

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ»

Кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта»

РАСЧЕТ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО
ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Методические указания к выполнению контрольной работы по дисциплине
«Релейная защита» для студентов дистанционной формы обучения
специальности 23.05.05 СОДП, специализация «Электроснабжение железных
дорог»

Составитель: Загорский В.А.

Самара 2016

УДК 621.316.9

Расчет дифференциальной защиты силового трехобмоточного трансформатора: методические указания к выполнению контрольной работы по дисциплине «Релейная защита» для студентов дистанционной формы обучения по специальности 23.05.05 СОДП, специализация «Электроснабжение железных дорог» [Электронн.] / составитель В.А.Загорский. – Самара: СамГУПС, 2016. – 26 с.

Утверждены на заседании кафедры Электроснабжение железнодорожного транспорта

Печатаются по решению редакционно-издательского совета университета.

В настоящих методических указаниях по дисциплине «Релейная защита» приведены теоретические материалы, методика, иллюстрации и табличные данные, необходимые для выполнения контрольной работы по релейной защите систем электроснабжения железнодорожного транспорта.

Методические указания предназначены для студентов специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» специализации «Электроснабжение железных дорог» дистанционной формы обучения.

Составитель: Загорский Владимир Алексеевич

Рецензент к.т.н., доцент СамГУПС О.В. Табаков

Редактор

Компьютерная верстка

Подписано в печать

Формат

Усл. печ. л.

Тираж

Заказ №

ВВЕДЕНИЕ

Автоматическое устройство, служащее для выявления КЗ и ненормальных режимов работы и формирующее управляющие воздействия на высоковольтные выключатели, называется релейной защитой.

Релейная защита является обязательной частью всех электроэнергетических установок, объектов и систем с напряжением 1кВ и выше.

Современная релейная защита представляет собой сложную систему, состоящую из взаимосвязанных электромагнитных, электронных и микроэлектронных устройств и их источников питания.

Целью контрольной работы является закрепление материал лекционных и практических занятий по релейной защите систем электроснабжения железнодорожного транспорта. Изучить порядок расчета и выполнить самостоятельный выбор по вариантам заданий типа реле дифференциальной защиты силового трехобмоточного трансформатора.

Выполнение контрольной работы способствуют формированию у обучаемых компетенций, предусмотренных программой дисциплины «Релейная защита», а именно знание способов выработки, передачи, распределения и преобразования электрической энергии, закономерности функционирования электрических сетей и энергосистем, теоретические основы электрической тяги, техники высоких напряжений (ПСК-1.6).

В настоящих методических указаниях по дисциплине «Релейная защита» приведены теоретические материалы, методика, иллюстрации и табличные данные, необходимые для выполнения контрольной по релейной защите систем электроснабжения железнодорожного транспорта.

Методические указания предназначены для студентов специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» специализации «Электроснабжение железных дорог» дистанционной формы обучения.

1. УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) и руководящими указаниями по релейной защите на трансформаторах устанавливаются защиты от внутренних повреждений, от внешних коротких замыканий (КЗ) и ненормальных режимов. В связи с этим на понижающих трансформаторах тяговых подстанций переменного тока в обмотках и на наружных выводах трансформатора применяется продольная дифференциальная защита от КЗ. Защита выполняется в трехфазном трехрелейном исполнении и действует без выдержки времени на отключение трансформатора со всех сторон.

Целью контрольной работы является приобретение навыков по расчету релейной защиты элементов системы тягового электроснабжения подвижного состава.

При выполнении контрольной работы необходимо выполнить расчет устройств релейной защиты понижающего трансформатора отпаечной тяговой подстанции переменного тока по вариантам заданий.

Варианты заданий представлены в разделе 3. Выбор вариантов выполняется в соответствии с порядковым номером обучающегося(йся) в учебной группе.

2. РАСЧЕТ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Понижающий трансформатор имеет ряд специфических особенностей, влияющих на выполнение схемы и расчеты уставок продольной дифференциальной защиты. К таким особенностям относятся:

- Наличие броска тока намагничивания трансформатора при включении его под напряжение или при восстановлении напряжения после отключения близкого КЗ;
- неравенство токов по вторичным обмоткам трансформаторов тока;
- наличие углового сдвига вторичных токов ТТ при различных схемах соединения силовых обмоток трансформатора.

Для дифференциальной защиты трансформаторов отечественной промышленностью выпускаются специальные реле типа РНТ и ДЗТ. Для защиты с регулированием напряжения под нагрузкой, которые устанавливаются на тяговых подстанциях переменного тока, применяются в основном реле типа ДЗТ с насыщающимся трансформатором тока (НТТ) и магнитным торможением.

Задачей расчета дифференциальной защиты трансформатора является определение числа витков различных обмоток дифференциальных реле защиты.

Расчет дифференциальной защиты производится с учетом данных вариантов заданий в следующей последовательности:

1. Выполняются расчеты по определению максимальных $I_{KЗ}^{\max}$ и минимальных $I_{KЗ}^{\min}$ токов при трехфазных КЗ на стороне тяговой и районной обмоток. Эти значения токов КЗ необходимы для отстройки защиты от максимальных токов небаланса $I_{НБ}^{\max}$ при внешних КЗ и определения коэффициента чувствительности защиты.

Для определения внешних токов КЗ необходимо составить схему замещения, включающую сопротивление системы X_S и обмоток понижающего трансформатора X_T .

Сопротивления обмоток трехобмоточного трансформатора определяются приближенно при известной номинальной мощности трансформатора по формуле:

$$X_T = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}, \quad (2.1.1)$$

где U_H – номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора;

$U_K \%$ – напряжение к.з. (в%) отдельных обмоток трансформатора.

