

16+

Малышева Н.Н.
Щекочихин А.В.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ДВУХТРАНСФОР- МАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Учебное пособие

2020

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет»

Н.Н. Малышева
А.В. Щекочихин

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Учебное пособие

Нижевартовск
2020

Печатается по постановлению Редакционно-издательского совета
Нижевартовского государственного университета

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
электрической техники ОмГТУ *А.В. Бубнов*;

кандидат технических наук, доцент, главный специалист отдела строительных решений
инженерного обеспечения Ханты-Мансийского филиала Федерального автономного
учреждения «Главное управление государственной экспертизы» *А.В. Беспалов*

М 20

Малышева, Н.Н.

Проектирование релейной защиты и автоматики двухтрансформаторной подстанции : учебное пособие / Н.Н. Малышева, А.В. Щекочихин. – Нижневартовск: НВГУ, 2020. – 90 с.

ISBN 978-5-00047-579-9

В учебном пособии изложены методики выбора уставок и времени срабатывания релейных защит силового трансформатора, кабельной линии и электродвигателя на основе микропроцессорных терминалов релейной защиты производства компаний «Шнейдер электрик» и «Механотроника». Содержатся рекомендации по расчету токов короткого замыкания с учетом подпитки от электродвигателей и выбору трансформаторов тока. Рассмотрен пример расчета защит для одной секции двухтрансформаторной подстанции. На основании расчетов составлена карта уставок и построена тормозная характеристика дифференциальной защиты силового трансформатора.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и курсов повышения квалификации «Релейная защита и автоматика систем электроснабжения для руководителей служб и специалистов», «Пусконаладочные работы устройств релейной защиты и автоматики систем электроснабжения».

ББК 31.27-051.3+31.278

ISBN 978-5-00047-579-9

© Малышева Н.Н., Щекочихин А.В., 2020
© НВГУ, 2020

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с развитием релейных защит цифровых ЭВМ появляется возможность использования микропроцессорных терминалов. Выбор времятоковых характеристик срабатывания и рабочих уставок ступенчатых защит различных устройств системы электроснабжения приводится производителями в нормативной документации к выпускаемому блоку. Но даже при выборе одного производителя микропроцессорной техники разобраться в технической документации по расчету уставок является непростой задачей, так как обозначения одинаковых величин в различных методиках не согласованы.

Задачей учебного пособия является изучение методик выбора уставок релейных защит микропроцессорных терминалов, а также формирование профессиональных навыков и компетенций у обучающихся в части расчета характеристик срабатывания промышленного оборудования.

Материал пособия изложен в порядке линейного расчета, облегчающего понимание причинно-следственных связей влияния отдельных параметров электрооборудования на выбор основных характеристик срабатывания, что должно в дальнейшем облегчить понимание построения структуры микропроцессорных защит.

Приведенные методики соответствуют современным требованиям и рекомендациям существующих нормативных документов в области релейной защиты и автоматики.

Изучение методик расчета по выбору уставок защит различных производителей является необходимой компетенцией при выпуске специалиста в области электроснабжения.

Учебное пособие содержит методики расчета блоков Seram и БМРЗ, применяемые обучающимся в рамках курсового проектирования, а также необходимые рекомендации по выбору уставок и времен срабатывания микропроцессорных релейных защит и автоматики (МРЗиА) для отдельных видов электроустановок двухтрансформаторной подстанции.

Задание на курсовой проект

Для представленной на схеме понижающей подстанции (рис. 1.1) выполнить расчет параметров срабатывания устройств релейной защиты и автоматики, согласно варианту (табл. 1.1–1.3) в представленной ниже последовательности.

1. Рассчитать токи короткого замыкания для максимального и минимального режима работы питающей системы.
2. Рассчитать параметры срабатывания дифференциальной защиты трансформатора Т1 и максимальной токовой защиты стороны ВН трансформатора Т1 для заданного микропроцессорного устройства.
3. Рассчитать параметры срабатывания двухступенчатой токовой защиты блока «линия W3 – трансформатор Т2» для заданного микропроцессорного устройства.
4. Рассчитать параметры срабатывания устройства АВР секционного выключателя.
5. Рассчитать параметры срабатывания защит электродвигателя для заданного микропроцессорного устройства.
6. В графической части проекта представить тормозную характеристику дифференциальной защиты трансформатора, карту уставок токовых защит, принципиальные схемы подключения микропроцессорных защит.

Общими для всех вариантов являются следующие исходные данные:

☐ относительное сопротивление питающей системы в минимальном режиме $X_{*Gmin} = 1,3X_{Gmax}$ (сопротивление в минимальном режиме на 30% больше сопротивления в максимальном режиме);

☐ параметры нагрузки:

$$S_{нагр.л.} = 0,7S_{Т1н}; S_{нагр.ц.} = 0,7S_{Т2н}; X_{*нагр.} = 0,35.$$

Таблица 1.1

Исходные данные для расчета

№ вар. 1	Макс. время сраб. МТЗ на стороне НН $t_{с3max}$, с	Тип трансформатора Т1	U _{к%}		№ вар. 2	Длина линии W3 l_{W3} , км	Длина линии W4 l_{W4} , км	Количество х тип ЭД М
			Мин.	Макс.				
1	0,7	ТДН-10000/115/6,6	8,7	12,36	1	0,3	0,4	2хАН-14-49-6
2	0,8	ТДН- 16000/115/10,5	9,8	11,71	2	0,5	0,6	2хСТД-1250-2
3	1,2	ТДН-16000/115/6,6	9,8	11,71	3	0,4	0,5	4хАН-15-41-6
4	0,6	ТРДН- 25000/115/6,3-6,3	9,84	11,72	4	0,6	0,7	4хСТД-1600-2
5	1,3	ТРДН- 25000/115/10,5-10,5	9,84	11,72	5	0,8	0,5	8хАТД-1250
6	0,9	ТРДН- 32000/115/10,5-10,5	9,77	11,58	6	0,9	0,3	4хСТД-1000-2
7	1,1	ТРДН- 32000/230/10,5-10,5	11,6	12,7	7	1,0	0,9	8хАТД-800
8	1,0	ТРДН- 40000/115/10,5-10,5	9,59	11,46	8	0,5	0,8	8хСТД-1000-2
9	0,5	ТРДН- 40000/115/6,3-6,3	9,59	11,46	9	0,3	0,7	4хАТД-2000
0	0,4	ТРДН- 63000/230/10,5-10,5	11,6	12,7	0	0,7	1,0	8х АН-15-41-6

Таблица 1.2

Исходные данные для расчета

№ вар. 3	Тип трансформатора T2	Мощность системы S_{GH} , МВА	№ вар. 4	Длина линии W_1 l_{W1} , км
1	ТСЗ-400	3800	1	2
2	ТСЗ-1000	4377	2	3
3	ТСЗ-630	4500	3	4
4	ТСЗ-1600	5000	4	5
5	ТМ-1000	5144	5	6
6	ТМ-2000	5200	6	7
7	ТМ-2500	5328	7	8
8	ТМ-1200	5500	8	10
9	ТМ-1600	6280	9	12
0	ТМ-2500	5709	0	15

Сечение воздушной линии W_1 задается преподавателем.

Таблица 1.3

Исходные данные для расчета

№ п/п	Ф.И.О.	Вид промышленности	Вариант	Микропроцессорные защиты		
				T1	W3 – T2	M
1		Нефтепереработка		БМРЗ	БМРЗ	БМРЗ
2		Химическая		Sepam	Sepam	Sepam
3		Машиностроение		БМРЗ	Sepam	Sepam
4		Строительные материалы		Sepam	БМРЗ	Sepam
5		Сельское хозяйство		Sepam	Sepam	БМРЗ
6		Тяжелое машиностроение		Sepam	БМРЗ	БМРЗ
7		Нефтедобыча		БМРЗ	Sepam	БМРЗ
8		Бытовая нагрузка		БМРЗ	БМРЗ	Sepam
9		Металлургия		БМРЗ	БМРЗ	БМРЗ
10		Металлообработка		Sepam	Sepam	Sepam
11		Легкая промышленность		БМРЗ	Sepam	Sepam
12		Пищевая промышленность		Sepam	БМРЗ	Sepam
13		Деревообрабатывающая		Sepam	Sepam	БМРЗ
14		Приборостроение		Sepam	БМРЗ	БМРЗ
15		Электротехническая		БМРЗ	Sepam	БМРЗ
16		Станкостроительная		БМРЗ	БМРЗ	Sepam

В соответствии с вариантом задания необходимо будет рассчитать только те пункты курсового проекта, которые соответствуют типу микропроцессорного терминала согласно таблице 1.3. Расчет параметров срабатывания устройства АВР секционного выключателя QV соответствует всем вариантам.

1. Выбор сечения питающей линии

Сечение питающей линии выбирается по экономической плотности тока и проверяется по условию нагрева (по длительно допустимому току). При напряжении 110 кВ и выше так же должна быть выполнена проверка по условию возникновения коронного разряда.

Выбор сечения по экономической плотности тока осуществляется согласно формуле:

$$F_{\text{э}} = \frac{I_{\text{НР}}}{j_{\text{э}}},$$

где $I_{\text{НР}}$ – ток, протекающий по линии в нормальном режиме; $j_{\text{э}}$ – экономическая плотность тока [А/мм²], зависящая от числа часов использования максимума нагрузки [10].

Величина тока нормального режима может быть определена по формуле:

$$I_{\text{НР}} = \frac{0,7S_{\text{тном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}}.$$

T_{max} определяется из справочных материалов, согласно типу промышленности, заданному по варианту.

В качестве выбранного сечения принимается ближайшее стандартное сечение. При этом учитывается, что по условию возникновения коронного разряда минимальное сечение проводника для напряжения 110 кВ составляет 70 мм², а для напряжения 220 кВ – 240 мм².

Проверка на нагрев проводится согласно выражению:

$$I_{\text{ДОП}} \geq I_{\text{раб. max}},$$

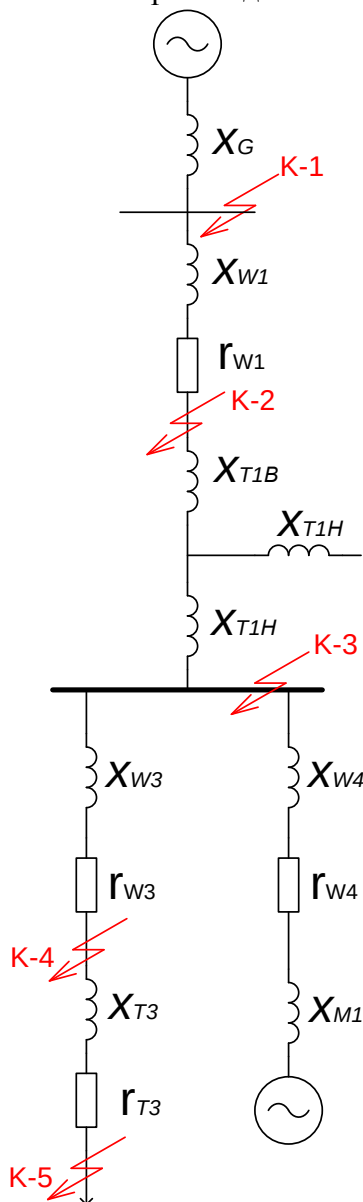
где $I_{\text{ДОП}}$ – величина допустимого тока для выбранного сечения, берется из [10];

$I_{\text{раб. max}}$ – величина максимального рабочего тока линии. В случае двухтрансформаторной подстанции эта величина тока равна:

$$I_{\text{раб. max}} = 2 \cdot I_{\text{НР}}.$$

2. Расчет токов короткого замыкания для максимального и минимального режима работы питающей системы

Расчет сопротивлений элементов производится согласно схеме замещения (рис. 2.1).



**Рис. 2.1. Схема замещения распределительной сети системы электроснабжения
для расчета токов КЗ**

Минимальные и максимальные сопротивления схемы замещения, приведенные к U_B :
Сопротивление системы в ее максимальном режиме работы:

$$X_{G.MAX[115]} = \frac{X_{*G.max} \cdot U_B^2}{S_{GH}}, \text{ Ом.}$$

Сопротивление системы в ее минимальном режиме работы:

$$X_{G.MIN[115]} = \frac{X_{*G.min} \cdot U_B^2}{S_{GH}}, \text{ Ом.}$$

Сопrotивление воздушной линии W1 равно:

$$Z_{W1} = r_{W1[115]} + jx_{W1[115]}, \text{ Ом},$$

$$r_{W1[115]} = r_{уд.W1} \cdot l_{W1} \cdot \left(\frac{U_B}{U_{CP}}\right)^2, \text{ Ом},$$

$$x_{W1[115]} = x_{уд.W1} \cdot l_{W1} \cdot \left(\frac{U_B}{U_{CP}}\right)^2, \text{ Ом}.$$

Максимальное и минимальное сопротивления силового трансформатора T1 с учетом работы устройства РПН равны:

$$x_{T1,MAX[115]} = \frac{U_{K,MAX}}{100} \cdot \frac{U_{BH,MAX}^2}{S_{T,HOM}}, \text{ Ом},$$

$$x_{T1,MIN[115]} = \frac{U_{K,MIN}}{100} \cdot \frac{U_{BH,MIN}^2}{S_{T,HOM}}, \text{ Ом},$$

где $U_{BH,MAX}$ – предельно допустимое отклонение напряжения согласно ГОСТ 32144-2013

$$U_B \cdot (1 + \Delta U_{РПН}) > U_{МАХДОП},$$

$$U_{BH,MAX} = U_{МАХДОП} = 1,1 \cdot U_B,$$

$$U_{BH,MIN} = U_B \cdot (1 - \Delta U_{РПН}).$$

Схема замещения трансформатора с расщепленными обмотками имеет вид трехлучевой звезды. Сопротивление луча, обращенного к зажиму высшего напряжения, составляет $X_{BH}=0,125X_T$, а сопротивление двух других лучей составляет $X_{HH1}=X_{HH2}=1,75X_T$.

С учетом этого:

$$x_{T1(p),MAX[115]} = 0,125 \cdot x_{T1,MAX(115)} + 1,75 \cdot x_{T1,MAX(115)},$$

$$x_{T1(p),MIN[115]} = 0,125 \cdot x_{T1,MIN(115)} + 1,75 \cdot x_{T1,MIN(115)}.$$

Сопротивление кабельной линии W3, приведенное к стороне высокого напряжения, равно:

$$Z_{W3} = r_{W3[115]} + jx_{W3[115]}, \text{ Ом},$$

$$r_{W3[115]} = r_{уд.W3} \cdot l_{W3} \cdot \left(\frac{U_B}{U_{CP}}\right)^2, \text{ Ом},$$

$$x_{W3[115]} = x_{уд.W3} \cdot l_{W3} \cdot \left(\frac{U_B}{U_{CP}}\right)^2, \text{ Ом}.$$

Сопротивление кабельной линии W4, приведенное к стороне высокого напряжения, равно:

$$Z_{W4} = r_{W4[115]} + jx_{W4[115]}, \text{ Ом},$$

$$r_{W4[115]} = r_{уд.W4} \cdot l_{W4} \cdot \left(\frac{U_B}{U_{CP}}\right)^2, \text{ Ом},$$

$$x_{W4[115]} = x_{уд.W4} \cdot l_{W4} \cdot \left(\frac{U_B}{U_{CP}}\right)^2, \text{ Ом}.$$

2.1. Расчет тока КЗ в точке К-1

Максимальное и минимальное сопротивление схемы замещения участка сети (от ЭС до точки К-1), приведенные к U_B :

$$X_{K-1,MAX[115]} = X_{G,MAX[115]}, \text{ Ом},$$

$$X_{K-1,MIN[115]} = X_{G,MIN[115]}, \text{ Ом}.$$

Максимальный и минимальный ток при трехфазном КЗ в точке К-1:

$$I_{K-1,MAX[115]}^{(3)} = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot X_{K-1,MAX[115]}}, \text{ кА},$$

$$I_{K-1,MIN[115]}^{(3)} = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot X_{K-1,MIN[115]}}, \text{ кА}.$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-1:

$$I_{K-1,MIN[115]}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K-1,MIN[115]}^{(3)}, \text{ кА}.$$

2.2. Расчет тока КЗ в точке К-2

Максимальное и минимальное сопротивление схемы замещения участка сети (от ЭС до точки К-2), приведенные к U_B :

$$X_{K-2,MAX[115]} = X_{G,MAX[115]} + X_{W1[115]},$$

$$r_{K-2,MAX[115]} = r_{W1[115]},$$

$$Z_{K-2,MAX[115]} = \sqrt{X_{K-2,MAX[115]}^2 + r_{K-2,MAX[115]}^2}.$$

$$X_{K-2,MIN[115]} = X_{G,MIN[115]} + X_{W1[115]},$$

$$r_{K-2,MIN[115]} = r_{W1[115]},$$

$$Z_{K-2,MIN[115]} = \sqrt{X_{K-2,MIN[115]}^2 + r_{K-2,MIN[115]}^2}.$$

Максимальный и минимальный ток при трехфазном КЗ в точке К-2:

$$I_{K-2,MAX[115]}^{(3)} = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot Z_{K-2,MAX[115]}},$$

$$I_{K-2,MIN[115]}^{(3)} = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot Z_{K-2,MIN[115]}}.$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-2:

$$I_{K-2,MIN[115]}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K-2,MIN[115]}^{(3)}.$$

2.3. Расчет тока КЗ в точке К-3

1. Максимальное и минимальное сопротивление схемы замещения участка сети (от ЭС до точки К-3), приведенные к U_B :

$$X_{K-3,MAX[115]} = X_{G,MAX[115]} + X_{W1[115]} + X_{T1(p),MIN[115]},$$

$$r_{K-3,MAX[115]} = r_{W1[115]}.$$

$$Z_{K-3,MAX[115]} = \sqrt{x_{K-3,MAX[115]}^2 + r_{K-3,MAX[115]}^2}.$$

$$X_{K-3,MIN[115]} = X_{G,MIN[115]} + X_{W1[115]} + X_{T1(p),MAX[115]},$$

$$r_{K-3,MIN[115]} = r_{W1[115]},$$

$$Z_{K-3,MIN[115]} = \sqrt{x_{K-3,MIN[115]}^2 + r_{K-3,MIN[115]}^2}.$$

Максимальные и минимальные первичные токи, проходящие через защищаемый трансформатор при КЗ между тремя фазами на шинах 6 кВ.

Вычисление максимально возможного тока КЗ $I_{K-3,MAX[115]}^{(3)}$ следует производить при наименьшем сопротивлении питающей системы в максимальном ее режиме и сопротивлении силового трансформатора в минимальном режиме. Значения ЭДС питающей системы на стороне ВН защищаемого трансформатора при точном расчете токов КЗ должны быть получены из электрических расчетов сети во всех возможных режимах ее работы. Однако это достаточно трудно выполнить для современных сложных схем электроснабжения. Для практических расчетов токов КЗ за понижающим трансформатором можно воспользоваться известным методом наложения аварийных токов на токи нагрузки трансформатора в предаварийном режиме. В основу этого метода положено предположение о постоянстве номинального напряжения на стороне НН (или СН) трансформатора, которое обеспечивается автоматикой РПН. В целях упрощения практических расчетов определение $I_{K-3,MAX[115]}^{(3)}$ для выбора уставок релейной защиты понижающих трансформаторов с РПН можно производить по выражению [16]:

$$I_{K-3,MAX[115]}^{(3)} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K-3,MAX[115]}},$$

$$I_{K-3,MIN[115]}^{(3)} = \frac{U_{ВН,MAX}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K-3,MIN[115]}}.$$

2. Токи трехфазного КЗ за силовым трансформатором Т1, приведенные к стороне НН с учетом тока подпитки от ЭД (при включенном секционном выключателе).

Сопротивление двигателя М:

$$x_d'' = \frac{1}{K_{\Pi}},$$

$$x_{M1} = x_d'' \frac{U_B^2}{S_{НОМ,М}}.$$

где $U_6 = 6$ кВ.

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ от одного ЭД:

$$I_{K-3.M1} = \frac{E_{MG}'' \cdot U_B}{\sqrt{3} \cdot x_{M1}},$$

где $E_{MG}'' = \sqrt{\cos^2 \varphi_{НОМ} + (\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{НОМ}} \pm x_d'')^2}$ – сверхпереходная ЭДС электродвигателя.

Для асинхронного двигателя и синхронного двигателя, работающего в режиме недовозбуждения, перед сопротивлением двигателя будет стоять знак «-», для синхронного двигателя в режиме перевозбуждения – знак «+».

Максимальный ток трехфазного КЗ в точке К-3, приведенный к нерегулируемой стороне НН:

$$I_{K-3,MAX[6,3]}^{(3)} = I_{K-3,MAX[115]}^{(3)} \cdot \frac{U_{BH,MIN}}{U_{HH}} + n_{дв} \cdot I_{K-3,M1},$$

где $n_{дв}$ – согласно схеме (рис. 1.1) при включенном QB1.

Минимальный ток трехфазного КЗ в точке К-3, приведенный к нерегулируемой стороне НН:

$$I_{K-3,MIN[6,3]}^{(3)} = I_{K-3,MIN[115]}^{(3)} \cdot \frac{U_{BH,MAX}}{U_{HH}} + n_{дв} \cdot I_{K-3,M1}.$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-3, приведенный к нерегулируемой стороне НН:

$$I_{K-3,MIN[6,3]}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K-3,MIN[6,3]}^{(3)}.$$

3. Ток в точке К-3 для оценки защит (при отключенном секционном выключателе).

Максимальный ток трехфазного КЗ в точке К-3, приведенный к нерегулируемой стороне НН:

$$I_{K-3,MAX[6,3]}^{(3)} = I_{K-3,MAX[115]}^{(3)} \cdot \frac{U_{BH,MIN}}{U_{HH}} + n_{дв2} \cdot I_{K-3,M1},$$

где $n_{дв2}$ – согласно схеме (рис. 2.1) при отключенном QB1.

Минимальный ток трехфазного КЗ в точке К-3, приведенный к нерегулируемой стороне НН:

$$I_{K-3,MIN[6,3]}^{(3)} = I_{K-3,MIN[115]}^{(3)} \cdot \frac{U_{BH,MAX}}{U_{HH}} + n_{дв2} \cdot I_{K-3,M1}.$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-3, приведенный к нерегулируемой стороне НН:

$$I_{K-3,MIN[6,3]}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K-3,MIN[6,3]}^{(3)}.$$

2.4. Расчет тока КЗ в точке К-4

Расчет тока КЗ в точке К-4 производится с использованием метода эквивалентного генератора (МЭГ).

1. Расчет тока КЗ без учета тока подпитки от ЭД.

Максимальное и минимальное сопротивление схемы замещения участка сети от ЭС до точки К-4:

$$Z_{K-4,max[115]} = jx_{G,MAX[115]} + r_{W1[115]} + jx_{W1[115]} + jx_{T1(p),MIN[115]} + r_{W3[115]} + jx_{W3[115]}.$$

$$Z_{K-4,min[115]} = jx_{G,MIN[115]} + r_{W1[115]} + jx_{W1[115]} + jx_{T1(p),MAX[115]} + r_{W3[115]} + jx_{W3[115]}.$$

Максимальный и минимальный ток при трехфазном КЗ в точке К-3 без учета тока подпитки от ЭД:

$$I_{K-4,MAX[115]}^{(3)} = \frac{U_{HB}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{K-4,max[115]}|},$$

$$I_{K-4,MIN[115]}^{(3)} = \frac{U_{max,доп}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{K-4,min[115]}|}.$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-4 без учета тока подпитки от ЭД:

$$I_{K-4.MIN[115]}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K-4.MIN[115]}^{(3)}, \text{ A.}$$

Токи трехфазного КЗ в точке К-4 без учета тока подпитки от ЭД, приведенные к стороне НН:

$$I_{K-4.MAX[6,3]}^{(3)} = I_{K-4.MAX[115]}^{(3)} \cdot \frac{U_{BH.MIN}}{U_{CH}}, \text{ кА,}$$

$$I_{K-4.MIN[6,3]}^{(3)} = I_{K-4.MIN[115]}^{(3)} \cdot \frac{U_{\max, \text{доп}}}{U_{CH}}, \text{ кА.}$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-4 без учета тока подпитки от ЭД, приведенный к стороне НН:

$$I_{K-4.MIN[6,3]}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K-4.MIN[6,3]}^{(3)}, \text{ кА.}$$

2. Расчет тока КЗ с учетом тока подпитки от ЭД.

Максимальное и минимальное сопротивление схемы замещения участка сети от ЭС до точки К-3:

$$Z_{G.MAX[115]} = jx_{G.MAX[115]} + r_{W1[115]} + jx_{W1[115]} + jx_{T1(p),MIN[115]}, \text{ Ом,}$$

$$Z_{G.MIN[115]} = jx_{G.MIN[115]} + r_{W1[115]} + jx_{W1[115]} + jx_{T1(p),MAX[115]}, \text{ Ом.}$$

Максимальное и минимальное суммарное сопротивление двигателя М1 и линии W4:

$$Z_{M.W4.MAX[115]} = (r_{W4[6,3]} + jx_{W4[6,3]} + jx_{M1[6,3]}) \cdot K_{T1.MAX}^2, \text{ Ом,}$$

$$Z_{M.W4.MIN[115]} = (r_{W4[6,3]} + jx_{W4[6,3]} + jx_{M1[6,3]}) \cdot K_{T1.MIN}^2, \text{ Ом,}$$

$$\text{где } r_{W4[6,3]} = r_{yD.W4} \cdot l_{W4}, \text{ Ом,}$$

$$x_{W4[6,3]} = x_{yD.W4} \cdot l_{W4}, \text{ Ом,}$$

$$K_{T1.MAX} = \frac{U_{CB} \cdot (1 - \Delta U_{*PIH})}{U_{CH}},$$

$$K_{T1.MIN} = \frac{U_{\max, \text{доп}}}{U_{CH}}.$$

Сверхпереходная ЭДС асинхронного электродвигателя:

$$E_{MG}'' = \sqrt{\cos^2 \varphi_{\text{ном}} + (\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{ном}}} - x_d'')^2},$$

$$E_G'' = 1.$$

Эквивалентная ЭДС:

$$E_{\mathcal{E}.MAX} = \frac{E_{MG}'' \cdot Z_{G.MAX[115]} + E_G'' \cdot Z_{M.W4.MAX[115]}}{Z_{G.MAX[115]} + Z_{M.W4.MAX[115]}}, \text{ В,}$$

$$E_{\mathcal{E}.MIN} = \frac{E_{MG}'' \cdot Z_{G.MIN[115]} + E_G'' \cdot Z_{M.W4.MIN[115]}}{Z_{G.MIN[115]} + Z_{M.W4.MIN[115]}}, \text{ В.}$$

Эквивалентное сопротивление до точки К-3:

$$Z_{\mathcal{E}.MAX[115]} = \frac{Z_{G.MAX[115]} \cdot Z_{M.W4.MAX[115]}}{Z_{G.MAX[115]} + Z_{M.W4.MAX[115]}}, \text{ Ом,}$$

$$Z_{\text{Э.МІН}[115]} = \frac{Z_{\text{Г.МІН}[115]} \cdot Z_{\text{М.В4.МІН}[115]}}{Z_{\text{Г.МІН}[115]} + Z_{\text{М.В4.МІН}[115]}}, \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление до точки К-4:

$$Z_{\text{К-4.МАХ}[115]} = Z_{\text{Э.МАХ}[115]} + Z_{\text{В3}[6,3]} \cdot K_{\text{Т1.МАХ}}^2, \text{ Ом,}$$

$$Z_{\text{К-4.МІН}[115]} = Z_{\text{Э.МІН}[115]} + Z_{\text{В3}[6,3]} \cdot K_{\text{Т1.МІН}}^2, \text{ Ом,}$$

где $Z_{\text{В3}[6,3]} = r_{\text{уд.В4}} \cdot l_{\text{В4}} + j(x_{\text{уд.В4}} \cdot l_{\text{В4}})$, Ом.

Максимальный и минимальный ток при трехфазном КЗ в точке К-4 с учетом тока подпитки от ЭД:

$$I_{\text{К-4.МАХ}[115]}^{(3)} = \frac{|E_{\text{Э.МАХ}}| \cdot U_{\text{ВН}}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{\text{К-4.МАХ}[115]}|}, \text{ А,}$$

$$I_{\text{К-4.МІН}[115]}^{(3)} = \frac{|E_{\text{Э.МІН}}| \cdot U_{\text{макс.доп}}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{\text{К-4.МІН}[115]}|}, \text{ А.}$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-4 с учетом тока подпитки от ЭД:

$$I_{\text{К-4.МІН}[115]}^{(2)} = I_{\text{К-4.МІН}[115]}^{(3)}, \text{ А.}$$

Токи трехфазного КЗ в точке К-4 с учетом тока подпитки от ЭД, приведенные к стороне НН:

$$I_{\text{К-4.МАХ}[6,3]}^{(3)} = I_{\text{К-4.МАХ}[115]}^{(3)} \cdot K_{\text{Т1.МАХ}}, \text{ кА,}$$

$$I_{\text{К-4.МІН}[6,3]}^{(3)} = I_{\text{К-4.МІН}[115]}^{(3)} \cdot K_{\text{Т1.МІН}}, \text{ кА.}$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-4 с учетом тока подпитки от ЭД, приведенный к стороне НН:

$$I_{\text{К-4.МІН}[6,3]}^{(2)} = I_{\text{К-4.МІН}[6,3]}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \text{ кА.}$$

2.5. Расчет тока КЗ за цеховым трансформатором ТЗ в точке К-5

1. Расчет максимального тока КЗ в точке К-5.

Полное сопротивление трансформатора ТЗ, приведенное к стороне ВН:

$$Z_{\text{ТЗ}[6,3]} = \frac{U_{\text{К}} \cdot U_{\text{ном.Т}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном.Т}}}, \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление трансформатора, приведенное к стороне ВН:

$$r_{\text{ТЗ}[6,3]} = \frac{P_{\text{К}} \cdot U_{\text{ном.ТЗ}}^2}{S_{\text{ном.ТЗ}}^2}, \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление трансформатора:

$$x_{\text{ТЗ}[6,3]} = \sqrt{Z_{\text{ТЗ}[6,3]}^2 - r_{\text{ТЗ}[6,3]}^2}, \text{ Ом.}$$

Максимальное значение тока при трехфазном металлическом КЗ за трансформатором ТЗ, отнесенное к стороне ВН:

$$I_{\text{К-5.МАХ}[6,3]}^{(3)} = \frac{U_{\text{сп}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(r_{\text{К-4,МАХ}[6,3]} + r_{\text{ТЗ}[6,3]})^2 + (x_{\text{К-4,МАХ}[6,3]} + x_{\text{ТЗ}[115]})^2}}, \text{ кА,}$$

где $r_{K-4,MAX[6,3]} = r_{K-4,MAX[115]} \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2$, Ом,

$$r_{K-4,MAX[115]} = r_{W1[115]} + r_{W3[115]}, \text{ Ом},$$

$$X_{K-4,MAX[6,3]} = X_{K-4,MAX[115]} \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2, \text{ Ом},$$

$$X_{K-4,MAX[115]} = X_{G,MAX[115]} + X_{W1[115]} + X_{T1(p),MIN[115]} + X_{W3[115]}, \text{ Ом}.$$

Максимальное значение тока трехфазного КЗ в точке К-5, отнесенное к стороне НН:

$$I_{K-5,MAX[0,4]}^{(3)} = I_{K-5,MAX[6,3]}^{(3)} \cdot \frac{U_{BH}}{U_{HH}}, \text{ кА}.$$

2. Расчет минимального тока КЗ в точке К-5.

Суммарное активное сопротивление цепи КЗ, приведенное к стороне НН:

$$r_{\Sigma} = r_{K-4,MIN[0,4]} + r_{T3[0,4]} + r_{III} + r_{KB} + r_K + r_{II}, \text{ мОм},$$

где $r_{K-4,MIN[0,4]} = r_{K-4,MIN[115]} \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2$, мОм – активное сопротивление системы до цехового трансформатора.

$$r_{K-4,MIN[115]} = r_{W1[115]} + r_{W3[115]}, \text{ Ом},$$

$$r_{T3[0,4]} = r_{T3[6,3]} \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2, \text{ мОм} – \text{активное сопротивление цехового трансформатора, приведенное к стороне НН};$$

$r_{III} = r_1 \cdot l_{III}$, мОм – активное сопротивление шинопровода от трансформатора до секции шин 0,4 кВ, удельное сопротивление которого определено согласно [4: Приложение 1, табл. 3].

$$I_{ном} = \frac{S_{ном.T3}}{\sqrt{3} \cdot U_{HH}}, \text{ А},$$

r_{KB} – активное сопротивление токовых катушек и контактов автоматического выключателя QF1 [4: Приложение 6, таблица 21].

$r_K = 1$ мОм – активное сопротивление контактов коммутационных аппаратов цепи КЗ.

r_{II} – активное переходное сопротивление дуги в разделке кабеля, отходящего от секции шин 0,4 кВ [4: Приложение 9, чертежи 12–22].

