ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
НАУЧНО - ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

ШКАФЫ РЗА СЕРИЙ ШЭ2607, ШЭ2710. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕРКЕ И ВЫБОРУ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

ЭКРА.650323.085 Д

(вторая редакция)

Чебоксары 2021

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 10
1 Проверка и выбор ТТ класса Р для ДЗЛ с учётом переходных режимов 11
1.1 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах ДЗЛ линий высокого и сверхвысокого напряжения с учётом переходных режимов 11
1.2 Методика проверки ТТ по времени до насыщения для ДЗЛ в режиме КЗ в зоне действия 14
1.3 Методика проверки ТТ по времени до насыщения для ДЗЛ в режиме КЗ вне зоны действия 16
1.4 Методика выбора ТТ по времени до насыщения для ДЗЛ 19
1.5 Пример проверки ТТ класса Р для ДЗЛ 220 кВ с учётом переходных режимов 20
1.6 Пример выбора ТТ класса Р для ДЗЛ 500 кВ с учётом переходных режимов 27
2 Проверка и выбор ТТ класса Р для ДФЗ с учётом переходных режимов 33
2.1 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах ДФЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения, с учётом переходных режимов 33
2.2 Методика проверки ТТ для ДФЗ по времени до насыщения 34
2.3 Методика выбора ТТ по времени до насыщения для ДФЗ 38
2.4 Пример проверки ТТ класса Р для ДФЗ ВЛ-220 кВ с учётом переходных режимов 41
2.5 Пример выбора ТТ класса Р для ДФЗ ВЛ-500 кВ с учётом переходных режимов 47
3 Проверка и выбор ТТ класса Р для дифференциальных защит шин и ошиновки высокого и сверхвысокого напряжения с учётом переходных режимов 53
3.1 Расчётные точки КЗ для ДЗШ и ДЗО 53
3.2 Методика проверки ТТ для ДЗШ и ДЗО при КЗ в зоне действия защиты 55
3.3 Методика проверки ТТ для ДЗШ и ДЗО при близком КЗ вне зоны действия 57
3.4 Методика выбора ТТ по времени до насыщения для ДЗШ и ДЗО 58
3.5 Пример проверки ТТ класса Р для ДЗШ 220 кВ с учётом переходных режимов 60
3.6 Пример выбора ТТ класса Р для ДЗШ 500 кВ с учётом переходных режимов 65
3.7 Пример формирования задания заводу изготовителю на разработку и изготовление ТТ класса Р с учётом переходных режимов 67
4 Проверка и выбор ТТ класса Р для первых ступеней дистанционных защит линий высокого и сверхвысокого напряжения с учётом переходных режимов 70
4.1 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах ДЗ

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

линий высокого и сверхвысокого напряжения с учётом переходных режимов 70
4.2 Методика проверки ТТ для первых ступеней ДЗ от междуфазных и однофазных КЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения 72
4.3 Методика выбора ТТ для первых ступеней ДЗ от междуфазных и однофазных КЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения 74
4.4 Пример проверки ТТ класса Р для первых ступеней ДЗ ВЛ-220 кВ с учётом переходных режимов 77
4.5 Пример выбора ТТ класса Р для первых ступеней ДЗ ВЛ-500 кВ с учётом переходных режимов 80
5 Проверка и выбор ТТ класса Р для токовых отсечек и первых ступеней токовых направленных защит нулевой последовательности линий высокого и сверхвысокого напряжения от КЗ на землю с учётом переходных режимов 84
5.1 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах ТО и первых ступеней ТНЗНП линий высокого и сверхвысокого напряжения с учётом переходных режимов 84
5.2 Методика проверки ТТ для ТО и первых ступеней ТНЗНП линий высокого и сверхвысокого напряжения 86
5.3 Методика выбора ТТ для ТО и первых ступеней ТНЗНП линий высокого и сверхвысокого напряжения 88
5.4 Пример проверки ТТ класса Р для ТО и первой ступени ТНЗНП ВЛ-220 кВ 90
5.5 Пример выбора ТТ класса Р для ТО и первой ступени ТНЗНП ВЛ-500 кВ с учётом переходных режимов 95
6 Проверка и выбор ТТ класса Р для дифференциальных защит понижающих трансформаторов и автотрансформаторов высокого и сверхвысокого напряжения, а также для дифференциальной защиты ошиновки стороны НН автотрансформатора с учётом переходных режимов 99
6.1 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах ДТЗ Т, АТ и ошиновки стороны НН АТ 99
6.2 Методика проверки ТТ для ДТЗ Т, АТ и ошиновки стороны НН АТ при КЗ в зоне действия 102
6.3 Методика проверки ТТ для ДТЗ Т, АТ, АТ и ошиновки стороны НН АТ при КЗ вне зоны действия 105
6.4 Методика выбора ТТ по времени до насыщения для ДТЗ Т, АТ и ошиновки НН АТ 107
6.5 Пример проверки ТТ класса Р для дифференциальных защит понижающих трансформаторов с учётом переходных режимов 109
6.6 Пример проверки ТТ класса Р для дифференциальных защит автотрансформаторов с учётом переходных режимов 122
6.7 Пример формирования задания заводу изготовителю на разработку и

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

изготовление ТТ класса PR с учётом переходных режимов 136
6.8 Пример проверки ТТ класса Р для дифференциальных защит ошиновки стороны НН автотрансформаторов (трансформаторов) с учётом переходных режимов 138
7 Проверка и выбор ТТ класса Р для дифференциальных защит шунтирующих реакторов с учётом переходных режимов.....145
7.1 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах дифференциальных защит шунтирующих реакторов.....145
7.2 Методика проверки ТТ для продольной ДТЗ ШР при КЗ в зоне действия.....146
7.3 Методика проверки ТТ для продольной и поперечной ДТЗ в режиме включения ШР под напряжение 148
7.4 Методика выбора ТТ по времени до насыщения для ДТЗ ШР.....150
7.5 Пример проверки ТТ класса Р для дифференциальных защит шунтирующего реактора с учётом переходных режимов 152
8 Методика проверки ТТ по условию несрабатывания УРЗ при насыщении ТТ в неповреждённой фазе.....171
8.1 Проверка эффективности уменьшения сопротивления нулевого проводника 171
8.2 Выбор ТТ со вторичным номинальным током 1 А.....172
8.3 Подключение ТТ к терминалу УРЗ индивидуальными фазными и нулевыми проводниками. 172
8.4 Пример проверки ТТ по условию несрабатывания УРЗ при насыщении ТТ в неповреждённой фазе 172
Список использованных источников.....174
Приложение А. Общие положения по проверке и выбору ТТ по времени до насыщения с учётом переходных режимов.....176
Приложение Б. Универсальные характеристики относительного действующего значения и угловой погрешности первой гармоники 189

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящих рекомендациях применены следующие термины с соответствующими определениями:

1. **Периодическая составляющая тока короткого замыкания** – составляющая тока короткого замыкания в электроустановке, изменяющаяся по периодическому закону с рабочей частотой.

Примечание – При допущениях, принятых в методических указаниях, периодическая составляющая является принужденной составляющей тока короткого замыкания – составляющей, равной разности между током короткого замыкания и его свободными составляющими.

2. **Апериодическая составляющая тока короткого замыкания** – составляющая электрического тока, изменяющаяся во времени без перемены знака.

Примечание – При допущениях, принятых в методических указаниях, апериодическая составляющая является свободной составляющей тока короткого замыкания – составляющей, определяемой только начальными условиями короткого замыкания, схемой электрической сети и параметрами ее элементов

3. **Трансформатор тока (ТТ)** – измерительный трансформатор, в котором при нормальных условиях применения вторичный ток практически пропорционален первичному току и сдвинут относительно него по фазе на угол, близкий к нулю.

4. **Вторичная цепь ТТ** – внешняя цепь, получающая сигналы измерительной информации от вторичной обмотки ТТ.

5. **Ветвь вторичного тока ТТ** – цепь, образуемая вторичной обмоткой и присоединённой к ней вторичной цепью ТТ.

6. **Номинальный первичный ток ТТ $I_{1ном}$** – указанное в паспорте действующее значение первичного тока, при котором ТТ рассчитан функционировать в течение срока службы.

7. **Номинальный вторичный ток ТТ $I_{2ном}$** – указанное в паспорте действующее значение вторичного тока, при котором ТТ рассчитан функционировать в течение срока службы.

8. **Номинальный коэффициент трансформации ТТ $n_{ном}$** – отношение номинального первичного тока к номинальному вторичному току.

9. **Класс точности** – обобщенная характеристика ТТ, определяемая установленными пределами допускаемых погрешностей при заданных условиях работы.

10. **Вторичная нагрузка ТТ $z_н$** – полное сопротивление вторичной цепи, выраженное в омах, при установленном коэффициенте мощности.

Примечание – Вторичная нагрузка может выражаться как полная мощность в вольт-амперах, при установленном коэффициенте мощности и при номинальном вторичном токе.

11. **Номинальная нагрузка ТТ $z_{н.ном}$** – значение нагрузки, при котором гарантируется класс точности ТТ.

12. **Номинальная мощность ТТ $S_{н.ном}$** – значение полной мощности (в вольт-амперах

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

при установленном коэффициенте мощности), которую трансформатор тока должен передавать в нагрузку при номинальном вторичном токе.

Примечание – Номинальная мощность ТТ является номинальной нагрузкой, выраженной в вольт-амперах при установленном коэффициенте мощности.

13. **Кратность первичного тока ТТ *K*** – отношение действующего значения первичного тока ТТ к его номинальному первичному току.

14. **Номинальная предельная кратность ТТ $K_{ном}$** – наибольшая кратность первичного синусоидального тока по отношению к его номинальному значению при номинальной нагрузке на ТТ, при которой его полная погрешность не превышает значений, соответствующих классу точности.

15. **Фактическая кратность первичного тока ТТ $K_{факт}$** –кратность первичного тока по отношению к его номинальному значению при фактической нагрузке на ТТ.

16. **Трансформатор тока класса Р** – трансформатор тока для защиты, для которого не задается требование ограничения остаточного потокосцепления, а уровень насыщения определяется в установившемся режиме короткого замыкания действующим значением периодического тока при значениях всех прочих параметров, соответствующих номинальным данным.

17. **Вольтамперная характеристика (ВАХ)** – выраженная графически или табличным способом зависимость между действующими значениями тока и напряжения на вторичной обмотке при приложении к последней синусоидального напряжения, причём первичная и все остальные обмотки разомкнуты.

18. **Остаточная (начальная) магнитная индукция B_r** – магнитная индукция, сохраняющаяся в ферромагнитном веществе при изменении напряженности магнитного поля от некоторого значения до нуля.

19. **Потокосцепление насыщения обмотки ТТ Ψ_{sat}** – максимальное значение магнитного потока, соответствующее насыщению материала магнитопровода ТТ, умноженное на число витков обмотки.

Примечание: магнитная индукция насыщения B_{sat} – максимальное значение магнитной индукции, соответствующее потокосцеплению насыщения обмотки ТТ Ψ_{sat}.

20. **Остаточное потокосцепление Ψ_r** – значение потокосцепления, определяемое магнитным потоком, остающимся в сердечнике (магнитопроводе) после отключения тока, вызывающего насыщение сердечника ТТ.

Примечание: остаточная магнитная индукция B_r – магнитная индукция, соответствующая остаточному потокосцеплению Ψ_r.

21. **Коэффициент остаточной намагниченности K_r** – отношение остаточного потокосцепления Ψ_r к потокосцеплению насыщения Ψ_{sat}, выраженное в относительных единицах или процентах.

Примечание – коэффициент остаточной намагниченности можно также выразить в виде отношения B_r / B_{sat}, что соответствует коэффициенту прямоугольности предельной петли

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

гистерезиса в соответствии с ГОСТ 19693-74.

22. **Коэффициент переходного режима $K_{п.р}(t)$** – функция, характеризующая изменение во времени отношения мгновенного значения потокосцепления при наличии апериодической составляющей к амплитудному значению потокосцепления, которое имело бы место при токе номинальной предельной кратности, не содержащем апериодической составляющей.

23. **Намагничивающий ток** – поделённая на число витков вторичной обмотки магнитодвижущая сила через замкнутый контур, проведённый вдоль магнитопровода ТТ.

П р и м е ч а н и е – Под определением «Ток намагничивания» понимается действующее значение тока во вторичной обмотке ТТ при снятии ВАХ.

24. **Параметр режима *A*** – отношение потокосцепления насыщения к амплитуде потокосцепления, созданного периодической составляющей тока КЗ при фактическом сопротивлении ветви вторичного тока трансформатора тока.

Применены следующие сокращения и обозначения:

АПВ – автоматическое повторное включение;

ВАХ – вольтамперная характеристика ТТ;

ДЗ – дистанционная защита;

ДЗЛ – дифференциальная защита линии;

ДЗШ – дифференциальная защита шин

ДЗО – дифференциальная защита ошиновки

ДТО – дифференциальная токовая отсечка

ДФЗ – дифференциально-фазная защита линии

КЗ – короткое замыкание;

КСЗ – комплект ступенчатых защит;

МТЗ – максимальная токовая защита;

ТНЗНП – токовая направленная защита нулевой последовательности;

ТО – токовая отсечка;

ТТ – трансформатор тока;

УРЗ – устройства релейной защиты

B_m – амплитуда магнитной индукции, созданной периодической составляющей вторичного тока ТТ при идеальной трансформации первичного тока;

$B_{нас}$ – магнитная индукция насыщения сердечника ТТ;

$U_{2\sin}$ – действующее значение напряжения, равное ЭДС вторичной обмотки при вторичном номинальном токе $I_{2ном}$, кратности синусоидального тока $K_{факт}$ и суммарном сопротивлении ветви вторичного тока $z_{2\Sigma факт}$;

$U_{нас}$ – действующее значение напряжения на ветви вторичного тока ТТ, соответствующее насыщению его сердечника;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение ТТ;

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

T_p – постоянная времени затухания апериодической составляющей первичного тока ТТ;

L_2 – индуктивность рассеяния вторичной обмотки ТТ;

$L_н$ – индуктивность нагрузки на ТТ;

L_s – индуктивность вторичного контура ТТ;

R_s – активное сопротивление ветви вторичного тока ТТ;

R_2 – активное сопротивление вторичной обмотки ТТ, приведённое к температуре 75°С или другой температуре, нормированной для конкретного типа ТТ;

$R_н$ – активное сопротивление нагрузки ТТ;

$R_{н.ном}$ номинальное активное сопротивление нагрузки ТТ;

$R_{н.факт}$ – фактическое активное сопротивление нагрузки ТТ;

X_2 – индуктивное сопротивление вторичной обмотки ТТ;

$X_{н.факт}$ – фактическое индуктивное сопротивление нагрузки ТТ;

$z_н$ – полное сопротивление нагрузки ТТ;

$z_{н.ном}$ – номинальное полное сопротивление нагрузки ТТ;

$\varphi_{н.ном}$ – номинальное значение угла сопротивления нагрузки ТТ;

$S_{н.ном}$ – номинальная полная мощность нагрузки ТТ;

$z_{2\Sigma ном}$ – номинальное сопротивление ветви вторичного тока ТТ;

$z_{2\Sigma факт}$ – фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ;

$I_{1ном}$ – номинальный первичный ток ТТ;

$I_{2ном}$ – номинальный вторичный ток ТТ;

$I_{КЗ}$ – действующее значение периодической составляющей тока КЗ;

$t_{нас}$ – время до насыщения сердечника трансформатора тока;

w_2 – число витков вторичной обмотки;

s – поперечное сечение магнитопровода;

l – средняя длина силовой линии в магнитопроводе.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

ВВЕДЕНИЕ

Методики базируются на условии соответствия времени до насыщения ТТ времени распознавания режимов КЗ в зоне и вне зоны действия. Вначале производится расчёт времени до насыщения ТТ по методам, приведённым в [1]. Затем вычисленные значения времени до насыщения ТТ сопоставляются с характеристиками основных защит и быстродействующих ступеней резервных защит. Если результат сопоставления положительный, то ТТ удовлетворяет условиям функционирования защиты в переходном режиме. При отрицательном результате сопоставления производится дополнительная проверка ТТ по предельно допустимому времени отключения КЗ в зоне и вне зоны действия защиты.

В разработанных примерах проверки и выбора ТТ, используемых в схемах основных защит и быстродействующих ступеней резервных защит при наличии в токах КЗ апериодической составляющей, также учитываются алгоритмические решения, применяемые в вышеуказанных устройствах защиты.

Основные положения по выбору и проверке ТТ класса Р на базе расчета времени до насыщения при наличии в токе КЗ апериодической составляющей изложены в Приложении А.

При разработке методик использованы материалы научных исследований, выводов и предложений ООО НПФ «Квазар» (г. Новочеркасск).

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

1 ПРОВЕРКА И ВЫБОР ТТ КЛАССА Р ДЛЯ ДЗЛ С УЧЁТОМ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

1.1 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах ДЗЛ линий высокого и сверхвысокого напряжения с учётом переходных режимов

Для обеспечения несрабатывания дифференциальной защиты линии при синусоидальных первичных токах ТТ должны проверяться на 10%-ную погрешность при максимальном уровне тока внешнего короткого замыкания (вне зоны действия защиты).

В Методических указаниях рассматривается реализация ДЗЛ с использованием тормозной характеристики, представляющей собой ломаную линию, состоящую из четырёх участков (рис. 1.1).

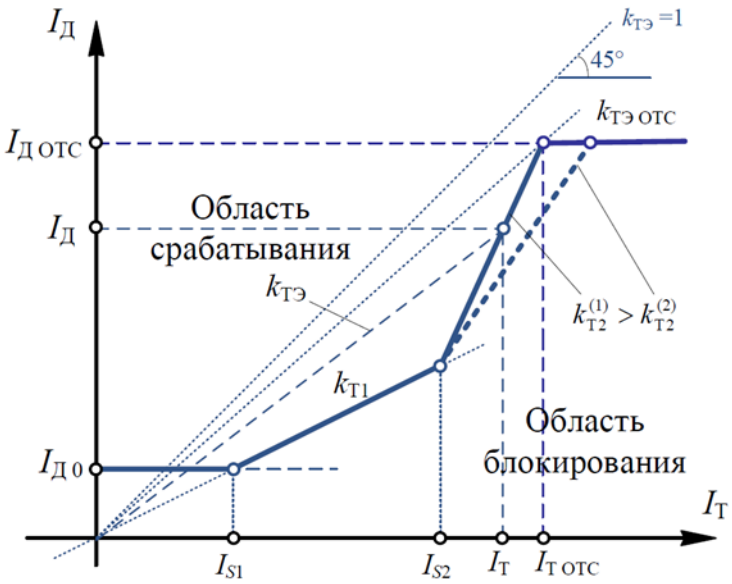


Рисунок 1.1 – Расположение расчетных точек КЗ при включении ДЗЛ на ТТ в цепи ВЛ

Первый (горизонтальный) участок характеризуется начальным током срабатывания $I_{Д0}$.

Первый наклонный участок характеристики, исходящий из начала координат, проходит под углом к оси абсцисс, соответствующем коэффициенту $k_{Т1}$. Точка пересечения горизонтального участка и первого наклонного участка определяется по выражению:

$$I_{S1} = \frac{I_{Д0}}{k_{Т1}}. \tag{1.1}$$

Указанный участок отражает работу ТТ с поглощением апериодической составляющей и относительно невысокой погрешностью трансформации периодической составляющей (ориентировочно до 20%). Использование второго наклонного участка по существу представляет собой разновидность адаптивного торможения, т.е. автоматическое изменение коэффициента торможения в зависимости от уровня тормозного сигнала.