Определяется по соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} U_{KB} &= 0.5(U_{KB-C} + U_{KB-H} - U_{KC-H}) \\ U_{KC} &= 0.5(U_{KB-C} + U_{KC-H} - U_{KB-H}) \\ U_{KH} &= 0.5(U_{KB-H} + U_{KC-H} - U_{KB-C}) \end{aligned} \right\}, \quad (2.1.2)$$

где $U_{KB} - C$, $U_{KB} - H$, $U_{KC} - H$, - напряжения КЗ между обмотками, которые принимаются по данным трансформатора (таблица 1).

Сопротивление системы определяется для двух режимов её работы – максимальном $X_S^{\max}$ и минимальном $X_S^{\min}$ по формуле:

$$X_S^{\max(\min)} = \frac{U_{cp}^2}{S_k^{\max(\min)}}, \quad (2.1.3)$$

где U_{cp} – среднее значение питающего напряжения системы. Принимается $U_{cp}=115\text{kV}$;

$S_k^{\max}$ и $S_k^{(\min)}$ - мощности КЗ на шинах 110 кВ тяговой подстанции в режимах максимума и минимума. Величины $S_k^{\max}$ и $S_k^{(\min)}$ выбираются по вариантам заданий (раздел 3).

Токи КЗ, приведенные к стороне ВН и протекающие через защищаемый трансформатор при КЗ на стороне среднего и низкого напряжения, в

максимальном и минимальном режимах работы системы определяются по выражению:

$$I_{К.З.}^{\max(\min)} = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot X_{рез}^{\max(\min)}}, \quad (2.1.4)$$

где: U_H – номинальное напряжение первичной обмотки;

$X_{рез}^{\max(\min)}$ – результирующие сопротивление системы и обмоток трансформатора в соответственно максимальном и минимальном режимах работы системы.

Таблица 1. Данные трансформаторов для расчета

Тип изделия,	Номинальная мощность, кВА	Номинальное напряжение обмоток, кВ			Схема и группа соединения обмоток	Потери, кВт		Напряжение короткого замыкания, % ВН; ВС; СН	Ток холостого хода, %	Габаритные размеры, мм длина х ширина х высота	Масса, т, не более	
		ВН	СН	НН		холодного хода	короткого замыкания				масла	полная
1ТДТНЖУ - 40000 /110	40000	11,5	38,5	27,5	Yh/Yh/D - 0-11	39,0	200	18; 10,5; 6,8	0,6	6550 x 4820 x 6300	17,5	72,8
2ТДТНЖ- 40000 /110	40000	11,5	27,5	11,0	Yh/D/D- 11-11	39,0	200	10,5;17,5;6,5	0,6	6432x5055x6010	17,5	72,8
3ТДТНЖ- 40000 /110	40000	11,5	27,5	6,0	Yh/D/D- 11-11	39,0	200	10,5;17,5;6,5	0,6	5543x2400x4420	17,5	72,8
1ТДТНЖ- 25000/110	25000	11,5	27,5	11,0	Yh/D/D- 11-11	28,5	140	10,5;17,5;6,5	0,7	6578x4752x5581	13,22	55
2ТДТНЖ- 25000/110	25000	11,5	27,5	6,0	Yh/D/D- 11-11	28,5	140	10,5;17,5;6,5	0,7	5350x2340x400	13,22	55

Примечание. Цифра в первом столбце таблицы 1 (1,2 или 3) перед обозначением типа трансформатора поставлена для удобства выбора данных для расчета по вариантам заданий в разделе 3).

Для дальнейших расчётов выбирается наибольшее из двух максимальных токов К.З. и наименьшее из двух минимальных токов КЗ.

2. Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого трансформатора, выбирают номинальные коэффициенты трансформации трансформаторов тока (ТТ), вычисляют токи в плечах защиты. Результаты расчета сводятся в таблицу 2.

При этом, в целях повышения надежности дифференциальной защиты и уменьшения полных погрешностей ТТ, рекомендуется применять несколько

завышенные против расчетного значения коэффициентов трансформации ($K_{ТТ}$). Для упрощения расчетов рекомендуется выбор ТТ таким образом, чтобы ток в плече высшего напряжения был наибольшим (основное плечо). Для компенсации углового сдвига токов ТТ, со стороны звезды обмоток понижающего трансформатора ТТ соединяются в треугольник, а со стороны треугольника ТТ в звезду.

Таблица 2. Расчет токов в плечах защиты

Наименование величины	Числовые значения для стороны		
	ВН	СН	НН
Первичные номинальные токи трансформатора, А			
Коэффициенты трансформации ТТ ($K_{ТТ}$)			
Схемы соединения Т., (коэффициент схемы $K_{СХ}$)			
Вторичные номинальные токи в плечах защиты, А			

Примечание. Трансформатор тока (ТТ) и его коэффициент трансформации ($K_{ТТ}$) выбираются исходя из величины первичного номинального тока. В качестве номинального первичного тока ТТ выбирается ближайшее большее целое число. Например, при токе 201,055 А выбирается трансформатор тока с первичным током 300 А. Для выбора нужного трансформатора тока используется стандартный ряд номинальных значений первичных токов, выпускаемых промышленностью ТТ:

1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 80, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 10000, 12000, 14000, 16000, 18000, 20000, 25000, 28000, 32000, 35000, 40000 (А).

3. Производится расчет для выбора типа реле дифференциальной защиты. Сначала определяется возможность применения реле типа РНТ. Для этого выбирается первичный ток срабатывания защиты $I_{СЗ}$, приведенный к стороне высшего напряжения трансформатора.

