

Практическое занятие № 1

ВЫБОР ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ДЛЯ СХЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Цель работы: получить навыки расчета и выбора трансформаторов тока.

Пример выполнения

ВЫБОР ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

1. УСЛОВИЕ ЗАДАЧИ

На линии АБ (рис. 1, а) напряжением 110 кВ установлена трехступенчатая токовая защита, включенная на токи фаз, и двухступенчатая токовая защита нулевой последовательности (рис. 1, б). Защиты выполнены на электромагнитных реле. Токи срабатывания всех ступеней защит ($I_{СЗ}$) известны и приведены в табл. 2.1. На линии установлены выключатели типа ВГТ-110-40/300. Максимальный рабочий ток ($I_{раб\ max}$), протекающий по линии, равен 205А. Максимальные токи при трехфазном ($I_{К1\ max}^{(3)}$) и однофазном ($I_{К1\ max}^{(1)}$) КЗ вблизи места установки трансформаторов тока (ТТ) соответственно равны 14 и 12 кА. Длина контрольного кабеля от релейного щита до ТТ равна 100 м.

2. РЕШЕНИЕ

Так как выключатель не имеет встроенных ТТ, устанавливаем выносные ТТ типа ТФМ-110 с номинальным первичным током ($I_{1\ ном}$) 300 А ($I_{1\ ном} \geq I_{раб\ max}$). При этом коэффициент трансформации ТТ $K_I = 300/5$.

В соответствии с ПУЭ [1] все ТТ, предназначенные для питания токовых цепей устройств релейной защиты от КЗ, должны удовлетворять трем основным требованиям:

- 1) должна обеспечиваться точная работа ТТ и измерительных органов (ИО) защиты при КЗ в конце зоны ее действия;
- 2) должна обеспечиваться надежная работа ИО при близких КЗ;
- 3) при близких КЗ на вторичных обмотках ТТ не должны появляться недопустимые перенапряжения.

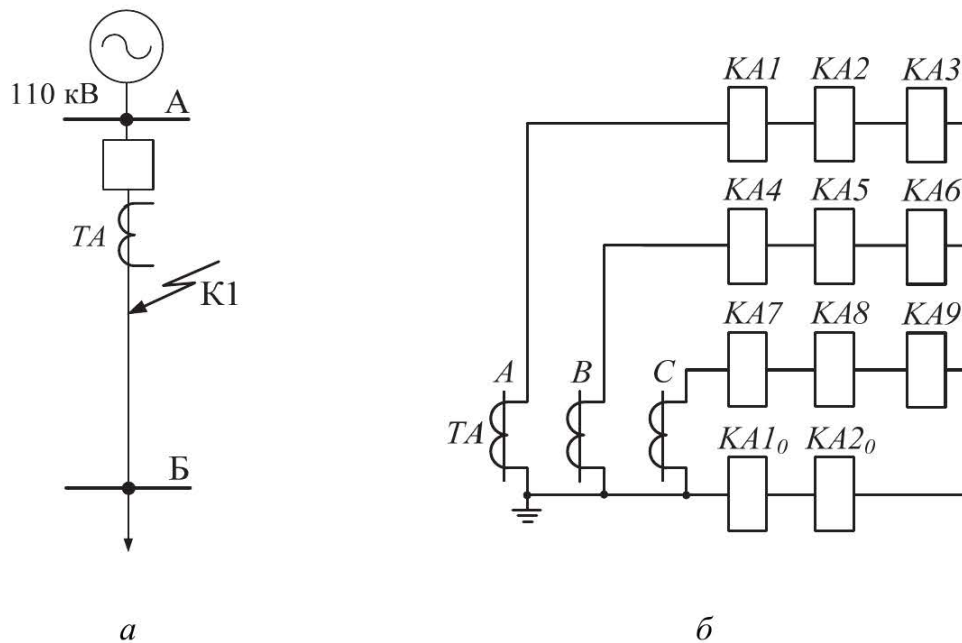


Рис. 1. Схема сети (а) и токовые цепи защиты (б)

2.1. ВЫБОР ТТ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЕМ ИХ ТОЧНОЙ РАБОТЫ

Для оценки точной работы ТТ при КЗ в расчетной точке используются кривые предельной кратности токов. Первое требование считается выполненным, если полная погрешность (ε) не превышает 10%. Однако для этого необходимо, чтобы было выполнено условие

$$z_{\text{нагр.расч}}^{(m)} \leq z_{\text{нагр.доп}}, \quad (1)$$

где $z_{\text{нагр.доп}}$ – допустимая нагрузка ТТ, найденная по кривой предельной кратности для данного типа ТТ, при которой его полная погрешность не превышает 10%; $z_{\text{нагр.расч}}^{(m)}$ – расчетная нагрузка ТТ при расчетном виде КЗ (m).