Для каждой точки на втором участке характеристики можно рассчитать эквивалентный коэффициент торможения $k_{ТЭ}$, величина которого зависит от нескольких параметров и может быть рассчитана по формуле:

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$$k_{\text{ТЭ}} = k_{\text{Т2}} + (k_{\text{Т1}} - k_{\text{Т2}}) \cdot \frac{I_{S2}}{I_{\text{Т}}}. \quad (1.2)$$

Эквивалентный коэффициент торможения показывает общую степень торможения при данном тормозном токе и относится ко всей характеристике срабатывания, включая первый наклонный участок. На первом наклонном участке $k_{\text{ТЭ}} = k_{\text{Т1}}$.

При превышении дифференциальным током величины $I_{\text{Д.ОТС}}$, независимо от величины тормозного тока, происходит срабатывание ПО дифференциальной токовой отсечки (ДТО). При этом торможение отсутствует.

С целью проверки правильности функционирования дифференциальной защиты линии, использующей информацию от ТТ класса Р, необходимо произвести расчёты первичных токов ТТ при КЗ в зоне и вне зоны действия в характерных точках, показанных на рис. 1.2 и 1.3.

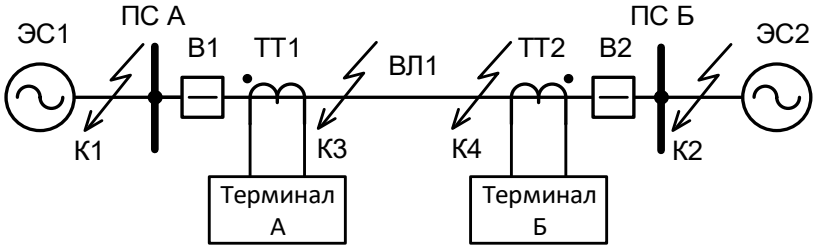


Рисунок 1.2 – Расположение расчетных точек КЗ при включении ДЗЛ на ТТ в цепи ВЛ

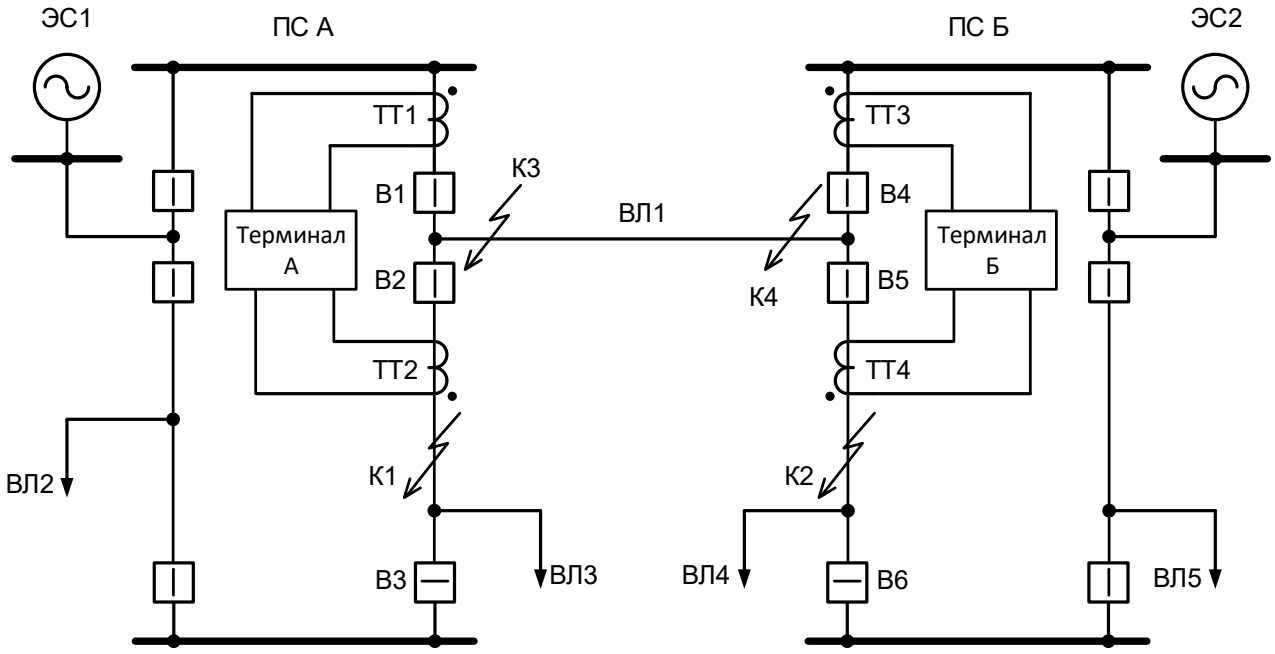


Рисунок 1.3 – Расположение расчетных точек КЗ при включении ДЗЛ на сумму токов ТТ в цепях выключателей

На рис. 1.2 устройство защиты подключено к ТТ, установленным в цепи защищаемой ВЛ. При близких КЗ вне зоны действия (точки К1 и К2) подпитка места КЗ током с противоположного конца относительно короткой ВЛ при наличии мощного источника питания на противоположном её конце может привести к неселективному срабатыванию ДЗЛ.

На рис. 1.3 устройства защиты по концам ВЛ1 подключены к ТТ, установленным в цепях выключателей В1, В2 и В4, В5. Наибольшие сквозные токи, протекающие по ТТ2 и ТТ4, имеют

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

место при отключённых выключателях В3 и В6 (ремонтный режим выключателя), соответственно. Насыщение магнитопроводов ТТ одной из групп (например, находящейся ближе к месту КЗ) может привести к неселективному срабатыванию защиты. Если насыщаются магнитопроводы ТТ и в другой группе (например, ТТ3 и ТТ4), то небаланс уменьшается и условия работы ДЗЛ облегчаются.

В общем случае проверка и выбор ТТ для ДЗЛ в режиме внешнего КЗ должны проводится независимо от места установки ТТ. Однако, для варианта подключения защиты на сумму токов ТТ в цепях выключателей при наличии в терминале ДЗЛ функции блокировки по направлению вторичных токов ТТ при протекании сквозных токов внешних КЗ указанная проверка не проводится.

При включении ДЗЛ на сумму токов ТТ в цепях выключателей (рис. 1.3) и отсутствии блокировки по направлению вторичных токов ТТ проверка при КЗ вне зоны действия проводится поочередно для ТТ обоих концов ВЛ (выключатели В3 и В6 находятся в ремонтном режиме):

– для конца ВЛ со стороны ПС А проверяется ТТ2 в режиме КЗ в точке К1;
– для конца ВЛ со стороны ПС Б проверяется ТТ4 в режиме КЗ в точке К2.

При включении ДЗЛ на ТТ в цепи ВЛ (рис. 1.2) расчетным является режим внешнего КЗ в точке К1 или К2 вблизи ПС с менее мощным эквивалентом энергосистемы, когда по линии протекает максимальный ток внешнего КЗ. В общем случае проверка проводится поочередно для ТТ обоих концов ВЛ. Однако, если по концам ВЛ установлены ТТ одного типа и нагрузка в их вторичных цепях близка по значению (например, ТТ нагружены только на терминалы ДЗЛ и контрольные кабели с одинаковым сечением жил и примерно равной длины), то допускается выполнять проверку ТТ только одного конца ВЛ, подключённого к более мощному источнику питания.

При КЗ в зоне действия для схемы подключения ДЗЛ к ТТ в цепях ВЛ (рис. 1.2) проверка выполняется для следующих режимов:

– в режиме КЗ в точке К3 проверяется ТТ1;
– в режиме КЗ в точке К4 проверяется ТТ2.

При включении ДЗЛ на сумму токов ТТ в цепях выключателей (рис. 1.3) в общем случае проверка выполняется

– в режиме КЗ в точке К3 для ТТ1 при условии, что выключатель В2 находится в ремонтном режиме, а для ТТ2 – при условии, что выключатель В1 находится в ремонтном режиме;
– в режиме КЗ в точке К4 для ТТ3 при условии, что выключатель В5 находится в ремонтном режиме, а для ТТ4 – при условии, что выключатель В4 находится в ремонтном режиме.

Если на каком-либо конце ВЛ в цепях выключателей установлены ТТ одного типа и нагрузка в их вторичных цепях близка по значению (например, ТТ нагружены только на терминалы ДЗЛ и контрольные кабели с одинаковым сечением жил и примерно равной длины), то допускается выполнять проверку только одного из двух ТТ. Например, в режиме КЗ в точке К4 проверяется только ТТ3 при условии, что выключатель В5 находится в ремонтном режиме.

Следует отметить, что в приведённых ниже методиках проверки ТТ с использованием

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

тормозных характеристик защиты на выпрямленных токах не учитываются фазовые соотношения между векторами первой гармоники вторичных токов ТТ с учётом насыщения последних. На самом деле возможности ДЗЛ производства ООО НПП «ЭКРА» гораздо шире, чем у защиты с торможением, рассмотренной в данном разделе Методических указаний. В защите дополнительно могут быть реализованы характеристики эквивалентных токов в плечах защиты на комплексной плоскости токов в виде кардиоиды или сектора [2]. Применение указанных характеристик обеспечивает повышенную устойчивость функционирования защиты при насыщении ТТ в переходных режимах.

1.2 Методика проверки ТТ по времени до насыщения для ДЗЛ в режиме КЗ в зоне действия

При КЗ в зоне действия расчётными являются КЗ вблизи шин источников питания, так как в этом случае в переходном режиме насыщение ТТ максимально. Именно в указанном режиме наиболее критичным является время отключения поврежденного элемента. Поэтому проверка ТТ по времени до насыщения при близком КЗ в зоне действия выполняется для дифференциальной токовой отсечки в составе ДЗЛ (как наиболее быстродействующей функции). Кроме того, опыт расчетов показал, что дифференциальный орган с торможением в составе ДЗЛ в режиме КЗ в зоне действия работает без замедления независимо от места установки ТТ (в цепи линии или в цепях выключателей).

Для версий программного обеспечения терминалов защиты, имеющих в составе ДЗЛ быстродействующий элемент дифференциальной отсечки время до насыщения ТТ должно быть не менее, чем время принятия решения отсечкой при КЗ в зоне действия, которое зависит от начальной фазы и кратности тока КЗ. При превышении током КЗ порога срабатывания отсечки в два раза, время принятия решения отсечкой не превышает 3,4 мс с момента начала КЗ. Для остальных версий ПО, если ТТ насыщается на первом периоде КЗ, требуется дополнительная проверка пригодности ТТ для ДЗЛ.

Ниже приводится порядок проверки функционирования ДТО при КЗ в точке К3 вблизи ПСА (рис. 1.2 и 1.3) в условиях насыщения ТТ1. Аналогично в режиме КЗ в точке К4 проверяется ТТ2 (рис. 1.2) или ТТ3 (рис. 1.3), в зависимости от места установки ТТ (в цепях ВЛ или выключателей).

1. В соответствии с [1] для режимов трехфазного и однофазного КЗ выполняется расчёт времени до насыщения ТТ ($t_{нас}$) по ВАХ или $B(H)$, а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. В последнем случае необходимо в соответствии с Приложением А данных Методических указаний вычислить значение фактической предельной кратности ТТ.

2. Если в составе ДЗЛ имеется быстродействующий элемент дифференциальной отсечки, то время до насыщения ТТ сравнивается с временем принятия решения ДЗЛ при КЗ в зоне действия:

$$t_{нас} \geq t_{реш.1}, \tag{1.3}$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

где $t_{реш.1}$ – время принятия решения быстродействующим элементом дифференциальной отсечки о КЗ в зоне действия. По данным производителя $t_{реш.1}$ = 3,4 мс.

3. Если условие (1.3) выполняется, то ТТ пригоден для использования в схеме ДЗЛ. Проверка считается успешно завершённой.

4. Если быстродействующий элемент отсечки отсутствует, то требуется проверка ТТ по методике, изложенной ниже. При этом возможны следующие варианты:

– время до насыщения ТТ больше 20 мс – проверка не требуется, ТТ пригоден для использования в схеме ДЗЛ;

– время до насыщения ТТ меньше 20 мс – необходима дополнительная проверка.

Во втором случае по зависимости рис. Б.4, Приложение Б, полученной с помощью дискретного преобразования Фурье методом скользящего окна, для момента времени $t_{нас}$ определяется действующее значение первой гармоники $I_{2.1.1*}$, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ1.

5. По приближённым выражениям вычисляется относительное значение дифференциального тока на первом периоде КЗ ($I_{Д.нас*}$):

– ТТ установлены в цепи линии:

$$I_{Д.нас*} = \frac{1}{I_Б}\left(I_{ТТ1} \cdot I_{2.1.1*} + I_{ТТ2}\right), \tag{1.4}$$

где $I_{ТТ1}$, $I_{ТТ2}$ – действующие значения первичных токов ТТ, установленных на ближнем и удаленном к точке КЗ концах ВЛ, соответственно (КЗ в точке КЗ вблизи ПСА на рис. 1.2);

$I_Б$ – базисный ток. Вычисляется в соответствии с рекомендациями, приведёнными в [2].

– ТТ установлены в цепях выключателей. Так как рассматривается режим КЗ в точке КЗ, то считается, что выключатель В2 отключён и по выключателю В1 проходит весь ток КЗ со стороны ПСА (на рис. 1.3):

$$I_{Д.нас*} = \frac{1}{I_Б}\left(I_{ТТ1} \cdot I_{2.1.1*} + I_{ТТ3} + I_{ТТ4}\right) \tag{1.5}$$

где $I_{ТТ1}$ – действующее значение первичного тока ТТ, установленного на ближнем к точке КЗ конце ВЛ;

$I_{ТТ3}$, $I_{ТТ4}$ – действующие значения первичных токов ТТ, установленных на удаленном от точки КЗ конце ВЛ.

6. Проверяют условие срабатывания дифференциальной отсечки:

$$I_{Д.нас*} > I_{Д.ОТС}, \tag{1.6}$$

где $I_{Д.ОТС}$ – значение уставки по току срабатывания дифференциальной отсечки, отн. ед.

7. Если условие (1.6) выполняется, то проверка ДЗЛ закончена с положительным результатом. Иначе рекомендуется выполнить проверку условия срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

С указанной целью для второго периода рассчитывают относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока по выражению:

– ТТ установлены в цепи линии:

$$I_{Д.2*} = \frac{1}{I_Б}\sqrt{\left(I_{ТТ1} \cdot I_{2.1.2*} \cdot \cos\delta_{2.1.2} + I_{ТТ2}\right)^2 + \left(I_{ТТ1} \cdot I_{2.1.2*} \cdot \sin\delta_{2.1.2}\right)^2}\ , \qquad (1.7)$$

где $I_{2.1.2*}$, $\delta_{2.1.2}$ – относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока ТТ и его угловая погрешность на втором периоде КЗ, определённые по рис. Б.1 и Б.2 Приложения Б, соответственно;

– ТТ установлены в цепях выключателей. Считается, что выключатель В2 отключён и по выключателю В1 проходит весь ток КЗ со стороны ПСА (на рис. 1.3):

$$I_{Д.2*} = \frac{1}{I_Б}\sqrt{\left(I_{ТТ1} \cdot I_{2.1.2*} \cdot \cos\delta_{2.1.2} + I_{ТТ3} + I_{ТТ4}\right)^2 + \left(I_{ТТ1} \cdot I_{2.1.2*} \cdot \sin\delta_{2.1.2}\right)^2}\ . \qquad (1.8)$$

8. Проверяют условие срабатывания дифференциальной отсечки при КЗ в зоне действия с помощью следующего выражения:

$$I_{Д.2*} > I_{Д.ОТС}\ . \qquad (1.9)$$

9. Если условие (1.8) выполняется, то проверка продольной ДТЗ закончена с положительным результатом.

10. Если условия (1.8) не выполняется, то следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм^2), повторно рассчитать время до насыщения ТТ и выполнить проверку:

– по пункту 2 при наличии в составе ДЗЛ быстродействующего элемента дифференциальной отсечки;

– иначе, по пунктам 4 – 6.

11. Если условие (1.8) не выполняется или задержка в срабатывании на 0,02 с недопустима, то ТТ не пригоден для использования в схеме ДЗЛ. Необходимо выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий требованиям по условию переходных процессов.

1.3 Методика проверки ТТ по времени до насыщения для ДЗЛ в режиме КЗ вне зоны действия

В общем случае проверка и выбор ТТ для ДЗЛ в режиме внешнего КЗ должны проводится независимо от места установки ТТ. Однако, для варианта подключения защиты на сумму токов ТТ в цепях выключателей при наличии в терминале ДЗЛ функции блокировки по направлению векторов первой гармоники вторичных токов ТТ при протекании сквозных токов внешних КЗ указанная проверка не проводится.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

1.3.1 Методика проверки ТТ для дифференциальной токовой отсечки в составе ДЗЛ в режиме КЗ вне зоны действия

ДТО в составе ДЗЛ реагирует на действующее значение первой гармоники дифференциального тока. Проверка ТТ для ДТО проводится в следующем порядке:

1. В соответствии [1] выполняется расчёт времени до насыщения ТТ ($t_{нас}$) по ВАХ или *B*(*H*), а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. В последнем случае необходимо в соответствии с Приложением А данных Методических указаний вычислить значение фактической предельной кратности ТТ.

Проверка ТТ производится при допущении, что ТТ, находящийся наиболее близко к точке КЗ ($ТТ_{БЛ}$) насыщается, а остальные ($ТТ_{УД}$) не насыщаются.

2. По значению $t_{нас}$ определяют номер n периода, следующего за периодом, на котором было насыщение. Например, $t_{нас}$ = 0,012 с, тогда

$$n = \text{ЦЧ}\left(\frac{t_{нас}}{0{,}02} + 2\right) = \text{ЦЧ}\left(\frac{0{,}012}{0{,}02} + 2\right) = 2\,. \qquad (1.10)$$

3. По рис. Б.3 в Приложении Б для периода переходного процесса с номером n определяют относительное действующее значение первой гармоники намагничивающего тока ($I_{0.1.n*}$). Максимальное значение тока небаланса при внешнем КЗ вычисляют с помощью следующего выражения:

$$I_{НБ.КЗ.ВНЕШ*} = \frac{I_{КЗ.ВНЕШ}}{I_{Б}} \cdot I_{0.1.n*}\,, \qquad (1.11)$$

где $I_{КЗ.ВНЕШ}$ – действующее значение первой гармоники максимального тока, протекающего через проверяемый ТТ при внешнем КЗ;

$I_{Б}$ – базисный ток. Вычисляется в соответствии с рекомендациями, приведёнными в [2].

4. Проверяют условие надёжной отстройки дифференциальной токовой отсечки при КЗ вне зоны действия от тока небаланса на первом периоде КЗ по выражению:

$$I_{Д.ОТС} \geq I_{НБ.КЗ.ВНЕШ*}\,, \qquad (1.12)$$

где $I_{Д.ОТС}$ – значение уставки дифференциальной токовой отсечки, отн. ед.

5. Если условие (1.12) выполняется, то проверка ДТО по режиму внешнего КЗ считается успешно завершённой.

6. Если условие (1.12) не выполняется, то максимально снижают нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм^2).

7. Повторно выполняют расчет времени до насыщения ТТ по ВАХ или характеристикам намагничивания и проверяют выполнение условия (1.12). При положительном результате проверка считается успешно завершённой.