Первым условием выбора $I_{СЗ}$ является отстройка от броска тока намагничивания:

$$I_{СЗ} \geq K_{ОТС} \cdot I_{Н(ВН)}, \quad (2.1.5)$$

где: $I_{Н(ВН)}$ - номинальный ток со стороны ВН трансформатора;

$K_{\text{ОТС}}$ - коэффициент отстройки защиты от бросков тока намагничивания. Для реле типа РНТ $K_{\text{ОТС}} = 1,3$; для реле типа ДЗТ $K_{\text{ОТС}} = 1,5$.

Вторым условием выбора $I_{\text{СЗ}}$ является отстройка от тока небаланса $I_{\text{НБ}}$ при внешних КЗ.:

$$I_{\text{СЗ}} \geq K_3 \cdot I_{\text{НБ}}, \quad (2.1.6)$$

где: K_3 - коэффициент запаса. Для реле типа РНТ $K_3=1,3$ (для ДЗТ – 1,5); $I_{\text{НБ}}$ - ток небаланса. Определяется по выражению:

$$I_{\text{НБ}} = (K_{\text{апер}} \cdot K_{\text{одн}} \cdot \xi + \Delta U_{\text{РЕГ}} + \Delta f_{\text{ВЫР}}) \cdot I_{\text{КЗ}}^{\text{max}}, \quad (2.1.7)$$

где: $K_{\text{апер}}$ - коэффициент, учитывающий переходный режим токов КЗ.

Для реле РНТ и ДЗТ $K_{\text{апер}} = 1$;

$K_{\text{одн}}$ - коэффициент однотипности ТТ. При одном выключателе на всех сторонах трансформатора $K_{\text{одн}} = 1$;

$\varepsilon = 0,1$ - допустимая относительная погрешность ТТ. Выбирается по вариантам заданий (раздел 3).

$\Delta U_{\text{РЕГ}}$ - относительная погрешность, обусловленная регулированием напряжения. Для трансформатора ТДН $\Delta U_{\text{РЕГ}} = 0,16$.

$\Delta f_{\text{выр}}$ - относительная погрешность от неточного выравнивания токов плеч защиты вследствие невозможности точной установки на реле расчетного числа витков. Так как число витков пока еще неизвестно, то принимается $\Delta f_{\text{выр}} = 0$.

$I_{\text{КЗ}}^{\text{max}}$ - максимальное значение тока КЗ (на стороне ВН трансформатора) при КЗ на стороне СН или НН.

Наибольшее из двух значений $I_{\text{СЗ}}$, найденных по выражениям (2.1.5) и (2.1.6), принимается за ток срабатывания реле.

По выбранному току срабатывания определяется коэффициент чувствительности дифференциальной защиты с реле типа РНТ:

$$K_{\text{Ч}} = \frac{I_{\text{КЗ}}^{\text{min}(2)}}{I_{\text{СЗ}}} \quad (2.1.8)$$

где: $I_{\text{КЗ}}^{\text{min}(2)}$ - значение минимального тока двухфазного КЗ, приведенного к стороне ВН трансформатора. Определяется по выражению:

$$I_{\text{КЗ}}^{\text{min}(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{КЗ}}^{\text{min}} \quad (2.1.9)$$

где: $I_{\text{КЗ}}^{\text{min}}$ - наименьшее значение минимального тока КЗ, найденного по выражению (2.1.4).

При $K_{\text{ч}} < 2$ дифференциальную защиту с реле типа РНТ, т.е. без торможения, выполнить нельзя. В этом случае следует применить реле типа ДЗТ, например, ДЗТ-11 с одной тормозной обмоткой.

4. Производится выбор уставок реле типа ДЗТ (уставки реле типа РНТ выбираются аналогично, только без расчета тормозной обмотки). В трехобмоточных трансформаторах лучшим вариантом является включение тормозной обмотки на сумму токов плеч защиты питаемых сторон (рисунок 1).

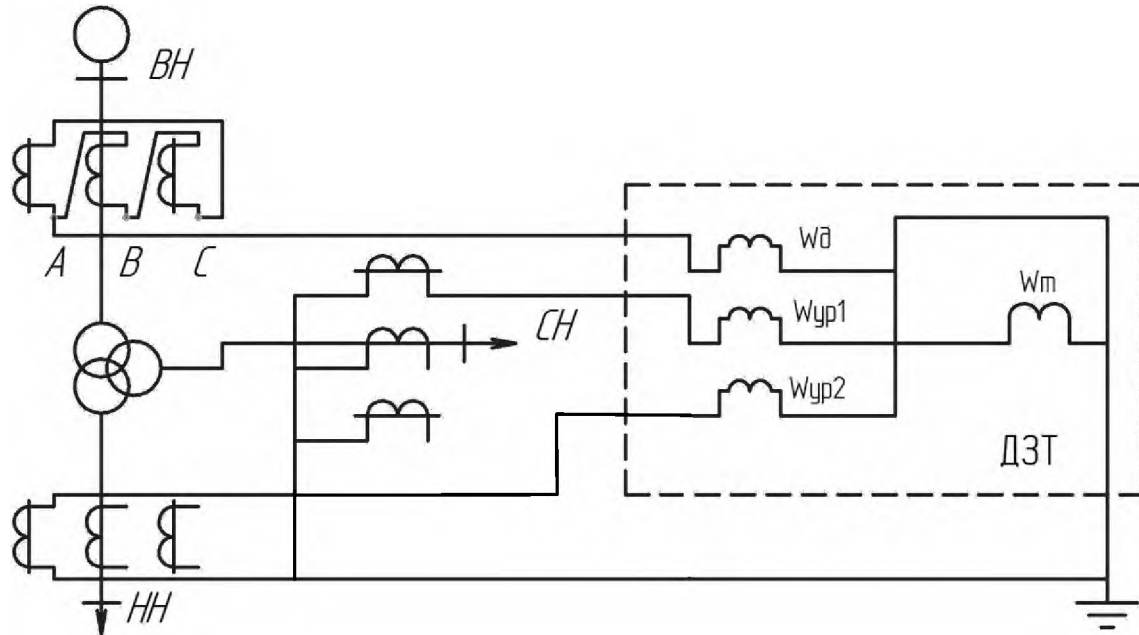


Рисунок 1 – Схема дифференциальной защиты фазы В трехобмоточного трансформатора при помощи реле серии ДЗТ