Суммарное индуктивное сопротивление цепи КЗ, приведенное к стороне НН:

$$X_{\Sigma} = X_{K-4,MIN[0,4]} + X_{T3[0,4]} + X_{III} + X_{KB},$$

где $X_{K-4,MIN[0,4]} = X_{K-4,MIN[115]} \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2$, мОм – индуктивное сопротивление системы до цехового трансформатора в минимальном режиме, т. к.

$$X_{K-4,MIN[115]} = X_{G,MIN[115]} + X_{W1[115]} + X_{T1(p),MAX[115]} + X_{W3[115]}, \text{ Ом},$$

$$X_{T3[0,4]} = X_{T3[6,3]} \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2, \text{ мОм} – \text{индуктивное сопротивление цехового трансформатора, приведенного к стороне НН}.$$

$x_{ш} = x_1 \cdot l_{ш}$, мОм – индуктивное сопротивление шинпровода от трансформатора до секции шин 0,4 кВ, удельное сопротивление которого определено согласно [4: Приложение 1, табл. 3].

$x_{кв} = 0,1$ мОм – индуктивное сопротивление токовых катушек и контактов автоматического выключателя QF1 определено по табл. [4: Приложение 6, табл. 21].

Минимальное значение тока трехфазного КЗ вблизи секции шин 0,4 кВ с учетом активного сопротивления дуги:

$$I_{K-5.MIN[0,4]}^{(3)} = \frac{U_{ср.НН}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}}, \text{ кА.}$$

Минимальное значение тока трехфазного КЗ в точке К-5, отнесенное к стороне ВН:

$$I_{K-5.MIN[6,3]}^{(3)} = I_{K-5.MIN[0,4]}^{(3)} \cdot \frac{U_{НН}}{U_{ВН}}, \text{ кА.}$$

Для трансформаторов со схемой соединения обмоток «треугольник – звезда» значение тока в месте однофазного КЗ за трансформатором считается практически равным току трехфазного КЗ в той же точке. Результаты расчета необходимо оформить в виде таблицы 2.5.

Таблица 2.5

Расчетные значения токов КЗ

Ток КЗ	К-1[115]	К-2[115]	К-3		К-4	К-5
			QB вкл.	QB выкл.	QB выкл.	
$I_{K.MAX}^{(3)}, \text{ кА}$						
$I_{K.MIN}^{(3)}, \text{ кА}$						
$I_{K.MIN}^{(2)}, \text{ кА}$						

3. Релейная защита трансформатора Т1 для микропроцессорного устройства Seram T87

3.1. Расчет параметров срабатывания дифференциальной защиты трансформатора Т1

Дифференциальная защита терминала Seram T87 выполнена пофазной. Она включает дифференциальную отсечку и чувствительную дифференциальную защиту с процентной тормозной характеристикой и блокировками по второй и пятой гармоникам. Тормозная характеристика имеет три участка: горизонтальный и два наклонных, проходящих через начало координат. Горизонтальный участок, крутизна наклонных частей и точка изменения крутизны регулируются. В качестве тормозного тока используется абсолютное значение наибольшего тока двух сторон силового трансформатора (см. Приложение, рис. 1) [6, 7, 1].

Определим соответствие установленных трансформаторов тока номинальным параметрам.

1) По условию выравнивания вторичных токов по величине

$$0,1 \cdot I_{\text{НОМ.Т}} < I_{\text{НОМ.ТТ}} < 2,5 \cdot I_{\text{НОМ.Т}} \text{ (условие фирмы).}$$

Номинальные токи силового трансформатора по формуле

$$I_{\text{НОМ.Т}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}}.$$

Трансформаторы тока на стороне 110 кВ $K_{\text{ТТ}(110)} = I_{\text{НВН}} / 5$, на стороне 6 кВ $K_{\text{ТТ}(6)} = I_{\text{ННН}} / 5$.

$$0,1 \cdot I_{\text{НОМ.Т}} < I_{\text{НВН}} < 2,5 \cdot I_{\text{НОМ.Т}} \text{ — для ТТ стороны 110 кВ.}$$

$$0,1 \cdot I_{\text{НОМ.Т}} < I_{\text{ННН}} < 2,5 \cdot I_{\text{НОМ.Т}} \text{ — для ТТ стороны 6 кВ.}$$

2) По условию отстройки от броска тока намагничивания

Для проверки пригодности ТТ по условию отстройки от броска тока намагничивания необходимо определить амплитудную величину броска тока намагничивания. Так как в паспортных данных на трансформатор не приведена величина броска тока намагничивания и не приведено сопротивление трансформатора при полном насыщении, то определяем сопротивление трансформатора при полном насыщении по приближенной формуле для трансформаторов до 63 МВА:

$$X^{(1)} *_{\text{В}} = 0,094 + \frac{0,74 \cdot U_{\text{К\%}}}{100}.$$

Определяем относительное индуктивное сопротивление прямой последовательности контура включения, предварительно приведя сопротивление линии электропередачи к базисным условиям:

$$X_{\text{Б}} = \frac{U_{\text{НОМВН}}^2}{S_{\text{НОМТ}}}.$$

Вычисляем сопротивление линии, пренебрегая активным сопротивлением:

$$X_{\text{Л}} = x_{\text{уд}} \cdot l_{\text{W1}}, \text{ Ом} \quad \text{или} \quad X_{\text{Л}} *_{\text{В}} = \frac{X_{\text{Л}}}{X_{\text{Б}}}.$$

Сопротивление контура включения:

$$X^* = X_{\text{Л}} *_{\text{В}} + K_1 \cdot X^{(1)} *_{\text{В}},$$

где $K_1 = 1,1 - 1,15$.

То же в именованных единицах: $X = X^* \cdot X_B$, Ом.

Амплитудное значение броска тока намагничивания определяется:

$$I_{бр.нам(ампл)} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_B \cdot (1 + A)}{\sqrt{3} \cdot X}, A,$$

где $U_{лин}$ – линейное напряжение со стороны включения трансформатора под напряжение; A – относительное смещение оси синусоиды потокосцепления по отношению к точке перегиба характеристики намагничивания. Величина A зависит от материала магнитопровода, индукции насыщения, остаточной индукции, от однофазного или трехфазного броска тока намагничивания.

С целью повышения надежности отстройки от броска тока намагничивания и согласно рекомендации [1] принимаем для трансформаторов с холоднокатаной сталью всех напряжений коэффициент $A = 0,39$, а для трансформаторов с горячекатаной сталью – $A = 0,25$ или $0,06$.

Кратность тока по отношению к амплитудному значению номинального тока ТТ:

$$K_{ТТ} = \frac{I_{бр.нам(ампл)}}{\sqrt{2} \cdot I_{ном.ТТ(110)}}.$$

Следовательно, по условию отстройки от броска тока намагничивания предельная кратность ТТ стороны 110 кВ должна быть: $K_{10} \geq 20$.

Определяем предельную кратность ТТ при заданной нагрузке ТТ стороны 110 кВ:

$$R_{нагр} = R_k + R_{пер} + R_{вх.терм},$$

где R_k – сопротивление контрольного кабеля; $R_{пер}$ – переходное сопротивление соединительных контактов в токовых цепях, равное 0,05 Ом; $R_{вх.терм}$ – входное сопротивление терминала, равное 0,01 Ом.

Сопротивление контрольного кабеля:

$$R_k = \frac{\rho \cdot L_k}{S_k},$$

где ρ – удельное сопротивление материала жил кабеля, для алюминиевого кабеля

$$\rho = 0,029 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}, \text{ и для медного кабеля } \rho = 0,017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

По кривым предельной кратности для ТТ проверяется условие $K_{10} > 20$ и выполнение требования отстройки от броска тока намагничивания.

Если для данного ТТ отсутствует кривая предельной кратности, но в технических данных приведены величина номинальной предельной кратности $K_{10,ном}$ для номинальной нагрузки и величины активного и индуктивного сопротивления вторичной обмотки ТТ, то фактическая предельная кратность определяется:

$$K_{факт} = K_{10,ном} \cdot \sqrt{(R_2 + 0,8 \cdot Z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0,6 \cdot Z_{н.ном})^2} / \sqrt{(R_2 + R_{нагр})^2 + X_2^2}.$$

3) По условию отстройки от переходных режимов

Приведенная предельная кратность ТТ для данного ТТ должна быть:

$$K' = \left(\frac{K_{10} \cdot I_{1,ном.ТТ}}{I_{1,ном.Т}} \right) > 20 \text{ или } K_{10} = \frac{K' \cdot I_{1,ном.Т}}{I_{1,ном.ТТ}}.$$

Аналогично должны проверяться ТТ стороны 6 кВ (за исключением требования отстройки от тока намагничивания). Однако, учитывая небольшую вторичную нагрузку ТТ 10 кВ, пригодность ТТ будет обеспечена.

Проверим возможность использования самоадаптирующегося торможения.

Условием использования этого торможения является требование, чтобы амплитудное значение броска тока намагничивания было меньше 8-кратного номинального тока трансформатора:

$$I_{\text{бр.нам(ампл)}} < 8 \cdot I_{\text{ном.Т(110)}},$$

$$I_{\text{бр.нам(ампл)}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{Б}} \cdot (1 + A)}{\sqrt{3} \cdot X},$$

$$\frac{I_{\text{бр.нам(ампл)}}}{I_{\text{ном.Т(110)}}}.$$

Следовательно, применяется традиционное торможение.

Минимальный ток срабатывания с учетом $K_{\text{пер}}=1,0$:

$$I_{\text{дс}} = 1,1 \cdot (K_{\text{пер}} \cdot \varepsilon + \frac{\Delta U_{\text{рег}}}{1 - \Delta U_{\text{рег}}} + 0,02).$$

Полная погрешность ТТ для всех режимов принимается равной предельной допустимой, т. е. равной 10%, $\varepsilon = 0,1$.

$\Delta U_{\text{рег}}$ – диапазон регулирования напряжения с помощью ПРН – выбирается согласно номинальному напряжению силового трансформатора (110 кВ – 16%; 220 кВ – 12%).

Принимаем к установке **$I_{\text{дс}}$** , округляя **вниз** до ближайшего целого.

Крутизна первого наклонного участка тормозной характеристики определяется:

$$I_{\text{д}} / I_{\text{т}} = 1,1 \cdot (K_{\text{пер}} \cdot 0,1 + \frac{\Delta U_{\text{рег}}}{1 - \Delta U_{\text{рег}}} + 0,02),$$

$$K_{\text{пер}} = 2 - 2,5.$$

Принимаем к установке **$I_{\text{д}}/I_{\text{т}}$** , округляя вниз до ближайшего целого.

Точка изменения крутизны тормозной характеристики:

$$SLP \leq 2 + \frac{3}{4} \cdot \left(\min(I_{\text{бр.нам.1}}^*; I_{\text{бр.нам.2}}^*) \right)^{\frac{4}{3}} \cdot I_{\text{д}} / I_{\text{т}}^*,$$

где $I_{\text{бр.нам.1}}^* = \frac{I_{\text{бр.нам.1}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{ном.Т}}}$, $I_{\text{бр.нам.2}}^* = \frac{I_{\text{бр.нам.2}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{2ном.Т}}}$, где в качестве броска тока намагничивания ре-

комендуется брать кратность тока по отношению к амплитудному значению номинального тока ТТ – $K_{\text{ТТ}}$; $I_{\text{бр.нам.1}}$ – амплитудное первичное значение броска тока намагничивания силового трансформатора со стороны первой обмотки; $I_{\text{бр.нам.2}}$ – амплитудное первичное значение броска тока намагничивания силового трансформатора со стороны второй обмотки; $I_{\text{1ном.Т}}$ – номинальный ток силового трансформатора первой обмотки; $I_{\text{2ном.Т}}$ – номинальный ток силового трансформатора второй обмотки; $I_{\text{д}} / I_{\text{т}}^*$ – наклон первого участка тормозной характеристики.

Принимаем к установке **SLP** , округляя вниз до ближайшего целого.

Крутизна второго наклонного участка тормозной характеристики ($I_{\text{д}}/I_{\text{т}2}$) согласно [7] принимается равной:

$$I_{\text{д}}/I_{\text{т}2} = 60-70\%,$$

$$I_{\text{д}}/I_{\text{т}2} = 65\%.$$

Принимается к установке **$I_{\text{д}}/I_{\text{т}2} = 65\%$** .

Ток срабатывания дифференциальной отсечки определяется из сравнения двух условий:

1) *Отстройка от броска тока намагничивания:*

$$I_{\text{дmax}} > K_{\text{отс}} \cdot \max(I_{\text{бр.нам.1}}^*; I_{\text{бр.нам.2}}^*),$$

где $I_{бр.нам.1}$ – амплитудное первичное значение броска тока намагничивания силового трансформатора со стороны первой обмотки; $I_{бр.нам.1}$ – амплитудное первичное значение броска тока намагничивания силового трансформатора со стороны второй обмотки; $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, равный 1,4.

2) *Отстройка от максимального значения внешнего короткого замыкания*

Максимальное значение внешнего КЗ будет при трехфазном повреждении на стороне 6 кВ в режиме минимального сопротивления силового трансформатора. Наименьшее сопротивление трансформатора будет при отрицательном положении анцапф РПН:

$$Z_{тр} = \left(\frac{U_{K\%min}}{100} \right) \cdot \frac{U_{ном.Н}^2}{S_{ном}}, \text{ Ом},$$

где $U_{ном.Н} = U_6(1 - \Delta U_{рпн})$, кВ.

Результирующее сопротивление до места короткого замыкания:

$$Z_{\Sigma} = X_{л} + Z_{тр}, \text{ Ом}.$$

Ток короткого замыкания равен:

$$I^{(3)} = \frac{U_{ном.В}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}}, \text{ А},$$

что соответствует:

$$K = \frac{I^{(3)}}{I_{ном.Т(110)}}.$$

Ток срабатывания дифференциальной отсечки:

$$I_{д.макс} = K_{отс} \cdot K_{нб} \cdot I_{КЗ.макс},$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, равный 1,2; $K_{нб}$ – коэффициент, равный отношению амплитуды первой гармоники тока небаланса к амплитуде периодической составляющей внешнего тока короткого замыкания; $K_{нб} = 0,7$ при установке со всех сторон силового трансформатора ТТ с вторичными токами 5 А; $K_{нб} = 1,0$ при условии установки с одной стороны ТТ с вторичным током 5 А, а с другой стороны – 1 А; $I_{КЗ.макс}$ – максимальное значение периодической составляющей тока внешнего короткого замыкания.

$$I_{д.макс} = 1,2 \cdot 0,7 \cdot K = k I_{н1}.$$

Принимаем к установке **$I_{дмакс} = k I_{н1}$** .

Следует обратить внимание, что и при использовании самоадаптирующегося торможения необходимо ввести дифференциальную отсечку, т. к. если используется блокировка дифференциальной защиты при неисправности ТТ, то при срабатывании этой блокировки трансформатор остается без дифференциальной защиты. Активация дифференциальной отсечки позволяет сохранить хотя бы эту защиту в случае неисправности ТТ.

Пример построения тормозной характеристики Sepam 87Т приведен в графической части проекта (см. *Приложение*).

Уставки блокировок по второй и пятой гармоникам принимаются:

$I2f/ I1f = 15\%$ с поперечной блокировкой;

$I5f/ I1f = 35\%$ с пофазной блокировкой.

3.2. Расчет параметров срабатывания максимальной токовой защиты стороны ВН трансформатора Т1

Расчет параметров срабатывания уставок МТЗ заключается в выборе: тока срабатывания защиты; тока срабатывания реле; времени срабатывания защиты (для защит с независи-

мыми характеристиками выдержек времени); коэффициентов чувствительности в основной и резервной зоне.

1) Ток самозапуска электродвигателей нагрузки определяется как ток трехфазного КЗ за эквивалентным сопротивлением, которое включает в себя сопротивления всех элементов системы в максимальном режиме ее работы и сопротивление нагрузки.

Максимальный рабочий ток через QB для ПАР:

$$I_{\text{раб. max. QB}} = \frac{0,7}{n1} \cdot \frac{S_{\text{ном. T1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{CH}}}, \text{ A.}$$

где $n1 = 2$ с расщепленной вторичной обмоткой, $n1 = 1$ без расщепления вторичной обмоткой силового трансформатора.

Номинальный ток двигателя M:

$$I_{\text{ном. M}} = \frac{P_{\text{ном. M}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном. M}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{ном. M}}}, \text{ A.}$$

Сопротивление двигателя:

$$x_M = \frac{U_{\text{ном. M}}}{\sqrt{3} \cdot k_{\Pi} \cdot I_{\text{ном. M}}}, \text{ Ом,}$$

$$x_{M, \Sigma} = \frac{x_M}{N}, \text{ Ом.}$$

В данном расчете рассматривается количество двигателей, подключенных к одной секции шин HH, N.

$$I_{\text{раб. max}[0,4]} = I_{\text{раб. max. QB}} - N \cdot I_{\text{ном. M}}, \text{ A.}$$

Сопротивление нагрузки 0,4 кВ:

$$x_{H[0,4]} = \frac{x_{*H} \cdot U_{\text{CH}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб. max}[0,4]}}, \text{ Ом.}$$

$$x_{\text{ЭН}[6,3]} = x_{H[0,4]} // x_{M, \Sigma} = \frac{x_{H[0,4]} \cdot x_{M, \Sigma}}{x_{H[0,4]} + x_{M, \Sigma}}, \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление:

$$Z_{\text{Э}[6,3]} = r_{\text{Э}[6,3]} + jx_{\text{Э}[6,3]},$$

$$r_{\text{Э}[6,3]} = r_{\text{WI}[115]} \cdot \left(\frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}}\right)^2, \text{ Ом,}$$

$$x_{\text{Э}[6,3]} = (x_{\text{G. MAX}[115]} + x_{\text{WI}[115]} + x_{\text{T1(p), MIN}[115]}) \cdot \left(\frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}}\right)^2 + x_{\text{ЭН}[6,3]}, \text{ Ом.}$$

Ток самозапуска:

$$I_{\text{CЗП}} = \frac{U_{\text{CH}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\text{Э}[6,3]}^2 + x_{\text{Э}[6,3]}^2}}, \text{ кА.}$$

Коэффициент самозапуска:

$$k_{\text{CЗП}} = \frac{I_{\text{CЗП}}}{I_{\text{раб. max. QB}}}.$$

Минимальное напряжение на шинах HH:

$$U_{\text{MIN}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{CЗП}} \cdot x_{\text{ЭН}[6,3]}, \text{ кВ.}$$

$$U_{*MIN} = \frac{U_{MIN}}{U_{HH}} \geq 0,55...0,7.$$

Время срабатывания МТЗ с независимой характеристикой, установленной на секционном выключателе QB:

$$t_{C3.QB} = t_{C3.max} + \Delta t, c,$$

где $t_{C3.max}$ – максимальное время срабатывания МТЗ на стороне HH, с.

$$\Delta t = 0,3...0,6c.$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{C3.QB[6,3]} = \frac{k_o \cdot k_{C3П}}{k_B} \cdot I_{раб.max.QB}, \text{ кА},$$

где $k_o = 1,1...1,2$ – коэффициент отстройки; $k_B = 0,92$ – коэффициент возврата реле.

Коэффициент чувствительности:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{K-3,MIN[6,3]}^{(2)}}{I_{C3.QB[6,3]}} \geq 1,5,$$

где $I_{K-3,MIN[6,3]}^{(2)}$ – минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-3 (при выключенных секционных выключателях).

2) Выбирается ток срабатывания МТЗ, установленной на ВН трансформатора. В качестве тока срабатывания защиты выбирается большее значение тока, полученное по следующим трем расчетным условиям.

2.1) По условию отстройки от самозапуска электродвигателей нагрузки.

Максимальный рабочий ток трансформатора Т1 для ПАР:

$$I_{раб.max.T1[115]} = \frac{1,4 \cdot S_{ном.T1}}{\sqrt{3} \cdot U_{BH}}, \text{ А.}$$

$$I_{ном.M[115]} = I_{ном.M[6,3]} \cdot \frac{U_{CH}}{U_{CB}}, \text{ А.}$$

Сопротивление двигателя:

$$X_{M[6,3]} = \frac{U_{ном.M}}{\sqrt{3} \cdot k_{II} \cdot I_{ном.M}}, \text{ Ом},$$

$$X_{M[115]} = X_{M[6,3]} \cdot \left(\frac{U_{CB}}{U_{CH}}\right)^2, \text{ Ом},$$

$$X_{M.\Sigma[115]} = \frac{X_{M[115]}}{N}, \text{ Ом.}$$

Сопротивление нагрузки 0,4 кВ:

$$X_{H.0,4[115]} = \frac{X_{*H} \cdot U_{CB}}{\sqrt{3} \cdot (I_{раб.max.T1[115]} - N \cdot I_{ном.M[115]})}, \text{ Ом},$$

где $N = 4$ – количество всех установленных двигателей, на четырех секциях.

$$X_{ЭН[115]} = X_{H.0,4[115]} // X_{M.\Sigma[115]} = \frac{X_{H.0,4[115]} \cdot X_{M.\Sigma[115]}}{X_{H.0,4[115]} + X_{M.\Sigma[115]}}, \text{ Ом},$$

$$X_{ЭН[6,3]} = X_{ЭН[115]} \cdot \left(\frac{U_{CH}}{U_{CB}}\right)^2, \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление:

$$\begin{aligned} Z_{\Sigma[115]} &= r_{\Sigma[115]} + jx_{\Sigma[115]}, \\ r_{\Sigma[115]} &= r_{W1[115]}, \text{ Ом}, \\ x_{\Sigma[115]} &= x_{G.MAX[115]} + x_{W1[115]} + x_{T1(p),MIN[115]} + x_{\Sigma H[115]}, \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Ток самозапуска:

$$\begin{aligned} I_{C3П[115]} &= \frac{U_{CB}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\Sigma[115]}^2 + x_{\Sigma[115]}^2}}, \text{ А}, \\ I_{C3П[6,3]} &= I_{C3П[115]} \cdot \frac{U_{CB}}{U_{CH}}, \text{ кА}. \end{aligned}$$

Коэффициент самозапуска:

$$k_{C3П[115]} = \frac{I_{C3П[115]}}{I_{\text{раб. max. T1[115]}}}.$$

Минимальное напряжение на шинах НН:

$$\begin{aligned} U_{\text{MIN}} &= \sqrt{3} \cdot I_{C3П[6,3]} \cdot x_{\Sigma H[6,3]}, \text{ кВ}, \\ U_{*\text{MIN}} &= \frac{U_{\text{MIN}}}{U_{\text{HH}}} \geq 0,55 \dots 0,7. \end{aligned}$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{C3} = \frac{k_o \cdot k_{C3П[115]}}{k_B} \cdot I_{\text{раб. max. T1[115]}}, \text{ А},$$

где $k_o = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент отстройки; $k_B = 0,92$ – коэффициент возврата реле.

2.2) По условию отстройки от тока перегрузки при действии АВР трансформаторов, в результате чего к работающему с нагрузкой трансформатору Т1 подключается затормозившаяся нагрузка отключившегося трансформатора Т3.

Максимальный рабочий ток трансформатора Т1 для НР:

$$I_{\text{раб. max. T1[115]}} = I_{\text{раб. max. T2[115]}} = \frac{0,7 \cdot S_{\text{ном. T1}}}{\sqrt{3} \cdot U_B}, \text{ А}.$$

Номинальный ток двигателя М:

$$\begin{aligned} I_{\text{ном. M[6,3]}} &= \frac{P_{\text{ном. M}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном. M}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{ном. M}}}, \text{ А}, \\ I_{\text{ном. M[115]}} &= I_{\text{ном. M[6,3]}} \cdot \frac{U_{CH}}{U_{CB}}, \text{ А}. \end{aligned}$$

Сопротивление двигателя:

$$\begin{aligned} x_{M[6,3]} &= \frac{U_{\text{ном. M}}}{\sqrt{3} \cdot k_{\Pi} \cdot I_{\text{ном. M}}}, \text{ Ом}, \\ x_{M[115]} &= x_{M[6,3]} \cdot \left(\frac{U_{CB}}{U_{CH}} \right)^2, \text{ Ом}, \\ x_{M.\Sigma[115]} &= \frac{x_{M[115]}}{N}, \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Сопротивление нагрузки 0,4 кВ:

$$X_{H.0,4[115]} = \frac{X_{*H} \cdot U_{CB}}{\sqrt{3} \cdot (I_{\text{раб. max. T1}[115]} - N \cdot I_{\text{ном. M}[115]})}, \text{ Ом.}$$

В данном расчете рассматривается количество двигателей, получающих питание от одного трансформатора, $N = 2$.

$$X_{ЭН[115]} = X_{H.0,4[115]} / X_{M.\Sigma[115]} = \frac{X_{H.0,4[115]} \cdot X_{M.\Sigma[115]}}{X_{H.0,4[115]} + X_{M.\Sigma[115]}}, \text{ Ом,}$$

$$X_{ЭН[6,3]} = X_{ЭН[115]} \cdot \left(\frac{U_{CH}}{U_{CB}}\right)^2, \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление:

$$Z_{Э[115]} = r_{Э[115]} + jx_{Э[115]},$$

$$r_{Э[115]} = r_{W1[115]}, \text{ Ом.}$$

$$X_{Э[115]} = X_{G.MAX[115]} + X_{W1[115]} + X_{T1(p), MIN[115]} + X_{ЭН[115]}, \text{ Ом.}$$

Ток самозапуска:

$$I_{C3П[115]} = \frac{U_{CB}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{Э[115]}^2 + x_{Э[115]}^2}}, \text{ А,}$$

$$I_{C3П[6,3]} = I_{C3П[115]} \cdot \frac{U_{CB}}{U_{CH}}, \text{ кА.}$$

Коэффициент самозапуска:

$$k_{C3П[115]} = \frac{I_{C3П[115]}}{I_{\text{раб. max. T1}[115]}}.$$

Минимальное напряжение на шинах НН:

$$U_{\text{MIN}} = \sqrt{3} \cdot I_{C3П[6,3]} \cdot X_{ЭН[6,3]}, \text{ кВ,}$$

$$U_{*MIN} = \frac{U_{\text{MIN}}}{U_{\text{HH}}} \geq 0,55 \dots 0,7.$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{C3} \geq \frac{k_o}{k_B} \cdot (I_{\text{раб. max. T1}[115]} + k_{C3П[115]} \cdot I_{\text{раб. max. T2}[115]}), \text{ А,}$$

где $k_o = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент отстройки; $k_B = 0,92$ – коэффициент возврата реле; $k_{C3П}$ – коэффициент самозапуска электродвигателя.

При наличии электродвигателей ток срабатывания определяется при пуске электродвигателя.

2.3) По условию отстройки (согласования) с током срабатывания МТЗ, установленной на секционном выключателе (предыдущем элементе СЭС).

Ток срабатывания защиты, установленной на секционном выключателе QB:

$$I_{C3.QB[115]} = I_{C3.QB[6,3]} \cdot \frac{U_{CH}}{U_{CB}}, \text{ А.}$$

Максимальный рабочий ток трансформатора Т1 для НР:

$$I_{\text{раб. max. T1}[115]} = \frac{0,7 \cdot S_{\text{ном. T1}}}{\sqrt{3} \cdot U_B}, \text{ А.}$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{C3} \geq k_{HC} \cdot (I_{C3.QB[115]} + I_{\text{раб. max. T1}[115]}), \text{ A.}$$

где $k_{HC} = 1,2 \dots 1,25$ – коэффициент надежности согласования.

В качестве тока срабатывания МТЗ, установленной на ВН трансформатора Т1, выбирается большее значение тока:

$$I_{C3[6,3]} = I_{C3[115]} \cdot \frac{U_{CB}}{U_{CH}}, \text{ кА.}$$

3) Определяются ток срабатывания реле и токи, проходящие через реле при двухфазных КЗ в минимальных режимах работы в основной и резервной зонах МТЗ.

Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = \frac{I_{C3} \cdot K_{CX}}{K_I}, \text{ A,}$$

где K_{CX} – коэффициент схемы ($K_{CX} = 1$); K_I – коэффициент трансформации ТТ на 110 кВ.

Ток, проходящий через реле, при двухфазном КЗ в минимальном режиме работы в основной зоне МТЗ:

$$I_{p.min.O} = \frac{I_{K-3,MIN[115]}^{(2)} \cdot K_{CX}}{K_I}, \text{ A,}$$

$$\text{где } I_{K-3,MIN[115]}^{(2)} = I_{K-3,MIN[6,3]}^{(2)} \cdot \frac{U_{CH}}{U_{CB}}, \text{ A.}$$

Ток, проходящий через реле, при двухфазном КЗ в минимальном режиме работы в резервной зоне МТЗ:

$$I_{p.min.P} = \frac{I_{K-5,MIN[115]}^{(2)} \cdot K_{CX}}{K_I}, \text{ A.}$$

4) Определяется чувствительность МТЗ трансформатора в основной и резервной зонах:

$$K_{ч.O} = \frac{I_{p.min.O}}{I_{CP}} \geq 1,5,$$

$$K_{ч.P} = \frac{I_{p.min.P}}{I_{CP}} \geq 1,2.$$

3.3. МТЗ с пуском по напряжению

На трансформаторах с большими пределами регулирования напряжения под нагрузкой, а также коэффициентом самозапуска больше 2, МТЗ выполняется с пусковым органом напряжения, что позволяет повысить чувствительность защиты.

1) Выбирается ток срабатывания МТЗ как наибольшее значение, полученное из трех расчетных условий.

1.1) *Максимальный рабочий ток трансформатора Т1 для ПАР:*

$$I_{\text{раб. max. T1}[115]} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{ном. T1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{CB}}, \text{ A.}$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{C3} \geq \frac{k_o}{k_B} \cdot I_{\text{раб. max. T1}[115]}, \text{ A,}$$

где $k_o = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент отстройки; $k_B = 0,92$ – коэффициент возврата реле; $k_{C3П} = 1$ – коэффициент самозапуска.

1.2) Максимальный рабочий ток трансформатора Т1 для НР:

$$I_{\text{раб. max. T1[115]}} = I_{\text{раб. max. T2[115]}} = \frac{0,7 \cdot S_{\text{ном. T1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{CB}}}, \text{ A.}$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{\text{CЗ}} \geq \frac{k_0}{k_B} \cdot (I_{\text{раб. max. T1[115]}} + k_{\text{CЗП[115]}} \cdot I_{\text{раб. max. T2[115]}}), \text{ A,}$$

где $k_0 = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент отстройки; $k_B = 0,92$ – коэффициент возврата реле; $k_{\text{CЗП}}$ – коэффициент самозапуска электродвигателя.

1.3) Ток срабатывания селективной МТЗ с независимой характеристикой, установленной на секционном выключателе QB:

$$I_{\text{CЗ.QB[115]}} = I_{\text{CЗ.QB[6,3]}} \cdot \frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}}, \text{ A.}$$

Максимальный рабочий ток трансформатора Т1 для НР:

$$I_{\text{раб. max. T1[115]}} = \frac{0,7 \cdot S_{\text{ном. T1}}}{\sqrt{3} \cdot U_B}, \text{ A.}$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{\text{CЗ}} \geq k_{\text{HC}} \cdot (I_{\text{CЗ.QB[115]}} + I_{\text{раб. max. T1[115]}}), \text{ A,}$$

где $k_{\text{HC}} = 1,2 \dots 1,25$ – коэффициент надежности согласования.

Принимаем ток срабатывания МТЗ:

$$I_{\text{CЗ[6,3]}} = I_{\text{CЗ[115]}} \cdot \frac{U_{\text{CB}}}{U_{\text{CH}}}, \text{ кА.}$$

2) Определяются ток срабатывания реле и минимальные токи через реле при КЗ в основной и резервной зоне.

Ток срабатывания реле:

$$I_{\text{CP}} = \frac{K_{\text{CX}} \cdot I_{\text{CЗ}}}{K_I}, \text{ A,}$$

где K_{CX} – коэффициент схемы ($K_{\text{CX}} = 1$); K_I – коэффициент трансформации ТТ на 110 (220) кВ.

Ток, проходящий через реле, при двухфазном КЗ в минимальном режиме работы в основной зоне МТЗ:

$$I_{\text{p.min.O}} = \frac{K_{\text{CX}} \cdot I_{\text{K-3,MIN[115]}}^{(2)}}{K_I}, \text{ A,}$$

где $I_{\text{K-3,MIN[115]}}^{(2)} = I_{\text{K-3,MIN[6,3]}}^{(2)} \cdot \frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}}$, А, $I_{\text{K-3,MIN[6,3]}}^{(2)}$, кА – минимальный ток двухфазного КЗ в

точке К-3 (при выключенном секционном выключателе).

Ток, проходящий через реле, при двухфазном КЗ в минимальном режиме работы в резервной зоне МТЗ:

$$I_{\text{p.min.P}} = \frac{K_{\text{CX}} \cdot I_{\text{K-4,MIN[115]}}^{(2)}}{K_I}, \text{ A,}$$

где $I_{\text{K-4,MIN[115]}}^{(2)}$, А – минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-4.

3) Проверяется чувствительность защиты по току для основной и резервной зоны:

$$K_{\text{ч.О}} = \frac{I_{\text{p.min.O}}}{I_{\text{CP}}} \geq 1,5,$$

$$K_{ч.р} = \frac{I_{p.min.P}}{I_{CP}} \geq 1,2.$$

4) Определяются первичные напряжения срабатывания защиты.

Для минимального реле напряжения выбирается напряжение срабатывания из условия обеспечения возврата реле после отключения внешнего КЗ:

$$U_{C3} \leq \frac{U_{MIN}}{k_o \cdot k_B}, \text{ кВ},$$

где U_{MIN} – междуфазное напряжение в месте установки защиты (шины НН) в условиях самозапуска после отключения внешнего КЗ; принимается значение U_{MIN} из выполненных ранее расчетов самозапуска (меньшее значение); $k_o = 1,2$ – коэффициент отстройки; $k_B = 1,05$ – коэффициент возврата.