8. Если условие (1.12) снова не выполняется, то необходимо выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий условиям отстройки от токов небаланса при внешних КЗ.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

1.3.2 Методика проверки ТТ для дифференциального органа с торможением в составе ДЗЛ в режиме КЗ вне зоны действия

Проверка ТТ для дифференциального органа с торможением в составе ДЗЛ проводится в следующем порядке:

1. В соответствии [1] выполняется расчёт времени до насыщения ТТ ($t_{нас}$) по ВАХ или $B(H)$, а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. В последнем случае необходимо в соответствии с Приложением А данных Методических указаний вычислить значение фактической предельной кратности ТТ.

Проверка ТТ производится при допущении, что ТТ, находящийся наиболее близко к точке КЗ ($ТТ_{БЛ}$) насыщается, а остальные ($ТТ_{УД}$) не насыщаются.

2. По значению $t_{нас}$ определяют номер n периода, следующего за периодом, на котором было насыщение (см. выражение (1.10)).

3. По рис. Б.3 в Приложении Б для периода переходного процесса с номером n определяют относительное действующее значение первой гармоники намагничивающего тока ($I_{0.1.n*}$). Максимальное значение небаланса при внешнем КЗ вычисляют с помощью выражения (1.11):

$$I_{НБ.КЗ.ВНЕШ*} = \frac{I_{КЗ.ВНЕШ}}{I_Б} \cdot I_{0.1.n*}.$$

4. По рис. Б.1 – Б.2 в Приложении Б для периода переходного процесса с номером n определяют параметры $I_{2.1.n*}$ и $\delta_{2.1.n}$.

5. Определяют соответствующее значение тормозного тока:

– если используется торможение от суммы модулей векторов токов, то:

- ТТ в цепи линии:

$$I_{Т*} = \frac{I_{КЗ.ВНЕШ}}{I_Б} \cdot \left(1 + I_{2.1.n*}\right); \qquad (1.13)$$

- ТТ в цепях выключателей, например, для варианта КЗ в точке К2 на рис. 1.3:

$$I_{Т*} = \frac{1}{I_Б} \cdot \left(I_{В1}^{А} + I_{В2}^{А} + I_{В4}^{Б} + I_{В5}^{Б} \cdot I_{2.1.n*.В5}\right), \qquad (1.14)$$

где $I_{В1}^{А}$, $I_{В2}^{А}$ – действующие значения первых гармоник токов, протекающих через выключатели В1 и В2 на ПС А (рис. 1.3) в расчетном режиме КЗ;

$I_{В4}^{Б}$, $I_{В5}^{Б}$ – действующие значения первых гармоник токов, протекающих через выключатели В4 и В5 на ПС Б (рис. 1.3) в расчетном режиме КЗ;

$I_{2.1.n*.В5}$ – относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока ТТ выключателя В5;

– если используется торможение от модуля разности векторов токов, то:

$$I_{Т*} = \frac{I_{КЗ.ВНЕШ}}{I_Б} \cdot \left|1 + I_{2.1.n*} e^{j\delta_{2.1.n}}\right|. \qquad (1.15)$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

6. По полученному значению тормозного тока I_{T*} определяют, на каком участке тормозной характеристики находится рабочая точка: первом наклонном или втором. В соответствии с указанным, значение коэффициента торможения принимают равным k_{T1} или k_{T2}.

7. Проверяют условие надёжной отстройки дифференциального органа с торможением от насыщения ТТ при КЗ вне зоны действия по выражению:

– для первого наклонного участка:

$$I_{НБ.КЗ.ВНЕШ*} < k_{T1} \cdot I_{T*}; \quad (1.16)$$

– для второго наклонного участка:

$$I_{НБ.КЗ.ВНЕШ*} < \left[k_{T2} \cdot I_{T*} + I_{S2} \cdot \left(k_{T1} - k_{T2}\right)\right], \quad (1.17)$$

где I_{S2} – ток начала торможения 2-го наклонного участка характеристики.

8. Если условие (1.16) или (1.17), в зависимости от расположения рабочей точки, выполняется, то ТТ пригоден для использования в схеме ДЗЛ. Проверка считается успешно завершённой.

9. Если условие (1.16) или (1.17), в зависимости от расположения рабочей точки, не выполняется, то максимально снижают нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм^2).

10. Повторно выполняют пункты с 1 по 7. При положительном результате проверка считается успешно завершённой. Иначе необходимо перейти на секторную характеристику защиты или выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий условиям отстройки от токов небаланса при внешних КЗ.

1.4 Методика выбора ТТ по времени до насыщения для ДЗЛ

Для обеспечения несрабатывания дифференциальной защиты линии при синусоидальных первичных токах ТТ должны выбираться по условию 10%-ной погрешности при максимальном значении тока внешнего короткого замыкания.

Должны быть известны следующие исходные данные:

– паспортные данные ТТ и их ВАХ (или *B*(*H*) и размеры магнитопровода);

– токи, протекающие через выбираемые ТТ при трёхфазных и однофазных КЗ в зоне и вне зоны действия;

– эквивалентные постоянные времени затухания апериодических составляющих тока КЗ, указанных выше;

– время принятия решения ДЗЛ при КЗ в зоне действия;

– параметры срабатывания ДЗЛ.

Методика выбора ТТ по условиям правильного функционирования ДЗЛ при переходных процессах следующая.

1. Время до насыщения ТТ принимается равным времени принятия решения ДЗЛ с быстродействующим элементом дифференциальной отсечки при КЗ в зоне действия:

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$$t_{\text{нас}} = t_{\text{реш.1}} = 3{,}4 \text{ мс.} \tag{1.18}$$

2. Так как время принятия решения значительно меньше 10 мс, то коэффициент переходного режима $K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}})$ для ТТ класса Р рекомендуется определять по значениям $t_{\text{реш.1}}$, T_p с помощью диаграмм зависимости $K_{\text{п.р}}(t)$ от времени, приведённых в Приложении А ГОСТ Р 58669-2019 [1].

3. Предварительно по нагрузке присоединения определяют значение номинального первичного тока $I_{1.\text{ном}}$. Значение номинального вторичного тока $I_{2.\text{ном}}$ в электроустановках напряжением 220 кВ и выше целесообразно принять равным 1 А, так как это облегчает условия работы ТТ в переходном режиме по сравнению с номинальным вторичным током, равным 5 А.

4. Рассчитывается фактическое сопротивление нагрузки на ТТ $z_{\text{н.факт}}$.

5. Задаётся номинальное сопротивление нагрузки на ТТ ($z_{\text{н.ном}}$), которое для ТТ с номинальным вторичным током равным 1 А обычно находится в пределах 20 … 100 Ом, а для пятиамперных – 0,8 … 2,4 Ом.

6. Определяется номинальное и фактическое сопротивления ветви вторичного тока ТТ по выражениям:

$$z_{2\sum\text{ном}} = z_2 + z_{\text{н.ном}} \approx 1{,}2 z_{\text{н.ном}}, \tag{1.19}$$

$$z_{2\sum\text{факт}} = z_2 + z_{\text{н.факт}} \approx 0{,}2 z_{\text{н.ном}} + z_{\text{н.факт}}, \tag{1.20}$$

где z_2 – сопротивления вторичной обмотки ТТ. При выборе ТТ значение сопротивления его вторичной обмотки допустимо принять равным 20 % от номинальной нагрузки.

7. Находят значение требуемой номинальной предельной кратности ТТ $K_{\text{ном.треб}}$ по выражению

$$K_{\text{ном.треб}} = \frac{K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}})}{1 - K_r} \cdot \frac{I_{\text{КЗ}} \cdot z_{2\sum\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\sum\text{ном}}}. \tag{1.21}$$

8. По каталогу находят ТТ класса Р того же класса напряжения с заданным значением номинального первичного тока и номинальной предельной кратностью, соответствующей выражению (1.21), а также с суммой сопротивления вторичной обмотки и номинального сопротивления нагрузки не ниже значения, вычисленного по выражению (1.19).

9. В соответствии с разделом 1.3 выполняют проверку ТТ в режиме КЗ вне зоны действия.

10. Если проверка выполнена успешно, то данный ТТ пригоден для использования в схеме ДЗЛ.

11. Иначе необходимо перейти на секторную характеристику защиты или выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий условиям отстройки от токов небаланса при внешних КЗ.

1.5 Пример проверки ТТ класса Р для ДЗЛ 220 кВ с учётом переходных режимов

Исходные данные для проверки ТТ приведены в табл. 1.1 – 1.3.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 1.1

Исходные данные ТТ1, ТТ2 (ТФНД-220-II)		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1200
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	30
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	30
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	7
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,54
Число витков вторичной обмотки	w_2	1200
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	21,5*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	1,06

Таблица 1.2

Параметры нагрузки ТТ			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,12	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	150	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 4	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{150}{1 \cdot 4} = 0{,}66$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п} = R_{каб}$	0,66	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 0{,}66 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 0{,}88$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$2 \cdot 0{,}66 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 1{,}54$	n = 2 при $K^{(1)}$
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(7+0{,}88)^2 + 0{,}54^2} = 7{,}89$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$\sqrt{(7+1{,}54)^2 + 0{,}54^2} = 8{,}55$	n = 2 при $K^{(1)}$
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(7 + 0{,}8 \cdot 30)^2 + (0{,}6 \cdot 30)^2} = 36{,}12$	

Таблица 1.3

Параметры срабатывания ДЗЛ		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Базисный ток, А	$I_Б$	1200
Начальный ток срабатывания, отн.ед.	$I_{Д0}$	0,5
Ток срабатывания дифференциальной отсечки, отн.ед.	$I_{Д.ОТС}$	1,8
Тип характеристики срабатывания		кардиоида
Коэффициент торможения на первом наклонном участке тормозной характеристики	k_{T1}	0,5
Коэффициент торможения на втором наклонном участке тормозной характеристики	k_{T2}	0,5
Ток начала торможения второго наклонного участка тормозной характеристики, отн.ед.	I_{S2}	9

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

1.5.1 Проверка ТТ для ДЗЛ при КЗ в зоне действия

В табл. 1.4 приведены данные о токах КЗ в зоне действия ДЗЛ. Значения токов приведены в именованных и относительных единицах (по отношению к базисному току).

Таблица 1.4

Параметры токов при близком КЗ в зоне действия			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		К(3)	**К(1)**
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К3, А / отн. ед.	$I_{TT1.3}$	5 290/4,41	3 744/3,12
Ток через ТТ2 при КЗ в точке К3, А / отн. ед.	$I_{TT2.3}$	4 060/3,38	3 418/2,85
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К4, А / отн. ед.	$I_{TT1.4}$	2 470/2,06	1 246/1,04
Ток через ТТ2 при КЗ в точке К4, А / отн. ед.	$I_{TT2.4}$	32 090/26,74	33 570/27,98
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс			
При КЗ вне зоны в точке К3, мс	$T_{p.3}$	50	50
При КЗ вне зоны в точке К4, мс	$T_{p.4}$	50	50

При КЗ в зоне действия для схемы подключения ДЗЛ к ТТ в цепях ВЛ (рис. 1.2) проверка выполняется для следующих режимов:

– в режиме КЗ в точке К3 проверяется ТТ1;

– в режиме КЗ в точке К4 проверяется ТТ2.

Так как ВАХ ТТ отсутствует, а размеры магнитопровода ТТ известны, то расчёт времени до насыщения ТТ ($t_{нас}$) выполняется по $B(H)$ и приведён в табл. 1.5.

Время до насыщения ТТ при КЗ в зоне действия превышает время принятия решения быстродействующим элементом отсечки 3,4 мс (см. табл. 1.5), т.е. ТТ типа ТФНД-220-II пригоден для использования в схеме ДЗЛ.

Если быстродействующий элемент отсечки в составе ДЗЛ отсутствует, то требуется дополнительная проверка поведения ДЗО на первом периоде КЗ, когда $t_{нас}$ меньше 20 мс. Для режима однофазного КЗ в точке К3 время до насыщения ТТ1 больше 20 мс (26 мс), поэтому в данном случае дополнительная проверка не требуется.

Из результатов указанной дополнительной проверки, приведенных в табл. 1.6, следует, что ТТ типа ТФНД-220-II пригоден для использования в схеме ДЗЛ без быстродействующего элемента отсечки.

Проверка ТТ при КЗ в зоне действия считается успешно завершённой.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 1.5

Расчёт времени до насыщения ТТ1, ТТ2 (ТФНД-220-II) при КЗ в зоне действия					
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**			
		Для ТТ1 при КЗ в точке К3		**Для ТТ2 при КЗ в точке К4**	
		$K^{(3)}$	$K^{(1)}$	$K^{(3)}$	$K^{(1)}$
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{\text{факт}} = \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$	$\frac{5290}{1200} = 4{,}41$	$\frac{3744}{1200} = 3{,}12$	$\frac{32090}{1200} = 26{,}74$	$\frac{33570}{1200} = 27{,}98$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 4{,}41 = 0{,}441$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 3{,}12 = 0{,}312$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 26{,}74 = 2{,}674$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 27{,}98 = 2{,}798$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{\text{нас}} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$0{,}441 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 499$	$0{,}312 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 353$	$2{,}674 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 3027$	$2{,}798 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 3167$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{\text{нас}}$	1,88	1,87	1,96	1,96
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}$	$4{,}41 \cdot 1 \cdot 7{,}89 = 35$	$3{,}12 \cdot 1 \cdot 8{,}55 = 26{,}7$	$26{,}74 \cdot 1 \cdot 7{,}89 = 229$	$27{,}98 \cdot 1 \cdot 8{,}55 = 239$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{35}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}061$	$\frac{26{,}7}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}047$	$\frac{229}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}4$	$\frac{239}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}42$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{\text{нас}}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}88}{0{,}061} = 31$ $31 \cdot (1 - 0{,}86) = 4{,}3$	$\frac{1{,}87}{0{,}047} = 40$ $40 \cdot (1 - 0{,}86) = 5{,}6$	$\frac{1{,}96}{0{,}4} = 4{,}9$ $4{,}9 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}69$	$\frac{1{,}96}{0{,}42} = 4{,}7$ $4{,}7 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}66$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{\text{нелин}} = \frac{y_\varepsilon}{y_{\text{лин}}} \geq 3$	>3	>3	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше $5T_p$ 11,8	Больше $5T_p$ 26	13,7 3,7	12,9 3,6
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{\text{нас.1}} > t_{\text{реш.1}}$; $t_{\text{нас.2}} > t_{\text{реш.1}}$	Выпол. (>> 3,4 мс) Выпол. (11,8 > 3,4 мс)	Выпол. (>> 3,4 мс) Выпол. (26 > 3,4 мс)	Выпол. (13,7 > 3,4 мс) Выпол. (3,7 > 3,4 мс)	Выпол. (12,9 > 3,4 мс) Выпол. (3,6 > 3,4 мс)

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 1.6

Проверка ТТ1 типа ТВТ-330 2000/1 по действующему значению первой гармоники, содержащейся в импульсе вторичного тока к моменту времени $t_{нас}$					
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**			**Примечания**
		Для ТТ1 при трехфазном КЗ в точке К3	**Для ТТ2 при КЗ в точке К4**		
			$K^{(3)}$	$K^{(1)}$	
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока к моменту времени $t_{нас}$, отн.ед.	$I_{2.1.1*}$	0,9	0,065	0,06	По рис. Б.4 при T_p = 0,05 с
Относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока на втором периоде, отн.ед	$I_{Д.нас*} = \frac{I_{ТТ1} \cdot I_{2.1.1*} + I_{ТТ2}}{I_Б}$	$\frac{5290 \cdot 0,3 + 4060}{1200} = 11,11$	$\frac{2470 + 32090 \cdot 0,065}{1200} = 3,79$	$\frac{1246 + 33570 \cdot 0,06}{1200} = 2,72$	
Проверка условия срабатывания дифференциальной отсечки на первом периоде КЗ в зоне	$I_{Д.нас*} > I_{Д.ОТС}$	+	+	+	$I_{ОТС*} = 1,8$ отн.ед.
Проверка ТТ по действующему значению первой гармоники, содержащейся в импульсе вторичного тока к моменту времени $t_{нас}$ выполнена успешно.					

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

1.5.2 Проверка ТТ для ДЗЛ при КЗ вне зоны действия

В табл. 1.7 приведены данные о токах КЗ вне зоны действия ДЗЛ. Значения токов приведены в именованных и относительных единицах (по отношению к базисному току).

Таблица 1.7

Параметры токов при близком КЗ вне зоны действия			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		К(3)	**К(1)**
Ток через ТТ при КЗ вне зоны в точке К1, А / отн. ед.	$I_{ТТ1.1}$	4 062/3,38	3 234/2,69
Ток через ТТ при КЗ вне зоны в точке К2, А / отн. ед.	$I_{ТТ1.2}$	2 473/2,06	2 067/1,72
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс			
При КЗ вне зоны в точке К1, мс	$T_{p.1}$	50	50
При КЗ вне зоны в точке К2, мс	$T_{p.2}$	50	50

При включении ДЗЛ на ТТ в цепи ВЛ (рис. 1.2) расчетным выбирается режим внешнего КЗ в точке вблизи ПС с менее мощным эквивалентом энергосистемы, когда по линии протекает максимальный ток внешнего КЗ. В данном случае расчетным является режим внешнего КЗ в точке К1.

В общем случае проверка проводится поочередно для ТТ обоих концов ВЛ. Однако, так как по концам ВЛ установлены ТТ одного типа и нагрузки в их вторичных цепях совпадают, то допускается выполнять проверку ТТ только одного конца ВЛ.

1.5.2.1 Проверка ТТ для дифференциальной токовой отсечки в составе ДЗЛ

Так как ВАХ ТТ отсутствует, а размеры магнитопровода ТТ известны, то расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) выполняется по $B(H)$ (см. табл. 1.8).