При таком включении тормозной обмотки ток срабатывания защиты минимальный и выбирается только по условию (2.1.5) при $K_{\text{отс}} = 1,5$. Кроме того, в этой схеме исключается влияние тормозной обмотки реле при КЗ, в зоне действия защиты.

По найденному $I_{\text{сз}}$ находится вторичный ток срабатывания реле $I_{\text{ср}}$:

$$I_{\text{ср}} = (I_{\text{сз}} \cdot K_{\text{сх}}) / K_{\text{тт}}. \quad (2.1.10)$$

Определяется число витков обмоток реле ДЗТ-11 (рисунок 2):

1. Число витков дифференциальной (рабочей) обмотки определяется по выражению:

$$W_{\text{д}} = \frac{F_{\text{ср}}}{I_{\text{ср}}}, \quad (2.1.11)$$

где: $F_{\text{ср}}$ - магнитодвижущая (намагничивающая) сила, необходимая для срабатывания реле. Для ДЗТ-11 $F_{\text{ср}} = 100 \text{ А} \cdot \text{вит}$. Исходя из расчетного значения $W_{\text{д}}$, принимается ближайшее целое число витков дифференциальной обмотки (рисунок 2).

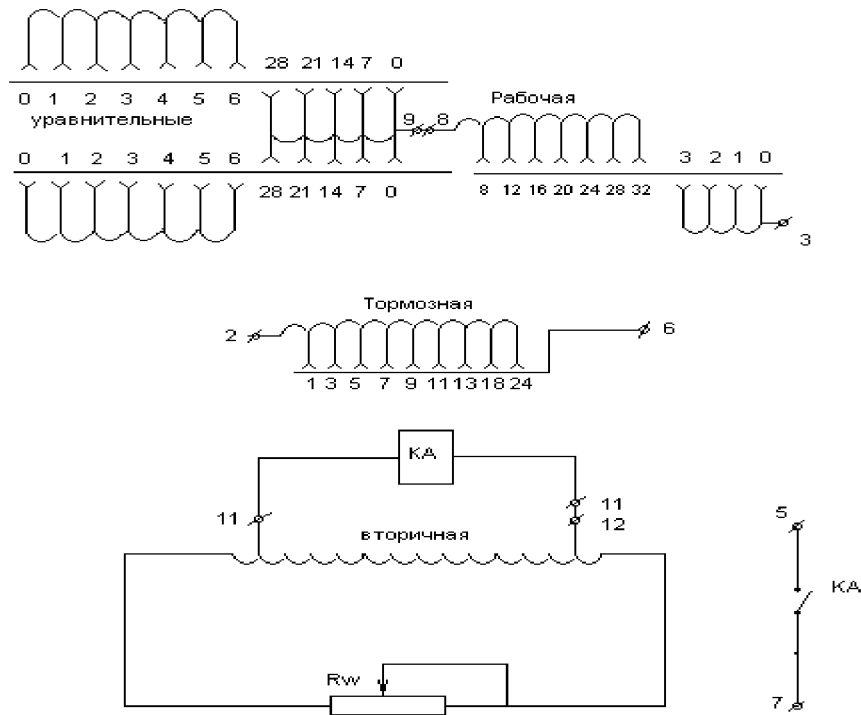


Рисунок 2 – Схема включения обмоток и коммутационного аппарата КА реле серии ДЗТ

2. Расчетное число витков уравнительных обмоток $W_{ур1}$ определяется из условия равновесия намагничивающих сил в реле, создаваемых номинальными токами в дифференциальной и уравнительных обмотках:

$$I_{2(ВН)} \cdot W_d = I_{2(СН)} \cdot W_{ур1} = I_{2(НН)} \cdot W_{ур2}, \quad (2.1.12)$$

где: $I_{2(ВН)}$, $I_{2(СН)}$, $I_{2(НН)}$ - вторичные токи в плечах защиты по сторонам ВН, СН и НН.

Из выражения (2.1.12) сначала находится число витков $W_{ур2}$. Для установки на реле принимается ближайшее большее целое число витков первой уравнительной обмотки, а затем аналогично определяется число витков на второй уравнительной обмотке (рисунок 2);

3) число витков тормозной обмотки W_T выбирается с учетом схемы ее включения, исходя, из условия надежного несрабатывания защиты при внешних К.З. на стороне СН или НН трансформатора, по формуле:

$$W_{BT} = \frac{K_3 \cdot I_{НБ}^{\max} \cdot W_d}{I_{КЗ}^{\max} \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (2.1.13)$$

где: K_3 - коэффициент запаса, $K_3=1,5$; W_d - расчетное число витков дифференциальной обмотки; $I_{НБ}^{\max}$ - максимальный ток небаланса при трехфазном К.З. на одной из сторон (СН или НН) трансформатора. Определяется из выражения (2.1.7) с учетом $\Delta f_{выр}$. Погрешность $\Delta f_{выр}$ определяется для сторон СН и НН трансформатора по выражению:

$$\Delta f_{\text{выр}} = \frac{(W_{\text{ур}}^{\text{уст}} - W_{\text{ур}}^{\text{расч}})}{W_{\text{ур}}^{\text{уст}}}, \quad (2.1.14)$$

где: $W_{\text{ур}}^{\text{уст}}$, $W_{\text{ур}}^{\text{расч}}$ – расчетное и принятое к установке на реле число витков уравнительных обмоток.