Расчетная нагрузка при трехфазном и однофазном КЗ определяется следующим образом:

$$z_{\text{нагр.расч}}^{(3)} = z_{\text{пр}} + z_{\text{кон}} + \Sigma z_{\text{р.ф}}; \quad (2)$$

$$z_{\text{нагр.расч}}^{(1)} = 2z_{\text{пр}} + z_{\text{кон}} + \Sigma z_{\text{р.ф}} + \Sigma z_{\text{р.0}}, \quad (3)$$

где $z_{\text{пр}}$ – сопротивление провода (контрольного кабеля), Ом; $\Sigma z_{\text{р.ф}}$ – суммарное сопротивление реле, включенных на ток фазы; $\Sigma z_{\text{р.0}}$ – суммарное сопротивление реле, включенных в нулевой провод; $z_{\text{кон}}$ – сопротивление контактов, которое принимается равным 0,05 Ом при двух и трех реле и 0,1 Ом – при большем количестве.

В табл. 1 приведены токи срабатывания ($I_{\text{ср}}$) всех ступеней защиты, найденные по выражению $I_{\text{ср}} = I_{\text{сз}} \frac{K_{\text{сх}}^{(3)}}{K_I}$; выбраны типы реле, а также потребляемая мощность каждого реле $S_{\text{пот}}$ (из справочников или по данным фирмы-изготовителя). Предпочтение следует отдавать реле с параллельным соединением обмоток, так как при этом уменьшается сопротивление реле.

Т а б л и ц а 1

$I_{\text{сз}}, \text{кА}$	$I_{\text{ср}}, \text{А}$	Тип реле	$S_{\text{пот}}, \text{В} \cdot \text{А}$	$z_{\text{р}}, \text{Ом}$
$I_{\text{сз}\phi}^I = 5,2$	87	РТ-40/100	1,8	0,000 72
$I_{\text{сз}\phi}^{\text{II}} = 0,575$	9,58	РТ-40/10	0,5	0,02
$I_{\text{сз}\phi}^{\text{III}} = 0,4$	6,67	РТ-40/10	0,5	0,02
$I_{\text{сз}0}^I = 4,5$	75	РТ-40/100	1,8	0,000 72
$I_{\text{сз}0}^{\text{II}} = 0,092$	1,53	РТ-40/2	0,2	0,2

Сопротивление реле определяется по формуле

$$z_{\text{р}} = \frac{S_{\text{пот}}}{I_{\text{уст min}}^2}, \quad (4)$$

где $I_{\text{уст min}}$ – минимальная уставка реле, которую можно выставить при выбранной схеме соединения обмоток (в нашем случае – параллельное соединение). Например, для реле РТ-40/10 максимально возможная выставляемая уставка при параллельном соединении обмоток

равна 10 А и соответствует значению в названии реле после косой черты, минимальная уставка при таком же соединении обмоток в 2 раза меньше, т. е. 5 А. При последовательном соединении обмоток значения минимального и максимального тока срабатывания в два раза меньше, чем при параллельном.

Поскольку необходимо обеспечить точную работу при КЗ в конце зоны действия первой ступени защиты (наибольшая кратность тока КЗ), за расчетный ток принимается с некоторым запасом ток срабатывания первой ступени защиты:

$$I_{\text{расч}} = k_{\text{н}} I_{\text{сз}}^{(m)}, \quad (5)$$

где $k_{\text{н}}$ – коэффициент надежности, принимаемый равным 1,1.