Результаты проверки ТТ для дифференциальной токовой отсечки в составе ДЗЛ приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.8

Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		$K^{(3)}$	**$K^{(1)}$**
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{факт} = \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}}$	$\frac{4062}{1200} = 3{,}38$	$\frac{3234}{1200} = 2{,}69$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 3{,}38 = 0{,}338$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 3{,}12 = 0{,}269$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{нас} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$0{,}338 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 383$	$0{,}269 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 305$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{нас}$	1,873	1,864
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{факт} \cdot I_{2ном} \cdot z_{2\Sigma факт}$	$3{,}38 \cdot 1 \cdot 7{,}89 = 26{,}7$	$3{,}12 \cdot 1 \cdot 8{,}55 = 23$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{26{,}7}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}047$	$\frac{23}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}04$
Параметр режима работы ТТ A – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{нас}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}873}{0{,}047} = 40$ $40 \cdot (1 - 0{,}86) = 5{,}6$	$\frac{1{,}864}{0{,}047} = 46{,}6$ $46{,}6 \cdot (1 - 0{,}86) = 6{,}5$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 1.8 (Окончание)

Наименование величины	Обозначение	Значение	
		$K^{(3)}$	$K^{(1)}$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{\text{нелин}} = \frac{y_{\varepsilon}}{y_{\text{лин}}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции; – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше $5T_p$ 26	Больше $5T_p$ 28

Таблица 1.9

Проверка ДТО по условию надёжной отстройки при КЗ вне зоны действия			
Наименование величины	Обозначение	Значение	
		$K^{(3)}$	$K^{(1)}$
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение ТТ	n	3	3
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1.n*}$	0,42	0,42
Максимальное значение небаланса при внешнем КЗ, отн.ед.	$I_{\text{НБ.КЗ.ВНЕШ}*} = \frac{I_{\text{КЗ.ВНЕШ}}}{I_{\text{Б}}} \cdot I_{0.1.n*}$	$\frac{4062}{1200} \cdot 0{,}42 = 1{,}42$	$\frac{3234}{1200} \cdot 0{,}42 = 1{,}13$
Проверка условия надёжной отстройки	$I_{\text{Д.ОТС}} \geq I_{\text{НБ.КЗ.ВНЕШ}*}$	$1{,}8 > 1{,}42$	$1{,}8 > 1{,}13$
Проверка ДТО по условию надёжной отстройки при КЗ вне зоны действия выполнена успешно			

1.5.2.2 Проверка ТТ для дифференциального органа с торможением в составе ДЗЛ

Результаты проверки ТТ для дифференциального органа с торможением в составе ДЗЛ приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10

Наименование величины	Обозначение	Значение	
		$K^{(3)}$	$K^{(1)}$
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение ТТ	n	3	3
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока, отн.ед.	$I_{2.1.n*}$	0,425	0,425
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1.n*}$	0,42	0,42
Максимальное значение небаланса при внешнем КЗ, отн.ед.	$I_{\text{НБ.КЗ.ВНЕШ}} = \frac{I_{\text{КЗ.ВНЕШ}}}{I_{\text{Б}}} \cdot I_{0.1.n*}$	$\frac{4062 \cdot 0{,}42}{1200} = 1{,}42$	$\frac{3234 \cdot 0{,}42}{1200} = 1{,}13$
Тормозной ток, отн.ед.	$I_{\text{Т}} = \frac{I_{\text{КЗ.ВНЕШ}}}{I_{\text{Б}}} \cdot (1 + I_{2.1.n*})$	$\frac{4062 \cdot (1 + 0{,}425)}{1200} = 4{,}82$	$\frac{3234 \cdot (1 + 0{,}425)}{1200} = 3{,}84$
Проверка условия надёжной отстройки	$I_{\text{НБ.КЗ.ВНЕШ}} < k_{\text{Т1}} \cdot I_{\text{Т}}$	$1{,}42 < 0{,}5 \cdot 4{,}82$	$1{,}13 < 0{,}5 \cdot 3{,}84$
Проверка ТТ для дифференциального органа с торможением в составе ДЗЛ выполнена успешно			

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

1.6 Пример выбора ТТ класса Р для ДЗЛ 500 кВ с учётом переходных режимов

1.6.1 Выбор ТТ для ДЗЛ по времени до насыщения в режиме КЗ в зоне действия

Пусть ДЗЛ подключается на сумму токов ТТ в цепях выключателей, схема подключения соответствует (рис. 1.3).

При включении ДЗЛ на сумму токов ТТ в цепях выключателей проверка при КЗ вне зоны действия проводится поочередно для ТТ обоих концов ВЛ (выключатели В3 и В6 находятся в ремонтном режиме):

– для конца ВЛ со стороны ПС А проверяется ТТ2 в режиме КЗ в точке К1;

– для конца ВЛ со стороны ПС Б проверяется ТТ4 в режиме КЗ в точке К2.

При КЗ в зоне действия в общем случае проверка выполняется:

– в режиме КЗ в точке К3 для ТТ1 при условии, что выключатель В2 находится в ремонтном режиме, а для ТТ2 – при условии, что выключатель В1 находится в ремонтном режиме;

– в режиме КЗ в точке К4 для ТТ3 при условии, что выключатель В5 находится в ремонтном режиме, а для ТТ4 – при условии, что выключатель В4 находится в ремонтном режиме.

Однако, так как по концам ВЛ будут установлены ТТ одного типа и нагрузка в их вторичных цепях близка по значению, так как ТТ нагружены только на терминалы ДЗЛ и контрольные кабели с одинаковым сечением жил и примерно равной длины. По указанной причине объём проверки допустимо сократить:

– режим КЗ в зоне действия:
  - при КЗ в точке К3 проверяется только ТТ1 при условии, что выключатель В2 находится в ремонтном режиме;
  - при КЗ в точке К4 проверяется только ТТ3 при условии, что выключатель В5 находится в ремонтном режиме;

– режим КЗ вне зоны действия:
  - при КЗ в точке К1 проверяется только ТТ2 при условии, что выключатель В3 находится в ремонтном режиме;
  - при КЗ в точке К2 проверяется только ТТ4 при условии, что выключатель В6 находится в ремонтном режиме.

Значения токов КЗ в расчетных режимах приведены в табл. 1.11 – 1.12.

Таблица 1.11

Параметры токов при близком КЗ в зоне действия			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		К(3)	**К(1)**
Ток через ТТ1 при КЗ в зоне в точке К3	$I_{ТТ1.3}$	8034	7718
Ток через ТТ3 при КЗ в зоне в точке К4, А	$I_{ТТ3.4}$	23210	21384
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс			
При КЗ вне зоны в точке К1, мс	$T_{p.3}$	50	50
При КЗ вне зоны в точке К2, мс	$T_{p.4}$	50	50

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 1.12

Параметры токов при близком КЗ вне зоны действия			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		К(3)	**К(1)**
Ток через ТТ2 при КЗ вне зоны в точке К1, А	$I_{ТТ2.1}$	12 074	11 518
Ток через ТТ4 при КЗ вне зоны в точке К2, А	$I_{ТТ4.2}$	25 815	23 368
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс			
При КЗ вне зоны в точке К1, мс	$T_{p.1}$	50	50
При КЗ вне зоны в точке К2, мс	$T_{p.2}$	50	50

Кроме того, постоянные времени затухания апериодических составляющих токов КЗ приняты одинаковыми для всех режимов КЗ, поэтому проверки допускается проводить только для ТТ одного конца ВЛ, подключённого к более мощному источнику питания (в данном случае это ПСБ на рис. 1.3):

– режим КЗ в зоне действия в точке К4 проверяется только ТТ3 при условии, что выключатель В5 находится в ремонтном режиме;

– режим КЗ вне зоны действия в точке К2 проверяется только ТТ4 при условии, что выключатель В6 находится в ремонтном режиме.

Время до насыщения ТТ при КЗ в зоне действия принимается равным времени принятия решения ДЗЛ с быстродействующим элементом дифференциальной отсечки:

$$t_{нас} = t_{реш.1} = 3{,}4 \text{ мс.}$$

Так как время принятия решения значительно меньше 10 мс, то коэффициент переходного режима $K_{п.р}(t_{нас})$ определяется по значениям $t_{реш.1}$, T_p с помощью диаграмм зависимости $K_{п.р}(t)$ от времени, приведённых в Приложении А ГОСТ Р 58669-2019 [1]:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = 0{,}5\,,$$

Предварительно по нагрузке присоединения определяется значение номинального первичного тока: $I_{1.ном}$ = 2000 А. Значение номинального вторичного тока $I_{2.ном}$ в электроустановках напряжением 220 кВ и выше целесообразно принять равным 1 А.

Результаты расчёта фактического сопротивления нагрузки на ТТ, представлены в табл. 1.13.

Так как косинус угла фактического сопротивления нагрузки на ТТ равен 1, то

$$z_{н.факт} = R_{н.факт}\,.$$

Задаётся номинальное сопротивление нагрузки на ТТ ($z_{н.ном}$), которое для ТТ с номинальным вторичным током равным 1 А обычно находится в пределах 20 … 100 Ом. Пусть $z_{н.ном} = 40$ Ом. Значение сопротивления вторичной обмотки ТТ допустимо принять равным 20 % от номинальной нагрузки.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 1.13

Параметры нагрузки ТТ			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечания**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{\text{терм}}$	0,12	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_{\text{н}}$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{\text{пер}}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{\text{т.ц}}$	250	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_{\text{ж}}$	Cu – 2,5	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_{\text{ж}}$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{\text{каб}} = \rho \cdot \dfrac{L_{\text{т.ц}}}{k_{\text{ж}} \cdot S_{\text{ж}}}$	$0{,}0175 \cdot \dfrac{250}{1 \cdot 2{,}5} = 1{,}75$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{\text{н.п}}$	1,75	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{\text{н.факт}} = n \cdot R_{\text{каб}} + m \cdot R_{\text{терм}} + R_{\text{пер}}$	$1 \cdot 1{,}75 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 1{,}97$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$2 \cdot 1{,}75 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 3{,}72$	n = 2 при $K^{(1)}$

Определяются номинальное и фактическое сопротивления ветви вторичного тока ТТ по выражениям:

$$z_{2\sum\text{ном}} = 1{,}2 z_{\text{н.ном}} = 1{,}2 \cdot 40 = 48 \text{ Ом},$$

$$z^{(3)}_{2\sum\text{факт}} = 0{,}2 z_{\text{н.ном}} + z_{\text{н.факт}} = 0{,}2 \cdot 40 + 1{,}97 = 9{,}97 \text{ Ом},$$

$$z^{(1)}_{2\sum\text{факт}} = 0{,}2 z_{\text{н.ном}} + z^{(1)}_{\text{н.факт}} = 0{,}2 \cdot 40 + 3{,}72 = 11{,}72 \text{ Ом}.$$

Находят значение требуемой номинальной предельной кратности ТТ $K_{\text{ном}}$ по выражению:

$$K^{(3)}_{\text{ном.треб}} \geq \frac{K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}})}{1 - K_r} \cdot \frac{I^{(3)}_{\text{КЗ}} \cdot z^{(3)}_{2\sum\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\sum\text{ном}}} = \frac{0{,}5}{1 - 0{,}86} \cdot \frac{23210 \cdot 9{,}97}{2000 \cdot 48} \approx 8{,}6;$$

$$K^{(1)}_{\text{ном.треб}} \geq \frac{K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}})}{1 - K_r} \cdot \frac{I^{(1)}_{\text{КЗ}} \cdot z^{(1)}_{2\sum\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\sum\text{ном}}} = \frac{2{,}03}{1 - 0{,}86} \cdot \frac{21384 \cdot 11{,}72}{2000 \cdot 48} \approx 9{,}3.$$

В качестве требуемой номинальной предельной кратности принимается большее значение, т.е. $K_{\text{ном.треб}} = 9{,}3$.

По каталогу находят ТТ класса Р на напряжение 500 кВ со значением номинального первичного тока 2000 А и номинальной предельной кратностью не менее 9,3, а также с суммой сопротивления вторичной обмотки и номинального сопротивления нагрузки не ниже вычисленных выше значений.

Например, всем выше указанным требованиям соответствует ТТ класса Р типа ТФРМ-500Б У1 2000/1, данные которого приведены в табл. 1.14.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 1.14

Предварительно по максимальному рабочему току ВЛ1 500кВ выбирается ТТ1 типа ТФРМ-500Б У1		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	2000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	18
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	40
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	4,23
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0
Число витков вторичной обмотки	w_2	2000
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	23,6*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	2,28

Уточненные значения сопротивлений нагрузки приведены в табл. 1.15.

Таблица 1.15

Наименование величины	Обозначение	Значение	Примечания
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(4{,}23+1{,}97)^2+0} = 6{,}2$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$\sqrt{(4{,}23+1{,}97)^2+0} = 7{,}95$	n = 2 при $K^{(1)}$
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(4{,}23+0{,}8\cdot 40)^2 + (0{,}6\cdot 40)^2} = 43{,}5$	

Далее выполняется расчет параметров срабатывания ДЗЛ в соответствии «Рекомендациями по выбору уставок функции продольной дифференциальной защиты линии электропередачи, используемой в терминалах БЭ 2704 09х, БЭ2704 59х, БЭ2502Б 21хх и в шкафах серий ШЭ2607 09х, ШЭ2710 59х, ШЭ2607 29х» [2].

Результаты расчета параметров срабатывания ДЗЛ приведены в табл. 1.16.

Таблица 1.16

Параметры срабатывания ДЗЛ		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Базисный ток, А	$I_Б$	2000
Начальный ток срабатывания, отн.ед.	$I_{Д0}$	0,4
Ток срабатывания дифференциальной отсечки, отн.ед.	$I_{Д.ОТС}$	13,6
Тип характеристики срабатывания		кардиоида
Коэффициент торможения на первом наклонном участке тормозной характеристики	k_{T1}	0,5
Коэффициент торможения на втором наклонном участке тормозной характеристики	k_{T2}	0,5
Ток начала торможения второго наклонного участка тормозной характеристики, отн.ед.	I_{S2}	28

Далее выполняется проверка ТТ для ДЗЛ при КЗ вне зоны действия.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

1.6.2 Проверка ТТ для ДЗЛ при КЗ вне зоны действия

Как указано в предыдущем параграфе, в условиях данного примера проверку для режима внешнего КЗ достаточно выполнить только для ТТ4 при КЗ в точке К2 (выключатель В6 находится в ремонтном режиме). Исходные данные приведены в табл. 1.12 – 1.16.

1.6.2.1 Проверка ТТ для дифференциальной токовой отсечки в составе ДЗЛ

Так как ВАХ ТТ отсутствует, а размеры магнитопровода ТТ известны, то расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) выполняется по $B(H)$ (см. табл. 1.17).

Результаты проверки ТТ для дифференциальной токовой отсечки в составе ДЗЛ приведены в табл. 1.18.

Таблица 1.17

Расчет времени до насыщения ТТ4 при внешнем КЗ в точке К2			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		$K^{(3)}$	$K^{(1)}$
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{факт} = \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}}$	$\frac{25815}{2000} = 12{,}9$	$\frac{23368}{1200} = 11{,}7$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 12{,}9 = 1{,}29$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 11{,}7 = 1{,}17$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{нас} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$1{,}29 \cdot \frac{2000}{2{,}28} = 1132$	$1{,}17 \cdot \frac{2000}{2{,}28} = 1026$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{нас}$	1,91	1,9
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{факт} \cdot I_{2ном} \cdot z_{2\Sigma факт}$	$12{,}9 \cdot 1 \cdot 6{,}2 = 80$	$11{,}7 \cdot 1 \cdot 7{,}95 = 93$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{80}{222 \cdot 2000 \cdot 23{,}6 \cdot 10^{-4}} = 0{,}076$	$\frac{93}{222 \cdot 2000 \cdot 23{,}6 \cdot 10^{-4}} = 0{,}089$
Параметр режима работы ТТ A – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{нас}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}91}{0{,}076} = 25$ $25 \cdot (1 - 0{,}86) = 3{,}5$	$\frac{1{,}9}{0{,}089} = 46{,}6$ $21 \cdot (1 - 0{,}86) = 2{,}9$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{нелин} = \frac{y_\varepsilon}{y_{лин}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции; – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	Больше $5T_p$ 10,2	Больше $5T_p$ 9,1

Таблица 1.18

Проверка ДТО по условию надёжной отстройки при КЗ вне зоны действия			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		$K^{(3)}$	$K^{(1)}$
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение ТТ	n	2	2
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1.n*}$	0,84	0,84
Максимальное значение небаланса при внешнем КЗ, отн.ед.	$I_{НБ.КЗ.ВНЕШ*} = \frac{I_{КЗ.ВНЕШ}}{I_Б} \cdot I_{0.1.n*}$	$\frac{25815}{2000} \cdot 0{,}84 = 10{,}8$	$\frac{23368}{1200} \cdot 0{,}42 = 9{,}8$
Проверка условия надёжной отстройки	$I_{Д.ОТС} \geq I_{НБ.КЗ.ВНЕШ*}$	$13{,}6 > 10{,}8$	$13{,}6 > 9{,}8$
Проверка ДТО по условию надёжной отстройки при КЗ вне зоны действия выполнена успешно			

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

1.6.2.2 Проверка ТТ для дифференциального органа с торможением в составе ДЗЛ

Результаты проверки ТТ для дифференциального органа с торможением в составе ДЗЛ приведены в табл. 1.19.

Таблица 1.19

Наименование величины	Обозначение	Значение	
		$K^{(3)}$	$K^{(1)}$
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение ТТ	n	2	2
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока, отн.ед.	$I_{2.1.n*}$	0,24	0,24
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1.n*}$	0,84	0,84
Максимальное значение небаланса при внешнем КЗ, отн.ед.	$I_{\text{НБ.КЗ.ВНЕШ}} = \frac{I_{\text{КЗ.ВНЕШ}}}{I_{\text{Б}}} \cdot I_{0.1.n*}$	$\frac{25815}{2000} \cdot 0{,}84 = 10{,}8$	$\frac{23368}{1200} \cdot 0{,}42 = 9{,}8$
Тормозной ток, отн.ед.	$I_{\text{Т}} = \frac{I_{\text{КЗ.ВНЕШ}}}{I_{\text{Б}}} \cdot \left(1 + I_{2.1.n*}\right)$	$\frac{25815 \cdot (1 + 0{,}24)}{2000} = 16$	$\frac{23368 \cdot (1 + 0{,}24)}{2000} = 14{,}5$
Проверка условия надёжной отстройки	$I_{\text{НБ.КЗ.ВНЕШ}} < k_{\text{Т1}} \cdot I_{\text{Т}}$	$10{,}8 > 0{,}5 \cdot 16$	$9{,}8 > 0{,}5 \cdot 14{,}5$
Условие отстройки дифференциального органа с торможением при КЗ вне зоны действия не выполняется. Максимальная разгрузка ТТ на ПС Б желаемого эффекта не даёт. В данных условиях для обоих полукомплектов ДЗЛ необходимо ввести в работу функцию блокировки при внешних КЗ по направлению векторов первых гармоник вторичных токов смежных ТТ. Тогда выбранный ТТ пригоден для использования в данной схеме ДЗЛ.			

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

2 ПРОВЕРКА И ВЫБОР ТТ КЛАССА Р ДЛЯ ДФЗ С УЧЁТОМ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

2.1 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах ДФЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения, с учётом переходных режимов

Для обеспечения несрабатывания дифференциально-фазной высокочастотной защиты линии при синусоидальных первичных токах ТТ должны проверяться на 10%-ную погрешность при максимальном значении тока внешнего короткого замыкания (вне зоны действия защиты).

С целью проверки правильности функционирования дифференциально-фазной высокочастотной защиты линии, использующей информацию от ТТ класса Р, необходимо произвести расчёты первичных и вторичных токов ТТ при КЗ в характерных точках, показанных на рис. 2.1 и 2.2.