В формулу (2.1.13) подставляется наибольшее из двух полученных значений $I_{\text{нб}}^{\text{max}}$.

$I_{\text{кз}}^{\text{max}}$ – максимальное значение внешнего тока КЗ на одной из сторон СН или НН трансформатора. В формулу (2.1.13) подставляется значение, соответствующее КЗ на той стороне трансформатора, для которой берется $I_{\text{нб}}^{\text{max}}$.

Для реле ДЗТ-11 выбираем $\text{tg}\alpha = 0,8$, что соответствует минимальному торможению по заводской характеристике.

3. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Вариант 1. Трансформатор 1ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_{\text{k}}^{\text{max}} = 760$ кВА; $S_{\text{k}}^{\text{min}} = 510$ кВА; $\varepsilon = 0,1$.

Вариант 2. Трансформатор 1ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_{\text{k}}^{\text{max}} = 740$ кВА; $S_{\text{k}}^{\text{min}} = 490$ кВА; $\varepsilon = 0,09$.

Вариант 3. Трансформатор 1ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_{\text{k}}^{\text{max}} = 720$ кВА; $S_{\text{k}}^{\text{min}} = 470$ кВА; $\varepsilon = 0,08$.

Вариант 4. Трансформатор 1ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_{\text{k}}^{\text{max}} = 700$ кВА; $S_{\text{k}}^{\text{min}} = 450$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 5. Трансформатор 1ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_{\text{k}}^{\text{max}} = 680$ кВА; $S_{\text{k}}^{\text{min}} = 430$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 6. Трансформатор 1ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_{\text{k}}^{\text{max}} = 660$ кВА; $S_{\text{k}}^{\text{min}} = 410$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 7. Трансформатор 1ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_{\text{k}}^{\text{max}} = 640$ кВА; $S_{\text{k}}^{\text{min}} = 400$ кВА; $\varepsilon = 0,06$.

Вариант 8. Трансформатор 1ТДТНЖ-25000/110, $S_{\text{k}}^{\text{max}} = 760$ кВА; $S_{\text{k}}^{\text{min}} = 510$ кВА; $\varepsilon = 0,1$.

Вариант 9. Трансформатор 1ТДТНЖ-25000/110, $S_{\text{k}}^{\text{max}} = 740$ кВА; $S_{\text{k}}^{\text{min}} = 490$ кВА; $\varepsilon = 0,09$.

Вариант 10. Трансформатор 1ТДТНЖ-25000/110, $S_k^{\max} = 720$ кВА; $S_k^{\min} = 470$ кВА; $\varepsilon = 0,08$.

Вариант 11. Трансформатор 1ТДТНЖ-25000/110, $S_k^{\max} = 700$ кВА; $S_k^{\min} = 450$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 12. Трансформатор 1ТДТНЖ-25000/110, $S_k^{\max} = 680$ кВА; $S_k^{\min} = 430$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 13. Трансформатор 1ТДТНЖ-25000/110, $S_k^{\max} = 660$ кВА; $S_k^{\min} = 410$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 14. Трансформатор 1ТДТНЖ-25000/110, $S_k^{\max} = 640$ кВА; $S_k^{\min} = 400$ кВА; $\varepsilon = 0,06$.

Вариант 15. Трансформатор 2ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 760$ кВА; $S_k^{\min} = 510$ кВА; $\varepsilon = 0,1$.

Вариант 16. Трансформатор 2ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 740$ кВА; $S_k^{\min} = 490$ кВА; $\varepsilon = 0,09$.

Вариант 17. Трансформатор 2ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 720$ кВА; $S_k^{\min} = 470$ кВА; $\varepsilon = 0,08$.

Вариант 18. Трансформатор 2ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 700$ кВА; $S_k^{\min} = 450$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 19. Трансформатор 2ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 680$ кВА; $S_k^{\min} = 430$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 20. Трансформатор 2ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 660$ кВА; $S_k^{\min} = 410$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 21. Трансформатор 2ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 640$ кВА; $S_k^{\min} = 400$ кВА; $\varepsilon = 0,06$.

Вариант 22. Трансформатор 2ТДТНЖ-25000/110, $S_k^{\max} = 760$ кВА; $S_k^{\min} = 510$ кВА; $\varepsilon = 0,1$.

Вариант 23. Трансформатор 2ТДТНЖ-25000/110, $S_k^{\max} = 740$ кВА; $S_k^{\min} = 490$ кВА; $\varepsilon = 0,09$.

Вариант 24. Трансформатор 2ТДТНЖ-25000/110, $S_k^{\max} = 720$ кВА; $S_k^{\min} = 470$ кВА; $\varepsilon = 0,08$.

Вариант 25. Трансформатор 2ТДТНЖ-25000/110, $S_k^{\max} = 700$ кВА; $S_k^{\min} = 450$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 26. Трансформатор 2ТДТНЖ-25000/110, $S_k^{\max} = 680$ кВА; $S_k^{\min} = 430$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 27. Трансформатор 2ТДТНЖ-25000/110, $S_k^{\max} = 660$ кВА; $S_k^{\min} = 410$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 28. Трансформатор 2ТДТНЖ-25000/110, $S_k^{\max} = 640$ кВА; $S_k^{\min} = 400$ кВА; $\varepsilon = 0,06$.