Итак,

$$I_{\text{расч}}^{(1)} = 1,1 \cdot 4,5 = 4,95 \text{ кА}; \quad I_{\text{расч}}^{(3)} = 1,1 \cdot 5,2 = 5,72 \text{ кА}.$$

Действительные кратности токов КЗ по отношению к номинальному току ТТ вычисляются по следующему выражению:

$$K_{10\text{дейст}}^{(m)} = \frac{I_{\text{расч}}^{(m)}}{I_{\text{ном}}} \quad (6)$$

и соответственно равны:

$$K_{10\text{дейст}}^{(1)} = \frac{4950}{300} = 16,5; \quad K_{10\text{дейст}}^{(3)} = \frac{5720}{300} = 19,07.$$

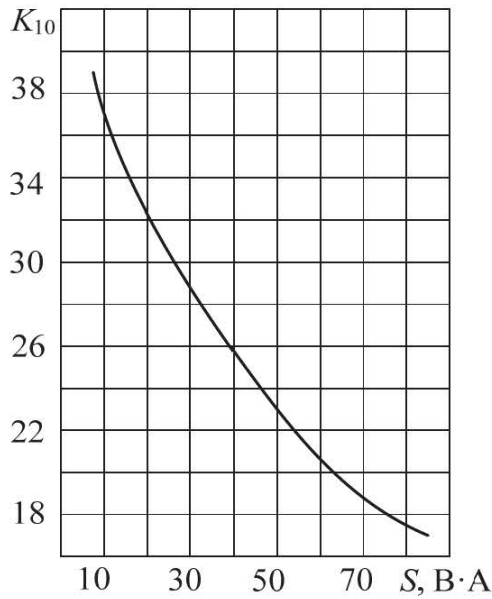
По кривым предельной кратности для выбранного ТТ (рис. 2) находится допустимая мощность нагрузки $S_{\text{доп}}$ для каждого вида КЗ и допустимая нагрузка $z_{\text{нагр.доп}}$ по выражению

$$z_{\text{нагр.доп}} = \frac{S_{\text{доп}}}{I_{2\text{ном}}^2}, \quad (7)$$

где $I_{2\text{ном}}$ – номинальный вторичный ток ТТ.

Тогда

$$z_{\text{нагр.доп}}^{(1)} = \frac{90}{5^2} = 3,6 \text{ Ом}; \quad z_{\text{нагр.доп}}^{(3)} = \frac{70}{5^2} = 2,8 \text{ Ом}.$$



K10	S, В·А
10	115
11	110
12	105
14	100

Рис. 2. Зависимость предельной кратности вторичных обмоток для защиты ТТ типа ТФМ-110 от нагрузки

После этого находится допустимое сопротивление контрольных кабелей в режимах трехфазного и однофазного КЗ:

$$z_{\text{пр.доп}}^{(m)} = z_{\text{нагр.доп}}^{(m)} - z_{\text{р.ф}}^{(m)} - z_{\text{р0}}^{(m)} - z_{\text{конт}}^{(m)}, \quad (8)$$

$$z_{\text{пр.доп}}^{(1)} = (3,6 - 2 \cdot 0,00072 - 2 \cdot 0,02 - 0,2 - 0,1) / 2 = 1,629 \cong 1,63 \text{ Ом},$$

$$z_{\text{пр.доп}}^{(3)} = 2,8 - 0,00072 - 2 \cdot 0,02 - 0,05 = 2,709 \cong 2,71 \text{ Ом}.$$

Определяющим является КЗ, в котором это сопротивление получилось меньше, т. е. однофазное КЗ. Далее находится сечение контрольного кабеля, соответствующее предельно допустимому сопротивлению:

$$q = \frac{\rho l}{R_{\text{пр.доп}}}, \quad (9)$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода; l – длина контрольного кабеля; $R_{\text{пр.доп}}$ – допустимое сопротивление контрольного кабеля.

Во вторичных цепях основного и вспомогательного оборудования электростанций и подстанций в настоящее время применяются провода с медными жилами ($\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$):

$$q = \frac{\rho l}{R_{\text{пр.доп}}} = \frac{0,0175 \cdot 100}{1,63} = 1,074 \text{ мм}^2.$$

Сечение контрольного кабеля принимается стандартным, при этом следует учитывать, что согласно ПУЭ [1] по условию механической прочности оно не должно быть меньше $2,5 \text{ мм}^2$ для медных жил.

Таким образом, выбираем сечение контрольного кабеля равным $2,5 \text{ мм}^2$. Находим действительное сопротивление контрольного кабеля:

$$R_{\text{пр.дейст}} = \frac{\rho l}{q} = \frac{0,0175 \cdot 100}{2,5} = 0,7 \text{ Ом} < z_{\text{пр.доп}}^{(1)} = 1,63 \text{ Ом}.$$

Затем находим действительные сопротивления нагрузок при однофазном и трехфазном КЗ:

$$z_{\text{нагр.дейст}}^{(1)} = 2 \cdot 0,7 + 0,1 + 0,04 + 0,2 + 2 \cdot 0,00072 = 1,74 \text{ Ом},$$

$$z_{\text{нагр.дейст}}^{(3)} = 0,7 + 0,05 + 0,04072 = 0,79 \text{ Ом}.$$

Действительная нагрузка на ТТ в расчетных видах КЗ не превышает допустимой, следовательно, погрешность ТТ в таких режимах не превышает 10 %.