Напряжение срабатывания реле:

$$U_{CP} = \frac{U_{C3}}{k_U}, \text{ В},$$

где k_U – коэффициент трансформации ТН.

Напряжение срабатывания фильтра реле напряжения обратной последовательности выбирается из условия обеспечения отстройки от напряжения небаланса фильтра в нормальном режиме:

$$U_{2,CP} = 0,06 \cdot U_{ном}, \text{ В},$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение вторичной обмотки ТН.

Это соответствует минимальной уставке РНФ-1М с пределами шкалы 6–12 В:

$$U_{2,C3} = k_U \cdot U_{2,CP}, \text{ В}.$$

5) Проверяется чувствительность защиты по напряжению в резервной зоне МТЗ.

Коэффициент чувствительности при КЗ в резервной зоне для минимального реле напряжения:

$$K_{ч.U} = \frac{U_{C3} \cdot k_B}{U_{OCT.MAX}} \geq 1,2,$$

где $U_{OCT.max}$ – междуфазное напряжение в месте установки ТН, от которого питается реле при металлическом КЗ в расчетной точке, когда указанное напряжение имеет максимальное значение:

$$U_{OCT.MAX} = \sqrt{3} \cdot I_{K-5,MAX[6,3]}^{(3)} \cdot \sqrt{r_{W3[6,3]}^2 + x_{W3[6,3]}^2}, \text{ кВ},$$

где $I_{K-5,MAX[6,3]}^{(3)}$, кА – максимальный ток трехфазного КЗ в точке К-5; $r_{W3[6,3]}$ – активное сопротивление линии W3, Ом; $x_{W3[6,3]}$ – индуктивное сопротивление линии W3, Ом.

Коэффициент чувствительности при КЗ в резервной зоне для фильтра реле напряжения обратной последовательности:

$$K_{ч.2.U} = \frac{U_{2.MIN.OCT}}{U_{2,C3}} \geq 1,2,$$

$U_{2.MIN.OCT}$ – междуфазное напряжение обратной последовательности в месте установки ТН, от которого питается фильтр реле при металлическом КЗ между двумя фазами в расчетной точке в режиме, когда указанное напряжение минимально:

$$U_{2.MIN.OCT} = \frac{U_{HH}}{2} - \sqrt{3} \cdot I_{K-5,MIN[6,3]}^{(2)} \cdot \sqrt{r_{2.W3}^2 + x_{2.W3}^2}, \text{ В},$$

где $I_{K-5,MIN[6,3]}^{(2)}$, кА – минимальный ток двухфазного КЗ, приведенный к стороне ВН = 6,3 кВ.

6) Определяем время срабатывания МТЗ трансформатора с независимой характеристикой:

$$t_{\text{сз.Т1}} = t_{\text{сз.QB}} + \Delta t, \text{с},$$

где $t_{\text{сз.QB}}$ – время срабатывания МТЗ с независимой характеристикой, установленной на секционном выключателе QB; $\Delta t = 0,3\text{--}0,6$ с.

4. Релейная защита трансформатора Т1 с применением микропроцессорного устройства БМРЗ

В качестве основной защиты для трансформаторов номинальной мощностью свыше 6300 кВА, согласно [10], применяется дифференциальная защита, которая является быстродействующей, и кроме того, способна эффективно нейтрализовать как короткие замыкания на вводах устройства, так и замыкания, возникающие между витками обмоток, благодаря возможности использовать сложную тормозную характеристику.

Измерительным токовым органом для терминала являются трансформаторы тока, соединяющиеся по схеме «звезда» (рис. 4.1). Блок микропроцессора обладает возможностью программного контроля и регулирования погрешности, вызванной схемой подключения, коэффициентами трансформации ТТ, называемой «цифровое выравнивание». Данный функционал позволяет снизить затраты при использовании защиты на применение дополнительных автотрансформаторов или других промежуточных трансформаторов, применяемых для снижения влияния небаланса.

Помимо этого, в работе с измерительными каналами блока предусмотрена возможность компенсации влияния схемы и группы соединений защищаемого устройства при помощи активации функции «Цифровой треугольник» [14], что позволяет игнорировать смещение фазы, вызванное схемой соединения обмоток.

При подключении токовых измерительных каналов требуется соблюдение полярности включения, при корректном подключении направление вторичных токов должно быть от источника к нагрузке, при обратном включении возможны ложные и некорректные срабатывания защит.

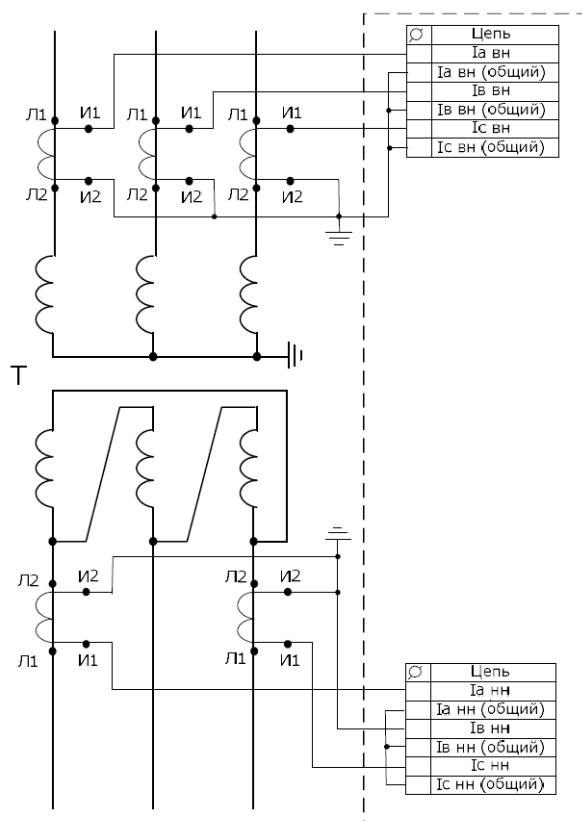


Рис. 4.1. Пример схемы подключения вторичных цепей ТТ к блоку БМРЗ [14]

4.1. Выбор трансформаторов тока

Номинальный первичный ток трансформатора на вводах (ВН, НН) определяется согласно формуле:

$$I_{\text{ном.Т}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}},$$

где $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность трансформатора, ВА; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение стороны трансформатора, относительно которой производят расчет, В.

В нагрузочном режиме трансформаторы тока должны обеспечить измеряемое значение тока в пределах допустимой погрешности измерения для 5 А и 2,5 А.

$$I_{\text{ном}} \leq 6 \cdot \frac{I_{\text{номТВН}}}{K_{\text{ТВН}}} \text{ А},$$

$$I_{\text{ном}} \leq 3 \cdot \frac{I_{\text{номТНН}}}{K_{\text{ТНН}}} \text{ А},$$

где $K_{\text{ТТ}}$ – коэффициент трансформации ТТ.

Трансформаторы тока на стороне 110 кВ: $K_{\text{ТТ}(110)} = I_{\text{НВН}} / 5$,

на стороне 6 (10) кВ: $K_{\text{ТТ}(6)} = I_{\text{ННН}} / 5$.

Привести полученное значение КЗ в точке К-3 к напряжению стороны ВН трансформатора по формуле:

$$I_{\text{К-4,МАХВН}}^{(3)} = I_{\text{К-4,МАХ[6,3]}}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} \text{ кА}.$$

4.2. Дифференциальная токовая отсечка

Селективное срабатывание ДТО обеспечивается соблюдением следующих отстроек в соотношении от доли номинального тока защищаемого трансформатора:

- ☐ БТН;
- ☐ расчетного максимального тока небаланса.

При расчете уставок ДТО определяются оба расчетных значения, в итоге наибольшее принимается за границу уставки защиты. Кроме того, для отстройки от ложных срабатываний защит при бросках тока намагничивания требуется завышение уставки ДТО от 4 до 5 значений номинального тока трансформатора.

Определим относительный расчетный максимальный ток небаланса, соответствующий максимальному току внешнего КЗ, проходящему через трансформатор:

$$I_{\text{НБрасч}} = |I'_{\text{НБрасч}}| + |I''_{\text{НБрасч}}| + |I'''_{\text{НБрасч}}|,$$

где $I'_{\text{НБрасч}}$ – составляющая тока небаланса, определяемая погрешностью ТТ; $I''_{\text{НБрасч}}$ – составляющая тока небаланса, определяемая регулированием напряжения защищаемого трансформатора; $I'''_{\text{НБрасч}}$ – составляющая тока небаланса, определяемая неточностью выравнивания токов в плечах.

Составляющие относительного расчетного тока небаланса $I'_{\text{НБрасч}}$, $I''_{\text{НБрасч}}$ и $I'''_{\text{НБрасч}}$ вычисляют по формулам:

$$I'_{\text{НБрасч}} = k_{\text{пер}} \cdot k_{\text{одн}} \cdot \varepsilon_{\text{max}} \cdot \frac{I_{\text{к 4 max}}^{(3)}}{I_{\text{ном тр}}^{\text{ВН}}},$$

$$I''_{\text{НБрасч}} = (U_{\text{пер1}} \cdot k_{\text{ток1}} + U_{\text{пер2}} \cdot k_{\text{ток2}}) \cdot \frac{I_{\text{к4max}}^{(3)}}{I_{\text{ном тр}}^{\text{ВН}}},$$

$$I'''_{\text{НБрасч}} = \gamma \cdot \frac{I_{\text{к4max}}^{(3)}}{I_{\text{ном тр}}^{\text{ВН}}},$$

где $k_{\text{пер}} = 2,5$ – коэффициент отстройки от апериодической составляющей тока в переходном режиме; $k_{\text{одн}} = 1$ – коэффициент однотипности ТТ; ε_{max} – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем максимальному току КЗ; $I_{\text{к4max}}^{(3)}$ – периодическая составляющая максимального фазного тока внешнего КЗ (как правило, трехфазного металлического КЗ), протекающего через ТТ (в начальный момент времени КЗ), приведенная к стороне ВН, А; $I_{\text{ном тр}}^{\text{ВН}}$ – номинальный первичный ток стороны ВН, А; $U_{\text{пер1}}, U_{\text{пер2}}$ – относительные погрешности, обусловленные регулированием напряжения на сторонах защищаемого трансформатора; $k_{\text{ток1}}, k_{\text{ток2}}$ – коэффициенты токораспределения, равные отношению тока, проходящего по стороне, где производится регулирование напряжения, в режиме рассматриваемого внешнего КЗ к току КЗ; $\gamma = 0,05$ – погрешность, вызванная выравниванием токов в плечах цифровым воздействием.

Для определения относительных погрешностей принимается значение, соответствующее половине диапазона регулирования ($U_{\text{пер1(2)}} = \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}$, где n – количество ступеней регулирования, ΔU – шаг регулирования напряжения, %), но не менее 0,05 ($n = 19$ при напряжении 115 кВ, $\Delta U = 1,78$).

Для устройств с ПБВ значение ступени регулирования приобретает значение $U_{\text{пер1(2)}} = 0,05$.

Для упрощения расчетов допустимо принимать предельные значения коэффициентов $k_{\text{ток1}} = k_{\text{ток2}} = 1$, учитывая, что это ведет к снижению коэффициента чувствительности защиты.

Для двухобмоточного трансформатора $U_{\text{пер2}}, k_{\text{ток2}}$ не учитывают, а слагаемое $k_{\text{ток1}}$ принимают равным 1.

Согласно [11] чувствительность ДТО проверять нецелесообразно.

Итоговое значение тока небаланса $I_{\text{НБрасч}}$ определяется суммой токов небаланса для наибольшего тормозного тока внешнего КЗ:

$$I_{\text{НБрасч}} = |I'_{\text{НБрасч}}| + |I''_{\text{НБрасч}}| + |I'''_{\text{НБрасч}}| = (k_{\text{пер}} \cdot k_{\text{одн}} \cdot \varepsilon_{\text{max}} + \Delta U_{\text{рпн}} + \gamma) \frac{I_{\text{к3max}}^{(3)}}{I_{\text{ном тр}}^{\text{ВН}}} \text{ А.}$$

Для отстройки от расчетного максимального тока небаланса значение уставки $I_{\text{ДТО}}$ определяется по формуле:

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{НБрасч}},$$

где $k_{\text{отс}} = \text{от } 1,15 \text{ до } 1,3$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас; $I_{\text{НБрасч}}$ – относительный расчетный максимальный ток небаланса, соответствующий максимальному току внешнего КЗ, проходящему через трансформатор.

Уставка срабатывания ДТО $I_{\text{ДТО}}$ по условию отстройки от броска тока намагничивания принимается равной 4.

Для уставки срабатывания ДТО $I_{\text{ДТО}}$ определяем наибольшее из двух полученных значений.

4.3. Дифференциальная токовая защита с торможением

1) Выбор уставки начального тока срабатывания ДЗТ.

Начальный ток срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТнач}$ определяется для нагрузочного режима и выбирается из учета максимального расчетного тока небаланса.

Микропроцессорные терминалы «БМРЗ» с определением текущей отпайки РПН требуют повторного расчета предварительно для групп «грубых» и «чувствительных» уставок. При отсутствии регулирования достаточно приравнять группы уставок.

Для трансформаторов с расщепленной обмоткой и двухобмоточных трансформаторов значение тока небаланса НБ расч I определяется с условием, что первое значение излома характеристики торможения находится при значении тока торможения $0,5 I_{НОМ ТР}$:

$$I_{НБрасч} = 0,5 \cdot (k_{пер} \cdot k_{одн} \cdot \varepsilon_{0,5} + U_{рег} + \gamma),$$

где $k_{пер} = 1$ – коэффициент, учитывающий переходный режим (принято отсутствие апериодической составляющей тока в нагрузочном режиме); $k_{одн} = 1$ – коэффициент однотипности ТТ; $\varepsilon_{0,5}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем $0,5 I_{НОМ ТР}$; $U_{рег}$ – относительная погрешность, обусловленная регулированием напряжения на стороне защищаемого трансформатора; $\gamma = 0,05$ – погрешность, вызванная выравниванием токов в плечах цифровым воздействием.

Для определения относительных погрешностей «грубой» группы уставок принимается значение, соответствующее половине диапазона регулирования ($U_{рег} = \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}$, где n – количество ступеней регулирования, ΔU – шаг регулирования напряжения, %), но не менее 0,05.

Значение тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТнач}$ определяется выражением:

$$I_{ДЗТнач} = k_{отс} \cdot I_{НБрасч},$$

где $k_{отс} = 1,5$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас.

Итоговое значение тока срабатывания рекомендуется округлять до десятых значений в верхнюю сторону

Для трансформаторов с расщепленной обмоткой и двухобмоточных трансформаторов значение тока небаланса $I_{НБрасч2}$ определяется с условием, что второе значение излома характеристики торможения находится при значении тока торможения $1,5 I_{НОМ ТР}$:

$$I_{НБрасч2} = 1,5 \cdot (k_{пер} \cdot k_{одн} \cdot \varepsilon_{1,5} + U_{рег} + \gamma),$$

где $k_{пер} = 2$ – коэффициент отстройки от апериодической составляющей тока в переходном режиме; $k_{одн} = 1$ – коэффициент однотипности ТТ; $\varepsilon_{0,5}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем $1,5 I_{НОМ ТР}$; $U_{рег}$ – относительная погрешность, обусловленная регулированием напряжения на стороне защищаемого трансформатора; $\gamma = 0,05$ – погрешность, вызванная выравниванием токов в плечах цифровым воздействием.

Для определения относительных погрешностей «грубой» группы уставок принимается значение, соответствующее половине диапазона регулирования ($U_{рег} = \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}$, где n – количество ступеней регулирования, ΔU – шаг регулирования напряжения, %), но не менее 0,05.

Значение уставки срабатывания $I_{ДЗТ2}$ находим следующим образом:

$$I_{ДЗТ2} = k_{отс} \cdot I_{НБрасч2},$$

где $K_{отс}$ = от 1,15 до 1,3 – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас; $I_{НБрасч2}$ – расчетное относительное значение тока небаланса, соответствующее току торможения $1,5 I_{НОМ\text{ тр.}}$

2) Определение коэффициента торможения ДЗТ на втором участке характеристики.

Определение коэффициента торможения $K_{ТОРМ2}$ на втором участке тормозной характеристики сводится к определению и отстройке расчетного тока небаланса при токе торможения в конце второго участка.

Второй участок характеристики торможения соответствует токам торможения от 0,5 до $1,5 I_{НОМ\text{ тр.}}$

Микропроцессорные терминалы «БМРЗ» с определением текущей отпайки РПН требуют повторного расчета предварительно для групп «грубых» и «чувствительных» уставок. При отсутствии регулирования достаточно приравнять группы уставок.

Коэффициент торможения $K_{ТОРМ2}$ рассчитывают по формуле:

$$K_{ТОРМ2} = \frac{I_{ДЗТ2} - I_{ДЗТ\text{ нач}}}{1,5 - 0,5} = I_{ДЗТ2} - I_{ДЗТ\text{ нач}},$$

где $I_{ДЗТ2}$ – ток срабатывания ДЗТ при токе торможения $1,5 I_{НОМ\text{ тр.}}$; $I_{ДЗТ\text{ нач}}$ – уставка начального тока срабатывания ДЗТ.

3) Определение коэффициента торможения ДЗТ на третьем участке характеристики.

Ток торможения $I_{К\text{ торм}}$, соответствующий максимальному току внешнего КЗ, вычисляют по формуле:

$$I_{К\text{ торм}} = \left(1 - \frac{k_{пер} \cdot \varepsilon_{\max}}{2} \right) \cdot \frac{I_{КЗ\text{ макс}}^{(3)}}{I_{НОМ\text{ тр}}^{ВН}},$$

где $k_{пер} = 2,5$ – коэффициент, учитывающий увеличение погрешности ТТ в переходном режиме при наличии апериодической составляющей тока; $I_{КЗ\text{ макс}}^{(3)}$ – периодическая составляющая максимального фазного тока внешнего КЗ (как правило, трехфазного металлического КЗ), протекающего через ТТ (в начальный момент времени КЗ), приведенная к стороне ВН, А; $\varepsilon_{\max}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем току $I_{КЗ\text{ макс}}^{(3)}$; $I_{НОМ\text{ тр}}^{ВН}$ – номинальный вторичный ток стороны ВН трансформатора (автотрансформатора).

Определение коэффициента торможения $K_{ТОРМ3}$ на третьем участке тормозной характеристики сводится к определению и отстройке расчетного тока небаланса при токе торможения в конце третьего участка.

Микропроцессорные терминалы «БМРЗ» с определением текущей отпайки РПН требуют повторного расчета предварительно для групп «грубых» и «чувствительных» уставок. При отсутствии регулирования достаточно приравнять группы уставок.

Коэффициент торможения $K_{ТОРМ3}$ третьего участка характеристики торможения ДЗТ рассчитывают по формуле:

$$K_{ТОРМ3} = \frac{I_{ДТО} - I_{ДЗТ2}}{I_{К\text{ торм}} - I_{ТОРМ2}},$$

где $I_{ДТО}$ – уставка срабатывания ДТО; $I_{ДЗТ2}$ – ток срабатывания ДЗТ при токе торможения $1,5 I_{НОМ\text{ тр.}}$; $I_{К\text{ торм}}$ – ток торможения, соответствующий максимальному току внешнего КЗ; $I_{ТОРМ2} = 1,5$ – ток торможения, соответствующий второму излому характеристики торможения.

4) Выбор уставки начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\text{нач ч}}$ группы «чувствительных» уставок.

Относительный расчетный ток небаланса, используемый при расчете при значении тока торможения $0,5 I_{НОМ\text{ ТР}}$:

$$I_{НБ\text{расч}} = 0,5 \cdot (k_{\text{пер}} \cdot k_{\text{одн}} \cdot \varepsilon_{0,5} + U_{\text{рег}} + \gamma),$$

где $k_{\text{пер}} = 1$ – коэффициент, учитывающий переходный режим (принято отсутствие апериодической составляющей тока в нагрузочном режиме); $k_{\text{одн}} = 1$ – коэффициент однотипности ТТ; $\varepsilon_{0,5}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем $0,5 I_{НОМ\text{ ТР}}$; $U_{\text{рег}}$ – относительная погрешность, обусловленная регулированием напряжения на стороне защищаемого трансформатора; $\gamma = 0,05$ – погрешность, вызванная выравниванием токов в плечах цифровым воздействием.

Для группы «чувствительных» уставок принимают ($U_{\text{рег}} = \frac{3 \cdot \Delta U}{100}$, ΔU – шаг регулирования напряжения, %), но не менее 0,05.

В случае использования устройства ПБВ принимают $U_{\text{рег}} = 0,05$.

Допускается применение коэффициента $k_{\text{ток1}} = 1$ с учетом снижения чувствительности защиты, но это позволяет упростить расчет.

Уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{ДЗТ\text{нач ч}}$ вычисляют по формуле:

$$I_{ДЗТ\text{нач ч}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{НБ\text{расч ч}},$$

где $k_{\text{отс}} = 1,5$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас.

Расчетное значение начального тока уставки для дифференциальной защиты может получиться за пределами минимального диапазона значений (согласно руководству по эксплуатации блока БМРЗ), при таких условиях рекомендуется применение нижнего порога допустимых значений.

При выборе уставки $I_{ДЗТ\text{нач}}$ значения менее 0,3 о.е. применять не допускается из-за низкой чувствительности защиты.

Оптимальными пределами для $I_{ДЗТ\text{нач}}$ являются значения от 0,3 до 0,5 о.е. согласно [5], данные уставки позволяют определять замыкания витков в переплетенных обмотках, а также замыкания между катушками для всех обмоток.

5) Выбор уставки коэффициента торможения второго участка характеристики торможения ДЗТ $K_{\text{ТОРМ ч}}$ «чувствительных» уставок.

Значение тока $I_{НБ\text{расч2}}$ для «чувствительных» уставок:

$$I_{НБ\text{расч2 ч}} = 1,5 \cdot (k_{\text{пер}} \cdot k_{\text{одн}} \cdot \varepsilon_{1,5} + U_{\text{рег}} + \gamma),$$

где $k_{\text{пер}} = 2$ – коэффициент, учитывающий увеличение погрешности ТТ в переходном режиме при наличии апериодической составляющей тока; $k_{\text{одн}} = 1$ – коэффициент однотипности ТТ; $\varepsilon_{0,5}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем $1,5 I_{НОМ\text{ ТР}}$; $\gamma = 0,05$ – погрешность, вызванная выравниванием токов в плечах цифровым воздействием.

Для группы «чувствительных» уставок принимают ($U_{\text{рег}} = \frac{3 \cdot \Delta U}{100}$, ΔU – шаг регулирования напряжения, %), но не менее 0,05.

В случае использования устройства ПБВ принимают $U_{\text{рег}} = 0,05$.

Допускается применение коэффициента $k_{\text{ток1}} = 1$ с учетом снижения чувствительности защиты, но это позволяет упростить расчет.

Ток срабатывания $I_{ДЗТ2ч}$ определяется следующим выражением:

$$I_{ДЗТ2ч} = k_{отс} \cdot I_{НБрасч2ч},$$

где $K_{отс}$ = от 1,15 до 1,3 – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас; $I_{НБрасч2ч}$ – расчетное относительное значение тока небаланса, соответствующее току торможения 1,5 $I_{НОМ\ TR}$ группы «чувствительных» уставок.

Коэффициент торможения $K_{ТОРМ2ч}$ рассчитывают по формуле:

$$K_{ТОРМ2ч} = I_{ДЗТ2ч} - I_{ДЗТначч},$$

где $I_{ДЗТ2ч}$ – ток срабатывания ДЗТ при токе торможения 1,5 $I_{НОМ\ TR}$ группы «чувствительных» уставок; $I_{ДЗТначч}$ – уставка начального тока срабатывания ДЗТ группы «чувствительных» уставок.

Расчетное значение $K_{ТОРМ2ч}$ для дифференциальной защиты может получиться за пределами минимального диапазона значений (согласно руководству по эксплуатации блока БМРЗ), при таких условиях рекомендуется применение нижнего порога допустимых значений.

Рассчитаем уставку $I_{ДТОч}$:

$$I_{ДТОч} = k_{отс} \cdot (k_{пер} \cdot k_{одн} \cdot \varepsilon_{max} + \Delta U_{рпн} + \gamma) \frac{I_{к3max}^{(3)}}{I_{НОМ\ TR}} A,$$

где $k_{пер} = 2,5$ – коэффициент для учета переходного режима при отсутствии апериодической составляющей тока в нагрузочном режиме; $k_{одн} = 1$ – коэффициент однотипности ТТ; $\varepsilon_{0,5} = 0,1$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем 0,5 $I_{НОМ\ TR}$; $\gamma = 0,05$ – погрешность, вызванная выравниванием токов в плечах цифровым воздействием.

Для группы «чувствительных» уставок принимают ($U_{рег} = \frac{3 \cdot \Delta U}{100}$, ΔU – шаг регулирования напряжения %), но не менее 0,05.

Коэффициент торможения $K_{ТОРМ3}$ третьего участка характеристики торможения ДЗТ рассчитывают по формуле:

$$K_{ТОРМ3ч} = \frac{I_{ДТОч} - I_{ДЗТ2ч}}{I_{K\ TOРМ} - I_{ТОРМ2}},$$

где $I_{ДТОч}$ – уставка срабатывания ДТО группы «чувствительных» уставок; $I_{ДЗТ2ч}$ – ток срабатывания ДЗТ при токе торможения 1,5 $I_{НОМ\ TR}$ группы «чувствительных» уставок; $I_{K\ TOРМ}$ – ток торможения, соответствующий максимальному току внешнего КЗ; $I_{ТОРМ2} = 1,5$ – ток торможения, соответствующий второму излому характеристики торможения.

6) Проверка чувствительности ДЗТ.

Согласно ПУЭ [10] значение коэффициента чувствительности защиты должно быть не менее 2.

Если обеспечение этого или близкого значения коэффициента чувствительности связано со значительным усложнением защиты или технически невозможно, допустимо снижение коэффициента чувствительности

Допускается снижение чувствительности защиты, если соблюдение данного параметра связано со значительным усложнением или невозможно технически обеспечить значение коэффициента только для следующих случаев:

- для защиты от КЗ трансформаторов до 80 МВА на вводах стороны низшего напряжения;
- при работе трансформатора на холостом ходу или кратковременной его работы (например, при отключении одной из питающих сторон);
- под нагрузкой, если она расположена за реактором, который находится в зоне дифференциальной защиты на стороне низшего напряжения.

Кроме того, допускается применение не чувствительной дифференциальной защиты при КЗ за реактором, если присутствуют другие виды защит, обеспечивающие требования чувствительности и зона защиты которых включает в себя реактор [14].

Коэффициент чувствительности ДЗТ при металлическом К определяют по формуле:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{КЗ мин}}^{(2)} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{мин}})}{I_{\text{ном тр}}^{\text{ВН}} \cdot I_{\text{ДЗТ нач}}},$$

где $I_{\text{КЗ мин}}^{(2)}$ – минимальное значение периодической составляющей тока КЗ в защищаемой зоне, приведенное к стороне ВН, А; $\varepsilon_{\text{мин}}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем току $I_{\text{КЗ мин}}^{(2)}$; $I_{\text{ном тр}}^{\text{ВН}}$ – номинальный первичный ток стороны ВН, А; $I_{\text{ДЗТ нач}}$ – уставка начального тока срабатывания ДЗТ.

Итогами расчета уставок защиты является полученная тормозная характеристика для двух групп уставок (рис. 4.2).

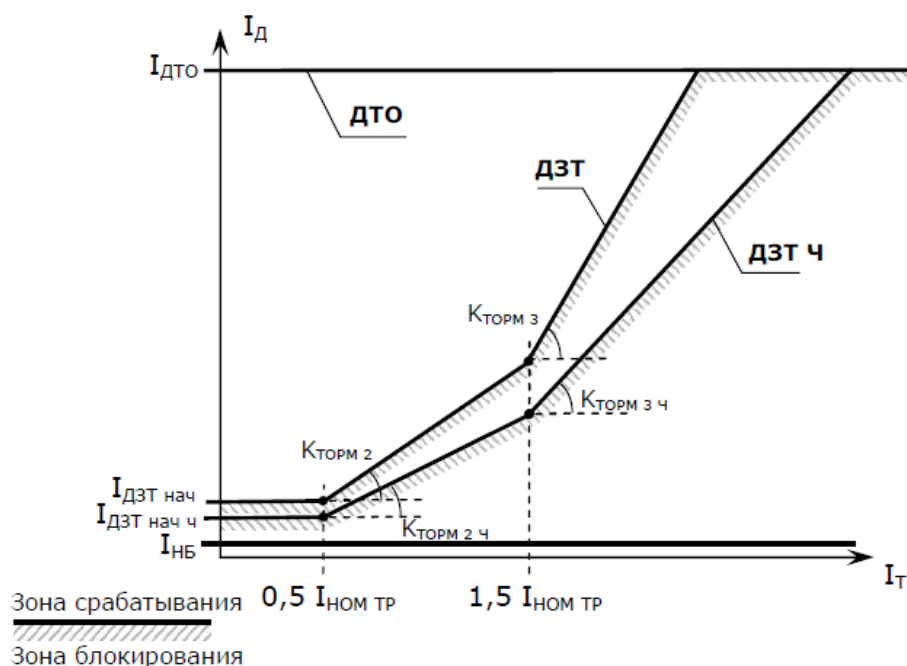


Рис. 4.2. Тормозная характеристика ДЗТ

4.4. Максимальная токовая защита (МТЗ)

Уставка срабатывания МТЗ определяется из учета самозапуска двигателей и устранения короткого замыкания на предстоящей ступени и находится по формуле [8]:

$$I_{\text{с.з.}}^{\text{II}} = \frac{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{сзп}}}{k_{\text{в}}} I_{\text{раб макс}},$$

где $k_{отс} = \text{от } 1,1 \text{ до } 1,2$ – коэффициент отстройки; $k_{сзп}$ – коэффициент самозапуска с учетом влияния двигателей в режиме торможения во время самозапуска. Определение токов самозапуска производится в соответствии с методикой [15]. Коэффициент самозапуска может быть принят от 3 до 5 при неизвестном характере нагрузки; $k_b = 0,95$ – коэффициент возврата; $I_{\text{раб. макс}}$ – первичное значение максимального рабочего тока трансформатора в месте установки защиты, А. При отсутствии данных о нагрузке может быть принят равным номинальному первичному току стороны ВН трансформатора $I_{\text{ном}}^{\text{ВН}}$.

Исходя из значения тока трехфазного КЗ за эквивалентным сопротивлением (сопротивление всех элементов схемы в максимальном режиме с учетом нагрузки) можно определить ток самозапуска.

Максимальный рабочий ток через QB:

$$I_{\text{раб. макс. QB}} = \frac{0,7}{n1} \cdot \frac{S_{\text{ном. T1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{CH}}}, \text{ А.}$$

где $n1 = 2$ – с расщепленной вторичной обмоткой, $n1 = 1$ – без расщепления вторичной обмоткой силового трансформатора.

Значение номинального тока М:

$$I_{\text{ном. М}} = \frac{P_{\text{ном. М}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном. М}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{ном. М}}}, \text{ А.}$$

Определение реактанса двигателя:

$$X_{\text{М}} = \frac{U_{\text{ном. М}}}{\sqrt{3} \cdot k_{\text{П}} \cdot I_{\text{ном. М}}}, \text{ Ом,}$$

$$X_{\text{М. Σ}} = \frac{X_{\text{М}}}{N}, \text{ Ом.}$$

Для расчета принимаются двигатели, подключенные на одной секции шин, количество двигателей определяется значением коэффициента N:

$$I_{\text{раб. макс}[0,4]} = I_{\text{раб. макс. QB}} - N \cdot I_{\text{ном. М}}, \text{ А.}$$

Реактанс нагрузки 0,4 кВ:

$$X_{\text{H}[0,4]} = \frac{X_{*H} \cdot U_{\text{CH}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб. макс}[0,4]}}, \text{ Ом.}$$

$$X_{\text{ЭН}[6,3]} = X_{\text{H}[0,4]} // X_{\text{М. Σ}} = \frac{X_{\text{H}[0,4]} \cdot X_{\text{М. Σ}}}{X_{\text{H}[0,4]} + X_{\text{М. Σ}}}, \text{ Ом.}$$

Общее эквивалентное сопротивление схемы составляет:

$$Z_{\text{Э}[6,3]} = r_{\text{Э}[6,3]} + jX_{\text{Э}[6,3]},$$

$$r_{\text{Э}[6,3]} = r_{\text{Wl}[115]} \cdot \left(\frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}}\right)^2, \text{ Ом,}$$

$$X_{\text{Э}[6,3]} = (X_{\text{G. MAX}[115]} + X_{\text{Wl}[115]} + X_{\text{T1(p), MIN}[115]}) \cdot \left(\frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}}\right)^2 + X_{\text{ЭН}[6,3]}, \text{ Ом.}$$

Значение тока самозапуска:

$$I_{\text{сзп}} = \frac{U_{\text{CH}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\text{Э}[6,3]}^2 + X_{\text{Э}[6,3]}^2}}, \text{ кА.}$$

Коэффициент самозапуска:

$$k_{\text{сзп}} = \frac{I_{\text{сзп}}}{I_{\text{раб. макс. QB}}}.$$

Минимальное напряжение на шинах НН:

$$U_{\text{MIN}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{сзп}} \cdot x_{\text{ЭН}[6,3]}, \text{ кВ.}$$

$$U_{*\text{MIN}} = \frac{U_{\text{MIN}}}{U_{\text{НН}}} \geq 0,55 \dots 0,7.$$

Уставка срабатывания МТЗ по времени при учете независимости характеристики секционного выключателя QB:

$$t_{\text{сз. QB}} = t_{\text{сз. макс}} + \Delta t, \text{ с,}$$

где $t_{\text{сз. макс}}$ – максимальное время срабатывания МТЗ на стороне НН, с.