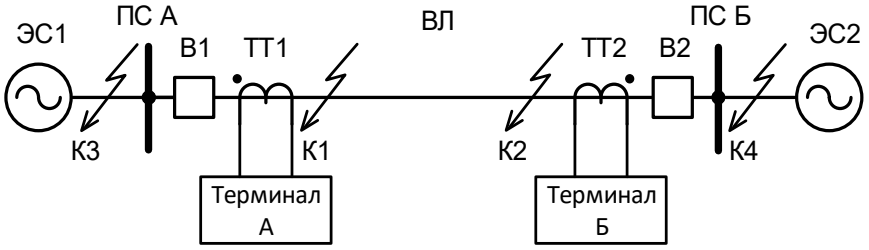


Рисунок 2.1 – Расположение расчетных точек КЗ при включении ДФЗ на ТТ в цепи ВЛ

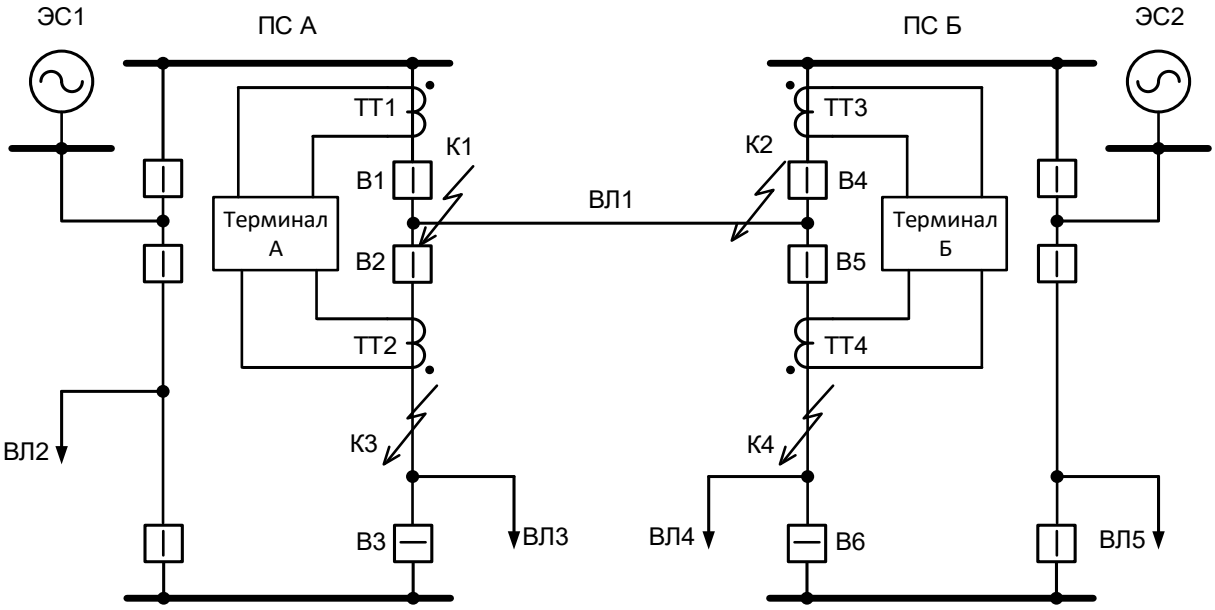


Рисунок 2.2 – Расположение расчетных точек КЗ при включении ДФЗ на сумму токов ТТ в цепях выключателей

На рисунке 2.1 устройство защиты подключено к ТТ, установленным в цепи защищаемой линии ВЛ. Характерные точки в этом случае следующие:

– при близких КЗ вне зоны действия (точки К3 и К4) подпитка места КЗ током с противоположного конца относительно короткой ВЛ при наличии мощного источника питания на противоположном её конце может привести к неселективному срабатыванию ДФЗ;

– близкое КЗ в зоне действия (в месте установки защиты) – точки К1 и К2. Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к замедлению в срабатывании ДФЗ.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

При включении ДФЗ на ТТ в цепи ВЛ (рис. 2.1) в режиме внешнего КЗ в качестве расчетной выбирается точка вблизи ПС с менее мощным эквивалентом энергосистемы (К3 или К4), когда по линии протекает максимальный ток внешнего КЗ. В общем случае проверка проводится поочередно для ТТ обоих концов ВЛ. Однако, если по концам ВЛ установлены ТТ одного типа и нагрузка в их вторичных цепях близка по значению (например, ТТ нагружены только на терминалы ДФЗ), то допускается выполнять проверку ТТ только одного конца ВЛ.

В режиме КЗ в зоне действия при включении ДФЗ на ТТ в цепи ВЛ (рис. 2.1) расчетными являются обе точки К1 и К2. Проверка проводится поочередно для ТТ обоих концов ВЛ:

- для конца ВЛ со стороны ПС А проверяется ТТ1 в режиме КЗ в точке К1;
- для конца ВЛ со стороны ПС Б проверяется ТТ2 в режиме КЗ в точке К2.

На рисунке 2.2 устройства защиты по концам ВЛ1 подключены к ТТ, установленным в цепях выключателей В1, В2 и В4, В5. Наибольшие сквозные токи, протекающие по ТТ2 и ТТ4, имеют место при отключённых выключателях В3 и В6 (ремонтный режим выключателя), соответственно. Насыщение магнитопроводов ТТ одной из групп (находящейся ближе к месту КЗ) может привести к неселективному срабатыванию защиты.

В общем случае проверка и выбор ТТ для ДФЗ должны проводится в режимах КЗ в зоне и вне зоны действия независимо от места установки ТТ. Однако, исследования показали, что при включении ДФЗ на сумму токов в цепях выключателей обеспечить её правильную работу в режимах близких КЗ вне зоны действия путем выбора ТТ класса Р по времени до насыщения не всегда возможно. Поэтому при включении ДФЗ на сумму токов в цепях выключателей необходимо использовать дополнительные меры, например, функцию блокировки при внешних КЗ по направлению векторов первой гармоники вторичных токов ТТ. Тогда при указанном варианте подключения ТТ к устройству защиты проводить проверку при внешнем КЗ не требуется.

В режиме КЗ в зоне действия при включении ДФЗ на ТТ в цепи выключателей (рис. 2.2) расчетными являются обе точки К1 и К2. Наибольшие токи, протекающие по ТТ1 и ТТ3 при КЗ в зоне действия, имеют место при отключённых выключателях В2 и В5 (ремонтный режим выключателя), соответственно. Проверка проводится поочередно для ТТ обоих концов ВЛ:

- для конца ВЛ со стороны ПС А проверяется ТТ1 в режиме КЗ в точке К1;
- для конца ВЛ со стороны ПС Б проверяется ТТ3 в режиме КЗ в точке К2.

2.2 Методика проверки ТТ для ДФЗ по времени до насыщения

2.2.1 Методика проверки ТТ для ДФЗ в режиме КЗ в зоне действия по времени до насыщения

При КЗ в зоне действия и подключении защиты к ТТ, как установленных в цепи защищаемой линии, так и в цепях выключателей, в переходном режиме, особенно при наличии в магнитопроводе ТТ значительной остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака, орган сравнения фаз (ОСФ) в составе ДФЗ может иметь задержку в принятии решения о срабатывании. Исследования показали, что значение задержки определяется временем до насыщения ТТ,

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ и значением коэффициента манипуляции ($k_{ман}$). Кроме того, в режимах однофазного и двухфазного КЗ при насыщении ТТ ОСФ работает правильно и практически без замедления. При этом в режиме трехфазного КЗ возможно существенное замедление в срабатывании ОСФ. Наиболее тяжелым в данном режиме является случай, когда насыщается ТТ той фазы, по симметричным составляющим которой формируется ток манипуляции.

Таким образом, проверку ТТ для ДФЗ в режиме КЗ в зоне действия по времени до насыщения целесообразно проводить только для режима трехфазного КЗ.

В табл. 2.1 приведены минимальные значения времени до насыщения ТТ, при которых время принятия решения ОСФ о КЗ в зоне действия не превышает указанных значений.

Таблица 2.1 – Зависимость времени принятия решения ОСФ о КЗ в зоне действия от значений T_p, $k_{ман}$ и $t_{нас}$

T_p, мс	$k_{ман}$	$t_{нас}$, мс						
		$t_{реш.1}$<20 мс	$t_{реш.1}$<40 мс	$t_{реш.1}$<60 мс	$t_{реш.1}$<80 мс	$t_{реш.1}$<0,1 с	$t_{реш.1}$<0,12 с	$t_{реш.1}$<0,14 с
15	8	> 20 мс	8	1,8	+	+	+	+
	6		6,3	1,8	+	+	+	+
	4		4,8	1,8	+	+	+	+
20	8	> 20 мс	11	11	1,8	+	+	+
	6		8,4	1,8	+	+	+	+
	4		5	1,8	+	+	+	+
30	8	> 20 мс	27,8	27,8	14,3	1,8	+	+
	6		14,6	14,6	1,8	+	+	+
	4		8,5	6,2	1,8	+	+	+
40	8	> 20 мс	28	28	28	1,8	+	+
	6		27,3	27,3	26,4	1,8	+	+
	4		14,5	14,5	1,8	+	+	+
50	8	> 20 мс	30	30	30	30	1,8	+
	6		28	28	28	1,8	+	+
	4		26,3	26,3	1,8	+	+	+
70	8	> 20 мс	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5	1,8
	6		29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	1,8
	4		28,7	28,7	28,7	1,8	+	+
100 и более	8	> 20 мс	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8
	6		30	30	30	30	30	30
	4		29	29	29	29	29	29
Примечания: знак «+» означает, что ОСФ срабатывает на данном периоде не зависимо от значения $t_{нас}$.								

Например, если $k_{ман}$ = 8, T_p = 15 мс, а $t_{нас}$ = 10 мс, то из табл. 2.1 получаем, что гарантированное время принятия решения ОСФ о КЗ в зоне действия не превышает 40 мс (так как при указанных значениях $k_{ман}$ и T_p максимальное значение $t_{нас}$ из табл. 2.1 равно 8 мс). Если же значения $k_{ман}$ и T_p остаются прежними, а $t_{нас}$ уменьшить до 5 мс, то из табл. 2.1 получаем, что гарантированное время принятия решения ОСФ о КЗ в зоне действия увеличивается до 60 мс.

Проверка проводится в следующем порядке:

1. В соответствии с [1] для режимов трехфазного и однофазного КЗ выполняется расчёт времени до насыщения ТТ ($t_{нас}$) по ВАХ или *B*(*H*), а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. В последнем случае необходимо в соответствии с Приложением А данных

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Методических указаний вычислить значение фактической предельной кратности ТТ.

2. Для данных значений коэффициента манипуляции ($k_{ман}$), постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ в зоне действия в выбранной расчетной точке и времени до насыщения ТТ по табл. 2.1 определяется гарантированное время принятия решения ОСФ о КЗ в зоне действия ($t_{реш.1}$).

3. Определяют время отключения КЗ на защищаемой ВЛ действием функции ДФЗ ($t_{откл.КЗ}$) с помощью следующего выражения:

$$t_{откл.КЗ} = t_{реш.1} + \Delta t_{выд} + t_{внутр.рел} + t_{пром.рел} + t_{О.В}\,, \qquad (2.1)$$

где $\Delta t_{выд}$ – значение выдержки времени на срабатывание ДФЗ;

$t_{внутр.рел}$ – время срабатывания внутреннего реле терминала защиты (составляет порядка 10 мс);

$t_{пром.рел}$ – время срабатывания промежуточного реле шкафа защиты (составляет порядка 10 мс);

$t_{О.В}$ – полное время отключения выключателя с учётом времени гашения электрической дуги во всех его полюсах.

4. Полученное значение $t_{откл.КЗ}$ согласовывается в региональном диспетчерском управлении (РДУ). В настоящее время предельно допустимые значения времени отключения КЗ ($t_{пред.доп.откл}$) конкретно для каждого ответственного объекта ЭЭС рассчитываются филиалами СО ЕЭС.

5. Если полученное значение $t_{откл.КЗ}$ удовлетворяет требованиям РДУ, то проверка считается успешно завершённой. Иначе максимально снижают нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм^2).

6. Повторно выполняют расчет времени до насыщения ТТ по ВАХ или характеристикам намагничивания, определяют значение $t_{откл.КЗ}$ и проверяют выполнение следующего условия:

$$t_{пред.доп.откл} \geq t_{откл.КЗ}\,. \qquad (2.2)$$

При положительном результате проверка считается успешно завершённой.

7. Если условие (2.2) не выполняется, то ТТ непригоден для использования в схеме ДФЗ. Необходимо выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий требованиям по условию переходных процессов.

2.2.2 Методика проверки ТТ, установленных в цепи линии, для ДФЗ в режиме КЗ вне зоны действия по времени до насыщения

Исследования показали, что для варианта установки ТТ в цепи линии наиболее «тяжелым» для ОСФ является трехфазное КЗ. В указанном режиме возможно излишнее срабатывание ДФЗ. Причина излишней работы ОСФ в режимах трехфазных КЗ заключается в том, что насыщение одного или нескольких ТТ, установленных в цепи линии, приводит к появлению на достаточно длительное время во вторичных токах обратной последовательности. При этом снижение

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

коэффициента манипуляции до 0 помогает полностью исключить излишнюю работу ОСФ в данном режиме.

В табл. 2.2 для различных сочетаний $k_{ман}$ и T_p приведены предельные значения времени до насыщения ТТ ($t_{доп.2}$), при не превышении которых гарантируется правильное несрабатывание ОСФ в режиме внешнего трехфазного КЗ. Указанные значения $t_{доп.2}$ соответствуют времени принятия решения ОСФ в режиме внешнего трехфазного КЗ ($t_{реш.2}$).

Таблица 2.2 – Значения допустимого времени до насыщения ТТ по правильному несрабатыванию ОСФ в режиме внешнего КЗ

T_p, мс	$k_{ман}$	$t_{доп.2}$, мс
15	8	10
	6	8,2
	4	7
20	8	29
	6	28,2
	4	7,2
30	8	49,1
	6	29,3
	4	27,5
40	8	50,4
	6	49
	4	28,2
50	8	70,5
	6	69,3
	4	47,8
70	8	110
	6	89,3
	4	68
100	8	150
	6	129
	4	90,2
Примечание: при значениях T_p > 100 мс целесообразно применение ТТ класса TPZ.		

Проверка ТТ, установленных в цепи линии, для ДФЗ в режиме КЗ вне зоны действия по времени до насыщения проводится для режима трехфазного КЗ в следующем порядке:

1. Из токов внешних КЗ в точках К3 и К4 на рис. 2.1 выбирается максимальный. Точка, соответствующая указанному току, принимается в качестве расчетной.

2. В соответствии с [1] для режимов трехфазного и однофазного КЗ выполняется расчёт времени до насыщения ТТ ($t_{нас}$) по ВАХ или $B(H)$, а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. В последнем случае необходимо в соответствии с Приложением А данных Методических указаний вычислить значение фактической предельной кратности ТТ.

3. Для данного значения коэффициента манипуляции ($k_{ман}$) и постоянной времени затухания апериодической составляющей тока внешнего КЗ в выбранной расчетной точке по табл. 2.2 определяется значение допустимого времени до насыщения ТТ ($t_{доп.2}$). Время принятия решения при КЗ вне зоны действия для ОСФ соответствует указанному значению значения $t_{доп.2}$ ($t_{реш.2}$ = $t_{доп.2}$).

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

4. ТТ соответствует условиям правильного функционирования ДФЗ в переходном режиме внешнего КЗ, если выполняется следующее неравенство:

$$t_{\text{нас}} \geq t_{\text{реш.2}}, \tag{2.3}$$

5. Если условие (2.3) не выполняется, то максимально снижают нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм^2).

6. Повторно выполняют расчет времени до насыщения ТТ по ВАХ или характеристикам намагничивания и проверяют выполнение условия (2.3). При положительном результате проверка считается успешно завершённой.

7. Если условие (2.3) снова не выполняется, то ТТ непригоден для использования в схеме ДФЗ. Необходимо выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий требованиям по условию переходных процессов.

2.3 Методика выбора ТТ по времени до насыщения для ДФЗ

Должны быть известны следующие исходные данные:

– паспортные данные ТТ и их ВАХ (или *B*(*H*) и размеры магнитопровода);

– токи трёхфазных КЗ для точек, указанных в п. 2.1;

– эквивалентные постоянные времени затухания апериодических составляющих токов КЗ, указанных выше;

– значение коэффициента манипуляции ($k_{\text{ман}}$);

– зависимость времени принятия решения ОСФ о КЗ в зоне действия от значений T_p, $k_{\text{ман}}$ и $t_{\text{нас}}$ (табл. 2.1);

– значения допустимого времени до насыщения ТТ, установленных в цепи линии, для ДФЗ в режиме внешнего трехфазного КЗ (табл. 2.2).

Методика выбора ТТ по условиям правильного функционирования ДФЗ при переходных процессах следующая.

1. Определяют допустимое значение времени принятии решения для ОСФ при КЗ в зоне действия защиты ($t_{\text{реш.1}}$):

$$t_{\text{реш.1}} = t_{\text{пред.доп.откл}} - t_{\text{О.В}} - t_{\text{внутр.рел}} - t_{\text{пром.рел}} - \Delta t_{\text{выд}}. \tag{2.4}$$

где $t_{\text{пред.доп.откл}}$ – предельно допустимые значения времени отключения КЗ. В настоящее время рассчитываются филиалами СО ЕЭС конкретно для каждого ответственного объекта ЭЭС;

$t_{\text{О.В}}$ – полное время отключения выключателя с учётом времени гашения электрической дуги во всех его полюсах;

$t_{\text{внутр.рел}}$ – время срабатывания внутреннего реле терминала защиты (составляет порядка 10 мс);

$t_{\text{пром.рел}}$ – время срабатывания промежуточного реле шкафа защиты (составляет порядка 10 мс);

$\Delta t_{\text{выд}}$ – значение выдержки времени на срабатывание ДФЗ.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

2. Для заданных значений коэффициента манипуляции ($k_{\text{ман}}$), постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ в зоне действия в выбранной расчетной точке и полученного значения $t_{\text{реш.1}}$ по табл. 2.1 определяется допустимое время до насыщения ТТ ($t_{\text{доп.1}}$), при котором ОСФ гарантированно сработает.

3. Допустимое время до насыщения ТТ ($t_{\text{доп.2}}$) при КЗ вне зоны действия ДФЗ определяется следующим образом:

– при включении на ТТ в цепи линии (рис. 2.1) – по табл. 2.2 для данных значений коэффициента манипуляции ($k_{\text{ман}}$) и постоянной времени апериодической составляющей тока внешнего КЗ;

– при включении на сумму токов ТТ в цепях выключателей (рис. 2.2) – с использованием предельно допустимого значения времени отключения по условиям устойчивости ЭЭС по данным филиала СО ЕЭС для объекта заданного класса напряжения:

$$t_{\text{доп.2}} = t_{\text{пред.доп.откл}} - \Delta t_{\text{выд}}, \tag{2.5}$$

(2.6)

4. По значениям $t_{\text{доп}.i}$ и $T_{p.i}^{(j)}$ для ТТ класса Р определяют значения коэффициента переходного режима $K_{\text{п.р}}^{(j)}(t_{\text{реш}i})$ с помощью следующего выражения:

$$K_{\text{п.р}}^{(j)}(t_{\text{доп}.i}) = \omega \cdot T_{p.i}^{(j)} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{доп}.i}}{T_{p.i}^{(j)}}} \right) + 1, \tag{2.7}$$

где i – номер режима КЗ: 1 – внешнее КЗ; 2 – КЗ в зоне действия;

j – вид КЗ в выбранной расчетной точке: 1 – однофазное; 3 – трехфазное;

T_p – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока при КЗ в зоне действия ($I_{\text{КЗ}}$).

Однако, если допустимое время до насыщения ТТ окажется меньше 10 мс, то коэффициент переходного режима $K_{\text{п.р}}^{(j)}(t_{\text{доп}.i})$ для ТТ класса Р рекомендуется определять по значениям $t_{\text{доп}.i}$ и $T_{p.i}^{(j)}$ с помощью диаграмм зависимости $K_{\text{п.р}}(t)$ от времени, приведённых в Приложении А ГОСТ Р 58669-2019 [1].

5. Предварительно по нагрузке присоединения определяют значение номинального первичного тока $I_{1.\text{ном}}$. Значение номинального вторичного тока $I_{2.\text{ном}}$ в электроустановках сверхвысокого напряжения и напряжением 220 кВ целесообразно принять равным 1 А, так как это облегчает условия работы ТТ в переходном режиме по сравнению с номинальным вторичным током, равным 5 А.

6. Производят расчёт фактического сопротивления нагрузки на ТТ ($z_{\text{н.факт}}$).

7. Задаётся номинальное сопротивление нагрузки на ТТ ($z_{\text{н.ном}}$), которое для ТТ с номинальным вторичным током равным 1 А обычно находится в пределах 20 … 100 Ом, а для пятиамперных – 0,8 … 2,4 Ом.