Вариант 29. Трансформатор 3ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 760$ кВА; $S_k^{\min} = 510$ кВА; $\varepsilon = 0,1$.

Вариант 30. Трансформатор 3ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 740$ кВА; $S_k^{\min} = 490$ кВА; $\varepsilon = 0,09$.

Вариант 31. Трансформатор 3ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 720$ кВА; $S_k^{\min} = 470$ кВА; $\varepsilon = 0,08$.

Вариант 32. Трансформатор 3ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 700$ кВА; $S_k^{\min} = 450$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 33. Трансформатор 3ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 680$ кВА; $S_k^{\min} = 430$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 34. Трансформатор 3ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 660$ кВА; $S_k^{\min} = 410$ кВА; $\varepsilon = 0,07$.

Вариант 35. Трансформатор 3ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_k^{\max} = 640$ кВА; $S_k^{\min} = 400$ кВА; $\varepsilon = 0,06$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фигурнов Е.П. Релейная защита: Учебник. В 2 ч. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Указания по расчету дифференциальной защиты силового трехобмоточного трансформатора	4
2. Расчет дифференциальной защиты силового трехобмоточного трансформатора	4
3. Варианты заданий	11
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	13
Приложение 1. Пример расчета дифференциальной защиты силового трехобмоточного трансформатора	14

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Вариант А.

Трансформатор 1ТДТНЖУ- 40000 /110, $S_{kmax} = 750$ кВа; $S_{kmin} = 500$ кВа; $\varepsilon = 0,1$.

1. По варианту задания составим таблицу исходных данных для расчета (таблица 1).

Таблица 1 - Исходные данные для расчета по варианту задания

Тип, мощность, напряжение обмоток трансформатора по высокой, средней и низкой стороне	1ТДТНЖ 40000/110 115/38,5/27,5
Мощность КЗ на шинах 110 кВ подстанции, кВА: S_k^{max} S_k^{min}	750 500
Допускаемая относительная погрешность ТТ, ε	0,1

2. Расчет максимальных и минимальных токов при трехфазных коротких замыканиях на сторонах среднего и низкого напряжения

2.1. Определим сопротивления обмоток трансформатора по высокой, средней и низкой сторонам

Сопротивления обмоток трехобмоточного трансформатора X_T определяются приближенно при известной номинальной мощности трансформатора по формуле:

$$X_T = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \quad (1)$$

где U_H - номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора; $U_K \%$ - напряжения короткого замыкания в % для отдельных обмоток трансформатора.

Величины $U_K \%$ по высокой, средней и низкой сторонам трансформатора определяются по соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} U_{KB} &= 0.5 \cdot (U_{KB-C} + U_{KB-H} - U_{KC-H}) \\ U_{KC} &= 0.5 \cdot (U_{KB-C} + U_{KC-H} - U_{KB-H}) \\ U_{KH} &= 0.5 \cdot (U_{KB-H} + U_{KC-H} - U_{KB-C}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $U_{KB-C}, U_{KB-H}, U_{KC-H}$ - напряжения при коротком замыкании соответственно между обмотками высокой и средней сторон, высокой и низкой сторон, средней и низкой сторон:

$$U_{KB} = 0.5 \cdot (10,5 + 18 - 6,8) = 10.85 \%$$

$$U_{KC} = 0.5 \cdot (10,5 + 6,8 - 18) = 0,35 \%$$

$$U_{KH} = 0.5 \cdot (18 + 6,8 - 10,5) = 7,15 \%$$

Значения величин $U_{KB-C}, U_{KB-H}, U_{KC-H}$ выбираем из таблицы данных трансформатора (таблица 1 раздел 1).

$$X_{TB} = \frac{10,85}{100} \cdot \frac{110^2}{40} = 32,82 \text{ Ом.}$$

$$X_{TC} = \frac{0,35}{100} \cdot \frac{110^2}{40} = 1,059 \text{ Ом.}$$

$$X_{TH} = \frac{7,15}{100} \cdot \frac{110^2}{40} = 21,63 \text{ Ом.}$$

2.2. Определим токи КЗ, протекающие через защищаемый трансформатор при КЗ на стороне среднего, низшего напряжения. В max и min режиме работы.

$$I_{K.3.}^{\max(\min)} = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot X_{рез}^{\max(\min)}}, \quad (3)$$

где U_H - номинальное напряжение обмотки высшего напряжения; $X_{рез}^{\max(\min)}$ - результирующее сопротивление системы и обмоток трансформатора соответственно на максимальном и минимальном режимах работы.

$$X_{рез}^{\max} = \frac{U_{cp}^2}{S_K^{\max}} = \frac{115^2}{750} = 17,63 \text{ Ом.}$$

$$X_{рез}^{\min} = \frac{U_{cp}^2}{S_K^{\min}} = \frac{115^2}{500} = 26,45 \text{ Ом.}$$

На средней стороне:

$$X_{резC}^{\max} = X_{рез}^{\max} + X_{TB} + X_{TC} = 17,63 + 32,82 + 1,059 = 51,5 \text{ Ом.}$$

$$I_{K.3.C}^{\max} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 51,5} = 1290,8 \text{ А.}$$

$$X_{резC}^{\min} = X_{рез}^{\min} + X_{TB} + X_{TC} = 26,45 + 32,82 + 1,059 = 60,33 \text{ Ом.}$$

Примечание. Если какое-либо из сопротивлений X_{TB} или X_{TC} будет меньше 0, то при определении величин $X_{резC}^{\max}$ и $X_{резC}^{\min}$ это сопротивление подставляется со знаком +.

$$I_{K.3.C}^{\min} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 60,33} = 1101,85 \text{ А.}$$