Уставку по времени для работы максимальной токовой защиты определяют из условия срабатывания наиболее чувствительной защиты предыдущей ступени, принимая значение, большее на ступень чувствительности.

Степень селективности вычисляют по формуле:

$$\Delta t = t_{\text{р.з.}} + t_{\text{откл. в}} + t_{\text{зап}},$$

где $t_{\text{р.з.}}$ – время срабатывания релейной защиты, для терминалов БМРЗ может быть принято 0,03 с; $t_{\text{откл. в}}$ – полное время отключения выключателя (интервал времени от момента подачи команды на отключение до момента погасания дуги во всех полюсах выключателя), с; $t_{\text{зап}} = 0,1$ – ступень времени, определяющая срабатывание дополнительных промежуточных реле, с.

Если неизвестно полное время срабатывания выключателя, степень селективности требуется принимать из учета не менее $\Delta t = 0,3$ с.

$$\Delta t = 0,3 \dots 0,6 \text{ с}$$

$$I_{\text{раб макс}} = \frac{0,7 S_{\text{ном ТР}}}{\sqrt{3} U_{\text{ВН}}}.$$

По условию отстройки от значения тока при автоматическом подключении нагрузки при АВР ток срабатывания МТЗ $I_{\text{с.з.}}^{\text{II}}$, А, рассчитывают по формуле:

$$I_{\text{с.з.}}^{\text{II}} = \frac{k_{\text{отс}} \cdot (I_{\text{раб. макс}} + k_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{II раб. макс}})}{k_{\text{в}}},$$

где $k_{\text{отс}}$ = от 1,1 до 1,2 – коэффициент отстройки; $I_{\text{I раб. макс}}$ – первичное значение максимального рабочего тока от секции I, от которой при действии АВР подается напряжение, А; $k_{\text{сзп}}$ – коэффициент самозапуска секции II, на которую подается напряжение. Расчет токов самозапуска может быть выполнен по методике, изложенной в [15]. При отсутствии данных о характере нагрузки может быть принят равным от 3 до 5; $I_{\text{II раб. макс}}$ – первичное значение максимального рабочего тока от секции II, на которую подается напряжение, А; $k_{\text{в}} = 0,95$ – коэффициент возврата.

Итоговой уставкой защиты МТЗ выбирается наибольшее полученное значение в процессе расчета.

Чувствительность работы защиты применяется для наименьшего возможного режима короткого замыкания, т. е. двухфазного металлического на границе зоны резервирования при включенном режиме «цифровой треугольник»:

$$I_{\text{р осн}} = \frac{I_{\text{к3 мин ВН}}^{(2)}}{n_{\text{ТВН}}},$$

$$I_{\text{р рез}} = \frac{I_{\text{к5минВН}}^{(2)}}{n_{\text{ТВН}}},$$

где $I_{\text{кминВН}}^{(2)}$ – значение тока в реле при металлическом двухфазном КЗ в конце зоны резервирования в режиме с наименьшим значением этого тока, А; $n_{\text{Т}}$ – коэффициент трансформации ТТ, установленных на стороне ВН.

Коэффициент чувствительности МТЗ определяется для металлического двухфазного КЗ в конце зоны резервирования в режиме с наименьшим значением тока в месте установки защиты:

$$k_{\text{ч осн}} = \frac{I_{\text{р осн}} \cdot n_{\text{Т}}}{I_{\text{с.з.}}^{\text{II}}},$$

$$k_{\text{ч рез}} = \frac{I_{\text{р рез}} \cdot n_{\text{Т}}}{I_{\text{с.з.}}^{\text{II}}},$$

где $I_{\text{с.з.}}^{\text{II}}$ – ток срабатывания МТЗ, А.

Функция резервирования МТЗ применяется для защиты линий низкого напряжения, в связи с этим проверка чувствительности защит требуется проверять для замыкания в конце защищаемой резервируемой линии (согласно схеме (рис. 2.1) точка К-5).

Согласно ПУЭ [10] допустимое наименьшее значение коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$ не должно быть меньше:

- 1,5 – для основной защиты шин и при КЗ на шинах;
- 1,2 – для резервирования и при КЗ в конце зоны резервирования.

4.5. Максимальная токовая защита с пуском по напряжению

В тех случаях, когда значение коэффициентов самозапуска достаточно высоко, может оказаться, что чувствительность не соответствует требованиям ПУЭ, тогда рекомендуется применение защит с органом напряжения.

Ток срабатывания МТЗ с пуском по напряжению $I_{\text{с.з.}}^{\text{II}}$, А, определяют по условию отстройки от номинального тока $I_{\text{ном}}$ трансформатора на стороне, где установлена рассматриваемая защита, по формуле:

$$I_{\text{с.з.}}^{\text{II}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{ном}},$$

где $k_{\text{отс}}$ = от 1,1 до 1,2 – коэффициент отстройки; $k_{\text{в}}$ = 0,95 – коэффициент возврата; $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток трансформатора, А.

Если максимальный рабочий ток $I_{\text{раб.мах}}$ стороны трансформатора, на которой установлена рассматриваемая защита, меньше номинального $I_{\text{ном}}$, вместо него следует использовать ток $I_{\text{раб.мах}}$.

$$I_{\text{рабмах}} = \frac{0,7 S_{\text{номТР}}}{\sqrt{3} U_{\text{ВН}}}.$$

Для реле минимального напряжения первичное напряжение срабатывания защиты $U_{\text{с з}}$, В, определяют по условиям обеспечения возврата реле после отключения внешнего КЗ и отстройки от напряжения самозапуска заторможенной двигательной нагрузки при АПВ или АВР.

Для возврата реле после отключения внешнего КЗ необходимо обеспечить выполнение условия:

$$U_{\text{с.з.}} \leq \frac{U_{\text{min}}}{k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{в}}},$$

где U_{min} – междуфазное напряжение в месте установки защиты в условиях самозапуска после отключения внешнего КЗ. В ориентировочных расчетах может быть принято равным от $0,85 U_{\text{ном}}$ до $0,9 U_{\text{ном}}$, В; $k_{\text{отс}}$ = от 1,1 до 1,2 – коэффициент отстройки; $k_{\text{в}} = 1,05$ – коэффициент возврата.

Для отстройки от напряжения самозапуска при включении от АПВ или АВР заторможенных двигателей необходимо обеспечить выполнение условия:

$$U_{\text{с.з.}} \leq \frac{U_{\text{сзп}}}{k_{\text{отс}}},$$

где $U_{\text{сзп}}$ – междуфазное напряжение в месте установки пускового органа по напряжению в условиях самозапуска заторможенных двигателей при включении их от АПВ или АВР, В. В ориентировочных расчетах может быть принято равным примерно $0,7 U_{\text{ном}}$; $k_{\text{отс}}$ = от 1,1 до 1,2 – коэффициент отстройки.

Уставку срабатывания защиты по напряжению обратной последовательности рассчитывают по формуле, В:

$$U_{2\text{с.з.}} = k_{\text{нб}} \cdot U_{\text{ном}},$$

где $k_{\text{нб}} = 0,06$ – коэффициент небаланса; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение стороны трансформатора в месте подключения пускового органа по напряжению, В.

МТЗ с комбинированным пуском по напряжению используют только при симметричной нагрузке. При наличии несимметричной нагрузки, при работе одной из смежных линий в длительном неполнофазном режиме следует применять МТЗ с пусковым органом минимального напряжения.

Коэффициент чувствительности МТЗ определяется для металлического двухфазного КЗ в конце зоны резервирования в режиме с наименьшим значением тока в месте установки защиты:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{р}} \cdot n_{\text{Т}}}{I_{\text{с.з.}}^{\text{II}}}.$$

Коэффициент чувствительности пускового органа минимального напряжения МТЗ с комбинированным пуском по напряжению определяют по формуле:

$$k_{\text{чU}} \leq \frac{U_{\text{с.з.}} \cdot k_{\text{в}}}{U_{\text{КЗmax}}},$$

где $U_{\text{с.з.}}$ – уставка срабатывания МТЗ по напряжению; $k_{\text{в}} = 1,05$ – коэффициент возврата. Коэффициент возврата учитывают, т. к. в момент возникновения трехфазного КЗ кратковременно появляется напряжение обратной последовательности, поэтому срабатывает пусковой орган по напряжению МТЗ. Для возврата пускового органа по напряжению после исчезновения несимметрии необходимо, чтобы все линейные напряжения превысили значение $U_{\text{с.з.}} \cdot k_{\text{в}}$; $U_{\text{КЗmax}}$ – значение междуфазного напряжения в месте установки защиты при металлическом КЗ между фазами в конце зоны резервирования в режиме с наибольшим значением этого напряжения, В.

$$k_{\text{чU}} \leq \frac{U_{\text{с.з.}} \cdot k_{\text{в}}}{U_{\text{КЗmax}}},$$

$$U_{\text{КЗmax}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{КЗmax}}^{(3)} \cdot Z_{\text{К4нн}}.$$

Коэффициент чувствительности пускового органа напряжения обратной последовательности определяют по формуле:

$$k_{\text{ч}U2} \leq \frac{U_{2\text{КЗmin}}}{U_{2\text{с.з.}}},$$

где $U_{2\text{КЗmin}}$ – значение напряжения обратной последовательности в месте установки защиты при металлическом КЗ между фазами в конце зоны резервирования в режиме с наименьшим значением этого напряжения, В; $U_{2\text{с.з.}}$ – уставка срабатывания МТЗ по напряжению обратной последовательности, В.

Минимальное значение коэффициента чувствительности по току и по напряжениям должно быть:

- 1,5 – при выполнении МТЗ функций основной защиты шин и при КЗ на шинах;
- 1,2 – при выполнении МТЗ функций резервирования и при КЗ в конце зоны резервирования.

4.6. Защита от перегрузки

Ток защиты от перегрузки выбирают из условия возврата токового реле при номинальном токе трансформатора:

$$I_{\text{с.з.}}^{\text{III}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{ном}},$$

где $k_{\text{отс}} = 1,05$ – коэффициент отстройки; $k_{\text{в}} = 0,95$ – коэффициент возврата; $I_{\text{ном}}$ – номинальный первичный ток стороны трансформатора с учетом регулирования напряжения на стороне, где установлена защита, А.

На двухобмоточных трансформаторах с расщепленной обмоткой и трехобмоточных трансформаторах третья ступень МТЗ должна реагировать на перегрузку любой из обмоток и обеспечивать защиту при работе трансформатора, когда одна из обмоток отключена.

Защита от перегрузки может быть выполнена с действием на сигнал и (или) на отключение.

Выдержку времени ступени защиты, действующей на сигнал, выбирают из условия отстройки от времени самозапуска двигателей, питающихся от секций шин 6–10 кВ, она должна быть не менее 10 с.

Выдержку времени ступени защиты, действующей на отключение, выбирают по перегрузочной характеристике трансформатора [3].

5. Расчет параметров срабатывания двухступенчатой токовой защиты КЛ W3 для микропроцессорного устройства БМРЗ-101-Д-КЛ-01

Согласно ПУЭ [10] в сетях 6–10 кВ применяют двухфазные трехрелейные схемы подключения (рис. 5.1).

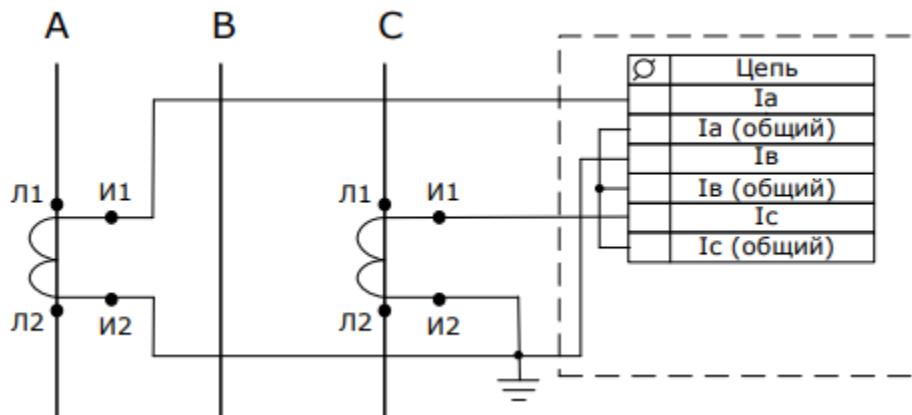


Рис. 5.1. Схема подключения защит от междофазных КЗ

Для увеличения зоны действия токовой отсечки отстраиваем ее от тока повреждения за трансформатором – в точке К-5.

1) Первая ступень защиты – токовая отсечка без выдержки времени.

Ток срабатывания отсечки:

$$I_{CO} \geq k_o \cdot I_{K-5.MAX[6,3]}^{(3)}, \text{ кА},$$

где $k_o = 1, 2 \dots 1, 4$ – коэффициент отстройки; $I_{K-5.MAX[6,3]}^{(3)}$, кА – максимальный ток трехфазного КЗ в точке К-5 (блок «линия – трансформатор»).

Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = \frac{I_{CO} \cdot K_{CX}}{K_I}, \text{ А},$$

где $K_{CX} = 1$ – коэффициент схемы; $K_I = \frac{I_{НОМТТ}}{5}$ – коэффициент трансформации ТТ на 6 кВ, K_I выбираем по максимальному рабочему току трансформатора ТЗ:

$$I_{max.раб.ТЗ[6,3]} = \frac{1,4 \cdot S_{НОМ.ТЗ}}{\sqrt{3} \cdot U_{CH}}, \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности токовой отсечки:

$$K_q = \frac{I_{K-4.MIN[6,3]}^{(2)}}{I_{CO}},$$

где $I_{K-4.MIN[6,3]}^{(2)}$, кА – минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-4.

Время срабатывания отсечки: $t_{CO} \approx 0,1 \text{ с}$.

2) Максимальная токовая защита (МТЗ).

Выбор тока срабатывания МТЗ производится по следующим расчетным условиям.

1. По условию возврата пусковых органов защиты в начальное положение после их срабатывания при отключении внешнего КЗ:

$$I_{C3} \geq \frac{K_o \cdot K_{C3П}}{K_B} \cdot I_{\text{раб. max. ТЗ}[6,3]},$$

где $I_{\text{раб. max. ТЗ}[6,3]} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{ном.ТЗ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{CH}}}$, А – максимальный рабочий ток трансформатора ТЗ.

Сопротивление обобщенной нагрузки:

$$X_{H[6,3]} = \frac{X_{*нагр} \cdot U_{\text{CH}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб. max. ТЗ}[6,3]}}, \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление при самозапуске равно:

$$Z_{\Sigma[6,3]} = (jX_{G.MAX[115]} + r_{W1[115]} + jX_{W1[115]} + jX_{T1(p),MIN[115]}) \cdot \left(\frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}}\right)^2 + Z_{W3[6,3]} + r_{T3[6,3]} + jX_{T3[6,3]} + jX_{H[6,3]}, \text{ Ом,}$$

где $Z_{W3[6,3]} = r_{\text{уд. W3}} \cdot l_{W3} + j(X_{\text{уд. W3}} \cdot l_{W3})$, Ом.

Ток самозапуска равен:

$$I_{C3П[6,3]} = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot |Z_{\Sigma[6,3]}|}, \text{ А.}$$

Коэффициент самозапуска равен:

$$K_{C3П} = \frac{I_{C3П[6,3]}}{I_{\text{раб. max. ТЗ}[6,3]}}.$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{C3} \geq \frac{K_o \cdot K_{C3П}}{K_B} \cdot I_{\text{раб. max. ТЗ}[6,3]}, \text{ А,}$$

где $K_o = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент отстройки; $K_B = 0,95$ – коэффициент возврата.

2) По условию несрабатывания РЗ при включении дополнительной нагрузки действием устройств АВР:

$$I_{C3} \geq \frac{K_o}{K_B} \cdot (K_{C3П} \cdot I_{\text{раб. max. Т4}[6,3]} + K_o' \cdot I_{\text{раб. max. ТЗ}[6,3]}),$$

где $I_{\text{раб. max. ТЗ}[6,3]} = \frac{0,7 \cdot S_{\text{ном.ТЗ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{CH}}}$, А – максимальный рабочий ток НР трансформатора ТЗ.

$$K_o' = 1,5.$$

Сопротивление обобщенной нагрузки:

$$X_{H[6,3]} = \frac{X_{*нагр} \cdot U_{\text{CH}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб. max. ТЗ}[6,3]}}, \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление при самозапуске равно:

$$Z_{\Sigma[6,3]} = (jX_{G.MAX[115]} + r_{W1[115]} + jX_{W1[115]} + jX_{T1(p),MIN[115]}) \cdot \left(\frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}}\right)^2 + Z_{W3[6,3]} + r_{T3[6,3]} + jX_{T3[6,3]} + jX_{H[6,3]}, \text{ Ом,}$$

где $Z_{W3[6,3]} = r_{\text{уд. W3}} \cdot l_{W3} + j(X_{\text{уд. W3}} \cdot l_{W3})$, Ом.

Ток самозапуска равен:

$$I_{\text{CЗП}[6,3]} = \frac{U_{\text{CH}}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{\Sigma[6,3]}|}, \text{ A.}$$

Коэффициент самозапуска равен:

$$K_{\text{CЗП}} = \frac{I_{\text{CЗП}[6,3]}}{I_{\text{раб. max. ТЗ}[6,3]}}.$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{\text{CЗ}} \geq \frac{K_o}{K_B} \cdot (K_{\text{CЗП}} \cdot I_{\text{раб. max. Т4}[6,3]} + K'_o \cdot I_{\text{раб. max. ТЗ}[6,3]}), \text{ A,}$$

где $K_o = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент отстройки; $K_B = 0,95$ – коэффициент возврата.

3) По условию согласования тока срабатывания МТЗ с током срабатывания отсечки автоматического выключателя QF:

$$I_{\text{CЗ}} \geq k_{\text{HC}} \cdot I_{\text{C.O.QF}[6,3]}, \text{ A,}$$

где $k_{\text{HC}} = 1,3$;

$$I_{\text{C.O.QF}[6,3]} = I_{\text{C.O.QF}[0,4]} \cdot \frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}} =, \text{ A,}$$

$I_{\text{C.O.QF}[0,4]}$, A – ток срабатывания отсечки автоматического выключателя QF1.

В качестве тока срабатывания МТЗ выбирается большее значение тока.

Ток срабатывания реле:

$$I_{\text{CP}} = \frac{K_{\text{CX}} \cdot I_{\text{CЗ}}}{K_I} =, \text{ A,}$$

где $K_{\text{CX}} = 1$ – коэффициент схемы; $K_I = \frac{I_{\text{номТТ}}}{5}$ – коэффициент трансформации ТТ на 6 (10) кВ.

Коэффициент чувствительности МТЗ:

$$K_q = \frac{I_{\text{К-5.MIN}[6,3]}^{(2)}}{I_{\text{CЗ}}} \geq 1,5,$$

где $I_{\text{К-5.MIN}[6,3]}^{(2)}$, кА – минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-5.

Время срабатывания МТЗ:

$$t_{\text{CЗ}} \geq t_{\text{CO(QF)}} + \Delta t, \text{ c.}$$

6. Расчет рабочих уставок максимальной защиты линии W3 (MTЗ) терминала Seram

Ток срабатывания MTЗ на линии выбирается по стандартному выражению:

$$I_{CЗ} = \frac{K_H \cdot K_{CЗП}}{K_B} \cdot I_{\text{раб.макс}}, \text{ А,}$$

где k_H – коэффициент надежности несрабатывания защиты; k_B – коэффициент возврата максимальных реле тока; $k_{CЗП}$ – коэффициент самозапуска нагрузки, отражающий увеличение рабочего тока $I_{\text{раб.макс}}$ за счет одновременного пуска всех тех электродвигателей, которые затормозились при снижении напряжения во время короткого замыкания, $k_{CЗП} = 1,1\text{--}1,3$.

Значения коэффициентов k_H и k_B для цифровых реле Seram соответственно 1,1 и 0,92.

$$I_{\text{раб.макс}} = \frac{1,4S_{HT1}}{\sqrt{3}U_{CH}}.$$

По условию согласования чувствительности защит последующего (защищаемого) и предыдущих элементов ток срабатывания последующей защиты выбирается по выражению:

$$I_{CЗ} \geq k_{HC} \cdot (I_{CЗТ} + I_{\text{раб.макс}}), \text{ А,}$$

где k_{HC} – коэффициент надежности согласования, значения которого зависят от типа токовых реле и принимаются в пределах 1,1 при согласовании терминалов Seram с реле типа РТ340, РСТ, Seram и SPAC.

Выдержка времени максимальных токовых защит вводится для замедления действия защиты с целью обеспечения селективности действия защиты последующего элемента по отношению к защитах предыдущих элементов. Для этого выдержка времени (или время срабатывания) защиты последующей линии выбирается большей, чем у защит предыдущих элементов:

$$t_{\text{сз.посл}} = t_{\text{сз.пред}} + \Delta t.$$

Величина Δt – ступень селективности или ступень времени (time interval). Ее значение выбирается в зависимости от точности работы защитных устройств и времени отключения выключателей. Ступень селективности по времени для терминалов Seram составляет 0,3 с. Возможно применять:

$$\Delta t = 0,3\text{--}0,4 \text{ с.}$$

6.1. Расчет тока срабатывания селективной токовой отсечки без выдержки времени

Селективность токовой отсечки мгновенного действия обеспечивается выбором ее тока срабатывания I_{CO} большим, чем максимальное значение тока трехфазного КЗ в максимальном режиме при повреждении в конце защищаемого участка. Для увеличения зоны действия токовой отсечки отстраиваем ее от тока повреждения за трансформатором – в точке К-5:

$$I_{CO} \geq k_H \cdot I_{K-5\text{max}}^{(3)} \text{ А.}$$

Коэффициент надежности k_H для токовых отсечек без выдержки времени, установленных на линиях электропередачи и понижающих трансформаторах, при использовании цифровых реле, в том числе Seram, может приниматься в пределах от 1,1 до 1,15.

При расчете токовой отсечки линии электропередачи, по которой питается трансформатор, необходимо обеспечить несрабатывание отсечки при КЗ за трансформатором и дополнительно проверить надежность несрабатывания отсечки при значении бросков тока намагничивания трансформатора, подключенного как к защищаемой линии. Условие отстройки отсечки от бросков тока намагничивания трансформатора имеет вид:

$$I_{CO} \geq k_n \cdot I_{ном.тр}, A,$$

где $I_{ном.тр}$ – номинальный ток трансформатора; k_n – коэффициент надежности 1,1–1,2.

$$I_{ном.тр} = \frac{S_{HT}}{\sqrt{3} \cdot U_H}.$$

В качестве уставки срабатывания токовой отсечки выбираем наибольшее значение из двух случаев.

Значение коэффициента чувствительности должно быть больше 2,0, иначе токовая отсечка не будет защищать всю линию W3.

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{K-4.MIN}^{(2)}}{I_{CO}} \geq 2.$$

7. Расчет параметров срабатывания устройства АВР секционного выключателя QВ

1) Напряжение срабатывания минимального пускового органа устройства АВР

$$U_{CP} \leq \frac{U_{ост.К-5[6,3]}}{k_o \cdot k_U} B,$$

где $k_o = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент отстройки; $k_U = \frac{U_{HH}}{100}$ – коэффициент трансформации ТН,

$$U_{CP} \leq \frac{U_{ост.СЗП}}{k_o \cdot k_B \cdot k_U} B,$$

$$U_{ост.СЗП} = U_{MIN} \text{ кВ},$$

где U_{MIN} – минимальное напряжение на шинах НН в условиях самозапуска после отключения внешнего КЗ. Принимается значение U_{MIN} из выполненных ранее расчетов самозапуска (меньшее значение).

$k_o = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент отстройки;

$k_B = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент возврата.

В качестве напряжения срабатывания минимального пускового органа устройства АВР выбирается меньшее значение:

$$U_{CP} , B.$$

2) Выбираем выдержку времени

$$t_{ABP1} \geq t_{CЗ. max} + \Delta t_{с}.$$

где $t_{CЗ. max}$ – наибольшая выдержка времени защит присоединений, отходящих от шин НН трансформатора Т1.

3) Ток срабатывания минимального реле тока, включенного на ток трансформатора Т1. Такое реле предусматривается в пусковом органе для предотвращения ложного срабатывания устройства АВР при неисправностях трансформатора напряжения (ТН).

Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = \frac{I_{раб. min[6,3]}}{k_o \cdot K_I} A,$$

где $I_{раб. min[6,3]} = \frac{0,5 \cdot S_{ном.Т1}}{\sqrt{3} \cdot U_{CH}} \text{ кА}$; $k_o = 1,2 \dots 1,4$ – коэффициент отстройки; $K_I = K_{ТТ(6)} = I_{1н} / 5$ –

коэффициент трансформации ТТ на стороне 6 кВ.

4) Напряжение срабатывания максимального реле напряжения, контролирующего наличие напряжения на резервном источнике:

$$U_{CP2} = \frac{U_{раб. min}}{k_o \cdot k_B \cdot k_U} B,$$

где $U_{раб. min} = 0,9 \cdot U_{HH} \text{ В}$; $k_o = 1,2 \dots 1,4$ – коэффициент отстройки; k_B – коэффициент возврата; k_U – коэффициент трансформации ТН.

5) Выдержка времени устройства АВП, обеспечивающая однократность его действия. Продолжительность воздействия на включение секционного выключателя QВ:

$$t_{ABP2} = t_{ВВ} + t_{зАП} \text{ с},$$

где $t_{ВВ} = 0,055 \text{ с}$ – собственное время включения секционного выключателя QВ;

$t_{зАП} = 0,3 \dots 0,5 \text{ с}$ – время запаса.

8. Расчет параметров срабатывания защит электродвигателя терминала Seram M87

Расчет токовой продольной дифференциальной защиты генераторов (двигателей) микропроцессорных блоков Seram 1000+ G87 (M87) заключается в выборе параметров срабатывания дифференциальной отсечки и чувствительной ступени с торможением. Чувствительность дифференциальной защиты с торможением оценивается применительно к режиму двухфазного короткого замыкания обмотки статора машины [9].

Действующее значение пускового тока:

$$I_{\text{пуск}} = k_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном}} \text{ A},$$

где $I_{\text{ном}}$ – номинальное значение тока статора генератора (двигателя), А; $k_{\text{п}}$ – кратность пускового тока двигателя, о.е.

Если номинальный ток двигателя $I_{\text{ном.дв}}$, А, не приведен в паспортных данных, его определяют по формуле:

$$I_{\text{ном.дв}} = \frac{P_{\text{ном.дв}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.дв}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \text{ A},$$

где $P_{\text{ном.дв}}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт; $U_{\text{ном.дв}}$ – номинальное линейное действующее напряжение двигателя, кВ; η – номинальный коэффициент полезного действия (далее – КПД) электродвигателя; $\cos \varphi$ – номинальный коэффициент мощности электродвигателя.

Действующее значение периодической составляющей максимального тока трехфазного короткого замыкания от эквивалента энергосистемы принимается равным в точке К-3 согласно схеме:

$$I_{\text{эквКЗмах}}^{(3)} = I_{\text{К-3мах}}^{(3)} \text{ A}.$$

Нагрузочная способность трансформаторов тока проверяется по выражению:

$$k_{\text{расчГТ}}^{(3)} = \frac{I_{\text{эквКЗмах}}^{(3)}}{I_{\text{нГТ}}}.$$

Минимальный ток срабатывания чувствительной ступени продольной токовой дифференциальной защиты находится по выражению:

$$I_{\text{СЗмин}} = k_{\text{О}} \cdot k_{\text{ОДН}} \cdot \varepsilon \cdot I_{\text{раб.мах}} \text{ A},$$

где $k_{\text{О}}$ – коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,2–1,5 о.е.; $k_{\text{ОДН}}$ – коэффициент, учитывающий однотипность характеристик и равномерность распределения нагрузки трансформаторов тока плеч дифференциальной защиты, о.е.; ε – приведенная погрешность трансформаторов тока, определяемая его классом точности, о.е.;

$$I_{\text{раб.мах}} = \frac{S_{\text{ном.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot 0,95} \text{ кА},$$

$$I_{\text{СЗмин}^*} = \frac{I_{\text{СЗмин}}}{I_{\text{ном}}} \text{ о.е.}$$

Коэффициент однотипности $k_{\text{ОДН}}$ принимается равным 0,5 при условии равномерного распределения вторичной нагрузки (с учетом контрольных кабелей) и однотипности технических характеристик трансформаторов тока плеч дифференциальной защиты, в противном случае данный коэффициент выбирается равным 1,0.

Расчетные условия срабатывания дифференциальной защиты с торможением отвечают режиму внутреннего короткого замыкания вблизи выводов двигателя:

$$I_{\text{дифф}} = k_{\text{АП}} \cdot k_{\text{ОДН}} \cdot (I_{\text{К-3М1}} + I_{\text{эквКЗmax}}^{(3)}) A,$$

$$I_{\text{торм}} = k_{\text{АП}} \cdot k_{\text{ОДН}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{|I_{\text{К-3М1}} - I_{\text{эквКЗmax}}^{(3)}|}{2} A.$$

Относительные значения дифференциального и тормозного токов защиты:

$$I_{\text{дифф}}^* = \frac{I_{\text{дифф}}}{I_{\text{ном}}} \text{ о.е.},$$

$$I_{\text{торм}}^* = \frac{I_{\text{торм}}}{I_{\text{ном}}} \text{ о.е.}$$

Коэффициент чувствительности рассчитывается:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{МКЗ}}^{(2)}}{I_{\text{с.з.мин}}}.$$

Оценка достаточности уровня тормозного сигнала при аварийных режимах работы. Несрабатывание (торможение) дифференциальной защиты асинхронного двигателя соответствует режимам включения (пуска) и внешнего короткого замыкания:

$$I_{\text{дифф}} = k_{\text{АП}} \cdot k_{\text{ОДН}} \cdot \varepsilon \cdot I_{\text{К-3М1}} A,$$

$$I_{\text{торм}} = k_{\text{АП}} \cdot k_{\text{ОДН}} \cdot I_{\text{К-3М1}} A,$$

$$I_{\text{дифф}}^* = \frac{I_{\text{дифф}}}{I_{\text{ном}}} \text{ о.е.},$$

$$I_{\text{торм}}^* = \frac{I_{\text{торм}}}{I_{\text{ном}}} \text{ о.е.}$$

где $K_{\text{АП}}$ – коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую тока короткого замыкания, равный 1,5–2,0 о.е.

9. Расчет параметров срабатывания защит электродвигателя терминала БМРЗ

9.1. Расчет уставок максимальной токовой отсечки

В качестве основной защиты электродвигателей от коротких замыканий между питающих фаз малой мощности и ответственности используется токовая отсечка без выдержки времени. Для двигателей более ответственной категории могут применяться дифференциальные защиты в качестве основных, но токовая отсечка также используется для резервирования основного комплекта.

Отстройку ТО выполняют:

- ☐ от броска апериодической составляющей пускового тока;
- ☐ от тока несинхронного включения двигателя [13].

Если номинальный ток двигателя $I_{ном.дв}$, А, не приведен в паспортных данных, его определяют по формуле:

$$I_{ном.дв} = \frac{P_{ном.дв}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.дв} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \text{ А},$$

где $P_{ном.дв}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт; $U_{ном.дв}$ – номинальное линейное действующее напряжение двигателя, кВ; η – номинальный коэффициент полезного действия (далее – КПД) электродвигателя; $\cos \varphi$ – номинальный коэффициент мощности электродвигателя.

ТТ, устанавливаемые со стороны питания электродвигателя, должны иметь такой коэффициент трансформации, чтобы вторичный ток не превышал 5 А (рекомендуемый диапазон от 1 до 4 А) при номинальном первичном токе двигателя.

По паспортным данным трансформатора тока необходимо определить предельную кратность тока, при которой трансформатор сохраняет погрешность, не превышающую 10%.

Принято считать, что процесс пуска машины завершен, когда пусковой ток станет ниже значения $1,25 \cdot I_{ном. дв}$.

В случае **прямого пуска** двигателя максимальный бросок пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск}$ А, с учетом апериодической составляющей определяется:

$$I_{бр.пуск} = k_{АП} \cdot k_{пуск} \cdot I_{ном.дв} \text{ А},$$

где $k_{апер}$ – коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую пускового тока машины, принимают равным 1,8; $k_{пуск}$ – кратность пускового тока машины (как правило, от 3 до 8 $I_{ном дв}$).

Выбираем ток срабатывания ТО $I_{сз} \gg \gg$, округляя вверх $I_{бр.пуск}$.

Коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ определяется по формуле:

$$k_{ч} = \frac{I_{К-3мин}^{(2)}}{I_{сз\ то}}.$$

9.2. Расчет уставок дифференциальной защиты

Расчетное значение максимального тока небаланса $I_{нб.пуск}$, А, соответствующее максимальному броску пускового тока электродвигателя $I_{бр.пуск}$, определяется:

$$I_{нб.пуск} = (\varepsilon_1 + \gamma + \delta) \cdot I_{бр.пуск} \text{ А},$$

где γ – **основная** относительная погрешность измерения терминалом дифференциального тока, определяемая суммой погрешностей двух токовых каналов (погрешность каждого канала – 2,5%); δ – технологический запас, обусловленный наличием дополнительной погрешности измерения терминала. Принимают равным половине основной погрешности измерения

дифференциального тока γ (2,5%); ε – полная относительная погрешность трансформаторов тока ТТ (10%).

Тормозная характеристика дифференциальной защиты трансформатора приведена на рисунке 9.1.

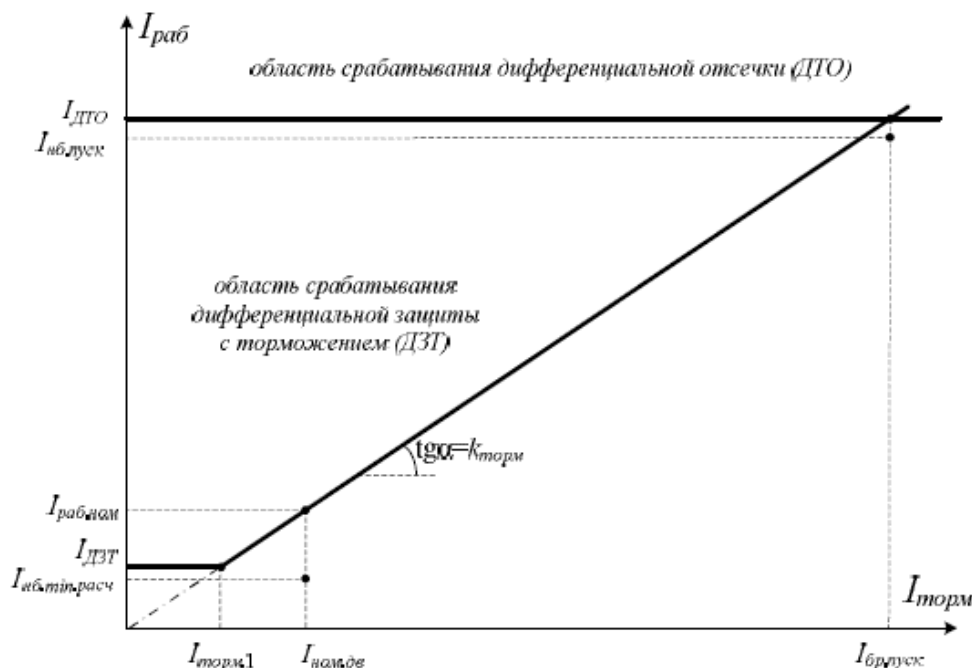


Рис. 9.1. Характеристики дифференциальных защит ДТО и ДЗТ

Максимальный ток небаланса в цепях дифференциальной защиты $I_{\text{раб.пуск}}$, А, зависит от значения максимального броска пускового тока электродвигателя при коэффициенте отстройки $k_{\text{отс}} = 1,2$.

$$I_{\text{раб.пуск}} \geq k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб.пуск}} \quad \text{А.}$$

Расчет коэффициента торможения защиты $k_{\text{торм}}$ выполняется:

$$k_{\text{торм}} \geq \frac{I_{\text{раб.пуск}}}{I_{\text{бр.пуск}}} = k_{\text{отс}} \cdot (\varepsilon_1 + \gamma + \delta).$$

Полученный по формуле результат округляется в большую сторону до сотых долей.

Уставку срабатывания дифференциальной токовой отсечки $I_{\text{ДТО}}$, А, определяют с учетом необходимости отстройки от максимального тока небаланса $I_{\text{ДТО}} \geq I_{\text{нб.пуск}}$ при максимальном броске пускового тока электродвигателя:

$$I_{\text{ДТО}} = k_{\text{торм}} \cdot I_{\text{бр.пуск}} \quad \text{А.}$$

Максимальное значение тока небаланса при номинальном токе двигателя:

$$I_{\text{нб.мин.расч}} = (\varepsilon_2 + \gamma + \delta) \cdot I_{\text{ном.дв}} \quad \text{А.}$$

$$I_{\text{ДЗТ}} \geq 1,2 \cdot I_{\text{нб.мин.расч}} \quad \text{А.}$$

Значение уставки $I_{\text{ДЗТ}}$ выбирают из диапазона от $0,3 \cdot I_{\text{ном}}$ до $1,2 \cdot I_{\text{ном}}$ в зависимости от рекомендаций.

При выборе уставки $I_{\text{ДЗТ}}$, превышающей номинальный ток двигателя, следует применять сигнализацию небаланса (для сигнализации о неисправности измерительных цепей) с уставкой $K_{\text{нб}}$ от 0,4 до 0,6.

Срабатывание сигнализации происходит при превышении дифференциальным током уставки $K_{\text{нб}} \times I_{\text{ДЗТ}}$.

Для построения характеристики ДЗТ необходимо определить значение тока торможения $I_{\text{торм.1}}$, А, которому соответствует точка излома характеристики дифференциальной защиты:

$$I_{\text{торм.1}} \geq \frac{I_{\text{ДЗТ}}}{k_{\text{торм}}}.$$

Выдержки времени для алгоритмов ДЗТ и ДТО принимают равными нулю.

Коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ на вводах питания электродвигателя:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{К-3мин}}^{(2)}}{I_{\text{ДТО}}}.$$

10. Пример расчета

Исходные данные:

- ☐ относительное сопротивление питающей системы:
в максимальном режиме работы $x^*_{Gmax} = 1,0$;
в минимальном режиме $x^*_{Gmin} = 1,3$;
- ☐ параметры нагрузки:
 $S_{нагр.п.} = 0,7S_{T1н}$; $S_{нагр.ц.} = 0,7S_{T2н}$; $x^*_{нагр.} = 0,35$.

№ вар. 1	Макс. время сраб. МТЗ на стороне НН $t_{с3max}$, с	Тип трансформатора T_1	$U_K\%$	
			Мин.	Макс.
0	0,4	ТРДН-63000/230/6,3-6,3	11,6	12,7

№ вар. 2	Длина линии W3 l_{w3} , км	Длина линии W4 l_{w4} , км	Количество x тип ЭД М
0	0,7	1,0	8xАН-15-41-6

Параметры линий	Количество	Марка кабеля	Активное сопротивление, r_0 , Ом/км	Индуктивное сопротивление, x_0 , Ом/км
W1	1	АС 240/32	0,118	0,435
W2	12	ААБл-3х120	0,153	0,076
W3	2	ААБл-3х120	0,153	0,076

№ вар. 3	Тип трансформатора T_2	Мощность системы S_{GH} , МВА	№ вар. 4	Длина линии W1 l_{w1} , км
0	ТМ-2500	5709	0	15

№ п/п	Ф.И.О.	Вариант	Микропроцессорные защиты		
			T1	W3 – T2	М
0		0.0.0.0	Sepam	БМРЗ	Сириус

Паспортные данные цеховых трансформаторов **ТМ-2500**

Номинальная мощность: $S_{T.ном} = 2500$ кВА;

Напряжения обмоток: $U_{BH} = 6$ кВ; $U_{HH} = 0,4$ кВ; $U_K = 6,5\%$;

Потери холостого хода и короткого замыкания: $\Delta P_X = 3,5$ кВт; $\Delta P_K = 26$ кВт.

Паспортные данные асинхронных двигателей **АН-15-41-6**

Номинальная мощность: $P_{ном} = 1600$ кВт; $S_{ном} = 1839$ кВА;

Номинальное напряжение: $U_{ном} = 6$ кВ;

Номинальное значение тока статора: $I_{ном} = 186,67$ А;

Коэффициент полезного действия: $\eta_{ном} = 0,948$;

Кратность пускового тока: $k_{п} = 6$;

Коэффициент мощности: $\cos \varphi = 0,87$.

10.1. Расчет токов короткого замыкания для максимального и минимального режима работы питающей системы

На рисунке 10.1 представлена расчетная схема замещения.

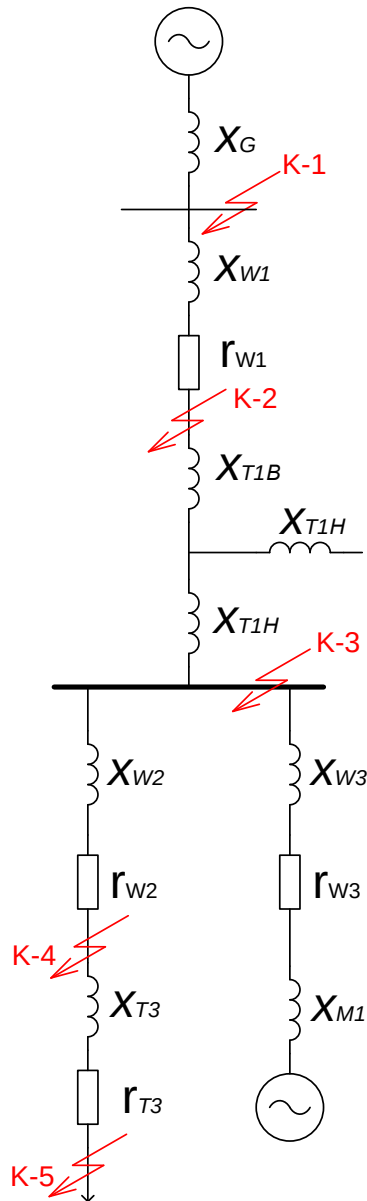


Рис. 10.1. Схема замещения распределительной сети системы электроснабжения для расчета токов КЗ

Определим минимальные и максимальные сопротивления схемы замещения, приведенные к $U_B = 230 \text{ кВ}$:

Сопротивление системы в ее максимальном режиме работы:

$$X_{G.\text{MAX}[230]} = \frac{X_{*G.\text{max}} \cdot U_B^2}{S_{GH}} = \frac{1 \cdot (230 \cdot 10^3)^2}{5709 \cdot 10^6} = 9,266 \text{ Ом.}$$

Сопротивление системы в ее минимальном режиме работы:

$$X_{G.\text{MIN}[230]} = \frac{X_{*G.\text{min}} \cdot U_B^2}{S_{GH}} = \frac{1,3 \cdot (230 \cdot 10^3)^2}{5709 \cdot 10^6} = 12,024 \text{ Ом.}$$

Сопротивление воздушной линии W1 равно:

$$r_{w1[230]} = r_{уд.w1} \cdot l_{w1} \cdot \left(\frac{U_B}{U_{CP}}\right)^2 = 0,118 \cdot 15 \cdot \left(\frac{230 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 = 1,77 \text{ Ом},$$

$$x_{w1[230]} = x_{уд.w1} \cdot l_{w1} \cdot \left(\frac{U_B}{U_{CP}}\right)^2 = 0,435 \cdot 15 \cdot \left(\frac{230 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 = 6,53 \text{ Ом},$$

$$Z_{w1} = r_{w1[230]} + jx_{w1[230]} = 6,42 + j6,66 \text{ Ом}.$$

Максимальное и минимальное сопротивления силового трансформатора Т1 с учетом работы устройства РПН равны:

$$x_{T1,MAX[230]} = \frac{U_{K,MAX}}{100} \cdot \frac{U_{BH,MAX}^2}{S_{T,HOM}} = \frac{12,7}{100} \cdot \frac{(253 \cdot 10^3)^2}{63 \cdot 10^6} = 129,034 \text{ Ом},$$

$$x_{T1,MIN[230]} = \frac{U_{K,MIN}}{100} \cdot \frac{U_{BH,MIN}^2}{S_{T,HOM}} = \frac{11,6}{100} \cdot \frac{(202,4 \cdot 10^3)^2}{63 \cdot 10^6} = 75,429 \text{ Ом}.$$

$$U_B \cdot (1 + \Delta U_{РПН}) > U_{МАХДОП},$$

$$230 \cdot (1 + 0,12) = 257,6 > 253 \text{ кВ}$$

$$U_{BH,MAX} = U_{МАХДОП} = 1,1 \cdot 230 = 253 \text{ кВ},$$

$$U_{BH,MIN} = 230 \cdot (1 - 0,12) = 202,4 \text{ кВ}.$$

Максимальное и минимальное сопротивления силового трансформатора Т1 с учетом расщепления обмотки низшего напряжения:

$$x_{T1(p),MAX[230]} = 0,125 \cdot x_{T1,MAX(230)} + 1,75 \cdot x_{T1,MAX(230)} = 1,25 \cdot 129,034 + 1,75 \cdot 129,034 = 241,939 \text{ Ом},$$

$$x_{T1(p),MIN[230]} = 0,125 \cdot x_{T1,MIN(230)} + 1,75 \cdot x_{T1,MIN(230)} = 1,25 \cdot 75,429 + 1,75 \cdot 75,429 = 141,429 \text{ Ом}.$$

Сопротивление кабельной линии W2 равно:

$$r_{w2[230]} = r_{уд.w2} \cdot \frac{l_{w2}}{n} \cdot \left(\frac{U_B}{U_{CP}}\right)^2 = 0,153 \cdot \frac{0,7}{12} \cdot \left(\frac{230 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3}\right)^2 = 11,896 \text{ Ом},$$

$$x_{w2[230]} = x_{уд.w2} \cdot \frac{l_{w2}}{n} \cdot \left(\frac{U_B}{U_{CP}}\right)^2 = 0,076 \cdot \frac{0,7}{12} \cdot \left(\frac{230 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3}\right)^2 = 5,909 \text{ Ом},$$

$$Z_{w2} = r_{w2[230]} + jx_{w2[230]} = 11,896 + j5,909 \text{ Ом}.$$

Сопротивление кабельной линии W3 равно:

$$r_{w3[230]} = r_{уд.w3} \cdot \frac{l_{w3}}{n} \cdot \left(\frac{U_B}{U_{CP}}\right)^2 = 0,153 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{230 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3}\right)^2 = 101,962 \text{ Ом},$$

$$x_{w3[230]} = x_{уд.w3} \cdot \frac{l_{w3}}{n} \cdot \left(\frac{U_B}{U_{CP}}\right)^2 = 0,076 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{230 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3}\right)^2 = 50,648 \text{ Ом},$$

$$Z_{w3} = r_{w3[230]} + jx_{w3[230]} = 101,962 + j50,648 \text{ Ом}.$$

10.2 Расчет токов короткого замыкания для максимального и минимального режима работы питающей системы

10.2.1. Расчет токов КЗ в точке К-1

Максимальное и минимальное сопротивление схемы замещения участка сети (от ЭС до точки К-1), приведенные к $U_B = 230$ кВ равны:

$$X_{K-1,MAX[230]} = X_{G,MAX[230]} = 9,266 \text{ Ом},$$

$$X_{K-1,MIN[230]} = X_{G,MIN[230]} = 12,046 \text{ Ом}.$$

Определим максимальный и минимальный ток при трехфазном КЗ в точке К-1:

$$I_{K-1,MAX[230]}^{(3)} = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot X_{K-1,MAX[230]}} = \frac{230 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 9,266} = 14,331 \text{ кА},$$

$$I_{K-1,MIN[230]}^{(3)} = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot X_{K-1,MIN[230]}} = \frac{230 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 12,046} = 11,024 \text{ кА}.$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-1:

$$I_{K-1,MIN[230]}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K-1,MIN[230]}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 11,024 = 9,547 \text{ кА}.$$

10.2.2. Расчет токов КЗ в точке К-2

Максимальное и минимальное сопротивление схемы замещения участка сети (от ЭС до точки К-2), приведенные к $U_B = 230$ кВ равны:

$$X_{K-2,MAX[230]} = X_{G,MAX[230]} + X_{W1[230]} = 9,266 + 6,53 = 15,791 \text{ Ом},$$

$$r_{K-2,MAX[230]} = r_{W1[230]} = 1,77 \text{ Ом},$$

$$Z_{K-2,MAX[230]} = \sqrt{X_{K-2,MAX[230]}^2 + r_{K-2,MAX[230]}^2} = \sqrt{15,791^2 + 1,77^2} = 15,89 \text{ Ом}.$$

$$X_{K-2,MIN[230]} = X_{G,MIN[230]} + X_{W1[230]} = 12,046 + 6,53 = 18,571 \text{ Ом},$$

$$r_{K-2,MIN[230]} = r_{W1[230]} = 1,77 \text{ Ом},$$

$$Z_{K-2,MIN[230]} = \sqrt{X_{K-2,MIN[230]}^2 + r_{K-2,MIN[230]}^2} = \sqrt{18,571^2 + 1,77^2} = 18,655 \text{ Ом}.$$

Определим максимальный и минимальный ток при трехфазном КЗ в точке К-2:

$$I_{K-2,MAX[230]}^{(3)} = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot Z_{K-2,MAX[230]}} = \frac{230 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 15,89} = 8,357 \text{ кА},$$

$$I_{K-2,MIN[230]}^{(3)} = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot Z_{K-2,MIN[230]}} = \frac{230 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 18,655} = 7,118 \text{ кА}.$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-2:

$$I_{K-2,MIN[230]}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K-2,MIN[230]}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 7,118 = 6,165 \text{ кА}.$$

10.2.3. Расчет токов КЗ в точке К-3

Максимальное и минимальное сопротивление схемы замещения участка сети (от ЭС до точки К-3), приведенные к $U_B = 230$ кВ равны:

$$X_{K-3,MAX[230]} = X_{G,MAX[230]} + X_{W1[230]} + X_{T1,pMIN[230]} = 9,266 + 6,53 + 141,429 = 157,22 \text{ Ом},$$

$$r_{K-3,MAX[230]} = r_{W1[230]} = 1,77 \text{ Ом},$$

$$Z_{K-3,MAX[230]} = \sqrt{X_{K-3,MAX[230]}^2 + r_{K-3,MAX[230]}^2} = \sqrt{157,22^2 + 1,77^2} = 157,23 \text{ Ом}.$$

$$X_{K-3,MIN[230]} = X_{G,MIN[230]} + X_{W1[230]} + X_{T1,pMAX[230]} = 12,046 + 6,53 + 241,939 = 260,51 \text{ Ом},$$

$$r_{K-3,MIN[230]} = r_{W1[230]} = 1,77 \text{ Ом},$$

$$Z_{K-3,MIN[230]} = \sqrt{X_{K-3,MIN[230]}^2 + r_{K-3,MIN[230]}^2} = \sqrt{260,51^2 + 1,77^2} = 260,52 \text{ Ом}.$$

Определим максимальные и минимальные первичные токи, проходящие через защищаемый трансформатор при КЗ между тремя фазами на шинах 6 кВ:

$$I_{K-3,MAX[230]}^{(3)} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K-3,MAX[230]}} = \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 157,23} = 0,807 \text{ кА},$$

$$I_{K-3,MIN[115]}^{(3)} = \frac{U_{ВН,MAX}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K-3,MIN[115]}} = \frac{253 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 260,52} = 0,560 \text{ кА}.$$

Определим токи трехфазного КЗ за силовым трансформатором типа ТРДН-63000/230/6,3, приведенные к стороне НН с учетом тока подпитки от ЭД (при включенном секционном выключателе).

Сопротивление двигателя М:

$$x_d'' = \frac{1}{K_{\Pi}} = \frac{1}{6} = 0,167,$$

$$x_{M1} = x_d'' \frac{U_B^2}{S_{НОМ,М}} = 0,167 \cdot \frac{(6,3 \cdot 10^3)^2}{1839 \cdot 10^3} = 3,597 \text{ Ом}.$$

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ от одного ЭД равно:

$$I_{K-3,M1} = \frac{E_{MG}'' \cdot U_B}{\sqrt{3} \cdot x_{M1}} = \frac{0,929 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 3,597} = 0,940 \text{ кА},$$

где $E_{MG}'' = \sqrt{\cos^2 \varphi_{НОМ} + (\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{НОМ}} - x_d'')^2} = \sqrt{0,87^2 + (\sqrt{1 - 0,87^2} - 0,167)^2} = 0,929$ – сверх-

переходная ЭДС асинхронного электродвигателя.

Максимальный ток трехфазного КЗ в точке К-3, приведенный к нерегулируемой стороне НН:

$$I_{K-3,MAX[6,3]}^{(3)} = I_{K-3,MAX[230]}^{(3)} \cdot \frac{U_{ВН,MIN}}{U_{НН}} + 4 \cdot I_{K-3,M1} = 0,807 \cdot \frac{202,4 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} + 4 \cdot 0,940 = 29,670 \text{ кА}.$$

Минимальный ток трехфазного КЗ в точке К-3, приведенный к нерегулируемой стороне НН:

$$I_{K-3,MIN[6,3]}^{(3)} = I_{K-3,MIN[230]}^{(3)} \cdot \frac{U_{ВН,MAX}}{U_{НН}} + 4 \cdot I_{K-3,M1} = 0,560 \cdot \frac{253 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} + 4 \cdot 0,940 = 26,257 \text{ кА}.$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-3, приведенный к нерегулируемой стороне НН:

$$I_{K-3, \text{MIN}[6,3]}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K-3, \text{MIN}[6,3]}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 26,257 = 22,739 \text{ кА}.$$

Рассчитаем ток в точке К-3 для оценки защит (при выключенном секционном выключателе).

Максимальный ток трехфазного КЗ в точке К-3, приведенный к нерегулируемой стороне НН:

$$I_{K-3, \text{MAX}[6,3]}^{(3)} = I_{K-3, \text{MAX}[230]}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{BH}, \text{MIN}}}{U_{\text{HH}}} + 2 \cdot I_{K-3, \text{M1}} = 0,807 \cdot \frac{202,4 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} + 2 \cdot 0,940 = 27,791 \text{ кА}.$$

Минимальный ток трехфазного КЗ в точке К-3, приведенный к нерегулируемой стороне НН:

$$I_{K-3, \text{MIN}[6,3]}^{(3)} = I_{K-3, \text{MIN}[230]}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{BH}, \text{MAX}}}{U_{\text{HH}}} + 2 \cdot I_{K-3, \text{M1}} = 0,560 \cdot \frac{253 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} + 2 \cdot 0,940 = 24,378 \text{ кА}.$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-3, приведенный к нерегулируемой стороне НН:

$$I_{K-3, \text{MIN}[6,3]}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K-3, \text{MIN}[6,3]}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 24,378 = 21,112 \text{ кА}.$$

10.2.4. Расчет токов КЗ в точке К-4

Расчет тока КЗ в точке К-4 произведем с использованием метода эквивалентного генератора (МЭГ).

Расчет тока КЗ без учета тока подпитки от ЭД.

Максимальное и минимальное сопротивление схемы замещения участка сети от ЭС до точки К-4:

$$\begin{aligned} Z_{K-4, \text{max}[230]} &= jx_{G, \text{MAX}[230]} + r_{W1[230]} + jx_{W1[230]} + jx_{T1, \text{pMIN}[230]} + r_{W2[230]} + jx_{W2[230]} = \\ &= j9,266 + 1,77 + j6,53 + j141,429 + 11,896 + j5,909 = 13,665 + j163,129 \text{ Ом}, \\ Z_{K-4, \text{min}[230]} &= jx_{G, \text{MIN}[230]} + r_{W1[230]} + jx_{W1[230]} + jx_{T1, \text{pMAX}[230]} + r_{W2[230]} + jx_{W2[230]} = \\ &= j12,046 + 1,77 + j6,53 + j241,939 + 11,896 + j5,909 = 13,665 + j266,419 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Максимальный и минимальный ток при трехфазном КЗ в точке К-3 без учета тока подпитки от ЭД:

$$I_{K-4, \text{MAX}[230]}^{(3)} = \frac{U_{\text{HB}}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{K-4, \text{max}[230]}|} = \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 164,7} = 775,91 \text{ А},$$

где $|Z_{K-4, \text{max}[115]}| = |13,665 + j163,129| = 164,7 \text{ Ом},$

$$I_{K-4, \text{MIN}[230]}^{(3)} = \frac{U_{\text{max}, \text{доп}}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{K-4, \text{min}[230]}|} = \frac{253 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 266,77} = 547,551 \text{ А},$$

где $|Z_{K-4, \text{min}[230]}| = |13,665 + j266,419| = 266,77 \text{ Ом}.$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-4 без учета тока подпитки от ЭД:

$$I_{K-4, \text{MIN}[230]}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K-4, \text{MIN}[230]}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 547,55 = 474,19 \text{ А}.$$

Токи трехфазного КЗ в точке К-4 без учета тока подпитки от ЭД, приведенные к стороне НН:

$$I_{K-4, \text{MAX}[6,3]}^{(3)} = I_{K-4, \text{MAX}[230]}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{BH}, \text{MIN}}}{U_{\text{CH}}} = 775,91 \cdot \frac{202,4 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} = 24,928 \text{ кА},$$

$$I_{K-4.MIN[6,3]}^{(3)} = I_{K-4.MIN[230]}^{(3)} \cdot \frac{U_{\max, \text{доп}}}{U_{\text{CH}}} = 547,55 \cdot \frac{253 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} = 21,989 \text{ кА.}$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-4 без учета тока подпитки от ЭД, приведенный к стороне НН:

$$I_{K-4.MIN[6,3]}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K-4.MIN[6,3]}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 21,989 = 19,043 \text{ кА.}$$

Расчет тока КЗ с учетом тока подпитки от ЭД.

Максимальное и минимальное сопротивление схемы замещения участка сети от ЭС до точки К-3:

$$\begin{aligned} Z_{G.MAX[230]} &= jx_{G.MAX[230]} + r_{W1[230]} + jx_{W1[230]} + jx_{T1,pMIN[230]} = \\ &= j9,266 + 1,77 + j6,53 + j141,429 = 1,77 + j157,22 \text{ Ом,} \\ Z_{G.MIN[230]} &= jx_{G.MIN[230]} + r_{W1[230]} + jx_{W1[230]} + jx_{T1,pMAX[230]} = \\ &= j12,046 + 1,77 + j6,53 + j241,939 = 1,77 + j260,5 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Максимальное и минимальное суммарное сопротивление двигателя М1 и линии W3:

$$\begin{aligned} Z_{M.W3.MAX[230]} &= (r_{W3[6,3]} + jx_{W3[6,3]} + jx_{M1[6,3]}) \cdot K_{T1.MAX}^2, \\ Z_{M.W3.MAX[230]} &= (0,153 + j0,076 + j3,597) \cdot 32,127^2 = 157,92 + j3791,13 \text{ Ом,} \\ Z_{M.W3.MIN[230]} &= (r_{W3[6,3]} + jx_{W3[6,3]} + jx_{M1[6,3]}) \cdot K_{T1.MIN}^2, \\ Z_{M.W3.MIN[230]} &= (0,153 + j0,076 + j3,597) \cdot 40,159^2 = 246,747 + j5923,636 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

где $r_{W3[6,3]} = r_{\text{уд.}W3} \cdot l_{W3} = 0,153 \cdot 1 = 0,153 \text{ Ом,}$
 $x_{W3[6,3]} = x_{\text{уд.}W3} \cdot l_{W3} = 0,076 \cdot 1 = 0,076 \text{ Ом.}$

$$K_{T1.MAX} = \frac{U_{\text{CB}} \cdot (1 - \Delta U_{*ПН})}{U_{\text{CH}}} = \frac{202,4 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} = 32,127,$$

$$K_{T1.MIN} = \frac{U_{\max, \text{доп}}}{U_{\text{CH}}} = \frac{253 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} = 40,159.$$

Сверхпереходная ЭДС асинхронного электродвигателя:

$$E_{\text{MG}}'' = \sqrt{\cos^2 \varphi_{\text{ном}} + (\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{ном}}} - x_d'')^2} = \sqrt{0,87^2 + (\sqrt{1 - 0,87^2} - 0,167)^2} = 0,929,$$

$$E_G'' = 1.$$

Эквивалентная ЭДС:

$$\begin{aligned} E_{\text{Э}.MAX} &= \frac{E_{\text{MG}}'' \cdot Z_{G.MAX[230]} + E_G'' \cdot Z_{M.W3.MAX[230]}}{Z_{G.MAX[230]} + Z_{M.W3.MAX[230]}}, \\ E_{\text{Э}.MAX} &= \frac{0,929 \cdot (1,77 + j157,22) + 1 \cdot (157,92 + j3791,13)}{(1,77 + j157,22) + (157,92 + j3791,13)} = 1,64 + j146,09 \text{ В,} \\ E_{\text{Э}.MIN} &= \frac{E_{\text{MG}}'' \cdot Z_{G.MIN[230]} + E_G'' \cdot Z_{M.W3.MIN[230]}}{Z_{G.MIN[230]} + Z_{M.W3.MIN[230]}}, \\ E_{\text{Э}.MIN} &= \frac{0,929 \cdot (1,77 + j260,5) + 1 \cdot (246,747 + j5923,636)}{(1,77 + j260,5) + (246,747 + j5923,636)} = 1,64 - j242,07 \text{ В.} \end{aligned}$$

Эквивалентное сопротивление до точки К-3:

$$Z_{\text{Э.МАХ}[230]} = \frac{Z_{\text{Г.МАХ}[230]} \cdot Z_{\text{М.ВЗ.МАХ}[230]}}{Z_{\text{Г.МАХ}[230]} + Z_{\text{М.ВЗ.МАХ}[230]}},$$

$$Z_{\text{Э.МАХ}[230]} = \frac{(1,77+j157,22) \cdot (157,92+j3791,13)}{(1,77+j157,22) + (157,92+j3791,13)} = 1,88+j150,965 \text{ Ом},$$

$$Z_{\text{Э.МИН}[230]} = \frac{Z_{\text{Г.МИН}[230]} \cdot Z_{\text{М.ВЗ.МИН}[230]}}{Z_{\text{Г.МИН}[230]} + Z_{\text{М.ВЗ.МИН}[230]}},$$

$$Z_{\text{Э.МИН}[230]} = \frac{(1,77 + j260,5) \cdot (246,747 + j5923,636)}{(1,77 + j260,5) + (246,747 + j5923,636)} = 2,061+j242,068 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное сопротивление до точки К-4:

$$Z_{\text{К-4.МАХ}[230]} = Z_{\text{Э.МАХ}[230]} + Z_{\text{ВЗ}[6,3]} \cdot K_{\text{Т1.МАХ}}^2 = (1,88+j101,965) + (0,107+j0,053) \cdot 32,128^2 =$$

$$= 112,425+j205,875 \text{ Ом},$$

$$Z_{\text{К-4.МИН}[230]} = Z_{\text{Э.МИН}[230]} + Z_{\text{ВЗ}[6,3]} \cdot K_{\text{Т1.МИН}}^2 = (2,06+j249,548) + (0,107+j0,053) \cdot 40,159^2 =$$

$$= 174,78+j335,345 \text{ Ом},$$

где $Z_{\text{ВЗ}[6,3]} = r_{\text{УД.ВЗ}} \cdot l_{\text{ВЗ}} + j(x_{\text{УД.ВЗ}} \cdot l_{\text{ВЗ}}) = 0,153 \cdot 0,7 + j(0,076 \cdot 0,7) = 0,107+j0,053 \text{ Ом}.$

Максимальный и минимальный ток при трехфазном КЗ в точке К-4 с учетом тока подпитки от ЭД:

$$I_{\text{К-4.МАХ}[230]}^{(3)} = \frac{|E_{\text{Э.МАХ}}| \cdot U_{\text{НВ}}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{\text{К-4.МАХ}[230]}|} = \frac{0,997 \cdot 220 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 234,57} = 539,96 \text{ А},$$

где $|E_{\text{Э.МАХ}}| = |0,997-j8,2 \cdot 10^{-5}| = 0,997,$

$$|Z_{\text{К-4.МАХ}[230]}| = |112,42+j205,875| = 234,57 \text{ Ом}.$$

$$I_{\text{К-4.МИН}[230]}^{(3)} = \frac{|E_{\text{Э.МИН}}| \cdot U_{\text{max.дон}}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{\text{К-4.МИН}[230]}|} = \frac{0,997 \cdot 253 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 378,16} = 385,11 \text{ А},$$

где $|E_{\text{Э.МИН}}| = |0,997 - j9,94 \cdot 10^{-5}| = 0,997,$

$$|Z_{\text{К-4.МИН}[230]}| = |174,78+j335,34| = 378,16 \text{ Ом}.$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-4 с учетом тока подпитки от ЭД:

$$I_{\text{К-4.МИН}[115]}^{(2)} = I_{\text{К-4.МИН}[115]}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 385,11 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 333,52 \text{ А}.$$

Токи трехфазного КЗ в точке К-4 с учетом тока подпитки от ЭД, приведенные к стороне НН:

$$I_{\text{К-4.МАХ}[6,3]}^{(3)} = I_{\text{К-4.МАХ}[230]}^{(3)} \cdot K_{\text{Т1.МАХ}} = 539,96 \cdot 32,127 = 17,347 \text{ кА},$$

$$I_{\text{К-4.МИН}[6,3]}^{(3)} = I_{\text{К-4.МИН}[230]}^{(3)} \cdot K_{\text{Т1.МИН}} = 385,11 \cdot 40,159 = 15,466 \text{ кА}.$$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-4 с учетом тока подпитки от ЭД, приведенный к стороне НН:

$$I_{\text{К-4.МИН}[6,3]}^{(2)} = I_{\text{К-4.МИН}[6,3]}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 15,466 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 13,394 \text{ кА}.$$

10.2.5. Расчет токов КЗ за цеховым трансформатором ТЗ в точке К-5

1. Расчет максимального тока КЗ в точке К-5.