8. Определяется номинальное и фактическое сопротивления ветви вторичного тока ТТ

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

по выражениям:

$$z_{2\sum\text{ном}} = z_2 + z_{\text{н.ном}} \approx 1{,}2 z_{\text{н.ном}}, \tag{2.8}$$

$$z^{(j)}_{2\Sigma\text{факт}} = z_2 + z^{(j)}_{\text{н.факт}} \approx 0{,}2 z_{\text{н.ном}} + z^{(j)}_{\text{н.факт}}, \tag{2.9}$$

где z_2 – сопротивления вторичной обмотки ТТ. При выборе ТТ значение сопротивления его вторичной обмотки допустимо принять равным 20 % от номинальной нагрузки.

9. Находят значения требуемой номинальной предельной кратности ТТ для каждого расчетного режима по выражению:

$$K^{(j)}_{\text{ном.треб}i} = \frac{K^{(j)}_{\text{п.р}}(t_{\text{доп}.i})}{1 - K_r} \cdot \frac{I^{(j)}_{\text{КЗ}.i} \cdot z^{(j)}_{2\Sigma\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}, \tag{2.10}$$

где $I^{(j)}_{\text{КЗ}.i}$ – ток соответствующего вида и режима КЗ.

10. В качестве требуемой номинальной предельной кратности ($K_{\text{ном.треб}}$) принимается максимальное из значений $K^{(j)}_{\text{ном.треб}i}$:

$$K_{\text{ном.треб}} > \max\left(K^{(j)}_{\text{ном.треб}i}\right). \tag{2.11}$$

11. По каталогу находят ТТ класса Р того же класса напряжения с заданным значением номинального первичного тока и номинальной предельной кратностью, соответствующей выражению (2.11), а также с суммой сопротивления вторичной обмотки и номинального сопротивления нагрузки не ниже значения, вычисленного по выражению (2.8).

12. Если подобрать ТТ со значениями параметров не ниже заданных не удаётся, то принимается ТТ с наиболее близкими к заданным значениями. Для указанного ТТ выполняется дополнительная проверка:

$$I_{1.\text{ном}} \cdot K_{\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}} \geq \frac{K^{(j)}_{\text{п.р}}(t_{\text{доп}.i})}{1 - K_r} \cdot I^{(j)}_{\text{КЗ}.i} \cdot z^{(j)}_{2\Sigma\text{факт}}, \tag{2.12}$$

$$z^{(j)}_{2\Sigma\text{факт}} = \sqrt{\left(R_2 + R^{(j)}_{\text{н.факт}}\right)^2 + \left(X_2 + X^{(j)}_{\text{н.факт}}\right)^2}, \tag{2.13}$$

$$z_{2\Sigma\text{ном}} = \sqrt{\left(R_2 + 0{,}8 z_{\text{н.ном}}\right)^2 + \left(X_2 + 0{,}6 z_{\text{н.ном}}\right)^2}. \tag{2.14}$$

13. Если условие (2.12) выполняется, то данный ТТ пригоден для использования в схеме ДТЗ. Иначе следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей) и повторно выполнить расчёт по пунктам 9 – 13.

14. Если вышеуказанная мера окажется неэффективной, следует перейти на ТТ того же класса Р с более высокими значениями первичного тока или номинального сопротивления нагрузки. Повторно выполнить расчёт по пунктам 9 – 13.

15. Если и эта мера окажется неэффективной, то следует выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

2.4 Пример проверки ТТ класса Р для ДФЗ ВЛ-220 кВ с учётом переходных режимов

Исходные данные для проверки ТТ приведены в табл. 2.3 – 2.5.

Таблица 2.3

Параметры ДФЗ		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Коэффициент манипуляции	$k_{ман}$	8
Выдержка на срабатывание, с	$\Delta t_{выд}$	0,02

Таблица 2.4

Исходные данные ТТ (ТФНД-220-II)		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1200
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	30
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	30
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	7
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,54
Число витков вторичной обмотки	w_2	1200
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	21,5*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	1,06

Таблица 2.5

Параметры нагрузки ТТ			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,12	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	150	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 2,5	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{150}{1 \cdot 2{,}5} = 1{,}05$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п} = R_{каб}$	1,05	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 1{,}05 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 1{,}27$	n = 1 при $K^{(3)}$
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{\left(R_2 + R_{н.факт}\right)^2 + \left(X_2 + X_{н.факт}\right)^2}$	$\sqrt{(7+1{,}27)^2 + 0{,}54^2} = 8{,}29$	n = 1 при $K^{(3)}$

2.4.1 Проверка ТТ для ДФЗ ВЛ-220 кВ при КЗ в зоне действия

В режиме КЗ в зоне действия при включении ДФЗ на ТТ в цепи ВЛ (рис. 2.1) расчетными являются обе точки: К1 и К2. Проверка проводится поочередно для ТТ обоих концов ВЛ:

– для конца ВЛ со стороны ПС А проверяется ТТ1 в режиме трехфазного КЗ в точке К1;

– для конца ВЛ со стороны ПС Б проверяется ТТ2 в режиме трехфазного КЗ в точке К2.

Параметры токов при близком КЗ в зоне действия приведены в табл. 2.6.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 2.6

Параметры токов при близком КЗ в зоне действия		
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение при трёхфазном КЗ**
Ток через ТТ1 при КЗ в зоне в точке К1, А	$I_{КЗ.1}$	5 294
Ток через ТТ2 при КЗ в зоне в точке К2, А	$I_{КЗ.2}$	32 157
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс		
При КЗ в зоне в точке К1, мс	$T_{p.1}$	16,8
При КЗ в зоне в точке К2, мс	$T_{p.2}$	34,6

Так как ВАХ ТТ отсутствует, а размеры магнитопровода ТТ известны, то расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) выполняется по *B*(*H*) (см. табл. 2.7).

Таблица 2.7

Результаты расчёта времени до насыщения для ТТ1 и ТТ2			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		Для ТТ1 при КЗ в К1	**Для ТТ2 при КЗ в К2**
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{факт} = \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}}$	$\frac{5294}{1200} = 4{,}41$	$\frac{32157}{1200} = 26{,}8$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 4{,}41 = 0{,}441$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 26{,}8 = 0{,}268$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{нас} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$0{,}441 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 499$	$0{,}268 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 304$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{нас}$	1,88	1,96
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{факт} \cdot I_{2ном} \cdot z_{2\Sigma факт}$	$4{,}41 \cdot 1 \cdot 8{,}29 = 36{,}6$	$26{,}8 \cdot 1 \cdot 8{,}29 = 222$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{36{,}6}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}064$	$\frac{222}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}388$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{нас}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}88}{0{,}064} = 29{,}4$ $29{,}4 \cdot (1 - 0{,}86) = 4{,}1$	$\frac{1{,}96}{0{,}388} = 5{,}05$ $5{,}05 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}71$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{нелин} = \frac{y_\varepsilon}{y_{лин}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции; – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	Больше $5T_p$ 13,7	26,2 3,7

Расчёт выполнен при условии, что соответствующий Филиал СО ЕЭС предоставил данные о допустимом значений времени отключения КЗ ($t_{пред.доп.откл}$) для данной ВЛ-220 кВ:

$$t_{пред.доп.откл} = 0{,}16 \text{ с.}$$

Из результатов проверки ТТ для ДФЗ, приведённых в табл. 2.8, следует, что условие отсутствия замедления в срабатывании для конца ВЛ со стороны ПС Б при максимальном значении коэффициента остаточной намагниченности не выполняется. Максимальная разгрузка ТТ2 желаемого эффекта не даёт. Необходимо выбрать ТТ класса PR.

Исходные данные выбранного ТТ2 класса PR приведены в табл. 2.9.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 2.8

Проверка допустимости замедления в срабатывании ДФЗ в переходном режиме КЗ в зоне				
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**		**Примечания**
		Для ТТ1 при КЗ в К1	**Для ТТ2 при КЗ в К2**	
Время принятия решения ОСФ о КЗ в зоне действия, с	$t_{\text{реш.1}}$	0,04	0,1	По табл. 2.1 для $k_{\text{ман}} = 8$
Время отключения КЗ на защищаемой ВЛ действием функции ДФЗ, с	$t_{\text{откл.КЗ}} = t_{\text{реш.1}} + \Delta t_{\text{выд}} + t_{\text{внутр.рел}} + t_{\text{пром.рел}} + t_{\text{О.В}}$	$0{,}04 + 0{,}02 + 0{,}01 + 0{,}01 + 0{,}035 = 0{,}115$	$0{,}1 + 0{,}02 + 0{,}01 + 0{,}01 + 0{,}035 = 0{,}175$	$\Delta t_{\text{выд}} = 0{,}02$ с, $t_{\text{О.В}} = 0{,}035$ с, $t_{\text{внутр.рел}} = 0{,}01$ с, $t_{\text{пром.рел}} = 0{,}01$ с
Условие отсутствия замедления в срабатывании ДФЗ в переходном режиме КЗ в зоне	$t_{\text{пред.доп.откл}} \geq t_{\text{откл.КЗ}}$	$0{,}16 > 0{,}115$	$0{,}16 < 0{,}175$	$t_{\text{пред.доп. откл}} = 0{,}16$ с
Условие отсутствия замедления в срабатывании выполняется только для конца ВЛ со стороны ПС А (ТТ1). Для конца ВЛ со стороны ПС Б (ТТ2) условие отсутствия замедления в срабатывании не выполняется.				

Редакция от 13.09.2021

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 2.9

Исходные данные ТТ класса PR типа ТВГ-УЭТМ-220-10PR 1000/1			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1000	
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1	
Фактическая номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном.факт}$	58	
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	30	
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8	
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	5,08	
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,66	
Индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом	X_0	3431	
Коэффициент остаточной намагниченности, %	K_r	6,2	
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(5{,}08+1{,}27)^2 + (0{,}66+0)^2} = 6{,}38$	
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(5{,}08+0{,}8\cdot 30)^2 + (0{,}66+0{,}6\cdot 40)^2} = 34{,}6$	

Расчет времени до насыщения для ТТ класса PR выполняется графическим методом с помощью предварительно построенной кривой $K_{п.р}(t)$ по выражению (Б.15) из [16]:

$$K_{п.р}(t) = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) + \frac{\omega T_s}{1+\omega^2 T_s^2} \left[e^{-\frac{t}{T_s}} - \sqrt{1+\omega^2 T_s^2} \sin\left[\omega t + arctg\left(\frac{1}{\omega \cdot T_s} \right) \right] \right].$$

Результаты расчёта времени до насыщения для ТТ2 класса PR приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Расчёт времени до насыщения ТТ2 класса PR типа ТВГ-УЭТМ-220-10PR 1000/1 при КЗ в точке К2			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$A = \frac{I_{1\,ном} \cdot K_{ном.факт} \cdot z_{2\Sigma ном}}{I_{КЗ} \cdot z_{2\Sigma факт}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1000 \cdot 58 \cdot 34{,}6}{32157 \cdot 6{,}38} = 9{,}8$; $9{,}8 \cdot (1 - 0{,}062) = 9{,}2$	$K_r = 0{,}062$
Постоянная времени вторичного контура, с	$T_s = \frac{X_0 + X_2 + X_{н.факт}}{\omega(R_2 + R_{н.факт})}$	$\frac{3431 + 0{,}66}{314 \cdot (5{,}08 + 1{,}27)} = 1{,}72$	
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	71,7 52,9	

Результаты повторной проверки ТТ2 для ДФЗ приведены в табл. 2.11.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 2.11

Повторная проверка отсутствия замедления в срабатывании ДФЗ в переходном режиме КЗ в зоне действия в точке К2 для ТТ2			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечания**
Время принятия решения ОСФ о КЗ в зоне действия, с	$t_{\text{реш.1}}$	< 0,02	$t_{\text{нас.2}} = 52{,}9$ мс. По табл. 2.1 для $k_{\text{ман}} = 8$
Время отключения КЗ на защищаемой ВЛ действием функции ДФЗ, с	$t_{\text{откл.КЗ}} = t_{\text{реш.1}} + \Delta t_{\text{выд}} + t_{\text{внутр.рел}} + $ $+ t_{\text{пром.рел}} + t_{\text{О.В}}$	$0{,}02 + 0{,}02 + 0{,}01 + 0{,}01 + 0{,}035 = 0{,}095$	$\Delta t_{\text{выд}} = 0{,}02$ с, $t_{\text{О.В}} = 0{,}035$ с, $t_{\text{внутр.рел}} = 0{,}01$ с, $t_{\text{пром.рел}} = 0{,}01$ с
Условие отсутствия замедления в срабатывании ДФЗ в переходном режиме КЗ в зоне	$t_{\text{пред.доп.откл}} \geq t_{\text{откл.КЗ}}$	$0{,}16 > 0{,}1$	$t_{\text{пред.доп. откл}} = 0{,}16$ с
Условие отсутствия замедления в срабатывании для конца ВЛ со стороны ПС Б (ТТ2) выполняется. Время принятия решения о срабатывании функции ДФЗ не превышает 20 мс. **Проверка при КЗ в зоне действия завершена успешно.**			

Редакция от 13.09.2021

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таким образом, для конца ВЛ со стороны ПС А замена ТТ1 не требуется, а для конца ВЛ со стороны ПС Б по условию отсутствия замедления в срабатывании при КЗ в зоне действия необходима замена ТТ2, например, на ТТ класса PR типа ТВГ-УЭТМ-220-10PR 1000/1.

2.4.2 Проверка ТТ для ДФЗ ВЛ-220 кВ при КЗ вне зоны действия

При включении ДФЗ на ТТ в цепи ВЛ (рис. 2.1) в режиме внешнего КЗ расчетной является точка вблизи ПС с менее мощным эквивалентом энергосистемы (КЗ или К4), когда по линии протекает максимальный ток внешнего КЗ. В данном примере расчетным является режим внешнего КЗ в точке КЗ (табл. 2.12).

Таблица 2.12

Параметры токов при близком КЗ вне зоны действия		
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение при К(3)**
Ток в линии при КЗ в точке КЗ, А	$I_{КЗ.3}$	4 062
Ток в линии при КЗ в точке К4, А	$I_{КЗ.4}$	2 473
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс		
При КЗ в точке КЗ, мс	$T_{p.3}$	18
При КЗ в точке К4, мс	$T_{p.4}$	17

Проверка проводится поочередно для ТТ обоих концов ВЛ.

Расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) для ТТ1 класса Р, установленного на конце ВЛ со стороны ПС А, выполняется по *B*(*H*) (см. табл. 2.13), а для ТТ2 класса PR, установленного на конце ВЛ со стороны ПС Б – графическим методом с помощью предварительно построенной кривой $K_{п.р}(t)$ по выражению (Б.15) из [16] (см. табл. 2.14).

Таблица 2.13

Результаты расчёта времени до насыщения для ТТ1 класса Р типа ТФНД-220-II в режиме КЗ в точке КЗ		
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{факт} = \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}}$	$\frac{4062}{1200} = 3{,}38$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 3{,}38 = 0{,}338$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{нас} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$0{,}338 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 383$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{нас}$	1,87
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{факт} \cdot I_{2ном} \cdot z_{2\Sigma факт}$	$3{,}38 \cdot 1 \cdot 8{,}29 = 28$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{28}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}048$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{нас}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}87}{0{,}048} = 38{,}2$ $38{,}2 \cdot (1 - 0{,}86) = 5{,}3$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{нелин} = \frac{y_\varepsilon}{y_{лин}} \geq 3$	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции; – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	Больше $5T_p$ 30,9

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 2.14

Расчёт времени до насыщения ТТ2 класса PR типа ТВГ-УЭТМ-220-10PR 1000/1 при КЗ в точке К3			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$A = \frac{I_{1\,\text{ном}} \cdot K_{\text{ном.факт}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}{I_{\text{КЗ}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1000 \cdot 58 \cdot 34{,}6}{4062 \cdot 6{,}38} = 77{,}5$; $77{,}5 \cdot (1 - 0{,}062) = 72{,}7$	$K_r = 0{,}062$
Постоянная времени вторичного контура, с	$T_s = \frac{X_0 + X_2 + X_{\text{н.факт}}}{\omega(R_2 + R_{\text{н.факт}})}$	$\frac{3431 + 0{,}66}{314 \cdot (5{,}08 + 1{,}27)} = 1{,}72$	
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Не насыщается Не насыщается	

Результаты проверки ТТ для ДФЗ при КЗ вне зоны действия приведены в табл. 2.15.

Таблица 2.15

Проверка ТТ по условиям правильного функционирования ДФЗ в переходном режиме внешнего КЗ				
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**		**Примечания**
		ТТ1	**ТТ2**	
Допустимое время до насыщения ТТ в режиме КЗ вне зоны действия ДФЗ, мс	$t_{\text{реш.2}} = t_{\text{доп.2}}$	29		По табл. 2.2. $k_{\text{ман}} = 8$
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения в режиме КЗ вне зоны действия ДФЗ	$t_{\text{нас.1}} > t_{\text{реш.2}}$; $t_{\text{нас.2}} > t_{\text{реш.2}}$	Выпол. (>> 29 мс) Выпол. (30,9>29 мс)	Выпол. (>> 29 мс) Выпол. (>> 29 мс)	
ТТ соответствует условиям правильного функционирования ДФЗ в переходном режиме внешнего КЗ				

2.5 Пример выбора ТТ класса Р для ДФЗ ВЛ-500 кВ с учётом переходных режимов

Выбор ТТ для ДФЗ выполняется в режимах КЗ в зоне и вне зоны действия.

В режиме КЗ в зоне действия расчетными являются точки К1 и К2 (рис. 2.2):

– для конца ВЛ со стороны ПС А проверяется ТТ1 в режиме КЗ в точке К1;

– для конца ВЛ со стороны ПС Б проверяется ТТ3 в режиме КЗ в точке К2.

Параметры токов при близком КЗ в зоне действия приведены в табл. 2.16.

Таблица 2.16

Параметры токов КЗ в расчетных точках		
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение при трёхфазном КЗ**
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К1, А	$I_{\text{КЗ.1}}$	6 852
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К2, А	$I_{\text{КЗ.2}}$	22 595
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс		
При КЗ в точке К1, мс	$T_{p.1}$	33,6
При КЗ в точке К2, мс	$T_{p.2}$	40,9

В режиме КЗ вне зоны действия расчетными являются точки К3 и К4 (рис. 2.2):

– для конца ВЛ со стороны ПС А проверяется ТТ2 в режиме КЗ в точке К3;

– для конца ВЛ со стороны ПС Б проверяется ТТ4 в режиме КЗ в точке К4.

Параметры токов при КЗ вне зоны действия приведены в табл. 2.17.

Таблица 2.17

Параметры токов КЗ в расчетных точках		
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение при трёхфазном КЗ**
Ток через ТТ2 при КЗ в точке К3, А	$I_{\text{КЗ.3}}$	12 074
Ток через ТТ4 при КЗ в точке К4, А	$I_{\text{КЗ.4}}$	25 815
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс		
При КЗ в точке К3, мс	$T_{p.3}$	38,7
При КЗ в точке К4, мс	$T_{p.4}$	40,7

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Необходимые для выбора ТТ параметры ДФЗ приведены в табл. 2.18.