2.2. ВЫБОР ТТ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЕМ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ РЗ ПРИ БЛИЗКИХ КЗ

При близких КЗ от места установки ТТ возможно глубокое насыщение их магнитопроводов, что приводит к резкому искажению формы кривой вторичного тока и отказу ИО защиты. Надежность действия ИО защиты будет обеспечена, если выполняется следующее условие:

$$f_{i \text{ расч}} \leq f_{i \text{ доп}}, \quad (10)$$

где $f_{i\text{ доп}}$ – допустимая токовая погрешность, при которой фирма-изготовитель гарантирует надежную работу реле (для электромагнитных реле – 50 %); $f_{i\text{ расч}}$ – действительная погрешность ТТ при заданной нагрузке $Z_{\text{нагр.расч}}$ и максимальной кратности тока КЗ K_{max} .

Для определения $f_{i\text{ расч}}$ используют кривую зависимости $f_{i\text{ расч}} = \varphi(A)$ (рис. 3), где A – обобщенный параметр, характеризующий отношение максимальной кратности тока КЗ к предельной кратности, найденной по кривой предельной кратности.

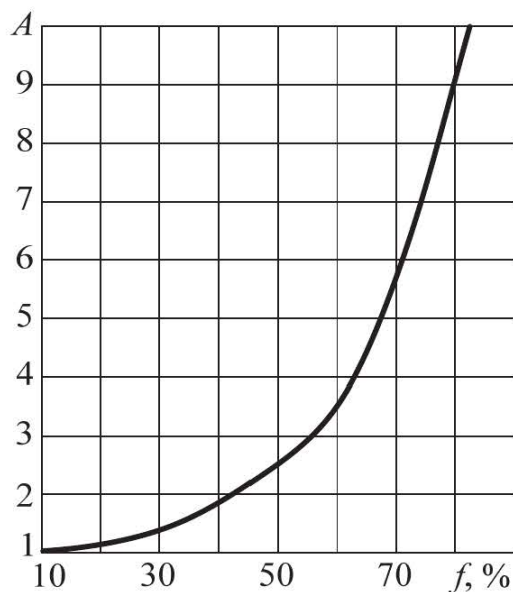


Рис. 3. Зависимость $f = \varphi(A)$ для определения токовых погрешностей ТТ более 10 %

Вначале находятся кратности токов КЗ по отношению к номинальному первичному току ТТ ($I_{\text{НОМ}}$) в максимальном режиме:

$$K_{\text{max}}^{(1)} = \frac{I_{K1\text{max}}^{(1)}}{I_{\text{НОМ}}} = \frac{12}{0,3} = 40, \quad K_{\text{max}}^{(3)} = \frac{I_{K1\text{max}}^{(3)}}{I_{\text{НОМ}}} = \frac{14}{0,3} = 46,7 \cong 47.$$

По кривым предельной кратности (см. рис. 1) определяется допустимая предельная кратность, соответствующая действительным нагрузкам (для этого необходимо значения действительных сопро-

тивлений перевести в мощность, потребляемую ТТ на основе выражения (4):

$$K_{10\text{доп}}^{(1)} = 25 > K_{10\text{дейст}}^{(1)} = 16,5, \quad K_{10\text{доп}}^{(3)} = 32 > K_{10\text{дейст}}^{(3)} = 19,07.$$

Определяются значения обобщенного параметра и погрешности при максимальных кратностях токов КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{K_{\text{max}}^{(1)}}{K_{10\text{доп}}^{(1)}} = \frac{40}{25} = 1,6, \quad A^{(3)} = \frac{K_{\text{max}}^{(3)}}{K_{10\text{доп}}^{(3)}} = \frac{47}{32} = 1,47,$$

где $K_{10\text{доп}}^{(1)}$, $K_{10\text{доп}}^{(3)}$ – предельные кратности тока, найденные по кривой предельной кратности при расчетной нагрузке ТТ.