Полное сопротивление трансформатора ТЗ, приведенное к стороне ВН:

$$Z_{ТЗ[6,3]} = \frac{U_K \cdot U_{НОМ.Т}^2}{100 \cdot S_{НОМ.Т}} = \frac{6,5 \cdot (6 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 2500 \cdot 10^3} = 0,936 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление трансформатора, приведенное к стороне ВН:

$$r_{ТЗ[6,3]} = \frac{P_K \cdot U_{НОМ.ТЗ}^2}{S_{НОМ.ТЗ}^2} = \frac{26 \cdot 10^3 \cdot (6 \cdot 10^3)^2}{(2500 \cdot 10^3)^2} = 0,150 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление трансформатора:

$$x_{ТЗ[6,3]} = \sqrt{Z_{ТЗ[6,3]}^2 - r_{ТЗ[6,3]}^2} = \sqrt{0,936^2 - 0,150^2} = 0,924 \text{ Ом.}$$

Максимальное значение тока при трехфазном металлическом КЗ за трансформатором ТЗ, отнесенное к стороне ВН:

$$I_{K-5,MAX[6,3]}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(r_{K-4,MAX[6,3]} + r_{ТЗ[6,3]})^2 + (x_{K-4,MAX[6,3]} + x_{ТЗ[6,3]})^2}},$$

$$I_{K-5,MAX[6,3]}^{(3)} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,014 + 0,150)^2 + (0,122 + 0,924)^2}} = 3,434 \text{ кА,}$$

$$\text{где } r_{K-4,MAX[6,3]} = r_{K-4,MAX[230]} \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 = 18,316 \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 = 0,014 \text{ Ом,}$$

$$r_{K-4,MAX[230]} = r_{W1[230]} + r_{W2[230]} = 6,42 + 11,896 = 18,316 \text{ Ом,}$$

$$x_{K-4,MAX[6,3]} = x_{K-4,MAX[230]} \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 = 163,13 \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 = 0,122 \text{ Ом,}$$

$$\begin{aligned} x_{K-4,MAX[230]} &= x_{G,MAX[230]} + x_{W1[230]} + x_{T1,pMIN[230]} + x_{W2[230]} = \\ &= 9,266 + 6,53 + 141,429 + 5,909 = 163,13 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Максимальное значение тока трехфазного КЗ в точке К-5, отнесенное к стороне НН:

$$I_{K-5,MAX[0,4]}^{(3)} = I_{K-5,MAX[6,6]}^{(3)} \cdot \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} = 3,434 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 10^3} = 54,089 \text{ кА.}$$

2. Расчет минимального тока КЗ в точке К-5.

Суммарное активное сопротивление цепи КЗ, приведенное к стороне НН:

$$r_{\Sigma} = r_{K-4,MIN[0,4]} + r_{ТЗ[0,4]} + r_{Ш} + r_{KB} + r_K + r_{П},$$

$$r_{\Sigma} = 0,055 + 0,604 + 0,13 + 0,1 + 1 + 3 = 4,89 \text{ мОм,}$$

где $r_{K-4,MIN[0,4]} = r_{K-4,MIN[230]} \cdot \left(\frac{U_{НН}}{U_{ВН}}\right)^2 = 18,316 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 = 0,055 \text{ мОм}$ – активное сопротивление системы до цехового трансформатора.

$$r_{K-4,MIN[230]} = r_{W1[230]} + r_{W2[230]} = 6,42 + 11,896 = 18,316 \text{ Ом,}$$

где $r_{ТЗ[0,4]} = r_{ТЗ[6,3]} \cdot \left(\frac{U_{НН}}{U_{ВН}}\right)^2 = 0,150 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3}\right)^2 = 0,604 \text{ мОм}$ – активное сопротивление цехового трансформатора, приведенное к стороне НН.

$r_{Ш} = r_l \cdot l_{Ш} = 0,013 \cdot 10 = 0,13 \text{ мОм}$ – активное сопротивление шинпровода типа ШМА68П от трансформатора до секции шин 0,4 кВ, протяженностью 10 м, удельное сопротивление которого определено по табл. [4].

При

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном.ТЗ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}}} = \frac{2500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 3608,439 \text{ А}$$

$r_{\text{KB}} = 0,1 \text{ мОм}$ – активное сопротивление токовых катушек и контактов автоматического выключателя QF1 определено по табл. [4].

$r_{\text{К}} = 1 \text{ мОм}$ – активное сопротивление контактов коммутационных аппаратов цепи КЗ.

$r_{\text{II}} = 3 \text{ мОм}$ – активное переходное сопротивление дуги в разделке кабеля, отходящего от секции шин 0,4 кВ (табл. [4]).

Суммарное индуктивное сопротивление цепи КЗ, приведенное к стороне НН:

$$X_{\Sigma} = X_{\text{К-4,MIN}[0,4]} + X_{\text{ТЗ}[0,4]} + X_{\text{II}} + X_{\text{KB}} = 0,806 + 3,725 + 0,15 + 0,05 = 4,731 \text{ мОм},$$

где $X_{\text{К-4,MIN}[0,4]} = X_{\text{К-4,MIN}[230]} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 = 266,42 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 = 0,199 \text{ мОм}$ – индуктивное сопротивление системы до цехового трансформатора в минимальном режиме, т. к.

$$X_{\text{К-4,MIN}[230]} = X_{\text{G,MIN}[230]} + X_{\text{W1}[230]} + X_{\text{T1,PMAX}[230]} + X_{\text{W2}[230]},$$

$$X_{\text{К-4,MIN}[230]} = 12,406 + 6,53 + 241,939 + 5,909 = 266,42 \text{ Ом},$$

$$X_{\text{ТЗ}[0,4]} = X_{\text{ТЗ}[6,3]} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3}\right)^2 = 0,924 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3}\right)^2 = 3,725 \text{ мОм} - \text{индуктивное сопротивление}$$

цехового трансформатора, приведенного к стороне НН.

$x_{\text{II}} = x_1 \cdot l_{\text{II}} = 0,015 \cdot 10 = 0,15 \text{ мОм}$ – индуктивное сопротивление шинопровода ШМА68П от трансформатора до секции шин 0,4 кВ, протяженностью 10 м, удельное сопротивление которого определено по табл. [4].

$x_{\text{KB}} = 0,05 \text{ мОм}$ – индуктивное сопротивление токовых катушек и контактов автоматического выключателя QF1 определено по табл. [4].

Минимальное значение тока трехфазного КЗ вблизи секции шин 0,4 кВ с учетом активного сопротивления дуги:

$$I_{\text{К-5,MIN}[0,4]}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(4,889 \cdot 10^{-3})^2 + (4,731 \cdot 10^{-3})^2}} = 33,997 \text{ кА}.$$

Минимальное значение тока трехфазного КЗ в точке К-5, отнесенное к стороне ВН:

$$I_{\text{К-5,MIN}[6,3]}^{(3)} = I_{\text{К-5,MIN}[0,4]}^{(3)} \cdot \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} = 33,946 \cdot \frac{0,4 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} = 2,158 \text{ кА}.$$

Для трансформаторов со схемой соединения обмоток «треугольник – звезда» значение тока в месте однофазного КЗ за трансформатором считается практически равным току трехфазного КЗ в той же точке.

Результаты расчетов токов КЗ сводятся в таблицу 10.2.5.

Таблица 10.2.5

Расчетные значения токов КЗ

Ток КЗ	К-1 [230]	К-2 [230]	К-3 [6,3]	К-4 [6,3]		К-5 [6,3]
				Без подпитки	С подпиткой	
$I_{\text{К,MAX}}^{(3)}, \text{ кА}$	14,331	8,357	27,833	24,928	17,347	3,434
$I_{\text{К,MIN}}^{(3)}, \text{ кА}$	11,024	7,118	24,396	21,989	15,466	2,158
$I_{\text{К,MIN}}^{(2)}, \text{ кА}$	9,547	6,165	21,128	19,043	13,394	2,158

10.3. Расчет параметров срабатывания дифференциальной защиты трансформатора Т1 для микропроцессорного устройства Seram T87

Определим соответствие установленных трансформаторов тока номинальным параметрам.

1) По условию выравнивания вторичных токов по величине

$$0,1 \cdot I_{\text{ном.Т}} < I_{\text{ном.ТТ}} < 2,5 \cdot I_{\text{ном.Т}} \text{ (условие производителя).}$$

Номинальные токи силового трансформатора определяются по формуле:

$$I_{\text{ном.Т}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}},$$
$$I_{\text{ном.Т(220)}} = \frac{63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 10^3} = 158,14 \text{ А},$$
$$I_{\text{ном.Т(6)}} = \frac{63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 5773,5 \text{ А}.$$

Трансформаторы тока на стороне 110 кВ $K_{\text{ТТ(220)}} = 200/5$, на стороне 6 кВ $K_{\text{ТТ(6)}} = 6000/5$.

$$0,1 \cdot 158,14 = 15,81 < 200 < 2,5 \cdot 158,14 = 395,36 \text{ – для ТТ стороны 220 кВ – условие соблюдено.}$$

$$0,1 \cdot 5773,5 = 577,35 < 6000 < 2,5 \cdot 5773,5 = 14433,76 \text{ – для ТТ стороны 6 кВ – условие соблюдено.}$$

2) По условию отстройки от броска тока намагничивания

Для проверки пригодности ТТ по условию отстройки от броска тока намагничивания необходимо определить амплитудную величину броска тока намагничивания. Так как в паспортных данных на трансформатор не приведена величина броска тока намагничивания и не приведено сопротивление трансформатора при полном насыщении, то определяем сопротивление трансформатора при полном насыщении по приближенной формуле для трансформаторов до 63 МВА:

$$X^{(1)} *_{\text{В}} = 0,094 + \frac{0,74 \cdot U_{\text{к\%}}}{100} = 0,094 + \frac{0,74 \cdot 12}{100} = 0,183.$$

Определяем относительное индуктивное сопротивление прямой последовательности контура включения, предварительно приведя сопротивление линии электропередачи к базисным условиям:

$$X_{\text{Б}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{(230 \cdot 10^3)^2}{63 \cdot 10^6} = 839,68 \text{ Ом}.$$

Сопротивление линии, пренебрегая активным сопротивлением, равно

$$X_{\text{Л}} = x_{\text{уд}} \cdot l_{\text{WL}} = 0,435 \cdot 15 = 6,53 \text{ Ом} \text{ или } X_{\text{Л}} *_{\text{В}} = \frac{6,53}{839,68} = 0,0078.$$

Сопротивление контура включения:

$$X^* = X_{\text{Л}} *_{\text{В}} + K_1 \cdot X^{(1)} *_{\text{В}} = 0,008 + 1,1 \cdot 0,183 = 0,209,$$

где $K_1 = 1,1 - 1,15$.

То же в именованных единицах: $X = X^* \cdot X_{\text{Б}} = 0,209 \cdot 839,68 = 175,5 \text{ Ом}.$

Амплитудное значение броска тока намагничивания определяем предварительно приняв коэффициент $A = 0,39$:

$$I_{\text{бр.нам(ампл)}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{лин}} \cdot (1+A)}{\sqrt{3} \cdot X} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230 \cdot 10^3 \cdot (1+0,39)}{\sqrt{3} \cdot 175,5} = 1487,34 \text{ А},$$

где $U_{\text{лин}}$ – линейное напряжение со стороны включения трансформатора под напряжение; A – относительное смещение оси синусоиды потокоцепления по отношению к точке перегиба характеристики намагничивания. Величина A зависит от материала магнитопровода, индукции насыщения, остаточной индукции, от однофазного или трехфазного броска тока намагничивания.

С целью повышения надежности отстройки от броска тока намагничивания и согласно рекомендации [7] принимаем для трансформаторов с холоднокатаной сталью всех напряжений коэффициент $A = 0,39$, а для трансформаторов с горячекатаной сталью – $A = 0,25$ или $0,06$.

Кратность тока по отношению к амплитудному значению номинального тока ТТ:

$$K_{\text{ТТ}} = \frac{I_{\text{бр.нам(ампл)}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{ном.ТТ(110)}}} = \frac{1487,34}{\sqrt{2} \cdot 200} = 5,259 < 6,7.$$

Следовательно, по условию отстройки от броска тока намагничивания предельная кратность ТТ стороны 220 кВ должна быть: $K_{10} \geq 20$.

Определяем предельную кратность ТТ при заданной нагрузке ТТ стороны 220 кВ:

$$R_{\text{нагр}} = R_{\text{к}} + R_{\text{пер}} + R_{\text{вх.терм}},$$

где $R_{\text{к}}$ – сопротивление контрольного кабеля; $R_{\text{пер}}$ – переходное сопротивление соединительных контактов в токовых цепях, равное $0,05 \text{ Ом}$; $R_{\text{вх.терм}}$ – входное сопротивление терминала, равное $0,01 \text{ Ом}$.

Сопротивление контрольного кабеля:

$$R_{\text{к}} = \frac{\rho \cdot L_{\text{к}}}{S_{\text{к}}},$$

где ρ – удельное сопротивление материала жил кабеля, для алюминиевого кабеля $\rho = 0,029 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

$$R_{\text{к}} = \frac{0,029 \cdot 50}{2,5} = 0,58 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{нагр}} = 0,58 + 0,05 + 0,01 = 0,64 \text{ Ом}.$$

Для ТТ типа ТВТ-220 номинальная предельная кратность $K_{10} = 24 > 20$. Следовательно, требование отстройки от броска тока намагничивания выполняется.

Так как ТТ и их вторичная нагрузка не ограничивают требование отстройки от броска тока намагничивания, то уточнение коэффициента A не требуется.

3) По условию отстройки от переходных режимов

Приведенная предельная кратность ТТ для данного ТТ должна быть:

$$K' = \left(\frac{K_{10} \cdot I_{\text{I.ном.ТТ}}}{I_{\text{I.ном.Т}}} \right) > 20 \text{ или } K_{10} = \frac{K' \cdot I_{\text{I.ном.Т}}}{I_{\text{I.ном.ТТ}}} = \frac{20 \cdot 158,14}{200} = 15,814 < 24.$$

Аналогично должны проверяться ТТ стороны 6 кВ (за исключением требования отстройки от тока намагничивания). Однако, учитывая небольшую вторичную нагрузку ТТ 6 кВ, пригодность ТТ будет обеспечена.

Проверим возможность использования самоадаптирующегося торможения.

Условием использования торможения является требование, чтобы амплитудное значение броска тока намагничивания было меньше 8-кратного номинального тока трансформатора:

$$I_{\text{бр.нам(ампл)}} < 8 \cdot I_{\text{ном.Т(110)}},$$

$$I_{\text{бр.нам(ампл)}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{лин}} \cdot (1 + A)}{\sqrt{3} \cdot X} = 1487,34 \text{ А},$$

$$\frac{I_{\text{бр.нам(ампл)}}}{I_{\text{ном.Т(110)}}} = \frac{1487,34}{158,14} = 9,41.$$

Следовательно, применяется традиционное торможение.

Минимальный ток срабатывания с учетом $K_{\text{пер}} = 1,0$:

$$I_{\text{дс}} = 1,1 \cdot (K_{\text{пер}} \cdot \varepsilon + \frac{\Delta U_{\text{рег}}}{1 - \Delta U_{\text{рег}}} + 0,02).$$

Полную погрешность ТТ для определенности для всех режимов будем принимать равной предельной допустимой, принятой в России, $\varepsilon = 0,1$.

$$I_{\text{дс}} = 1,1 \cdot (1,0 \cdot 0,1 + \frac{0,12}{1 - 0,12} + 0,02) = 0,282.$$

Пределы регулировки минимальной уставки $I_{\text{дс}}$ (30% $I_{\text{н1}}$ – 100% $I_{\text{н1}}$).

Принимаем к установке **$I_{\text{дс}} = 30\%$** .

Крутизна первого наклонного участка тормозной характеристики определяется:

$$I_{\text{д}} / I_{\text{т}} = 1,1 \cdot (K_{\text{пер}} \cdot 0,1 + \frac{\Delta U_{\text{рег}}}{1 - \Delta U_{\text{рег}}} + 0,02)$$

$$K_{\text{пер}} = 2 - 2,5.$$

$$I_{\text{д}} / I_{\text{т}}^* = 1,1 \cdot (2,0 \cdot 0,1 + \frac{0,12}{1 - 0,12} + 0,02) = 0,392.$$

Принимаем к установке **$I_{\text{д}} / I_{\text{т}} = 39\%$** .

Точка изменения крутизны тормозной характеристики:

$$SLP \leq 2 + \frac{3}{4} \cdot \left(\min(I_{\text{бр.нам.1}}^*, I_{\text{бр.нам.2}}^*) \right)^{\frac{4}{3}} \cdot I_{\text{д}} / I_{\text{т}}^*,$$

$$SLP = 2 + \frac{3}{4} \cdot \frac{5,259}{3} \cdot 0,39 = 4,67,$$

где $I_{\text{бр.нам.1}}^* = \frac{I_{\text{бр.нам.1}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{ном.Т}}}$, $I_{\text{бр.нам.2}}^* = \frac{I_{\text{бр.нам.2}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{ном.Т}}}$, $I_{\text{бр.нам.1}}$ – амплитудное первичное значение

броска тока намагничивания силового трансформатора со стороны первой обмотки; $I_{\text{бр.нам.2}}$ – амплитудное первичное значение броска тока намагничивания силового трансформатора со стороны второй обмотки; $I_{\text{ном.Т}}$ – номинальный ток силового трансформатора первой обмотки; $I_{\text{ном.Т}}$ – номинальный ток силового трансформатора второй обмотки; $I_{\text{д}} / I_{\text{т}}^*$ – наклон первого участка тормозной характеристики.

Принимаем к установке **$SLP = 4,5$** .

Крутизна второго наклонного участка тормозной характеристики ($I_{\text{д}} / I_{\text{т}2}$) по рекомендации производителя Schneider Electric принимается равной:

$$I_{\text{д}} / I_{\text{т}2} = 60 - 70\%$$

$$I_{\text{д}} / I_{\text{т}2} = 65\%$$

Принимаем к установке **$I_{\text{д}} / I_{\text{т}2} = 65\%$** .

Ток срабатывания дифференциальной отсечки определяется из сравнения двух условий.

1) *Отстройка от броска тока намагничивания*

$$I_{d\max} > K_{\text{отс}} \cdot \max(I_{\text{бр.нам.1}}^*, I_{\text{бр.нам.2}}^*),$$

где $I_{\text{бр.нам.1}}$ – амплитудное первичное значение броска тока намагничивания силового трансформатора со стороны первой обмотки; $I_{\text{бр.нам.1}}$ – амплитудное первичное значение броска тока намагничивания силового трансформатора со стороны второй обмотки; $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, равный 1,4.

$$I_{d\max} = 1,4 \cdot 5,26 = 7,36.$$

2) *Отстройка от максимального значения внешнего короткого замыкания*

Максимальное значение внешнего КЗ будет при трехфазном повреждении на стороне 6 кВ в режиме минимального сопротивления силового трансформатора. Наименьшее сопротивление трансформатора будет при отрицательном положении анцапф РПН:

230 кВ–0,12×230 = 202 кВ. $U_{K\% \min}$ для $U = 202$ кВ равно 11,6%:

$$Z_{\text{тр}} = \left(\frac{U_{K\% \min}}{100} \right) \cdot \frac{U_{\text{ном.Н}}^2}{S_{\text{ном}}} = \left(\frac{11,6}{100} \right) \cdot \frac{(202,4 \cdot 10^3)^2}{63 \cdot 10^6} = 75,43 \text{ Ом}.$$

Резльтирующее сопротивление до места короткого замыкания:

$$Z_{\Sigma} = X_{\text{Л}} + Z_{\text{тр}} = 6,53 + 75,43 = 81,95 \text{ Ом}.$$

Ток короткого замыкания равен:

$$I^{(3)} = \frac{U_{\text{ном.В}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} = \frac{230 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 81,95} = 1620,31 \text{ А},$$

что соответствует

$$K = \frac{I^{(3)}}{I_{\text{ном.Т(110)}}} = \frac{1620,31}{158,14} = 10,25 \text{ In}_1.$$

Ток срабатывания дифференциальной отсечки:

$$I_{d.\max} = K_{\text{отс}} \cdot K_{\text{нб}} \cdot I_{\text{КЗ.макс}}$$

где $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, равный 1,2; $K_{\text{нб}}$ – коэффициент, равный отношению амплитуды первой гармоники тока небаланса к амплитуде периодической составляющей внешнего тока короткого замыкания; $K_{\text{нб}} = 0,7$ при установке со всех сторон силового трансформатора ТТ с вторичными токами 5 А; $K_{\text{нб}} = 1,0$ при условии установки с одной стороны ТТ с вторичным током 5А, а с другой стороны – 1А; $I_{\text{КЗ.макс}}$ – максимальное значение периодической составляющей тока внешнего короткого замыкания.

$$I_{d.\max} = 1,2 \cdot 0,7 \cdot 10,25 = 8,6 \text{ In}_1.$$

Принимаем к установке **$I_{d\max} = 9 \text{ In}_1$** .

Следует обратить внимание, что и при использовании самоадаптирующегося торможения необходимо ввести дифференциальную отсечку, т. к. если используется блокировка дифференциальной защиты при неисправности ТТ, то при срабатывании этой блокировки трансформатор остается без дифференциальной защиты. Активация дифференциальной отсечки позволяет сохранить хотя бы эту защиту в случае неисправности ТТ.

Уставки блокировок по второй и пятой гармоникам принимаются:

I2f/ I1f = 15% с поперечной блокировкой.

I5f/ I1f = 35% с пофазной блокировкой.

10.4. Расчет параметров срабатывания максимальной токовой защиты стороны ВН трансформатора Т1 для микропроцессорного устройства Seram T87

1) Выбирается ток срабатывания селективной МТЗ с независимой характеристикой, установленной на секционном выключателе QB.

Правило МТЗ

Чем ближе находится защищаемый элемент к источнику питания, тем больше ток и время срабатывания МТЗ.

Параметры срабатывания МТЗ определяются относительно той стороны трансформатора, где физически включены ТТ защиты.

Ток самозапуска электродвигателей нагрузки определяется как ток трехфазного КЗ за эквивалентным сопротивлением, которое включает в себя сопротивления всех элементов системы в максимальном режиме ее работы и сопротивление нагрузки.

Максимальный рабочий ток через QB для ПАР:

$$I_{\text{раб. max. QB}} = \frac{0,7}{2} \cdot \frac{S_{\text{ном. Т1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{CH}}} = \frac{0,7}{2} \cdot \frac{63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 2020,726 \text{ A.}$$

Номинальный ток двигателя М:

$$I_{\text{ном. М}} = \frac{P_{\text{ном. М}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном. М}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{ном. М}}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,87 \cdot 0,948} = 186,673 \text{ A.}$$

Сопротивление двигателя:

$$X_{\text{М}} = \frac{U_{\text{ном. М}}}{\sqrt{3} \cdot k_{\text{II}} \cdot I_{\text{ном. М}}} = \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 186,673} = 3,093 \text{ Ом,}$$

$$X_{\text{М.Σ}} = \frac{X_{\text{М}}}{N} = \frac{3,093}{2} = 1,55 \text{ Ом.}$$

В данном расчете рассматривается количество двигателей, подключенных к одной секции шин НН, N=2.

$$I_{\text{раб. max[0,4]}} = I_{\text{раб. max. QB}} - N \cdot I_{\text{ном. М}} = 2020,726 - 2 \cdot 186,673 = 1647,381 \text{ A.}$$

Сопротивление нагрузки 0,4 кВ:

$$X_{\text{H[0,4]}} = \frac{X_{\text{H}} \cdot U_{\text{CH}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб. max[0,4]}}} = \frac{0,35 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1647,381} = 0,773 \text{ Ом.}$$

$$X_{\text{ЭН[6,3]}} = X_{\text{H[0,4]}} / X_{\text{М.Σ}} = \frac{X_{\text{H[0,4]}} \cdot X_{\text{М.Σ}}}{X_{\text{H[0,4]}} + X_{\text{М.Σ}}} = \frac{0,773 \cdot 1,546}{0,773 + 1,546} = 0,515 \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление:

$$Z_{\text{Э[6,3]}} = r_{\text{Э[6,3]}} + jX_{\text{Э[6,3]}},$$

$$r_{\text{Э[6,3]}} = r_{\text{W1[115]}} \cdot \left(\frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}}\right)^2 = 6,42 \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 = 0,0048 \text{ Ом,}$$

$$X_{\text{Э[6,3]}} = (X_{\text{G.MAX[230]}} + X_{\text{W1[230]}} + X_{\text{T1(p), MIN[230]}}) \cdot \left(\frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}}\right)^2 + X_{\text{ЭН[6,3]}} =$$

$$= (9,266 + 6,53 + 141,429) \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 + 0,515 = 0,633 \text{ Ом.}$$

Ток самозапуска:

$$I_{\text{сзп}} = \frac{U_{\text{CH}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\text{Э[6,3]}}^2 + X_{\text{Э[6,3]}}^2}} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,005^2 + 0,633^2}} = 5742,867 \text{ кА.}$$

Коэффициент самозапуска:

$$k_{\text{CЗП}} = \frac{I_{\text{CЗП}}}{I_{\text{раб. max. QB}}} = \frac{5742,867}{2020,726} = 2,842.$$

Минимальное напряжение на шинах НН:

$$U_{\text{MIN}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{CЗП}} \cdot x_{\text{ЭН}[6,3]} = \sqrt{3} \cdot 5742,867 \cdot 0,515 = 5,125 \text{ кВ};$$

$$U_{*\text{MIN}} = \frac{U_{\text{MIN}}}{U_{\text{НН}}} = \frac{5,125}{6} = 0,854 \geq 0,55 \dots 0,7.$$

Время срабатывания МТЗ с независимой характеристикой, установленной на секционном выключателе QB:

$$t_{\text{CЗ. QB}} = t_{\text{CЗ. max}} + \Delta t = 1,2 + 0,4 = 1,6 \text{ с},$$

где $t_{\text{CЗ. max}}$ – максимальное время срабатывания МТЗ на стороне НН, с.

$$\Delta t = 0,3 \dots 0,6 \text{ с}$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{\text{CЗ. QB}[6,3]} = \frac{k_o \cdot k_{\text{CЗП}}}{k_B} \cdot I_{\text{раб. max. QB}} = \frac{1,1 \cdot 2,842}{0,92} \cdot 2020,726 = 6866,471 \text{ кА},$$

где $k_o = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент отстройки; $k_B = 0,92$ – коэффициент возврата реле.

Коэффициент чувствительности:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{К-3, MIN}[6,3]}^{(2)}}{I_{\text{CЗ. QB}[6,3]}} = \frac{21,112}{6,866} = 3,07 \geq 1,5,$$

где $I_{\text{К-3, MIN}[6,3]}^{(2)}$ – минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-3 (при выключенных секционных выключателях).

2) Выбирается ток срабатывания МТЗ, установленной на ВН трансформатора. В качестве тока срабатывания защиты выбирается большее значение тока, полученное по следующим трем расчетным условиям:

2.1) По условию отстройки от самозапуска электродвигателей нагрузки

Максимальный рабочий ток трансформатора Т1 для ПАР:

$$I_{\text{раб. max. Т1}[230]} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{ном. Т1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{CB}}} = \frac{1,4 \cdot 63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 10^3} = 221,401 \text{ А}.$$

Номинальный ток двигателя М:

$$I_{\text{ном. М}[6,3]} = \frac{P_{\text{ном. М}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном. М}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{ном. М}}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,87 \cdot 0,948} = 186,673 \text{ А},$$

$$I_{\text{ном. М}[230]} = I_{\text{ном. М}[6,3]} \cdot \frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}} = 186,673 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3} = 5,113 \text{ А}.$$

Сопротивление двигателя:

$$x_{\text{М}[6,3]} = \frac{U_{\text{ном. М}}}{\sqrt{3} \cdot k_{\text{П}} \cdot I_{\text{ном. М}}} = \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 186,673} = 3,093 \text{ Ом},$$

$$x_{\text{М}[230]} = x_{\text{М}[6,3]} \cdot \left(\frac{U_{\text{CB}}}{U_{\text{CH}}}\right)^2 = 3,093 \cdot \left(\frac{230 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3}\right)^2 = 4122,241 \text{ Ом},$$

$$x_{\text{М. Σ}[230]} = \frac{x_{\text{М}[230]}}{N} = \frac{4122,241}{4} = 1030,56 \text{ Ом}.$$

Сопротивление нагрузки 0,4 кВ:

$$X_{H,0,4[230]} = \frac{X_{*H} \cdot U_{CB}}{\sqrt{3} \cdot (I_{\text{раб. max. T1}[230]} - N \cdot I_{\text{ном. M}[230]}} ,$$

$$X_{H,0,4[230]} = \frac{0,35 \cdot 115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (221,401 - 4 \cdot 5,113)} = 231,287 \text{ Ом},$$

где $N = 4$ – количество всех установленных двигателей на четырех секциях.

$$X_{ЭН[230]} = X_{H,0,4[230]} / X_{M,Σ[230]} = \frac{X_{H,0,4[230]} \cdot X_{M,Σ[230]}}{X_{H,0,4[230]} + X_{M,Σ[230]}} = \frac{231,287 \cdot 1030,56}{231,287 + 1030,56} = 188,894 \text{ Ом},$$

$$X_{ЭН[6,3]} = X_{ЭН[230]} \cdot \left(\frac{U_{CH}}{U_{CB}}\right)^2 = 188,894 \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 = 0,142 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное сопротивление:

$$Z_{Э[115]} = r_{Э[115]} + jx_{Э[115]},$$

$$r_{Э[230]} = r_{W1[230]} = 6,42 \text{ Ом},$$

$$X_{Э[230]} = X_{G,MAX[230]} + X_{W1[230]} + X_{T1(p),MIN[230]} + X_{ЭН[230]},$$

$$X_{Э[230]} = 9,266 + 6,53 + 141,429 + 188,894 = 346,249 \text{ Ом}.$$

Ток самозапуска:

$$I_{C3П[230]} = \frac{U_{CB}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{Э[230]}^2 + x_{Э[230]}^2}} = \frac{230 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{6,42^2 + 346,249^2}} = 383,446 \text{ А},$$

$$I_{C3П[6,3]} = I_{C3П[230]} \cdot \frac{U_{CB}}{U_{CH}} = 383,446 \cdot \frac{230 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} = 13,999 \text{ кА}.$$

Коэффициент самозапуска:

$$k_{C3П[230]} = \frac{I_{C3П[230]}}{I_{\text{раб. max. T1}[230]}} = \frac{383,446}{221,401} = 1,73.$$

Минимальное напряжение на шинах НН:

$$U_{\text{MIN}} = \sqrt{3} \cdot I_{C3П[6,3]} \cdot X_{ЭН[6,3]} = \sqrt{3} \cdot 13,999 \cdot 0,142 = 3,436 \text{ кВ},$$

$$U_{*MIN} = \frac{U_{\text{MIN}}}{U_{\text{HH}}} = \frac{3,436}{6} = 0,573 \geq 0,55 \dots 0,7.$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{C3} = \frac{k_o \cdot k_{C3П[230]}}{k_B} \cdot I_{\text{раб. max. T1}[230]} = \frac{1,1 \cdot 1,73}{0,92} \cdot 221,401 = 458,468 \text{ А},$$

где $k_o = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент отстройки; $k_B = 0,92$ – коэффициент возврата реле.

2.2) По условию отстройки от тока перегрузки при действии АВР трансформаторов, в результате чего к работающему с нагрузкой трансформатору Т1 подключается затормозившаяся нагрузка отключившегося трансформатора Т3.