Таблица 2.18

Параметры ДФЗ		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Коэффициент манипуляции	$k_{\text{ман}}$	8
Выдержка на срабатывание, с	$\Delta t_{\text{выд}}$	0,02

Расчёт выполнен при условии, что соответствующий Филиал СО ЕЭС предоставил данные о допустимом значений времени отключения КЗ ($t_{\text{пред.доп.откл}}$) для данной ВЛ-500 кВ:

$$t_{\text{пред.доп.откл}} = 0{,}12 \text{ с.}$$

Определяют допустимое значение времени принятии решения для ОСФ при КЗ в зоне действия защиты ($t_{\text{реш.1}}$):

$$t_{\text{реш.1}} = t_{\text{пред.доп.откл}} - t_{\text{О.В}} - t_{\text{внутр.рел}} - t_{\text{пром.рел}} - \Delta t_{\text{выд}} = 0{,}12 - 0{,}025 - 0{,}01 - 0{,}01 - 0{,}02 = 0{,}055 \text{ с.}$$

Для заданных значений коэффициента манипуляции ($k_{\text{ман}} = 8$), постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ в зоне действия в выбранной расчетной точке (приближенно равна 40 мс) и полученного значения $t_{\text{реш.1}}$ = 0,055 с по табл. 2.1 определяется допустимое время до насыщения ТТ ($t_{\text{доп.1}}$), при котором ОСФ гарантированно сработает:

$$t_{\text{доп.1}} = t_{\text{доп.1.К1}} \approx t_{\text{доп.1.К2}} \approx 28 \text{ мс.}$$

В данном примере ДФЗ подключается на сумму токов ТТ в цепях выключателей (рис. 2.2), по указанной причине допустимое время до насыщения ТТ ($t_{\text{доп.2}}$) при КЗ вне зоны действия определяется с использованием предельно допустимого значения времени отключения по условиям устойчивости ЭЭС по данным филиала СО ЕЭС для объекта заданного класса напряжения:

$$t_{\text{доп.2}} = t_{\text{пред.доп.откл}} - \Delta t_{\text{выд}} = 0{,}12 - 0{,}02 = 0{,}1 \text{ с,}$$

Так как допустимые времена до насыщения ТТ принимают значения больше 10 мс, то коэффициент переходного режима $K_{\text{п.р}}^{(j)}(t_{\text{доп.}i})$ определяют по значениям $t_{\text{доп.}i}$ и $T_{p.i}^{(j)}$ с помощью выражения (2.7):

– для конца ВЛ со стороны ПС А:

$$K_{\text{п.р.}K1}(t_{\text{доп.1}}) = \omega \cdot T_{p.K1}\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{доп.1}}}{T_{p.K1}}}\right) + 1 = 314 \cdot 0{,}0336 \cdot \left(1 - e^{-\frac{0{,}028}{0{,}0336}}\right) + 1 = 7\,;$$

$$K_{\text{п.р.}K3}(t_{\text{доп.2}}) = \omega \cdot T_{p.K3}\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{доп.2}}}{T_{p.K3}}}\right) + 1 = 314 \cdot 0{,}0387 \cdot \left(1 - e^{-\frac{0{,}1}{0{,}0387}}\right) + 1 = 12{,}2\,;$$

– для конца ВЛ со стороны ПС Б:

$$K_{\text{п.р.}K2}(t_{\text{доп.1}}) = \omega \cdot T_{p.K2}\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{доп.1}}}{T_{p.K2}}}\right) + 1 = 314 \cdot 0{,}0409 \cdot \left(1 - e^{-\frac{0{,}028}{0{,}0409}}\right) + 1 = 7{,}4\,;$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$$K_{\text{п.р.}K4}(t_{\text{доп.2}}) = \omega \cdot T_{p.K4}\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{доп.2}}}{T_{p.K4}}}\right) + 1 = 314 \cdot 0{,}0407 \cdot \left(1 - e^{-\frac{0{,}1}{0{,}0407}}\right) + 1 = 12{,}7\,;$$

По нагрузке присоединения определяется значение номинального первичного тока $I_{1.\text{ном}}$ = 2000 А. Значение номинального вторичного тока $I_{2.\text{ном}}$ в электроустановках сверхвысокого напряжения целесообразно принять равным 1 А. Расчёт фактического сопротивления нагрузки на ТТ приведен в табл. 2.19.

Таблица 2.19

Параметры нагрузки ТТ			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{\text{терм}}$	0,12	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_{\text{н}}$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{\text{пер}}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{\text{т.ц}}$	250	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_{\text{ж}}$	Cu – 24	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_{\text{ж}}$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{\text{каб}} = \rho \cdot \frac{L_{\text{т.ц}}}{k_{\text{ж}} \cdot S_{\text{ж}}}$	$0{,}0175 \cdot \frac{250}{1 \cdot 4} = 1{,}1$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{\text{н.п}} = R_{\text{каб}}$	1,1	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{\text{н.факт}} = n \cdot R_{\text{каб}} + m \cdot R_{\text{терм}} + R_{\text{пер}}$	$1 \cdot 1{,}1 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 1{,}32$	n = 1 при $K^{(3)}$

Так как косинус угла фактического сопротивления нагрузки на ТТ равен 1, то

$$z_{\text{н.факт}} = R_{\text{н.факт}}.$$

Задаётся номинальное сопротивление нагрузки на ТТ ($z_{\text{н.ном}}$), которое для ТТ с номинальным вторичным током равным 1 А обычно находится в пределах 20 … 100 Ом. Пусть $z_{\text{н.ном}}$ = 40 Ом. Значение сопротивления вторичной обмотки ТТ допустимо принять равным 20 % от номинальной нагрузки.

Определяются номинальное и фактическое сопротивления ветви вторичного тока ТТ по выражениям:

$$z_{2\sum\text{ном}} = 1{,}2 z_{\text{н.ном}} = 1{,}2 \cdot 40 = 48 \text{ Ом},$$

$$z_{2\sum\text{факт}} = 0{,}2 z_{\text{н.ном}} + z_{\text{н.факт}} = 0{,}2 \cdot 40 + 1{,}32 = 9{,}32 \text{ Ом}.$$

Находят значения требуемой номинальной предельной кратности ТТ для каждого расчетного режима по выражению:

– для конца ВЛ со стороны ПС А

$$K_{\text{ном.треб}K1} = \frac{K_{\text{п.р.}K1}(t_{\text{доп.1}})}{1 - K_r} \cdot \frac{I_{\text{КЗ.}K1} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}} = \frac{7}{1 - 0{,}86} \cdot \frac{6852 \cdot 9{,}32}{2000 \cdot 48} \approx 33{,}3\,;$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$$K_{\text{ном.треб}K3} = \frac{K_{\text{п.р.}K3}(t_{\text{доп.2}})}{1-K_r} \cdot \frac{I_{\text{КЗ.}K3} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}} = \frac{12{,}2}{1-0{,}86} \cdot \frac{12074 \cdot 9{,}32}{2000 \cdot 48} \approx 102.$$

– для конца ВЛ со стороны ПС Б

$$K_{\text{ном.треб}K2} = \frac{K_{\text{п.р.}K2}(t_{\text{доп.1}})}{1-K_r} \cdot \frac{I_{\text{КЗ.}K2} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}} = \frac{7{,}4}{1-0{,}86} \cdot \frac{22595 \cdot 9{,}32}{2000 \cdot 48} \approx 116;$$

$$K_{\text{ном.треб}K4} = \frac{K_{\text{п.р.}K4}(t_{\text{доп.2}})}{1-K_r} \cdot \frac{I_{\text{КЗ.}K4} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}} = \frac{12{,}7}{1-0{,}86} \cdot \frac{25815 \cdot 9{,}32}{2000 \cdot 48} \approx 227.$$

2.5.1 Выбор ТТ для полукомплекта ДФЗ ВЛ-500 кВ конца ВЛ со стороны ПС А

Для конца ВЛ со стороны ПС А можно подобрать ТТ класса Р по условию КЗ в зоне действия:

$$K_{\text{ном.треб}} = 33{,}3,$$

при этом необходимо ввести в работу функцию блокировки при внешних КЗ по направлению токов.

Выбирается ТТ класса Р с наиболее близкими к заданным ($I_{1.\text{ном}}$ = 2000 А; $z_{\text{н.ном}} = 40$ Ом; $K_{\text{ном}} = 33{,}3$) значениями параметров – ТФРМ-500Б У1. Исходные данные ТТ приведены в табл. 2.20.

Таблица 2.20

Параметры предварительно выбранного ТТ1 типа ТФРМ-500Б У1		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.\text{ном}}$	2000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.\text{ном}}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{\text{ном}}$	18
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{\text{н.ном}}$	40
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	4,23
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0
Число витков вторичной обмотки	w_2	2000
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	23,6*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	2,28

Однако паспортные значения номинальных предельных кратностей ТТ могут быть занижены. Поэтому рекомендуется выбирать ТТ по фактическому значению номинальной предельной кратности.

Паспортное значение номинальной предельной кратности для указанного ТТ класса Р типа ТФРМ-500Б У1 равно 18. Определим паспортное значение амплитуды магнитной индукции в магнитопроводе ТТ ($B_{m.\text{пасп}}$), соответствующее паспортному значению номинальной предельной кратности первичного тока ТТ $K_{\text{ном.пасп}}$ в условиях 10%-ной погрешности с помощью следующего выражения:

$$B_{\text{нас.пасп}} = \frac{K_{\text{ном.пасп}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot \sqrt{(R_2 + 0{,}8 \cdot Z_{\text{н.ном}})^2 + (X_2 + 0{,}6 \cdot Z_{\text{н.ном}})^2}}{222 \cdot w_2 \cdot s_{\text{м}}} =$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$$=\frac{18\cdot 1\cdot\sqrt{(4{,}23+0{,}8\cdot 40)^2+(0+0{,}6\cdot 40)^2}}{222\cdot 2000\cdot 23{,}6\cdot 10^{-4}}=0{,}75\ \text{Тл}.$$

Фактическое значение амплитуды магнитной индукции насыщения приближенно равно

$$B_{\text{нас.факт}}=1{,}9\ \text{Тл}.$$

Определим фактическое значение номинальной предельной кратности тока ТТ с помощью следующего выражения:

$$K_{\text{ном.факт}}=K_{\text{ном.пасп}}\frac{B_{\text{нас.факт}}}{B_{\text{нас.пасп}}}=18\cdot\frac{1{,}9}{0{,}75}=45{,}6\ .$$

Таким образом, фактическое значение номинальной предельной кратности больше требуемого (45,6 > 33,3), т.е. ТТ класса Р типа ТФРМ-500Б У1 2000/1 подходит для полукомплекта ДФЗ конца ВЛ со стороны ПС А.

2.5.2 Выбор ТТ для полукомплекта ДФЗ ВЛ-500 кВ конца ВЛ со стороны ПС Б

Для конца ВЛ со стороны ПС Б выбрать ТТ класса Р, удовлетворяющий требованиям по условию переходных процессов при K_r = 0,86, невозможно. Необходимо выбрать ТТ класса PR того же класса напряжения со значением номинального первичного тока $I_{1.\text{ном}}$ = 2000 А и значениями номинального и фактического сопротивлений ветви вторичного тока ТТ:

$$z_{2\sum\text{ном}}=1{,}2z_{\text{н.ном}}=1{,}2\cdot 40=48\ \text{Ом},$$

$$z_{2\sum\text{факт}}=0{,}2z_{\text{н.ном}}+z_{\text{н.факт}}=0{,}2\cdot 40+1{,}32=9{,}32\ \text{Ом}.$$

Постоянная времени вторичного контура ориентировочно принимается равной T_s = 1,5 с.

Для конца ВЛ со стороны ПС Б по значениям $t_{\text{доп}.i}$, $T_{p.i}$ и T_s определяют значения коэффициента переходного режима $K_{\text{п.р}}(t_{\text{реш}i})$ ТТ класса PR с помощью выражения (Б.15) из [16]:

$$K_{\text{п.р}}(t)=\frac{\omega\cdot T_p\cdot T_s}{T_p-T_s}\left(e^{-\frac{t}{T_p}}-e^{-\frac{t}{T_s}}\right)+\frac{\omega\cdot T_s}{1+(\omega\cdot T_s)^2}\left[e^{-\frac{t}{T_s}}-\sqrt{1+(\omega\cdot T_s)^2}\sin\left(\omega\cdot t+arctg\frac{1}{\omega\cdot T_s}\right)\right];$$

$$K_{\text{п.р}.K2}(t_{\text{доп}.1})=\frac{314\cdot 0{,}0409\cdot 1{,}5}{0{,}0409-1{,}5}\left(e^{-\frac{0{,}028}{0{,}0409}}-e^{-\frac{0{,}028}{1{,}5}}\right)+\frac{314\cdot 1{,}5}{1+(314\cdot 1{,}5)^2}\cdot$$

$$\cdot\left[e^{-\frac{0{,}028}{1{,}5}}-\sqrt{1+(314\cdot 1{,}5)^2}\sin\left(314\cdot 0{,}028+arctg\frac{1}{314\cdot 1{,}5}\right)\right]=5{,}7;$$

$$K_{\text{п.р}.K4}(t_{\text{доп}.2})=\frac{314\cdot 0{,}0407\cdot 1{,}5}{0{,}0407-1{,}5}\left(e^{-\frac{0{,}1}{0{,}0407}}-e^{-\frac{0{,}1}{1{,}5}}\right)+\frac{314\cdot 1{,}5}{1+(314\cdot 1{,}5)^2}\cdot$$

$$\cdot\left[e^{-\frac{0{,}1}{1{,}5}}-\sqrt{1+(314\cdot 1{,}5)^2}\sin\left(314\cdot 0{,}1+arctg\frac{1}{314\cdot 1{,}5}\right)\right]=11{,}2$$

Находят значения требуемой номинальной предельной кратности ТТ класса PR для конца

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

ВЛ со стороны ПС Б по выражению:

$$K_{\text{ном.треб}K2} = \frac{K_{\text{п.р.}K2}(t_{\text{доп.1}})}{1-K_r} \cdot \frac{I_{\text{КЗ.}K2} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}} = \frac{5{,}7}{1-0{,}093} \cdot \frac{22595 \cdot 9{,}32}{2000 \cdot 48} \approx 14;$$

$$K_{\text{ном.треб}K4} = \frac{K_{\text{п.р.}K4}(t_{\text{доп.2}})}{1-K_r} \cdot \frac{I_{\text{КЗ.}K4} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}} = \frac{11{,}2}{1-0{,}093} \cdot \frac{25815 \cdot 9{,}32}{2000 \cdot 48} \approx 31.$$

Выбирается ТТ класса PR с наиболее близкими к заданным ($I_{1.\text{ном}}$ = 2000 А; $z_{\text{н.ном}} = 40$ Ом; $K_{\text{ном}} = 31$) значениями параметров. Исходные данные ТТ класса PR приведены в табл. 2.21.

Таблица 2.21

Исходные данные ТТ класса PR типа ТВГ-УЭТМ-330/500 2000/1		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.\text{ном}}$	2000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.\text{ном}}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{\text{ном}}$	30
Фактическая номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{\text{ном.факт}}$	117,3
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{\text{н.ном}}$	30
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	11,66
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0
Индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом	X_0	16314
Постоянная времени вторичного контура, с	T_s	1,46
Коэффициент остаточной намагниченности, %	K_r	9,3

Таким образом, фактическое значение номинальной предельной кратности значительно больше максимального требуемого (117,3 > 31), т.е. ТТ класса PR типа ТВГ-УЭТМ-330/500 2000/1 подходит для полукомплекта ДФЗ конца ВЛ со стороны ПС Б. При этом нет необходимости использовать функцию блокировки при внешних КЗ по направлению токов.

Выбор ТТ успешно завершен.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

3 ПРОВЕРКА И ВЫБОР ТТ КЛАССА Р ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ШИН И ОШИНОВКИ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С УЧЁТОМ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

3.1 Расчётные точки КЗ для ДЗШ и ДЗО

Для обеспечения несрабатывания ДЗШ и ДЗО при синусоидальных первичных токах ТТ должны проверяться на 10%-ную погрешность при максимальном значении тока внешнего короткого замыкания (вне зоны действия защиты).

С целью проверки правильности функционирования ДЗШ и ДЗО, использующих информацию от ТТ класса Р, необходимо произвести расчёты первичных и вторичных токов ТТ при КЗ в характерных точках, показанных на рис. 3.1 и 3.2.

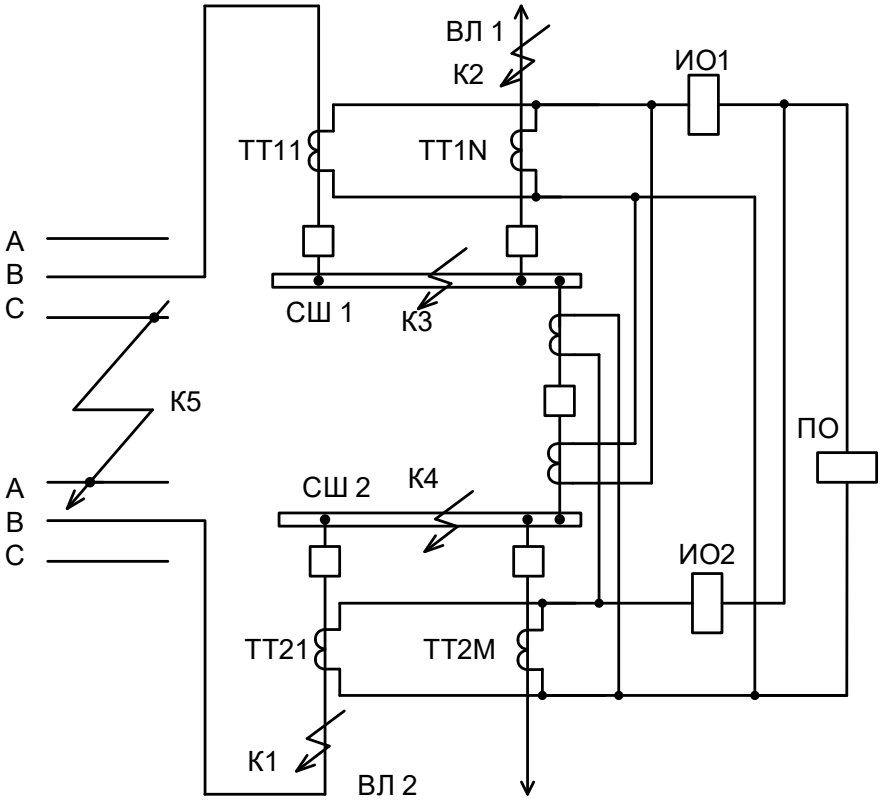


Рисунок 3.1 – Расположение расчетных точек КЗ для ДЗШ двойной системы шин

Характерные точки для ДЗШ следующие:

– близкое трёхфазное или однофазное КЗ вне зоны действия избирательных органов ИО1 первой системы или секции шин СШ1 (точка К2). Насыщение магнитопроводов ТТ повреждённых фаз может привести к неселективному срабатыванию избирательных органов ИО1 и пускового органа ПО защиты;

– близкое трёхфазное или однофазное КЗ вне зоны действия избирательных органов ИО2 второй системы или секции шин СШ2 (точка К1). Насыщение магнитопроводов ТТ повреждённых фаз может привести к неселективному срабатыванию избирательных органов ИО2 второй системы или секции шин СШ2 и пускового органа ПО защиты;

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

– близкое двухфазное КЗ вне зоны действия на смежных присоединениях, подключённых к разным системам или секциям шин, при которых замыкаются накоротко разные фазы указанных присоединений (точка К5). Насыщение магнитопроводов ТТ неповреждённых фаз может привести к неселективному срабатыванию быстродействующих избирательных органов одной или обеих систем (секций) шин и пускового органа ПО защиты;

– близкое КЗ в зоне действия избирательных органов ИО1 первой системы шин СШ1 – точка К3. Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к замедлению в срабатывании ИО1 и ПО на время, в первом приближении превышающее значение постоянной времени T_p;

– близкое КЗ в зоне действия избирательных органов ИО2 второй системы шин СШ2 – точка К4. Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к замедлению в срабатывании ИО2 и ПО на время, в первом приближении превышающее значение постоянной времени T_p.

