

Уставка по оси активных сопротивлений для первой ступени в соответствии с (3.9):

$$\mathbf{R} = R^{\text{I}}_{\text{п.А1}} = \frac{K_{\text{отс}}}{k_{\text{т.д}}} \cdot \text{Re}\left(\frac{r_{\text{п}}}{1 + \underline{k}_0}\right) =$$

$$= \frac{1{,}3}{0{,}082} \cdot \text{Re}\left(\frac{10{,}266}{1 + 0{,}655 + j \cdot 0{,}066}\right) = 98{,}2 \text{ Ом}.$$

Уставка по оси активных сопротивлений для ступени ускорения в соответствии с (3.14):

$$\mathbf{R} = R^{\text{уск}}_{\text{п.А1}} = 1{,}25 \cdot R^{\text{I}}_{\text{п.А1}} = 1{,}25 \cdot 98{,}2 = 123 \text{ Ом}.$$

Уставку для обратной ступени выбирается по формуле (3.15):

$$\mathbf{R} = R^{\text{об}}_{\text{п.А1}} = 0{,}8 \cdot R^{\text{I}}_{\text{п.А1}} = 0{,}8 \cdot 98{,}2 = 78{,}6 \text{ Ом}.$$

Уставки параметры характеристик срабатывания сведены в таблице А.5.

Таблица № А.5. – Уставки для полигональной характеристики.

Ступень.	По оси активных сопротивлений, Ом/Ом втор.	По оси реактивных сопротивлений, Ом/Ом втор.	Угол наклона характеристики, °
I	$\mathbf{R} = 98{,}2/5{,}36$	$\mathbf{X} = 4{,}20\ /0{,}23$	$\mathbf{f} = 68$
Уск.	$\mathbf{R} = 123/6{,}71$	$\mathbf{X} = 6{,}04/0{,}33$	$\mathbf{f} = 68$
Об.	$\mathbf{R} = 78{,}6/4{,}29$	$\mathbf{X} = 1{,}45/0{,}08$	$\mathbf{f} = 68$

Вариант 2. Выбор уставок по оси активных сопротивлений по условию отстройки от нагрузочного режима.

Уставка для первой ступени выбирается по формуле (3.12):

$$\mathbf{R} = R^{\text{I}}_{\text{п.А1}} = 0{,}64 \cdot Z_{\text{мин}} \cdot \cos y = 0{,}64 \cdot 127 \cdot \cos 25° = 73{,}7 \text{ Ом}.$$

Уставка для ступени ускорения выбирается по формуле (3.14):

$$\mathbf{R} = R^{\text{уск}}_{\text{п.А1}} = 1{,}25 \cdot R^{\text{I}}_{\text{п.А1}} = 1{,}25 \cdot 73{,}7 = 92{,}1 \text{ Ом}.$$

Уставка для обратной ступени выбирается по формуле (3.15).

$$\mathbf{R} = R^{\text{об}}_{\text{п.А1}} = 0{,}8 \cdot R^{\text{I}}_{\text{п.А1}} = 0{,}8 \cdot 73{,}7 = 59{,}0 \text{ Ом}.$$

Таблица № А.6 – Уставки для полигональной характеристики.

Ступень.	По оси активных сопротивлений, Ом/Ом втор.	По оси реактивных сопротивлений, Ом/Ом втор.	Угол наклона характеристики, °
I	$\mathbf{R} = 73{,}7/4{,}02$	$\mathbf{X} = 4{,}20/0{,}23$	$\mathbf{f} = 68^{\circ}$
Уск.	$\mathbf{R} = 92{,}1/5{,}02$	$\mathbf{X} = 6{,}04/0{,}33$	$\mathbf{f} = 68^{\circ}$
Об.	$\mathbf{R} = 59{,}0/3{,}2$	$\mathbf{X} = 1{,}45/0{,}08$	$\mathbf{f} = 68^{\circ}$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководящие указания по релейной защите. – Вып. 7: Дистанционная защита линий 35-330 кВ. – М. Энергоатомиздат, 1966. – 172 с.

2. Методика расчёта уставок микропроцессорных защит высоковольтной линии электропередачи серии REL 500: СТП 09110.35.124-09. – Введ. 15.05.2009 Минск : Белэнерго, 2009. – 63 с.

3. Руководящие указания по релейной защите. – Вып. 11: Расчёты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М. Энергоатомиздат, 1979. – 154 с.

4. Гондуров, С.А. Ступенчатые дистанционные защиты линий электропередачи 35 – 220 кВ: методика расчёта / Гондуров С. А. Илюхин Е. В. Пирогов М. Г. Соловьёв А. Л. : – СПб.: ПЭИПК, 2013. – 52 с.

5. Правила устройства электроустановок. – 6 изд., доп. с исправл. – Гомель : Полеспечать, 2005. – 640 с.

6. Шнеерсон Э. М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

7. Методические указания по выбору уставок микропроцессорных защит высоковольтной линии электропередачи типа 7SA522 и MICOM P400: СТП 09110.35.121-07. – Введ. 01.10.2007 Минск : Белэнерго, 2007. – 56 с.