Максимальный рабочий ток трансформатора Т1 для НР:

$$I_{\text{раб. max. T1}[230]} = I_{\text{раб. max. T2}[230]} = \frac{0,7 \cdot S_{\text{ном. T1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{CB}} = \frac{0,7 \cdot 63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 10^3} = 110,701 \text{ А}.$$

Номинальный ток двигателя М:

$$I_{\text{ном. M}[6,3]} = \frac{P_{\text{ном. M}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном. M}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{ном. M}}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,87 \cdot 0,948} = 186,673 \text{ А},$$

$$I_{\text{ном.М}[230]} = I_{\text{ном.М}[6,3]} \cdot \frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}} = 186,673 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3} = 5,113 \text{ A.}$$

Сопротивление двигателя:

$$X_{\text{М}[6,3]} = \frac{U_{\text{ном.М}}}{\sqrt{3} \cdot k_{\text{II}} \cdot I_{\text{ном.М}}} = \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 186,673} = 3,093 \text{ Ом,}$$

$$X_{\text{М}[230]} = X_{\text{М}[6,3]} \cdot \left(\frac{U_{\text{CB}}}{U_{\text{CH}}}\right)^2 = 3,093 \cdot \left(\frac{230 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3}\right)^2 = 4122,241 \text{ Ом,}$$

$$X_{\text{М.Σ}[230]} = \frac{X_{\text{М}[230]}}{N} = \frac{4122,241}{2} = 2061,121 \text{ Ом.}$$

Сопротивление нагрузки 0,4 кВ:

$$X_{\text{H.0,4}[230]} = \frac{x_{*H} \cdot U_{\text{CB}}}{\sqrt{3} \cdot (I_{\text{раб.мах.ТI}[230]} - N \cdot I_{\text{ном.М}[230]})},$$

$$X_{\text{H.0,4}[230]} = \frac{0,35 \cdot 230 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (110,7 - 2 \cdot 5,113)} = 462,573 \text{ Ом.}$$

В данном расчете рассматривается количество двигателей, получающих питание от одного трансформатора, N=2.

$$X_{\text{ЭН}[230]} = X_{\text{H.0,4}[230]} // X_{\text{М.Σ}[230]} = \frac{X_{\text{H.0,4}[230]} \cdot X_{\text{М.Σ}[230]}}{X_{\text{H.0,4}[230]} + X_{\text{М.Σ}[230]}} = \frac{462,573 \cdot 2061,121}{462,573 + 2061,121} = 377,787 \text{ Ом,}$$

$$X_{\text{ЭН}[6,3]} = X_{\text{ЭН}[230]} \cdot \left(\frac{U_{\text{CH}}}{U_{\text{CB}}}\right)^2 = 377,787 \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 = 0,283 \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление:

$$Z_{\text{Э}[230]} = r_{\text{Э}[230]} + jx_{\text{Э}[230]},$$

$$r_{\text{Э}[230]} = r_{\text{WI}[230]} = 6,42 \text{ Ом,}$$

$$X_{\text{Э}[230]} = X_{\text{G.MAX}[230]} + X_{\text{WI}[230]} + X_{\text{TI(p),MIN}[230]} + X_{\text{ЭН}[230]} =$$

$$= 9,266 + 6,66 + 141,429 + 377,787 = 535,143 \text{ Ом.}$$

Ток самозапуска:

$$I_{\text{CЗП}[230]} = \frac{U_{\text{CB}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\text{Э}[230]}^2 + x_{\text{Э}[230]}^2}} = \frac{230 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{6,42^2 + 535,143^2}} = 248,123 \text{ A,}$$

$$I_{\text{CЗП}[6,3]} = I_{\text{CЗП}[230]} \cdot \frac{U_{\text{CB}}}{U_{\text{CH}}} = 248,123 \cdot \frac{230 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} = 9,058 \text{ кА.}$$

Коэффициент самозапуска:

$$k_{\text{CЗП}[230]} = \frac{I_{\text{CЗП}[230]}}{I_{\text{раб.мах.ТI}[230]}} = \frac{248,123}{110,701} = 2,241.$$

Минимальное напряжение на шинах НН:

$$U_{\text{MIN}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{CЗП}[6,3]} \cdot X_{\text{ЭН}[6,3]} = \sqrt{3} \cdot 9,058 \cdot 0,283 = 4,447 \text{ кВ,}$$

$$U_{* \text{MIN}} = \frac{U_{\text{MIN}}}{U_{\text{HH}}} = \frac{4,447}{6} = 0,741 \geq 0,55 \dots 0,7.$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{C3} \geq \frac{k_o}{k_B} \cdot (k_{C3П[115]} \cdot I_{\text{раб. max. T2}[115]} + k'_o \cdot I_{\text{раб. max. T1}[115]}),$$

$$I_{C3} = \frac{1,1}{0,92} \cdot (2,241 \cdot 110,7 + 1,5 \cdot 110,7) = 495,208 \text{ A},$$

где $k_o = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент отстройки; $k_B = 0,92$ – коэффициент возврата реле; $k'_o = 1,5$ – коэффициент, учитывающий увеличение тока через трансформатор Т1 при понижении напряжения на шинах НН после подключения к нему затормозившихся двигателей, ранее питавшихся от трансформатора Т3.

2.3) По условию отстройки (согласования) с током срабатывания МТЗ, установленной на секционном выключателе (предыдущем элементе СЭС).

Ток срабатывания защиты, установленной на секционном выключателе QB:

$$I_{C3.QB[6,3]} = 6,866 \text{ кА},$$

$$I_{C3.QB[115]} = I_{C3.QB[6,3]} \cdot \frac{U_{CH}}{U_{CB}} = 6,866 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3} = 188,082 \text{ A}.$$

Максимальный рабочий ток трансформатора Т1 для НР:

$$I_{\text{раб. max. T1}[230]} = \frac{0,7 \cdot S_{\text{ном. T1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{CB}} = \frac{0,7 \cdot 63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 10^3} = 110,701 \text{ A}.$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{C3} \geq k_{HC} \cdot (I_{C3.QB[230]} + I_{\text{раб. max. T1}[230]}) = 1,22 \cdot (188,082 + 110,701) = 364,514 \text{ A},$$

где $k_{HC} = 1,2 \dots 1,25$ – коэффициент надежности согласования.

В качестве тока срабатывания МТЗ, установленной на ВН трансформатора Т1, выбирается большее значение тока:

$$I_{C3[230]} = 495,208 \text{ A},$$

$$I_{C3[6,3]} = I_{C3[230]} \cdot \frac{U_{CB}}{U_{CH}} = 495,208 \cdot \frac{230 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} = 18,079 \text{ кА}.$$

3) Определяются ток срабатывания реле и токи, проходящие через реле при двухфазных КЗ в минимальных режимах работы в основной и резервной зонах МТЗ.

Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = \frac{I_{C3} \cdot K_{CX}}{K_I} = \frac{495,208 \cdot 1}{200/5} = 12,38 \text{ A},$$

где K_{CX} – коэффициент схемы ($K_{CX} = 1$); K_I – коэффициент трансформации ТТ на 110 кВ.

Ток, проходящий через реле, при двухфазном КЗ в минимальном режиме работы в основной зоне МТЗ:

$$I_{p.min.O} = \frac{I_{K-3,MIN[230]}^{(2)} \cdot K_{CX}}{K_I} = \frac{578,28 \cdot 1}{200/5} = 14,457 \text{ A},$$

где $I_{K-3,MIN[230]}^{(2)} = I_{K-3,MIN[6,3]}^{(2)} \cdot \frac{U_{CH}}{U_{CB}} = 21,12 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3} = 578,28 \text{ A}$; $I_{K-3,MIN[6,3]}^{(2)} = 21,112 \text{ кА}$ – минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-3 (при выключенном секционном выключателе).

Ток, проходящий через реле, при двухфазном КЗ в минимальном режиме работы в резервной зоне МТЗ:

$$I_{p.min.P} = \frac{I_{K-4,MIN[230]}^{(2)} \cdot K_{CX}}{K_I} = \frac{331,682 \cdot 1}{200/5} = 8,292 \text{ A},$$

где $I_{K-4, \text{MIN}[230]}^{(2)} = 331,682 \text{ А}$ – минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-4.

4) Определяется чувствительность МТЗ трансформатора в основной и резервной зонах:

$$K_{\text{ч.О}} = \frac{I_{\text{р.мин.О}}}{I_{\text{СР}}} \geq 1,5,$$

$$K_{\text{ч.Р}} = \frac{I_{\text{р.мин.Р}}}{I_{\text{СР}}} \geq 1,2,$$

$$K_{\text{ч.О}} = \frac{I_{\text{р.мин.О}}}{I_{\text{СР}}} = \frac{14,457}{12,38} = 1,17 < 1,5,$$

$$K_{\text{ч.Р}} = \frac{I_{\text{р.мин.Р}}}{I_{\text{СР}}} = \frac{8,292}{12,38} = 0,67 < 1,2.$$

Чувствительность защиты не удовлетворяет требованиям ПУЭ в основной и резервной зонах, для увеличения чувствительности произведем расчет МТЗ с пуском по напряжению.

10.5. МТЗ с пуском по напряжению

На трансформаторах с большими пределами регулирования напряжения под нагрузкой, а также коэффициентом самозапуска больше 2, МТЗ выполняется с пусковым органом напряжения, что позволяет повысить чувствительность защиты, применяя $K_{\text{сзп}} = 1$.

1) Выбирается ток срабатывания МТЗ как наибольшее значение, полученное из трех расчетных условий.

1.1) *Максимальный рабочий ток трансформатора Т1 для ПАР:*

$$I_{\text{раб.мах.Т1}[230]} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{ном.Т1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{СВ}}} = \frac{1,4 \cdot 63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 10^3} = 221,401 \text{ А.}$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{\text{СЗ}} \geq \frac{k_0}{k_B} \cdot I_{\text{раб.мах.Т1}[230]} = \frac{1,1}{0,92} \cdot 221,401 = 264,719 \text{ А,}$$

где $k_0 = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент отстройки; $k_B = 0,92$ – коэффициент возврата реле; $k_{\text{сзп}} = 1$ – коэффициент самозапуска.

1.2) *Максимальный рабочий ток трансформатора Т1 для НР:*

$$I_{\text{раб.мах.Т1}[230]} = I_{\text{раб.мах.Т2}[230]} = \frac{0,7 \cdot S_{\text{ном.Т1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{СВ}}} = \frac{0,7 \cdot 63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 10^3} = 110,701 \text{ А.}$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{\text{СЗ}} \geq \frac{k_0}{k_B} \cdot (I_{\text{раб.мах.Т2}[230]} + k'_0 \cdot I_{\text{раб.мах.Т1}[230]}) = \frac{1,1}{0,92} \cdot (110,7 + 1,5 \cdot 110,7) = 330,898 \text{ А,}$$

$k'_0 = 1,5$ – коэффициент, учитывающий увеличение тока через трансформатор Т1 при понижении напряжения на шинах НН после подключения к нему затормозившихся двигателей, ранее питавшихся от трансформатора Т3.

1.3) *Ток срабатывания селективной МТЗ с независимой характеристикой, установленной на секционном выключателе QB.*

Ток срабатывания защиты:

$$I_{\text{СЗ, QB}[6,3]} = \frac{k_0 \cdot k_{\text{СЗП}}}{k_B} \cdot I_{\text{раб.мах. QB}} = \frac{1,1 \cdot 1}{0,92} \cdot 2020,726 = 2416,085 \text{ кА,}$$

где $k_0 = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент отстройки; $k_B = 0,92$ – коэффициент возврата реле; $k_{\text{сзп}} = 1$ – коэффициент самозапуска.

$$I_{C3.QB[230]} = I_{C3.QB[6,3]} \cdot \frac{U_{CH}}{U_{CB}} = 2,416 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3} = 66,18 \text{ A.}$$

Максимальный рабочий ток трансформатора Т1 для НР:

$$I_{\text{раб. max. Т1}[230]} = \frac{0,7 \cdot S_{\text{ном. Т1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{CB}} = \frac{0,7 \cdot 63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 10^3} = 110,7 \text{ A.}$$

Ток срабатывания защиты:

$$I_{C3} \geq k_{HC} \cdot (I_{C3.QB[230]} + I_{\text{раб. max. Т1}[230]}) = 1,22 \cdot (66,18 + 110,7) = 215,79 \text{ A,}$$

где $k_{HC} = 1,2 \dots 1,25$ – коэффициент надежности согласования.

Принимаем ток срабатывания МТЗ:

$$I_{C3[115]} \geq 330,898 \text{ A,}$$

$$I_{C3[6,3]} = I_{C3[230]} \cdot \frac{U_{CB}}{U_{CH}} = 330,898 \cdot \frac{230 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} = 12,080 \text{ кА.}$$

2) Определяются ток срабатывания реле и минимальные токи через реле при КЗ в основной и резервной зоне.

Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = \frac{K_{CX} \cdot I_{C3}}{K_I} = \frac{1 \cdot 330,898}{200/5} = 8,27 \text{ A,}$$

где K_{CX} – коэффициент схемы; K_I – коэффициент трансформации ТТ на 110 кВ.

Ток, проходящий через реле, при двухфазном КЗ в минимальном режиме работы в основной зоне МТЗ:

$$I_{p.min.O} = \frac{K_{CX} \cdot I_{K-3,MIN[230]}^{(2)}}{K_I} = \frac{1 \cdot 578,284}{200/5} = 14,457 \text{ A.}$$

Ток, проходящий через реле, при двухфазном КЗ в минимальном режиме работы в резервной зоне МТЗ:

$$I_{p.min.P} = \frac{K_{CX} \cdot I_{K-4,MIN[230]}^{(2)}}{K_I} = \frac{1 \cdot 331,681}{200/5} = 8,292 \text{ A.}$$

3) Проверяется чувствительность защиты по току для основной и резервной зоны:

$$K_{ч.O} = \frac{I_{p.min.O}}{I_{CP}} \geq 1,5,$$

$$K_{ч.P} = \frac{I_{p.min.P}}{I_{CP}} \geq 1,2,$$

$$K_{ч.O} = \frac{I_{p.min.O}}{I_{CP}} = \frac{14,457}{8,272} = 1,75 \geq 1,5,$$

$$K_{ч.P} = \frac{I_{p.min.P}}{I_{CP}} = \frac{8,292}{8,27} = 1,002 < 1,2.$$

4) Определяются первичные напряжения срабатывания защиты.

Напряжение срабатывания для минимального реле напряжения выбирается из условия обеспечения возврата реле после отключения внешнего КЗ:

$$U_{C3} \leq \frac{U_{MIN}}{k_o \cdot k_B} = \frac{3,436}{1,2 \cdot 1,05} = 2,727 \text{ кВ,}$$

где U_{MIN} – междуфазное напряжение в месте установки защиты (шины НН) в условиях самозапуска после отключения внешнего КЗ. Принимается значение U_{MIN} из выполненных ранее

расчетов самозапуска (меньшее значение); $k_0 = 1,2$ – коэффициент отстройки; $k_B = 1,05$ – коэффициент возврата.

Напряжение срабатывания реле:

$$U_{CP} = \frac{U_{C3}}{k_U} = \frac{2,727}{6000/100} = 45,45 \text{ В},$$

где k_U – коэффициент трансформации ТН.

Напряжение срабатывания фильтра реле напряжения обратной последовательности выбирается из условия обеспечения отстройки от напряжения небаланса фильтра в нормальном режиме:

$$U_{2,CP} = 0,06 \cdot U_{ном} = 0,06 \cdot 100 = 6 \text{ В},$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение вторичной обмотки ТН, что соответствует минимальной уставке с пределами шкалы 6–12 В:

$$U_{2,C3} = k_U \cdot U_{2,CP} = \frac{6000}{100} \cdot 6 = 360 \text{ В}.$$

5) Проверяется чувствительность защиты по напряжению в резервной зоне МТЗ.

Коэффициент чувствительности при КЗ в резервной зоне для минимального реле напряжения:

$$K_{ч.У} = \frac{U_{C3} \cdot k_B}{U_{OCT.MAX}} \geq 1,2,$$

$$K_{ч.У} = \frac{U_{C3} \cdot k_B}{U_{OCT.MAX}} = \frac{2,727 \cdot 1,05}{711,325} = 4,03 > 1,2,$$

где $U_{OCT.MAX}$ – междуфазное напряжение в месте установки ТН, от которого питается реле при металлическом КЗ в расчетной точке, когда указанное напряжение имеет максимальное значение:

$$U_{OCT.MAX} = \sqrt{3} \cdot I_{K-5,MAX[6,3]}^{(3)} \cdot \sqrt{r_{W3[6,3]}^2 + x_{W3[6,3]}^2} = \sqrt{3} \cdot 3,434 \cdot \sqrt{0,107^2 + 0,053^2} = 711,325 \text{ кВ},$$

где $I_{K-5,MAX[6,3]}^{(3)} = 3,434 \text{ кА}$ – максимальный ток трехфазного КЗ; $r_{W3[6,3]}$ – активное сопротивление линии W3, равное $0,153 \cdot 0,7 = 0,107 \text{ Ом}$; $x_{W3[6,3]}$ – индуктивное сопротивление линии W3, равное $0,076 \cdot 0,7 = 0,053 \text{ Ом}$.

Коэффициент чувствительности при КЗ в резервной зоне для фильтра реле напряжения обратной последовательности:

$$K_{ч.2.У} = \frac{U_{2.MIN.OCT}}{U_{2,C3}} \geq 1,2,$$

$$K_{ч.2.У} = \frac{U_{2.MIN.OCT}}{U_{2,C3}} = \frac{2553,58}{360} = 7,09 > 1,2,$$

где $U_{2.MIN.OCT}$ – междуфазное напряжение обратной последовательности в месте установки ТН, от которого питается фильтр реле при металлическом КЗ между двумя фазами в расчетной точке в режиме и при котором указанное напряжение минимально:

$$U_{2.MIN.OCT} = \frac{U_{HH}}{2} - \sqrt{3} \cdot I_{K-5,MIN[6,3]}^{(2)} \cdot \sqrt{r_{2.W3}^2 + x_{2.W3}^2} =$$

$$= \frac{6000}{2} - \sqrt{3} \cdot 2,155 \cdot \sqrt{0,107^2 + 0,053^2} = 2553,58 \text{ В},$$

где $I_{K-5,MIN[6,3]}^{(2)} = 2,155 \text{ кА}$ – минимальный ток двухфазного КЗ.

6) Определяем время срабатывания МТЗ трансформатора с независимой характеристикой:

$$t_{C3.T1} = t_{C3.QB} + \Delta t = 1,6 + 0,4 = 2,0 \text{ с},$$

где $t_{сз. QB}$ – время срабатывания МТЗ с независимой характеристикой, установленной на секционном выключателе QB; $\Delta t = 0,4$ с – для МП защиты.

Чувствительность защиты удовлетворяет требованиям ПУЭ в основной зоне. Полученная чувствительность соответствует крайнему положению устройства РПН, поэтому во всех других режимах КЧ будет выше.

10.6. Расчет параметров срабатывания двухступенчатой токовой защиты КЛ W3 для микропроцессорного устройства БМРЗ-101-Д-КЛ-01

1) Для обеспечения первой ступени защиты используется максимальная токовая отсечка. Ток срабатывания отсечки определяется следующим выражением:

$$I_{CO} \geq k_o \cdot I_{K-5.MAX[6,3]}^{(3)} = 1,3 \cdot 3,434 = 4,464 \text{ кА},$$

где $k_o = 1,2 \dots 1,4$ – коэффициент отстройки; $I_{K-5.MAX[6,3]}^{(3)} = 3,434$ кА – максимальное значение трехфазного тока в точке К-5 (для блока «линия – трансформатор»).

$$I_{\max. \text{раб. ТЗ}[6,3]} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{ном.ТЗ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{CH}}} = \frac{1,4 \cdot 2500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 320,75 \text{ А}.$$

$K_I = \frac{400}{5}$ – коэффициент трансформации ТТ на 6 кВ, K_I выбираем по максимальному рабочему току трансформатора ТЗ.

Исходя из имеющихся данных определяем коэффициент срабатывания реле:

$$I_{CP} = \frac{I_{CO} \cdot K_{CX}}{K_I} = \frac{4,464 \cdot 1}{400/5} = 55,806 \text{ А},$$

где $K_{CX} = 1$ – коэффициент схемы для схемы соединения измерительных трансформаторов тока в «звезду», при схеме соединения «треугольник» применяется значение коэффициента $\sqrt{3}$.

Чувствительность срабатывания отсечки определяется по следующей формуле:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{K-4.MIN[6,3]}^{(2)}}{I_{CO}} = \frac{13,32}{4,464} = 2,98,$$

где $I_{K-4.MIN[6,3]}^{(2)} = 13,320$ кА – минимальное значение двухфазного тока короткого замыкания в точке К-4.

Время срабатывания отсечки: $t_{CO} \approx 0,05$ с.

2) В качестве резервирования для основного комплекта защит применяется максимальная токовая защита (МТЗ).

Определение значения уставки МТЗ рекомендуется выполнять по следующим условиям.

2.1) *Требуется, чтобы пусковой орган релейной защиты возвращался в исходное состояние по окончании действия режима короткого замыкания:*

$$I_{CЗ} \geq \frac{K_o \cdot K_{CЗП}}{K_B} \cdot I_{\text{раб. max. ТЗ}[6,3]},$$

где $I_{\max. \text{раб. ТЗ}[6,3]} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{ном.ТЗ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{CH}}} = \frac{1,4 \cdot 2500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 320,75 \text{ А}$ – максимальный рабочий ток ПАР трансформатора ТЗ.

Значение сопротивления нагрузки на нижней стороне:

$$X_{H[6,3]} = \frac{x_{* \text{нагр}} \cdot U_{\text{CH}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб. max. ТЗ}[6,3]}} = \frac{0,35 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 320,75} = j3,969 \text{ Ом}.$$

Определяется значение эквивалентного сопротивления в условиях самозапуска двигательной нагрузки:

$$Z_{W3[6,3]} = r_{уд.W3} \cdot I_{W3} + j(x_{уд.W3} \cdot I_{W3}) = 0,153 \cdot 0,7 + j(0,076 \cdot 0,7) = 0,107 + j0,053 \text{ Ом.}$$

Значение тока самозапуска может быть найдено по следующей формуле:

$$I_{C3П[6,3]} = \frac{U_{CH}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{Э[6,3]}|} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 5,071} = 717,282 \text{ А,}$$

где $|Z_{Э[6,3]}| = |0,262 + j5,064| = 5,071 \text{ Ом.}$

Определение коэффициента самозапуска:

$$K_{C3П} = \frac{I_{C3П[6,3]}}{I_{раб.мах.ТЗ[6,3]}} = \frac{717,282}{320,75} = 2,24.$$

Условия срабатывания защиты:

$$I_{C3} \geq \frac{K_o \cdot K_{C3П}}{K_B} \cdot I_{раб.мах.ТЗ[6,3]} = \frac{1,1 \cdot 2,24}{0,95} \cdot 320,75 = 830,54 \text{ А,}$$

где $K_o = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент отстройки; $K_B = 0,95$ – коэффициент возврата микропроцессорного терминала БМРЗ.

2.2) Для отстройки от ложных срабатываний во время воздействия АВР требуется уточнение тока срабатывания защит:

$$I_{C3} \geq \frac{K_o}{K_B} \cdot (K_{C3П} \cdot I_{раб.мах.Т4[6,3]} + K'_o \cdot I_{раб.мах.ТЗ[6,3]}),$$

где $I_{раб.мах.ТЗ[6,3]} = \frac{0,7 \cdot S_{ном.ТЗ}}{\sqrt{3} \cdot U_{CH}} = \frac{0,7 \cdot 2500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 160,375 \text{ А}$ – в нормальном режиме ток максимальный рабочий для трансформатора ТЗ.

Значение сопротивления нагрузки на нижней стороне:

$$X_{H[6,3]} = \frac{x_{*нагр} \cdot U_{CH}}{\sqrt{3} \cdot I_{раб.мах.ТЗ[6,3]}} = \frac{0,35 \cdot 6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 160,375} = j7,938 \text{ Ом.}$$

Определяется значение эквивалентного сопротивления в условиях самозапуска двигательной нагрузки:

$$Z_{Э[6,3]} = (jx_{G.MAX[230]} + r_{W1[230]} + jx_{W1[230]} + jx_{T1(p),MIN[230]}) \cdot \left(\frac{U_{CH}}{U_{CB}}\right)^2 + Z_{W3[6,3]} + r_{T3[6,3]} + jx_{T3[6,3]} + jx_{H[6,3]},$$

$$Z_{Э[6,3]} = (j9,266 + 6,42 + j6,66 + j141,429) \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{230 \cdot 10^3}\right)^2 + 0,107 + j0,053 + 0,15 + j0,924 + j7,938,$$

$$Z_{Э[6,3]} = 0,262 + j9,033 \text{ Ом.}$$

Значение тока самозапуска может быть найдено по формуле:

$$I_{C3П[6,3]} = \frac{U_{CH}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{Э[6,3]}|} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 9,037} = 402,49 \text{ А,}$$

где $|Z_{Э[6,3]}| = |0,262 + j9,033| = 9,037 \text{ Ом.}$

Определение коэффициента самозапуска:

$$K_{C3П} = \frac{I_{C3П[6,3]}}{I_{раб.мах.ТЗ[6,3]}} = \frac{402,49}{160,375} = 2,51.$$

Защита срабатывает при следующих условиях:

$$I_{C3} \geq \frac{K_o}{K_B} \cdot (K_{C3П} \cdot I_{\text{раб.мах.Т4}[6,3]} + K'_o \cdot I_{\text{раб.мах.Т3}[6,3]}),$$

$$I_{C3} = \frac{1,1}{0,95} \cdot (2,51 \cdot 160,375 + 1,5 \cdot 160,375) = 744,588 \text{ A},$$

где $K_o = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент отстройки; $K_B = 0,95$ – коэффициент возврата; $K'_o = 1,5$.

2.3) *Исключение ошибочного срабатывания зашит МТЗ, вызванного срабатыванием отсечки на выключателе QF, требует уточнения уставки срабатывания:*

$$I_{C3} \geq k_{HC} \cdot I_{C.O.QF[6,3]} = 1,3 \cdot 304,762 = 396,19 \text{ A},$$

где $I_{C.O.QF[6,3]} = I_{C.O.QF[0,4]} \cdot \frac{U_{CH}}{U_{CB}} = 4800 \cdot \frac{0,4 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^3} = 304,762 \text{ A}$; $I_{C.O.QF[0,4]} = 4800 \text{ A}$ – значения тока срабатывания на выключателе QF1.

После определения всех пороговых ступеней отстройки по наибольшему из значений определяем значение уставки:

$$I_{C3} = 830,537 \text{ A}.$$

Значение тока срабатывания на реле:

$$I_{CP} = \frac{K_{CX} \cdot I_{C3}}{K_I} = \frac{1 \cdot 830,549}{400/5} = 10,38 \text{ A},$$

где $K_{CX} = 1$ – коэффициент схемы для схемы соединения измерительных трансформаторов тока в «звезду», при схеме соединения «треугольник» применяется значение коэффициента $\sqrt{3}$.

$K_I = \frac{400}{5}$ – коэффициент трансформации ТТ на 6 кВ.

Коэффициент чувствительности МТЗ:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{K-5.MIN[6,3]}^{(2)}}{I_{C3}} = \frac{2155}{830,54} = 2,59 \geq 1,5.$$

Время срабатывания МТЗ:

$$t_{C3} \geq t_{CO(QF)} + \Delta t = 0,3 + 0,3 = 0,6 \text{ с}.$$

Таким образом, МТЗ блока «линия – трансформатор» удовлетворяет требованиям чувствительности по ПУЭ.

10.7. Расчет параметров срабатывания устройства АВР секционного выключателя QВ

1) Определение значения срабатывания органа напряжения автоматики ввода резерва:

$$U_{CP} \leq \frac{U_{\text{отс.К-5}[6,3]}}{k_o \cdot k_U} = \frac{6009,76}{1,1 \cdot 60} = 52,066 \text{ В},$$

где $k_o = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент отстройки; $k_U = \frac{6000}{100} = 60$ – коэффициент трансформации ТН.

$$U_{\text{отс.К-5}[6,3]} = \sqrt{3} \cdot I_{K-5.MAX[6,3]}^{(3)} \cdot \sqrt{(r_{T3[6,3]} + r_{W3[6,3]})^2 + (x_{T3[6,3]} + x_{W3[6,3]})^2},$$

$$U_{\text{отс.К-5}[6,3]} = \sqrt{3} \cdot 3,434 \cdot \sqrt{(0,15 + 0,107)^2 + (0,924 + 0,053)^2} = 6009,76 \text{ В}.$$

$$U_{CP} \leq \frac{U_{\text{отс.СЗП}}}{k_o \cdot k_B \cdot k_U} = \frac{3436,328}{1,1 \cdot 1,1 \cdot 60} = 47,33 \text{ В},$$

$$U_{\text{отс.СЗП}} = U_{\text{MIN}} = 3,436 \text{ кВ},$$

где $U_{\min}$ – напряжение в минимальном режиме шин низшего напряжения в случае самозапуска после ликвидации короткого замыкания за пределами устройства.

Для определения значения уставки по расчетным условиям выбирается наименьшее получаемое значение из расчетных параметров, определяемых в выборе уставок МТЗ.

$k_o = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент отстройки;

$k_B = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент возврата;

$k_U = \frac{6000}{100} = 60$ – коэффициент трансформации ТН.

Минимальное полученное значение в расчете будет являться уставкой срабатывания минимального пускового органа АВР:

$$U_{CP} = 47,33 \text{ В.}$$

2) Уставка по времени определяется следующим условием:

$$t_{ABP1} \geq t_{C3.\max} + \Delta t = 1,2 + 0,3 = 1,5 \text{ с,}$$

где $t_{C3.\max}$ – максимальная ступень времени срабатывания отходящих присоединений по шинам низшего напряжения для силового трансформатора Т1.

3) Минимальный ток срабатывания силового трансформатора Т1 позволяет исключить ложные срабатывания АВР в случае ошибочной работы измерительного трансформатора напряжения (ТН).

Значение срабатывания реле:

$$I_{CP} = \frac{I_{\text{раб. min}[6,3]}}{k_o \cdot K_I} = \frac{2886,75}{1,3 \cdot 1200} = 1,85 \text{ А,}$$

где $I_{\text{раб. min}[6,3]} = \frac{0,5 \cdot S_{\text{ном.Т1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{CH}} = \frac{0,5 \cdot 63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 2,886 \text{ кА; } k_o = 1,2 \dots 1,4$ – коэффициент отстройки;

$K_I = K_{TT(6)} = 6000 / 5 = 1200$ – коэффициент трансформации ТТ на стороне 6 кВ.

4) Для работы АВР важен контроль наличия напряжения на резервной секции шин. Для этого используется дополнительный орган максимального реле напряжения, уставка срабатывания которого определяется по формуле:

$$U_{CP2} = \frac{U_{\text{раб. min}}}{k_o \cdot k_B \cdot k_U} = \frac{5400}{1,3 \cdot 0,95 \cdot 60} = 72,874 \text{ В,}$$

где $U_{\text{раб. min}} = 0,9 \cdot U_{HH} = 0,9 \cdot 6000 = 5400 \text{ В; } k_o = 1,2 \dots 1,4$ – коэффициент отстройки; $k_B = 0,95$ –

коэффициент возврата для терминала БМРЗ; $k_U = \frac{6000}{100} = 60$ – коэффициент трансформации ТН.

5) Уставка времени АПВ позволяет обеспечить единоразовое срабатывание устройства автоматики.

Время на срабатывание секционного выключателя QV определяется суммой выдержек времени на:

$$t_{ABP2} = t_{BB} + t_{3АП} = 0,055 + 0,4 = 0,455 \text{ с,}$$

где $t_{BB} = 0,055 \text{ с}$ – собственное время включения секционного выключателя QV;

$t_{3АП} = 0,3 \dots 0,5 \text{ с}$ – время запаса.

10.8. Расчет параметров срабатывания защит электродвигателя на терминале Сириус-Д

На асинхронных электродвигателях напряжением выше 1000 В устанавливают защиту от следующих видов повреждений и ненормальных режимов: многофазных КЗ в обмотке статора и на ее выводах; замыканий на землю в обмотке статора; токов перегрузки; потери питания. Защиту от многофазных замыканий устанавливают на всех ЭД, она действует на отключение ЭД.

10.8.1. Защита от междуфазных КЗ

Согласно ПУЭ [10] для ЭД мощностью менее 2 МВт должна быть обязательно предусмотрена однорелейная токовая отсечка, защищающая от многофазных замыканий.

В микропроцессорных устройствах предусмотрено необходимое количество цифровых реле максимального тока для каждой фазы, поэтому применение предусмотренной в ПУЭ [10] отсечки в виде однорелейной схемы нецелесообразно.

Номинальный ток ЭД:

$$I_{\text{ном.М1}} = \frac{P_{\text{ном.М1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.М1}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{ном.М1}}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,87 \cdot 0,948} = 186,673 \text{ А}.$$

По номинальному току ЭД выбираем ТТ типа ТОЛ-СЭЦ-10-200/5 с коэффициентом трансформации $K_I = 200/5$.

При кратности тока 17 и максимальном сопротивлении токовых цепей не более 0,5 Ом ТТ этого типа имеет погрешность не более 10%. Указанная кратность тока соответствует току в первичной обмотке 3400 А ($17 \cdot 200 \text{ А}$).

Для оценки пригодности выбранного ТТ по погрешности, соответствующей предельной кратности тока, необходимо знать максимальный бросок пускового тока ЭД.

Максимальный бросок пускового тока с учетом апериодической составляющей:

$$I_{\text{бр.пуск}} = 1,4 \cdot k_{\text{ампер}} \cdot k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{ном.М1}} = 1,4 \cdot 1,8 \cdot 6 \cdot 186,673 = 2822 \text{ А},$$

где $k_{\text{ампер}} = 1,8$ – коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую пускового тока ЭД; $k_{\text{пуск}} = 6$ – кратность пускового тока ЭД.

Уставку срабатывания $I_{\text{ТО}}$ следует выбирать такой, чтобы выполнялось соотношение:

$$I_{\text{ТО}} \geq I_{\text{бр.пуск}} = 2822 \text{ А}.$$

Выбираем уставку срабатывания алгоритма ТО: $I_{\text{ТО}} = 2850 \text{ А}$.

Проверим выбранный ТТ на соблюдение требования, установленного в п. 3.2.29 ПУЭ [10]:

$$1,1 \cdot I_{\text{ТО}} < k_T \cdot I_{\text{ном}},$$

$$1,1 \cdot 2850 = 3135 \text{ А} < 17 \cdot 200 = 3400 \text{ А},$$

где $k_T = 17$ – кратность тока короткого замыкания при допустимой погрешности 10%;

$I_{\text{ном}} = 200 \text{ А}$ – номинальный первичный ток ТТ.