На низкой стороне

$$X_{резH}^{\max} = X_{рез}^{\max} + X_{TB} + X_{TH} = 17,63 + 32,82 + 21,63 = 72,08 \text{ Ом.}$$

$$I_{K.3.H}^{\max} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 72,08} = 922,2 \text{ А.}$$

$$X_{резH}^{\min} = X_{рез}^{\min} + X_{TB} + X_{TH} = 26,45 + 32,82 + 21,63 = 80,9 \text{ Ом.}$$

Примечание. Если какое-либо из сопротивлений X_{TB} , X_{TC} или X_{TH} будет меньше 0, то при определении величин $X_{резH}^{\max}$ и $X_{резH}^{\min}$ это сопротивление подставляется со знаком +.

$$I_{K.3.c}^{\max} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 80,9} = 821,72 \text{ A.}$$

Принимаем наибольшие значения из полученных в расчете токов $I_{K3}^{\max}$ и $I_{K3}^{\min}$:

$$I_{K3}^{\max} = 1290,8 \text{ A}; I_{K3}^{\min} = 921,72 \text{ A. } I_{K.3.}^{\max} = 1290,8 \text{ A, } I_{K.3.}^{\min} = 821,72 \text{ A.}$$

3. Расчет токов в плечах защиты

3.1. Определим первичные токи для всех сторон защищаемого трансформатора

$$I_{H_{1B}} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 201,055 \text{ A.}$$

$$I_{H_{1C}} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 38,5} = 600,55 \text{ A.}$$

$$I_{H_{1H}} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 27,5} = 840,86 \text{ A.}$$

3.2. Выберем номинальные коэффициенты трансформации трансформаторов тока (ТТ) и вычислим токи в плечах защиты:

$$I_{H_2} = I_{H1} \cdot \frac{K_{CX}}{K_{TT}} \quad (4)$$

$$I_{H_{2B}} = 201,055 \cdot \frac{\sqrt{3}}{60} = 5,803 \text{ A.}$$

$$I_{H_{2C}} = 600,55 \cdot \frac{\sqrt{3}}{160} = 6,501 \text{ A.}$$

$$I_{H_{2H}} = 840,86 \cdot \frac{1}{200} = 4,2 \text{ A.}$$

Результаты расчетов сведем в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты расчета токов в плечах защиты

Наименование величины	Числовые значения		
	ВН	СН	НН
Первичные номинальные токи, А	201,055	600,55	840,86
Коэффициент трансформации, K_{TT}	$\frac{300}{5} = 60$	$\frac{800}{5} = 160$	$\frac{1000}{5} = 200$
Коэффициент схемы K_{CX}	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	1
Вторичные номинальные токи, А	5,803	6,501	4,2

Примечание. Трансформатор тока (ТТ) и его коэффициент трансформации (КТТ) выбираются исходя из величины первичного номинального тока. В качестве номинального первичного тока ТТ выбирается ближайшее большее целое число. Например, при токе 201,055 А выбирается трансформатор тока с первичным током 300 А. Для выбора

нужного трансформатора тока используется стандартный ряд номинальных значений первичных токов, выпускаемых промышленностью ТТ:

1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 80, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 10000, 12000, 14000, 16000, 18000, 20000, 25000, 28000, 32000, 35000, 40000 (А).

4. Выбора типа реле дифференциальной защиты

Первоначально определяется возможность применения реле типа РНТ. Для этого выбирается первичный ток срабатывания защиты $I_{CЗ}$, приведенный к стороне высшего напряжения трансформатора

Первым условием выбора $I_{CЗ}$ является отстройка от броска тока намагничивания:

$$а) I_{CЗ} \geq K_{отс} \cdot I_{H(BH)},$$

где $I_{H(BH)}$ - номинальный ток со стороны ВН трансформатора; $K_{отс}$ - коэффициент отстройки защиты от бросков тока намагничивания.

Для реле типа РНТ выбираем $K_{отс} = 1,3$ (для, ДЗТ = 1,5).

Вторым условием выбора $I_{CЗ}$ является отстройка от тока небаланса $I_{НБ}$ при внешних К.З.

$$б) I_{CЗ} \geq K_3 \cdot I_{НБ};$$

где K_3 - коэффициент запаса. Для реле типа РНТ $K_3 = 1,3$ (для ДЗТ = 1,5); $I_{НБ}$ - ток небаланса, определяемый по выражению:

$$I_{НБ} = (K_{анер} \cdot K_{одн} \cdot \xi + \Delta U_{РЕГ} + \Delta f_{ВЫР}) \cdot I_{КЗ}^{\max} \quad (5)$$

где $K_{анер}$ - коэффициент, учитывающий переходный режим токов К.З. Для реле с РНТ выбираем $K_{анер} = 1$;

$K_{одн}$ - коэффициент однотипности Т.Т. При одном выключателе на всех сторонах трансформатора $K_{одн} = 1$;

ξ - допускаемая относительная погрешность Т.Т. ($\xi = 0,1$);

$\Delta U_{РЕГ}$ - относительная погрешность, обусловленная регулированием напряжения. Для трансформатора ТДНЖ $\Delta U_{РЕГ} = 0,16$;

$\Delta f_{ВЫР}$ - относительная погрешность от неточного выравнивания токов плеч защиты вследствие невозможности точной установки на реле расчетного числа витков. Так как число витков пока еще неизвестно, то принимается $\Delta f_{ВЫР} = 0$;

$I_{КЗ}^{\max}$ - максимальное значение тока К.З. (на стороне ВН трансформатора) при К.З. на стороне СН или НН.