Далее по зависимости $f = \varphi(A)$ (см. рис. 3), которая одинакова для всех типов ТТ, определяется значение действительной погрешности ТТ:

$$f_i^{(1)} = 30\%, \quad f_i^{(3)} = 25\%.$$

Таким образом, при КЗ в начале ЛЭП погрешности ТТ не превышают 50 %, при которых производитель гарантирует надежную работу электромагнитных реле.

2.3. ПРОВЕРКА ТТ НА НЕДОПУСТИМЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ВО ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЯХ

При близких КЗ амплитудное значение напряжения на выводах вторичной обмотки ТТ $U_{2\text{max}}$ не должно превышать допустимую величину $U_{2\text{доп}}$, при которой проверяется прочность изоляции вторичных цепей. В соответствии с ПУЭ [1] $U_{2\text{доп}}^{(m)} = 1000 \text{ В}$

$$U_{2\text{max}} < \sqrt{2} \cdot U_{2\text{доп}}. \quad (11)$$

Максимальное напряжение во вторичной цепи определяется без учета апериодической составляющей тока КЗ [6] по выражению

$$U_{2\text{max}}^{(m)} = \sqrt{2} \cdot K_{\text{max}}^{(m)} I_{2\text{ном}} Z_{\text{нагр.расч}}^{(m)}, \quad (12)$$

где $K_{\max}^{(m)}$ – максимальная кратность тока при расчетном виде КЗ, $I_{2\text{ном}}$ – номинальный вторичный ток ТТ, $Z_{\text{нагр.расч}}^{(m)}$ – расчетная нагрузка на ТТ.

Пользуясь формулой (12), находим

$$U_{2\max}^{(1)} = \sqrt{2} \cdot 40 \cdot 5 \cdot 1,5758 = 445,7 \text{ В},$$

$$U_{2\max}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 46,7 \cdot 5 \cdot 0,7982 = 262,58 \text{ В}.$$

Таким образом, напряжение на выводах вторичной обмотки ТТ при КЗ в месте установки защиты не превышает допустимого значения.

Выбранный ТТ удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к нему.

Исходные данные

По выданному варианту выполнить расчет и выбор трансформаторов тока следуя примеру.

Таблица 2. – Исходные данные для расчета

Вариант	$I_{\text{раб max}}, \text{ A}$	$I_{K \text{ max}}^{(3)}, \text{ кА}$	$I_{K \text{ max}}^{(1)}, \text{ кА}$	$l, \text{ м}$	K_T
1	120	10	8	100	150/5
2	150	10	8	120	150/5
3	210	15	13	80	250/5
4	250	15	13	80	250/5
5	280	15	13	150	300/5
6	310	20	18	90	400/5
7	350	20	18	90	400/5
8	460	25	22	100	500/5
9	185	10	8	120	100/5
10	265	15	13	140	300/5
11	130	10	8	140	150/5
12	145	10	8	130	150/5
13	200	15	13	80	200/5
14	260	15	13	80	300/5
15	270	15	13	120	300/5
16	320	20	18	120	350/5
17	340	20	18	110	350/5
18	450	25	22	115	500/5
19	190	10	8	140	100/5
20	490	30	27	130	500/5
21	110	10	8	90	150/5
22	160	10	8	80	200/5
23	200	15	13	80	200/5
24	260	15	13	115	300/5
25	270	15	13	125	300/5
26	320	20	18	12	350/5
27	340	20	18	130	350/5
28	470	25	22	120	500/5
29	180	10	8	115	100/5
30	370	30	27	100	400/5

Таблица 3. – Технические данные реле РТ-40

Тип реле	Пределы установки на ток срабатывания реле, А	Потребляемая мощность, В·А, при токе мин. установки	Номинальный ток, А	
			соединение катушек	
			последовательное	параллельное
РТ-40/0.2, РТ-140/0.2	0.05 ... 0.2	0.2	0.4	1
РТ-40/0.6, РТ-140/0.6	0.15 ... 0.6		1.6	2.5
РТ-40/2, РТ-140/2	0.5 ... 2		2.5	6.3
РТ-40/6, РТ-140/6	1.5 ... 6	0.5	10	16
РТ-40/10, РТ-140/10	2.5 ... 10		16	
РТ-40/20, РТ-140/20	5 ... 20			
РТ-40/50, РТ-140/50	12.5 ... 50			
РТ-40/100, РТ-140/100	25 ... 100			
РТ-40/200, РТ-140/200	50 ... 200	8		