Выбранный ТТ соответствует требованиям, изложенным в ПУЭ [10].

Коэффициент чувствительности защиты:

$$K_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{I_{\text{К-3, MIN}[6,3]}^{(2)}}{I_{\text{ТО}}} = \frac{21112}{2850} = 7,41 > 2,$$

где $I_{\text{К-3, MIN}[6,3]}^{(2)} = 8,639 \text{ кА}$ – минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-3 (при выключенном секционном выключателе).

Так как коэффициент чувствительности ТО больше 2 и мощность ЭД не превышает 5 МВт, нет необходимости применять дополнительно дифференциальную защиту для защиты данного ЭД от междуфазных КЗ.

Защита от междуфазных КЗ работает без выдержки времени, как и ТО.

10.8.2. Защита от однофазных замыканий обмотки статора на землю

Для контроля тока I_0 в схемах защиты используют специальные ТТ нулевой последовательности – ТТНП.

В схеме применен ТТНП типа ТЗР, имеющий коэффициент трансформации $K_1 = 1/18$.

Определим емкостный ток защищаемого ЭД для оценки полученных результатов двумя способами.

1 способ. Для асинхронного ЭД с номинальным напряжением 6 кВ:

$$I_{C,ДВ} = 0,017 \cdot S_{НОМ,ДВ} = 0,017 \cdot 1,94 = 0,033 \text{ А},$$

где $S_{НОМ,ДВ} = \frac{P_{НОМ,ДВ}}{\cos \varphi \cdot \eta} = \frac{1,6}{0,87 \cdot 0,948} = 1,94 \text{ МВА}$ – полная мощность ЭД.

2 способ. Более точно емкостный ток ЭД можно определить по формуле:

$$I_{C,ДВ} = 2 \cdot \pi \cdot f_{НОМ} \cdot \sqrt{3} \cdot C_{ДВ} \cdot U_{НОМ,ДВ} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,014 \cdot 10^{-8} \cdot 6000 = 0,033 \text{ А},$$

где $C_{ДВ} = \frac{0,0187 \cdot S_{НОМ,ДВ} \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{U_{НОМ,ДВ} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{НОМ,ДВ})}} = \frac{0,0187 \cdot 1,94 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot \sqrt{6 \cdot (1 + 0,08 \cdot 6)}} = 1,014 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$ – электрическая емкость ЭД.

Сравнивая результаты, вычислений $I_{C,ДВ}$ по первому и второму способам, видим, что они совпадают.

Емкостный ток кабельной линии W4, соединяющей ЭД с ячейкой:

$$I_{C,КЛ} = I_{C0} \cdot l \cdot n = 1 \cdot 0,5 \cdot 1 = 0,5 \text{ А},$$

где $I_{C0} = 1 \text{ А/км}$ – удельный емкостный ток линии; $l = 0,5 \text{ км}$ – длина линии; $n = 1$ – число кабелей в линии.

Уставку срабатывания защиты ЭД от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) по току нулевой последовательности, определяем по соотношению:

$$3I_0 = \frac{K_{ОТС}}{K_B} \cdot K_{БР} \cdot (I_{C,ДВ} + I_{C,КЛ}) = \frac{1,2}{0,95} \cdot 2 \cdot (0,033 + 0,5) = 1,346 \text{ А},$$

где $K_{ОТС} = 1,2$ – коэффициент отстройки защиты от ОЗЗ; $K_B = 0,95$ – коэффициент возврата защит; $K_{БР} = 2$ – коэффициент броска емкостного тока, обусловленного перезарядом емкостей электрической сети при ОЗЗ.

Суммарный емкостный ток линий:

$$I_{ОЗЗ, \Sigma} = \frac{U_{НОМ,КЛ} \cdot l_{\Sigma}}{10} = \frac{6 \cdot 8}{10} = 4,8 \text{ А},$$

где $U_{НОМ,КЛ} = 6 \text{ кВ}$ – номинальное линейное напряжение КЛ; $l_{\Sigma} = 8 \text{ км}$ – суммарная длина КЛ, отходящих от секции.

Коэффициент чувствительности защиты от ОЗЗ по току нулевой последовательности:

$$K_q^{(1)} = \frac{I_{ОЗЗ, \Sigma}}{3I_0} = \frac{4,8}{1,346} = 3,565 > 1,5.$$

Ток во вторичной обмотке ТТНП, к которой подключены входные цепи цифровых устройств защиты, определяем по формуле:

$$3I_{0,ВТОР} \geq \frac{3I_0}{K_1} = \frac{1,346}{18} = 0,075 \text{ А},$$

где $K_1 = 18$ – коэффициент трансформации ТТНП типа ТЗР.

Для повышения стабильности срабатывания защиты принимаем выдержку времени первой ступени защиты от замыканий на землю равную 0,1 с.

10.8.3. Защита от перегрузки

Для защиты ЭД от перегрузки в цифровых устройствах релейной защиты используют третью ступень МТЗ, обеспечивающую контроль тока в двух или трех фазах.

Рассчитаем ток срабатывания первой ступени защиты (первичные значения), который должен быть отстроен от пускового тока ЭД:

$$I_{сз1} = \frac{1,2 \cdot k_{\text{пуск}}}{k_B} \cdot I_{\text{ном.М1}} = \frac{1,2 \cdot 6}{0,95} \cdot 186,673 = 1415 \text{ А},$$

где $k_{\text{пуск}} = 6$ – кратность пускового тока ЭД; $k_B = 0,95$ – коэффициент возврата; $I_{\text{ном.М1}} = 186,673 \text{ А}$ – номинальный ток двигателя.

Для отстройки от бросков пускового тока электродвигателя принимаем $t_{сз1} = 0,1 \text{ с}$. При таком значении выдержки времени будет исключено неправильное действие защиты при подпитке точки КЗ на шинах или присоединениях питающей сети.

Вторая ступень рассматриваемой защиты имеет инверсную характеристику и действует на отключение электродвигателя.

Время срабатывания защиты определяем по формуле, учитывающей тепловую постоянную времени A охлаждения статора защищаемого ЭД:

$$t_{сз2} = \frac{A}{k_i^2 - 1},$$

где k_i – кратность тока статорной обмотки ЭД.

Тепловую постоянную времени A охлаждения статора защищаемого ЭД найдем по формуле:

$$A = t_{\text{доп}} \cdot (k_i^2 - 1),$$

где $t_{\text{доп}}$ – допустимое время работы при кратности тока k_i .

Эта формула позволяет оценить минимально допустимое значение постоянной времени охлаждения статора в тех случаях, когда известны значения кратности тока и допустимого времени работы ЭД при этой кратности тока.

Серийные двигатели общего назначения отечественного производства изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52776–2007 (введен 1 января 2008 г.), согласно которым трехфазные двигатели переменного тока мощностью не менее 0,55 кВт с косвенным охлаждением обмоток статора должны выдерживать ток, равный 1,5 номинального тока, в течение 2 мин. Серийные двигатели общего назначения отечественного производства, изготовленные до 1 июля 2010 г., как правило, соответствуют требованиям ГОСТ 183–74. В ГОСТ 183–74 также указано приведенное выше требование.

Это позволяет определить постоянную времени A :

$$A = t_{\text{доп}} \cdot (k_i^2 - 1) = 120 \cdot (1,5^2 - 1) = 150 \text{ с}.$$

В зависимости от типа и мощности защищаемого ЭД значение A может находиться в диапазоне от 60 до 300 с.

Время срабатывания защиты:

$$t_{сз2} = \frac{A}{k_i^2 - 1} = \frac{150}{1,1^2 - 1} = 714,286 \text{ с},$$

где $k_i = 1,1$ – кратность тока статорной обмотки ЭД.

Ток срабатывания второй ступени защиты от симметричных перегрузок определяем по формуле:

$$I_{C32} = \frac{k_i}{k_B} \cdot I_{\text{ном.М1}} = \frac{1,1}{0,95} \cdot 186,673 = 216,147 \text{ А.}$$

Третья ступень защиты имеет независимую характеристику срабатывания и действует на сигнализацию, т. е. рассчитана для применения на объектах с дежурным персоналом.

Ток срабатывания третьей ступени находим по формуле:

$$I_{C33} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_B} \cdot I_{\text{ном.М1}} = \frac{1,05}{0,95} \cdot 186,673 = 206,322 \text{ А.}$$

Если двигатель работает без технологических перегрузок, то время срабатывания этой ступени t_{C33} выбирают от 10 до 20 с, но обязательно больше, чем время пуска ЭД.

Если же для приводимого электродвигателем механизма характерно наличие технологических перегрузок, то время срабатывания этой ступени выбирают таким, чтобы оно превышало время технологической перегрузки. Но и в этом случае оно не может быть меньше времени пуска электродвигателя.

Принимаем время срабатывания третьей ступени равным $t_{C33} = 10\text{с}$.

10.8.4. Защита минимального напряжения

Защита минимального напряжения (ЗМН) обеспечивает отключение электродвигателей ответственных механизмов.

Отключение таких ЭД необходимо для обеспечения самозапуска ЭД ответственных механизмов и создания условий для быстрого восстановления напряжения после отключения КЗ.

Выдержки времени ЗМН выбирают в диапазоне от 0,5 до 1,5 с, т. е. больше времени действия быстродействующих защит от многофазных КЗ. Уставку ЗМН по напряжению выбирают, как правило, не выше 70% номинального напряжения.

Вторая ступень алгоритма ЗМН предназначена для отключения всех электродвигателей при длительном исчезновении напряжения по условиям технологического процесса и техники безопасности.

Напряжение срабатывания второй ступени выбирают из диапазона:

$$U_{<} = (0,4 \div 0,5) \cdot U_{\text{ном.М}} = 0,45 \cdot 6000 = 2700\text{В.}$$

Уставка по времени срабатывания защиты выбирается в зависимости от скорости затормаживания основных АД, что позволяет осуществить последовательный запуск механизмов при невозможности их одновременного пуска.

Если присоединенные массы на валу АД значительны и электродвигатели затормаживаются медленно, то время срабатывания защиты выбирают из диапазона $T_{<<3.МН} = 6 \div 9\text{с}$.

Если электродвигатели затормаживаются быстро, то уставку защиты по времени выбирают менее 6 с.

Уставку по времени срабатывания защиты принимаем равной 6 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров А.М. Техническая коллекция Schneider Electric. Методика расчета уставок дифференциальной защиты трансформаторов (Seram T87). СПб.: ПЭИпк, 2007. Вып. 9. 16 с.
2. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-101-Д-КЛ-01. Руководство по эксплуатации. Ч. 2. ДИВГ.648228.014-00.01 РЭ1. СПб.: НТЦ «Механотроника», 2014. 65 с.
3. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. Взамен ГОСТ 14209-69; введ. 01.07.1985. М.: Стандартиформ, 2009. 54 с.
4. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. Взамен ГОСТ Р 50270-92; введ. 01.01.1995. М.: Изд-во стандартов, 1994. 109 с.
5. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 240 с.
6. Захаров О.Г. Цифровые устройства релейной защиты электродвигателей. Алгоритмы и уставки. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2012. Ч. 1. 82 с.
7. Захаров О.Г. Цифровые устройства релейной защиты электродвигателей. Алгоритмы и уставки. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. Ч. 2. 82 с.
8. Понижающие трансформаторы 35–220 кВ. Резервные защиты. Расчет уставок. Методические указания. СТО ДВИГ-056-2015. СПб.: НТЦ «Механотроника», 2015. 33 с.
9. Попов М.Г. Техническая коллекция Schneider Electric. Методические указания по расчету продольной дифференциальной токовой защиты ANSI 87M. СПб.: ПЭИпк, 2011. Вып. 40. 31 с.
10. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2015. 647 с.
11. Руководящие указания по релейной защите. М.: Энергоатомиздат, 1985. Вып. 13 Б: Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110–500 кВ: Расчеты. 96 с.
12. Соловьев А.Л. Техническая коллекция Schneider Electric. Методика расчета уставок защит Seram. СПб.: ПЭИпк, 2006. Вып. 3. 73 с.
13. Терминалы релейной защиты синхронных и асинхронных электродвигателей 6–10 кВ. Расчет уставок. Методические указания. СТО ДВИГ-046-2012. СПб.: НТЦ «Механотроника», 2012. 82 с.
14. Трансформаторы и автотрансформаторы 35–220 кВ. Дифференциальная токовая защита. Расчет уставок. Методические указания. СТО ДВИГ-055-2013. СПб.: НТЦ «Механотроника», 2013. 55 с.
15. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 800 с.
16. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. 4-е изд., испр. и доп. СПб.: ПЭИПК, 2010. 350 с.
17. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
18. Seram серии 80. Установка, применение, ввод в эксплуатацию и обслуживание. Руководство по эксплуатации. 2005. 125 с.

ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ПРОЕКТА

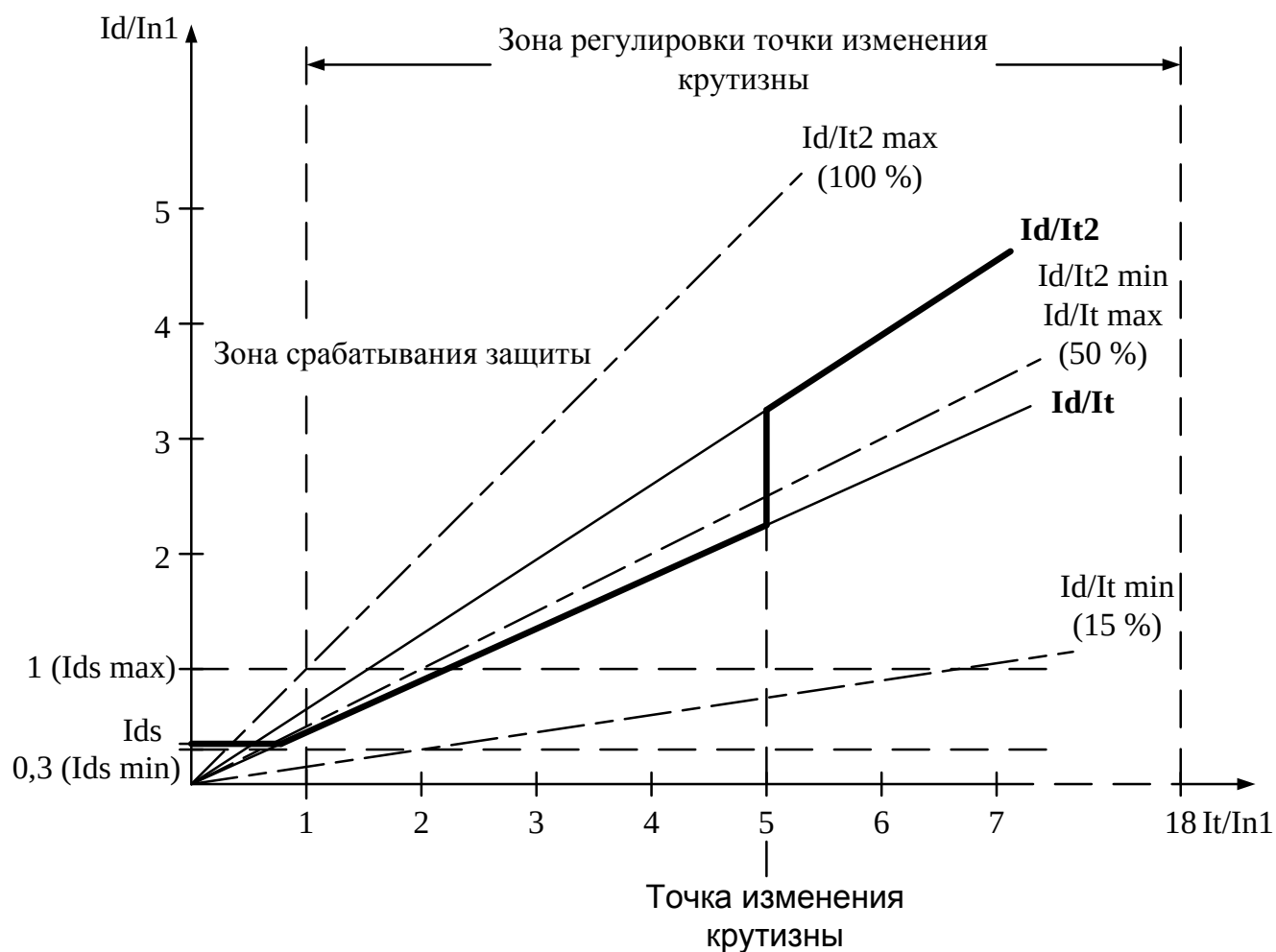
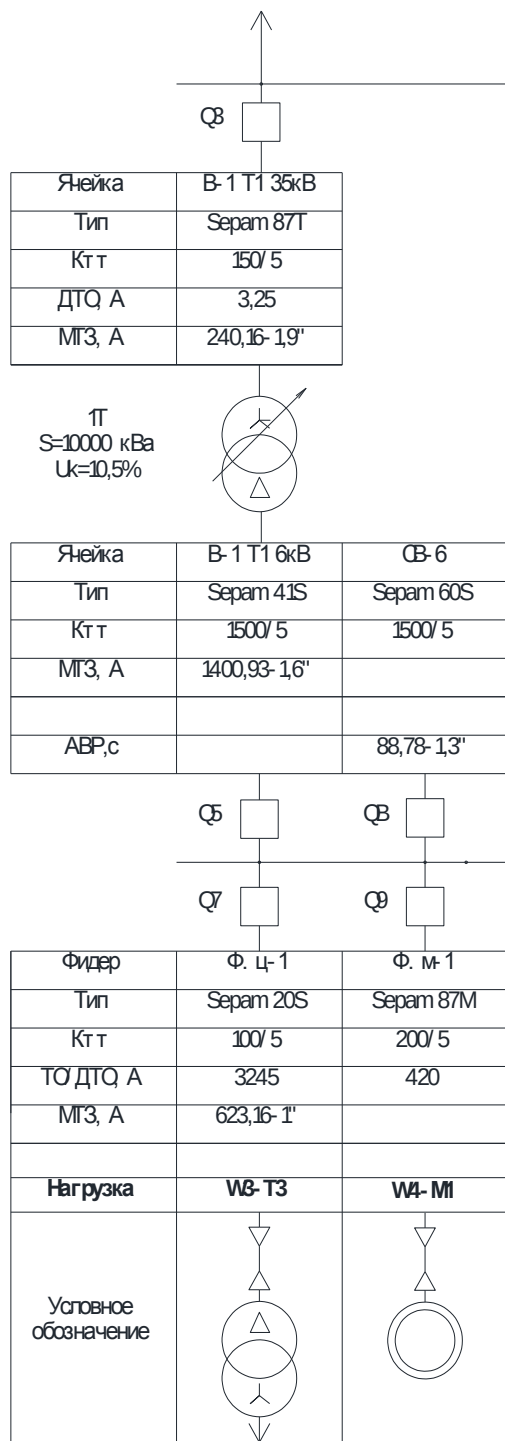
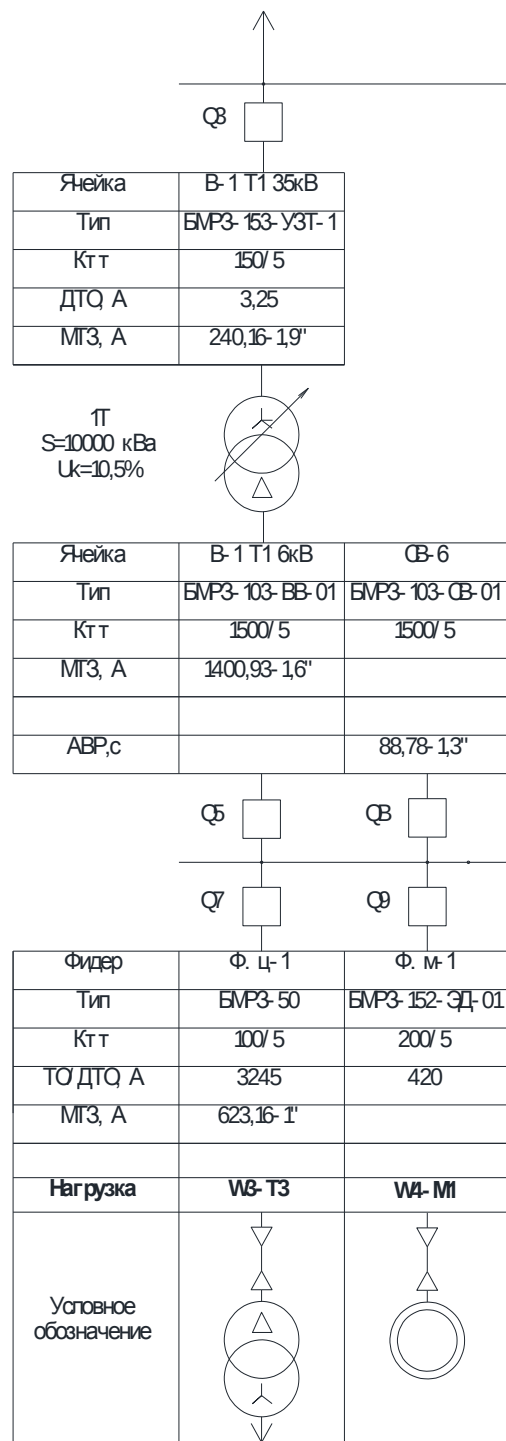


Рис. 1. Тормозная характеристика дифференциальной защиты трансформатора Т1 для микропроцессорного устройства Seram T87



a



б

Рис. 2. Карта уставок
a – на терминалах Sepam; *б* – на терминалах БМРЗ

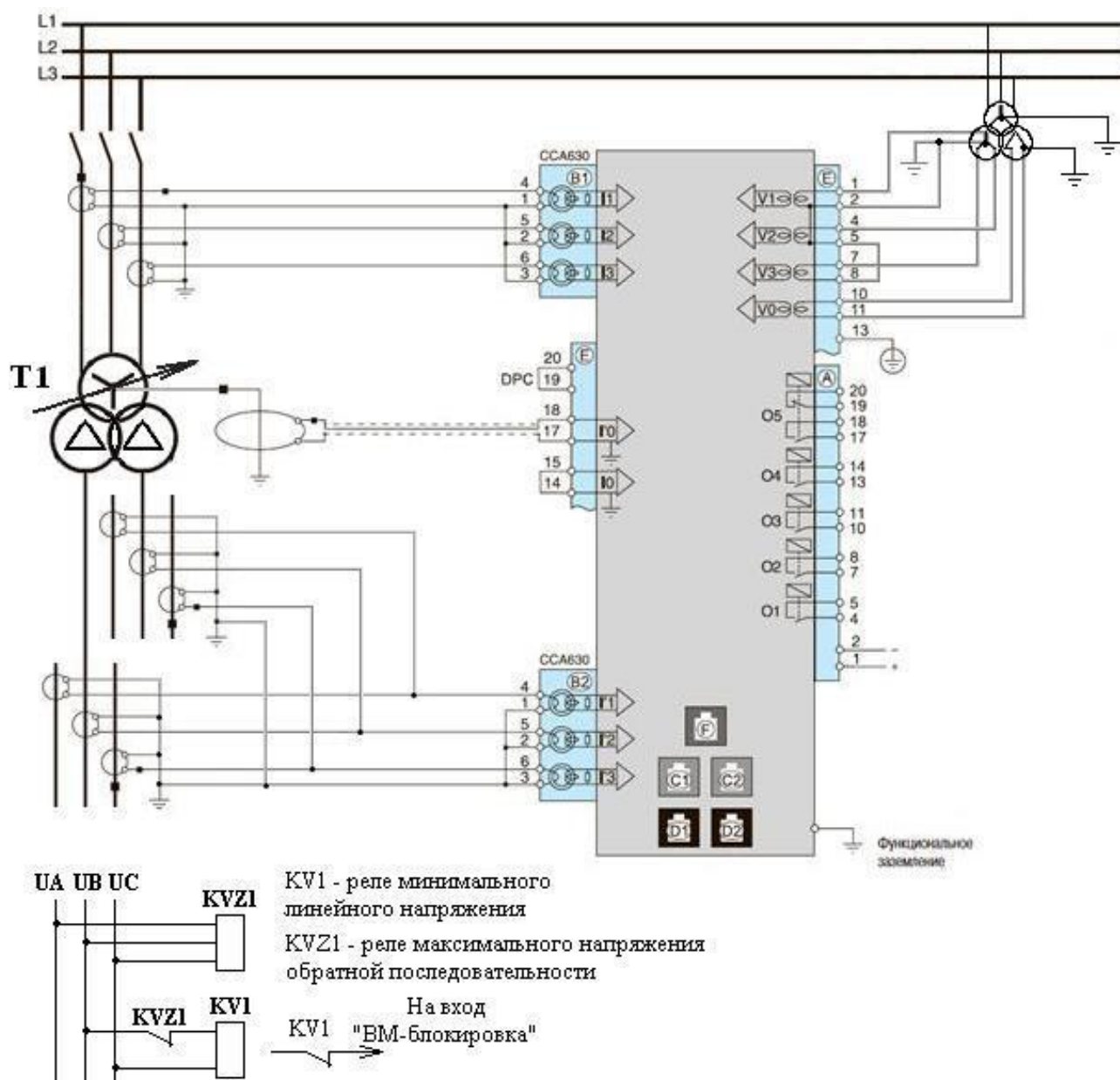


Рис. 3. Схема подключения Seram T87 для защиты трансформатора T1

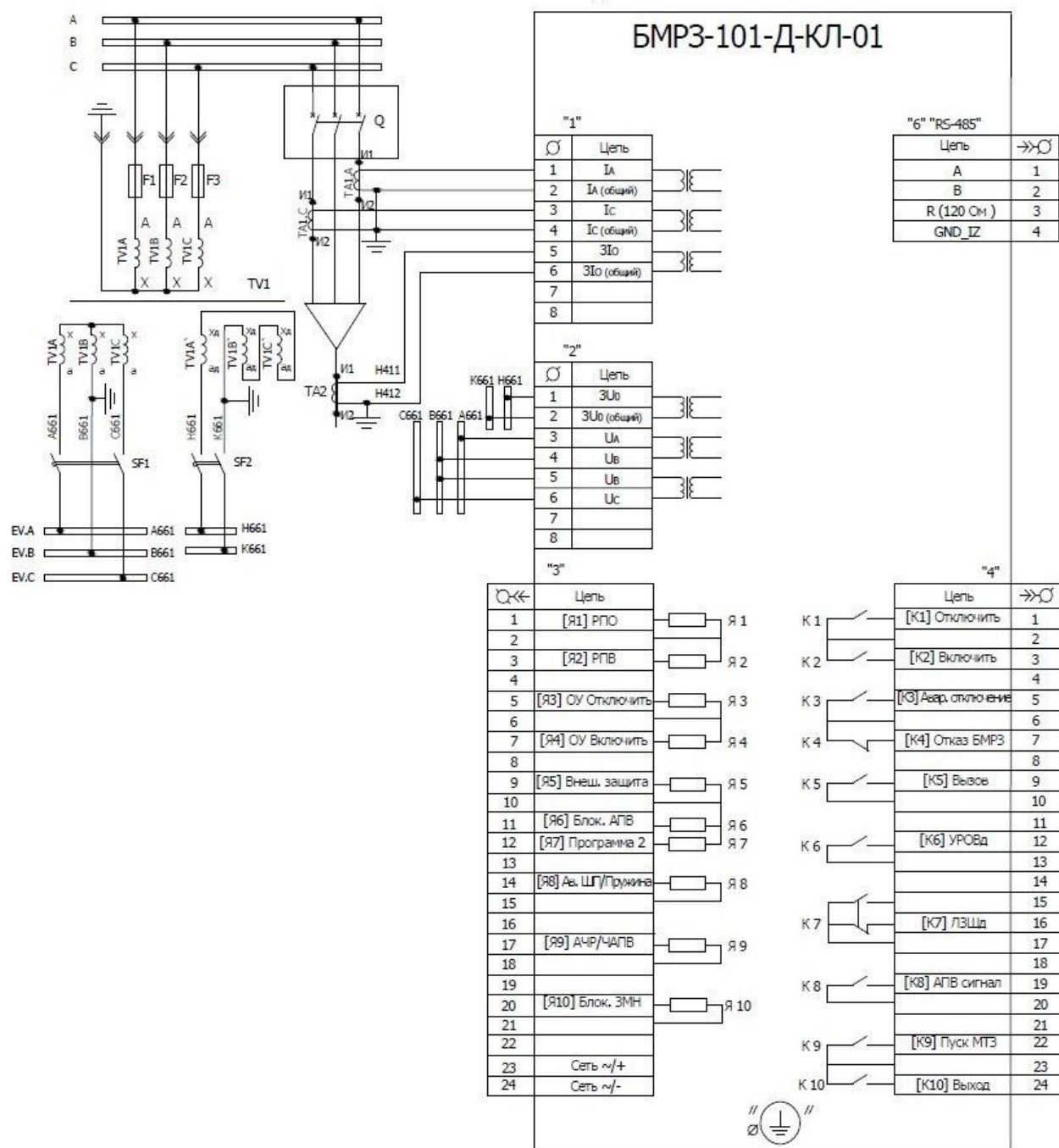


Рис. 4. Схема подключения БМР3-101-Д-КЛ-01 для защиты блока «линия W3 – трансформатор Т3»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ.....	4
1. Выбор сечения питающей линии.....	7
2. Расчет токов короткого замыкания для максимального и минимального режима работы питающей системы	8
2.1. Расчет тока КЗ в точке К-1.....	10
2.2. Расчет тока КЗ в точке К-2.....	10
2.3. Расчет тока КЗ в точке К-3.....	10
2.4. Расчет тока КЗ в точке К-4.....	12
2.5. Расчет тока КЗ за цеховым трансформатором ТЗ в точке К-5.....	14
3. Релейная защита трансформатора Т1 для микропроцессорного устройства Seram Т87.....	17
3.1. Расчет параметров срабатывания дифференциальной защиты трансформатора Т1	17
3.2. Расчет параметров срабатывания максимальной токовой защиты стороны ВН трансформатора Т1	20
3.3. МТЗ с пуском по напряжению.....	25
4. Релейная защита трансформатора Т1 с применением микропроцессорного устройства БМРЗ.....	29
4.1. Выбор трансформаторов тока.....	30
4.2. Дифференциальная токовая отсечка	30
4.3. Дифференциальная токовая защита с торможением.....	32
4.4. Максимальная токовая защита (МТЗ)	36
4.5. Максимальная токовая защита с пуском по напряжению.....	39
4.6. Защита от перегрузки	41
5. Расчет параметров срабатывания двухступенчатой токовой защиты КЛ W3 для микропроцессорного устройства БМРЗ-101-Д-КЛ-01.....	42
6. Расчет рабочих уставок максимальной защиты линии W3 (МТЗ) терминала Seram	45
6.1. Расчет тока срабатывания селективной токовой отсечки без выдержки времени.....	45
7. Расчет параметров срабатывания устройства АВР секционного выключателя QV	47
8. Расчет параметров срабатывания защит электродвигателя терминала Seram M87	48
9. Расчет параметров срабатывания защит электродвигателя терминала БМРЗ.....	50
9.1. Расчет уставок максимальной токовой отсечки.....	50
9.2. Расчет уставок дифференциальной защиты.....	50

10. Пример расчета.....	53
10.1. Расчет токов короткого замыкания для максимального и минимального режима работы питающей системы.....	54
10.2. Расчет токов короткого замыкания для максимального и минимального режима работы питающей системы.....	56
10.2.1. Расчет токов КЗ в точке К-1.....	56
10.2.2. Расчет токов КЗ в точке К-2.....	56
10.2.3. Расчет токов КЗ в точке К-3.....	57
10.2.4. Расчет токов КЗ в точке К-4.....	58
10.2.5. Расчет токов КЗ за цеховым трансформатором Т3 в точке К-5.....	60
10.3. Расчет параметров срабатывания дифференциальной защиты трансформатора Т1 для микропроцессорного устройства Seram Т87	63
10.4. Расчет параметров срабатывания максимальной токовой защиты стороны ВН трансформатора Т1 для микропроцессорного устройства Seram Т87	67
10.5. МТЗ с пуском по напряжению.....	72
10.6. Расчет параметров срабатывания двухступенчатой токовой защиты КЛ W3 для микропроцессорного устройства БМРЗ-101-Д-КЛ-01	75
10.7. Расчет параметров срабатывания устройства АВР секционного выключателя QВ	77
10.8. Расчет параметров срабатывания защит электродвигателя на терминале Сириус-Д	79
10.8.1. Защита от междуфазных КЗ.....	79
10.8.2. Защита от однофазных замыканий обмотки статора на землю.....	80
10.8.3. Защита от перегрузки	81
10.8.4. Защита минимального напряжения.....	82
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	84
ПРИЛОЖЕНИЕ. Графическая часть проекта	83

Учебное издание

**Надежда Николаевна Малышева
Александр Владимирович Щекочихин**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Учебное пособие

Редактор *Н.В. Титова*
Технический редактор *Н.В. Титова*

Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 06.10.2020
Формат 60×84/8. Бумага для множительных аппаратов
Гарнитура Times. Усл. печ. листов 11,25
Тираж 500 экз. Заказ 2163

*Отпечатано в Нижневарттовском государственном университете
628616, Тюменская область, г. Нижневарттовск, ул. Маршала Жукова, 4
Тел./факс: (3466)24-50-51, e-mail: izdatelstvo@nggu.ru*