Наибольшее из двух найденных значений принимается за ток срабатывания.

$$I_{НБ} = (1 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,16 + 0) \cdot 1290,8 = 335,6 \text{ А};$$

$$а) I_{C3} \geq K_{OTC} \cdot I_{H(BH)} = 1.3 \cdot 201,055 = 261,371 \text{ A};$$

$$б) I_{C3} \geq K_3 \cdot I_{HB} = 1.3 \cdot 335,6 = 436,28 \text{ A};$$

Принимаем $I_{C3} = 436,28 \text{ A}$.

По выбранному току срабатывания определяется коэффициент чувствительности дифференциальной защиты с реле типа РНТ:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{K3}^{\min(2)}}{I_{C3}}; \quad (6)$$

где $I_{K3}^{\min(2)}$ - значение минимального тока двухфазного КЗ, приведенного к стороне ВН трансформатора, определяемый по выражению:

$$I_{K3}^{\min(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K3}^{\min}; \quad (7)$$

$$I_{K3}^{\min(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 821,72 = 710,78 \text{ A}.$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{710,78}{436,28} = 1.63$$

Так как при $K_{\text{ч}} = 1.63 < 2$, дифференциальную защиту с реле типа РНТ, т.е. без торможения, выполнить нельзя. В этом случае следует применить реле типа ДЗТ.

5. Выбор уставок и определение числа витков обмоток реле типа ДЗТ

5.1. Выбор уставок реле типа ДЗТ (уставки реле типа РНТ выбираются аналогично, только без расчета тормозной обмотки)

$$I_{C3} \geq K_{OTC} \cdot I_{H(BH)}$$

$$I_{C3} \geq 1.5 \cdot 201,055 = 301,582 \text{ A};$$

Найдем вторичный ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = \frac{I_{CP}}{K_T} \cdot K_{CX} \quad (8)$$

$$I_{CP} = \frac{301,582}{60} \cdot \sqrt{3} = 8.695 \text{ A};$$

Выбираем реле типа РТ 40/10.

5.2. Определим число витков обмоток реле ДЗТ:

а) Число витков дифференциальной (рабочей) обмотки W_d определяется по выражению:

$$W_d = \frac{F_{CP}}{I_{CP}} \quad (9)$$

где F_{CP} - магнитодвижущая (намагничивающая) сила, необходимая для срабатывания реле. Для ДЗТ-11 $F_{CP} = 100 \text{ A} \cdot \text{Вит}$.

$$W_d = \frac{100}{8,695} = 11,500$$

Исходя из расчетного значения, принимаем ближайшее целое число витков дифференциальной обмотки $W_{\partial} = 12$.

б) Расчетное число витков уравнильных обмоток W_{yp} определяется из условия равновесия намагничивающих сил в реле, создаваемых номинальными токами в дифференциальной и уравнильных обмотках.

$$I_{2(BH)} \cdot W_{\partial} = I_{2(CH)} \cdot W_{yp1} = I_{2(HH)} \cdot W_{yp2} \quad (10)$$

где $I_{2(BH)}, I_{2(CH)}, I_{2(HH)}$ - вторичные токи в плечах защиты

$$W_{yp1} = \frac{I_{2(BH)} \cdot W_{\partial}}{I_{2(CH)}}$$

$$W_{yp} = \frac{5.83 \cdot 12}{6.501} = 10.711 \text{ витков.}$$

Принимаем 11 витков.

$$W_{yp1} = \frac{I_{2(BH)} \cdot W_{\partial}}{I_{2(HH)}}$$

$$W_{yp} = \frac{5.803 \cdot 12}{4.2} = 16.58 \text{ витков.}$$

Принимаем 17 витков.

в) Число витков тормозной обмотки выбирается с учетом схемы ее включения, исходя из условия надежного несрабатывания защиты при внешних К.З. на стороне СН или НН трансформатора, по формуле:

$$W_{BT} = \frac{K_3 \cdot I_{HB}^{\max} \cdot W_{\partial}}{I_{K3}^{\max} \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (11)$$

где K_3 - коэффициент запаса, $K_3 = 1.5$;

W_{∂} - расчетное число витков дифференциальной обмотки;

$I_{HB}^{\max}$ - максимальный ток небаланса при трехфазном К.З. на одной из сторон (СН или НН) трансформатора.

$\operatorname{tg} \alpha = 0.8$ - для реле ДЗТ-11 (соответствует минимальному торможению по заводской характеристике).

$$W_{BT} \geq \frac{1.5 \cdot 386.104 \cdot 12}{1290.8 \cdot 0.8} = 6.731 \text{ витков.}$$

$$\Delta f_{\text{вып}} = \frac{(W_{yp}^{\text{уст}} - W_{yp}^{\text{расч}})}{W_{yp}^{\text{уст}}}, \quad (12)$$

где $W_{yp}^{\text{уст}}, W_{yp}^{\text{расч}}$ - расчетное и принятое к установке на реле число витков уравнильных обмоток.

$$I_{HB1} = (1 \cdot 1 \cdot 0.1 + 0.16 + \frac{11 - 10.711}{8}) \cdot 1290.8 = 369 \text{ А;}$$

$$I_{HB2} = (1 \cdot 1 \cdot 0.1 + 0.16 + \frac{17 - 16.58}{17}) \cdot 1290.8 = 386 \text{ А;}$$

Принимаем $I_{HB} = 386 \text{ А}$, $W_{BT} = 7$ витков.

ВЫВОД. Для дифференциальной защиты трансформатора ТДТНЖ 40000/110 115/38,5/27,5 применяются реле типа ДЗТ в которых в качестве коммутационного аппарата используются реле тока РТ-40/10. Реле типа ДЗТ имеет рабочую дифференциальную обмотку, уравнительную обмотку и тормозную обмотку.