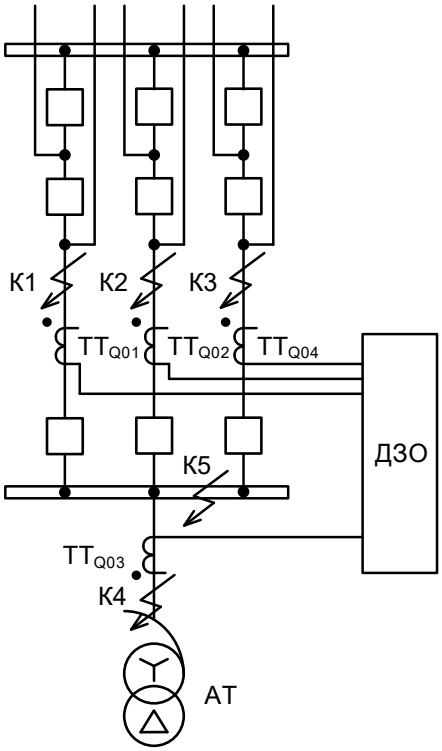


Рисунок 3.2 – Схема подключения защиты ошиновки

Кроме того, необходимо учитывать, что при близком однофазном КЗ вне зоны действия избирательных органов ИО1 и ИО2 (точки К2 и К1) насыщение магнитопроводов ТТ неповреждённых фаз может привести к неселективному срабатыванию указанных ИО и пускового органа ПО защиты.

Характерные точки для ДЗО следующие:

– близкое трёхфазное или однофазное КЗ вне зоны действия ДЗО (точки К1 – К4). Насыщение магнитопроводов ТТ повреждённых фаз может привести к неселективному срабатыванию защиты;

– близкое однофазное КЗ вне зоны действия (точки К1 – К4). Насыщение магнитопроводов ТТ неповреждённых фаз может привести к неселективному срабатыванию защиты;

– близкое КЗ в зоне действия ДЗО – точка К5. Насыщение магнитопроводов ТТ может

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

привести к замедлению в срабатывании защиты на время, в первом приближении превышающее значение постоянной времени T_p.

3.2 Методика проверки ТТ для ДЗШ и ДЗО при КЗ в зоне действия защиты

Проверка при КЗ в зоне действия для ТТ защищаемых объектов выполняется по времени до насыщения. Указанное время для ДЗШ (ДЗО) должно быть не менее, чем время принятия решения о срабатывании при КЗ в зоне действия. Для ДЗШ (ДЗО) серии ШЭ2607 и ШЭ2710 время принятия решения о срабатывании быстродействующим органом не превышает 5 мс с момента начала КЗ. Т.е. в течение 5 мс при КЗ в зоне действия ТТ не должен насыщаться.

Если условие по времени до насыщения ТТ не выполняется и для данного объекта защиты допустимо замедление в срабатывании ДЗШ (ДЗО) на 20 мс, то следует выполнить проверку условия срабатывания медленнодействующего органа на втором периоде КЗ (второй этап проверки).

Идеология второго этапа проверки заключается в следующем. Медленнодействующий орган защиты распознаёт КЗ в зоне действия, если выпрямленный дифференциальный ток на периоде основной частоты 50 Гц имеет два импульса, превышающие порог срабатывания защиты. Проверка заключается в вычислении на расчётном периоде мгновенного значения второй полуволны дифференциального тока и сравнения его с порогом срабатывания защиты, учитывающим влияние тормозного тока.

Порядок проверки функционирования ДЗШ (ДЗО) при КЗ в зоне действия в условиях насыщения ТТ следующий.

1. В соответствии с [1] для режимов трехфазного и однофазного КЗ для каждого ТТ, входящего в состав ДЗШ (ДЗО), выполняется расчёт времени до насыщения ($t_{\text{нас}}$) по ВАХ или $B(H)$, а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. В последнем случае необходимо в соответствии с Приложением А данных Методических указаний вычислить значение фактической предельной кратности ТТ.

2. Время до насыщения ТТ сравнивается с временем принятия решения ДЗШ (ДЗО) при КЗ в зоне действия:

$$t_{\text{нас}} \geq t_{\text{реш.1}}, \tag{3.1}$$

где $t_{\text{реш.1}}$ – время принятия решения ДЗШ (ДЗО) о КЗ в зоне действия. По данным производителя $t_{\text{реш.1}}$ = 5 мс.

3. Если условие (3.1) выполняется, то ТТ пригоден для использования в схеме ДЗШ (ДЗО) и проверка считается успешно завершённой.

4. Если условие (3.1) не выполняется, то переходят к проверке условия срабатывания медленнодействующего органа на втором периоде КЗ в зоне действия.

5. Для второго периода с помощью рис. Б.5 (Приложение Б) определяют момент насыщения ТТ $t_{\text{нас}}^{(2)}$. Указанное выполняется для ТТ всех присоединений, время до первого момента насыщения, у которых не превышает 0,02 с.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

6. Из полученных значений $t_{\text{нас}}^{(2)}$ выбирают минимальное ($t_{\text{нас.min}}^{(2)}$).

7. Вычисляют эквивалентную постоянную времени затухания периодической составляющей ($T_{p.\text{экв}}$) и относительное мгновенное значение дифференциального тока $I_{\text{Д.1*}}$ в момент времени $t_{\text{нас.min}}^{(2)}$, соответственно, с помощью следующих выражений:

$$T_{p.\text{экв}} = \frac{1}{I_{\text{КЗ}\Sigma}} \left(\sum_{i=1}^{n} \left(I_{\text{КЗ}.i} \cdot T_{p.i} \right) \right), \tag{3.2}$$

$$I_{\text{Д.1*}} = \frac{I_{\text{КЗ}\Sigma}}{I_{\text{Б}}} \cdot \left(e^{-\frac{t_1}{T_{p.\text{экв}}}} - \cos[\omega \cdot t_1] \right), \tag{3.3}$$

где $I_{\text{КЗ}\Sigma}$ – суммарный ток КЗ;

$I_{\text{КЗ}.i}$ – ток КЗ в i -ой ветви;

$I_{\text{Б}}$ – базисный ток;

$T_{p.i}$ – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока в i-ой ветви;

t_1 – интервал времени от момента начала режима КЗ в зоне действия до момента времени $t_{\text{нас.min}}^{(2)}$:

$$t_1 = 0{,}02 + t_{\text{нас.min}}^{(2)}. \tag{3.4}$$

8. Вычисляют относительное мгновенное значение дифференциального тока ($I_{\text{Д.2*}}$) в момент времени (t_2), соответствующий максимальному по модулю мгновенному значению суммарного тока на второй половине второго периода, по следующему выражению:

$$I_{\text{Д.2*}} = \frac{I_{\text{КЗ}\Sigma}}{I_{\text{Б}}} \cdot \left| e^{-\frac{t_2}{T_{p.\text{экв}}}} - \cos[\omega \cdot t_2] \right|, \tag{3.5}$$

где t_2 = 0,04 с.

9. Вычисляют относительное мгновенное значение тормозного тока в момент времени t_2

$$I_{\text{Т.2*}} = \frac{1}{2} \max \left(I_{\text{Д.1*}} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_{\text{ин}}}}; I_{\text{Д.2*}} \right), \tag{3.6}$$

где $T_{\text{ин}}$ – постоянная времени инерционного звена в контуре тормозного тока (принимается равной 40 мс).

10. Ток срабатывания $I_{\text{ср.2}}$ рассчитывают по выражению:

$$I_{\text{ср.2*}} = I_{\text{Д.0*}} + k_{\text{Т}} \left(I_{\text{Т.2*}} - I_{\text{Т.0*}} \right), \tag{3.7}$$

где $I_{\text{Д.0*}}$ – начальный ток срабатывания;

$I_{\text{Т.0*}}$ – ток начала торможения;

$k_{\text{Т}}$ – коэффициент торможения.

11. Проверяют условие срабатывания ДЗШ (ДЗО):

$$I_{\text{Д.2*}} > I_{\text{ср.2*}}. \tag{3.8}$$

12. При положительном результате проверка считается успешно завершённой.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

13. Иначе следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей) и повторно выполнить расчет времени до насыщения.

Следует учитывать, что нагрузка на ТТ влияет только на продолжительность времени до первого момента насыщения. После первого момента насыщения в переходном процессе погрешности ТТ не зависят от его нагрузки. Поэтому значение $I_{Д.1*}$, вычисленное по выражению (3.3), также не зависит от нагрузки на ТТ.

14. Если вычисленное повторно время до насыщения превысит значение времени принятия решения ДЗШ (ДЗО) о КЗ в зоне действия защиты ($t_{реш.1}$ = 5 мс), то ТТ пригоден для использования в схеме ДЗШ (ДЗО). Проверка закончена с положительным результатом. Иначе – ТТ не пригоден для использования в схеме ДЗШ (ДЗО) данного объекта, и проверка закончена с отрицательным результатом. Необходимо выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий требованиям по условию переходных процессов.

3.3 Методика проверки ТТ для ДЗШ и ДЗО при близком КЗ вне зоны действия

С целью обеспечения правильного несрабатывания ДЗШ (ДЗО) при внешнем КЗ в её составе имеется блокирующий орган, реагирующий на отставание во времени появления дифференциального тока от тормозного. Указанное отставание определяется временем до насыщения ТТ. Наименьшее время отставания получается при близком внешнем КЗ.

Блокирующий орган ДЗШ (ДЗО) распознает внешнее КЗ за 2 мс с момента начала КЗ. После чего блокирует измерительные органы ДЗШ (ДЗО) на время до 300 мс, за которое апериодическая составляющая тока переходного процесса безусловно затухнет.

Порядок проверки следующий:

1. В соответствии с [1] для режимов трехфазного и однофазного КЗ для каждого ТТ, входящего в состав ДЗШ (ДЗО), выполняется расчёт времени до насыщения ТТ ($t_{нас}$) по ВАХ или *B*(*H*), а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. В последнем случае необходимо в соответствии с Приложением А данных Методических указаний вычислить значение фактической предельной кратности ТТ.

2. Время до насыщения ТТ сравнивается с временем принятия решения блокирующим органом:

$$t_{нас} \geq t_{реш.2}, \tag{3.9}$$

где $t_{реш.2}$ – время принятия решения блокирующим органом при КЗ вне зоны действия. По данным производителя $t_{реш.1}$ = 2 мс.

3. Если условие выполняется, то ТТ пригоден для использования в схеме ДЗШ (ДЗО) и проверка считается успешно завершённой.

4. Если условие (3.9) не выполняется, то максимально снижают нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм^2).

5. Повторно выполняют расчет времени до насыщения ТТ и проверяют выполнение условия (3.9).

6. При положительном результате сравнения проверка считается успешно завершённой.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

7. Если результат проверки оказался отрицательным, то ТТ непригоден для использования в схеме ДЗШ (ДЗО). Необходимо выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий требованиям по условию переходных процессов.

3.4 Методика выбора ТТ по времени до насыщения для ДЗШ и ДЗО

Задачу выбора ТТ по условию координации их функционирования с ДЗШ (ДЗО) можно сформулировать в следующем виде: подобрать ТТ с номинальными параметрами (номинальные первичный $I_{1.ном}$ и вторичный $I_{2.ном}$ токи, номинальная предельная кратность тока $K_{ном}$, номинальное сопротивление нагрузки), при которых выполняется неравенство:

$$t_{нас} \geq t_{реш}.$$

Должны быть известны следующие исходные данные:

– паспортные данные ТТ и его ВАХ (или *B*(*H*) и размеры магнитопровода);

– токи трёхфазных и однофазных КЗ для точек, указанных на рис. 3.1 (рис. 3.2);

– эквивалентные постоянные времени затухания апериодических составляющих токов КЗ, указанных выше;

– время принятия решения быстродействующим органом ДЗШ (ДЗО) при КЗ в зоне действия ($t_{реш.1}$ по данным производителя 5 мс);

– время принятия решения блокирующим органом ДЗШ (ДЗО) при внешнем КЗ ($t_{реш.2}$ по данным производителя 2 мс).

Медленнодействующий измерительный орган не проверяется при внешних КЗ, так как по принципу действия он не реагирует на них.

В общем случае для ДЗШ (ДЗО) по времени до насыщения необходимо провести выбор всех ТТ указанных защит. При этом должны рассматриваться режимы КЗ в зоне и близкого вне зоны действия с максимально возможными токами через соответствующий ТТ.

Методика выбора ТТ по условиям правильного функционирования ДЗШ (ДЗО) при переходных процессах следующая.

1. Так как время принятия решения быстродействующим органом значительно меньше 10 мс, то коэффициент переходного режима $K_{п.р}^{(j)}(t_{реш\,i})$ для ТТ класса Р рекомендуется определять по значениям $t_{реш.i}$ и $T_{p.i}^{(j)}$ с помощью диаграмм зависимости $K_{п.р}(t)$ от времени, приведённых в Приложении А ГОСТ Р 58669-2019 [1]. При этом под i понимается номер режима КЗ: 1 – внешнее КЗ; 2 – КЗ в зоне действия, а под j – вид КЗ в выбранной расчетной точке: 1 – однофазное; 3 – трехфазное.

2. Предварительно по нагрузке присоединения определяют значение номинального первичного тока $I_{1.ном}$. Значение номинального вторичного тока $I_{2.ном}$ в электроустановках сверхвысокого напряжения и напряжением 220 кВ целесообразно принять равным 1 А, так как это облегчает условия работы ТТ в переходном режиме по сравнению с номинальным вторичным током, равным 5 А.

3. Производят расчёт фактического сопротивления нагрузки на ТТ ($z_{н.факт}$).

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

4. Задаётся номинальное сопротивление нагрузки на ТТ ($z_{\text{н.ном}}$), которое для ТТ с номинальным вторичным током равным 1 А обычно находится в пределах 20 … 100 Ом, а для пятиамперных – 0,8 … 2,4 Ом.

5. Определяется номинальное и фактическое сопротивления ветви вторичного тока ТТ по выражениям:

$$z_{2\sum\text{ном}} = z_2 + z_{\text{н.ном}} \approx 1{,}2 z_{\text{н.ном}}, \tag{3.10}$$

$$z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)} = z_2 + z_{\text{н.факт}}^{(j)} \approx 0{,}2 z_{\text{н.ном}} + z_{\text{н.факт}}^{(j)}, \tag{3.11}$$

где z_2 – сопротивления вторичной обмотки ТТ. При выборе ТТ значение сопротивления его вторичной обмотки допустимо принять равным 20 % от номинальной нагрузки.

6. Находят значения требуемой номинальной предельной кратности ТТ для каждого расчетного режима по выражению:

$$K_{\text{ном.треб}i}^{(j)} = \frac{K_{\text{п.р}}^{(j)}(t_{\text{реш}i})}{1-K_r} \cdot \frac{I_{\text{КЗ}.i}^{(j)} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}, \tag{3.12}$$

где $I_{\text{КЗ}.i}^{(j)}$ – ток соответствующего вида и режима КЗ.

7. В качестве требуемой номинальной предельной кратности ($K_{\text{ном.треб}}$) принимается максимальное из значений $K_{\text{ном.треб}i}^{(j)}$:

$$K_{\text{ном.треб}} > \max\left(K_{\text{ном.треб}i}^{(j)}\right). \tag{3.13}$$

8. По каталогу находят ТТ класса Р того же класса напряжения с заданным значением номинального первичного тока и номинальной предельной кратностью, соответствующей выражению (3.13), а также с суммой сопротивления вторичной обмотки и номинального сопротивления нагрузки не ниже значения, вычисленного по выражению (3.10).

9. Если подобрать ТТ со значениями параметров не ниже заданных не удаётся, то принимается ТТ с наиболее близкими к заданным значениями. Для указанного ТТ выполняется дополнительная проверка:

$$I_{1.\text{ном}} \cdot K_{\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}} \geq \frac{K_{\text{п.р}}^{(j)}(t_{\text{реш}i})}{1-K_r} \cdot I_{\text{КЗ}.i}^{(j)} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)}, \tag{3.14}$$

$$z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)} = \sqrt{\left(R_2 + R_{\text{н.факт}}^{(j)}\right)^2 + \left(X_2 + X_{\text{н.факт}}^{(j)}\right)^2}, \tag{3.15}$$

$$z_{2\Sigma\text{ном}} = \sqrt{\left(R_2 + 0{,}8 z_{\text{н.ном}}\right)^2 + \left(X_2 + 0{,}6 z_{\text{н.ном}}\right)^2}. \tag{3.16}$$

10. Если условие (3.14) выполняется, то данный ТТ пригоден для использования в схеме ДЗШ (ДЗО). Иначе следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей) и повторно выполнить расчёт по пунктам 5 – 9.

11. Если вышеуказанная мера окажется неэффективной, следует перейти на ТТ того же класса Р с более высокими значениями первичного тока или номинального сопротивления нагрузки. Повторно выполнить расчёт по пунктам 5 – 9.

12. Если и эта мера окажется неэффективной, то следует выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

3.5 Пример проверки ТТ класса Р для ДЗШ 220 кВ с учётом переходных режимов

Расчетные точки КЗ для проверки правильности функционирования ДЗШ, использующей информацию от ТТ класса Р, в условиях данного примера показаны на рис. 3.3. Исходные данные для проверки ТТ приведены в табл. 3.1 – 3.4.

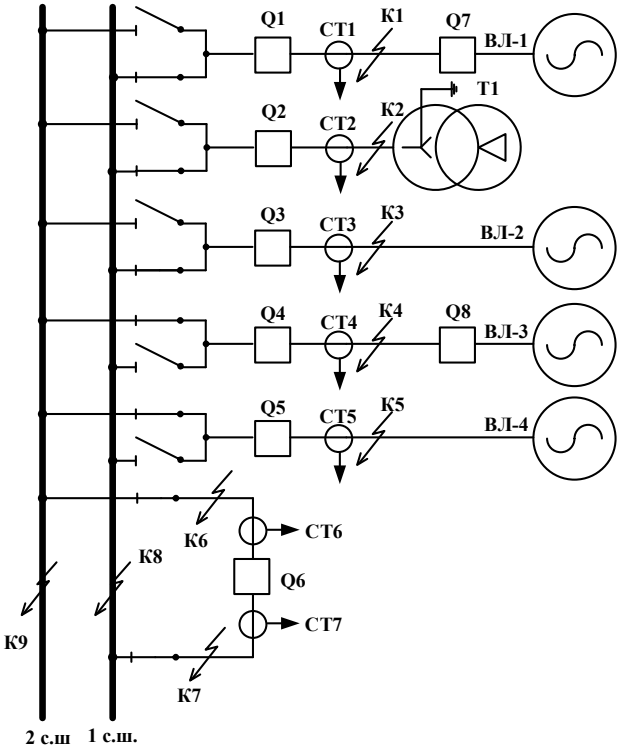


Рисунок 3.3 – Фрагмент понизительной подстанции и прилегающей питающей сети 220 кВ

Таблица 3.1

Исходные данные ТТ ТФЗМ-220Б (СТ1 – СТ3, СТ5 – СТ7)		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1200
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	15
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	30
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	7
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,54
Число витков вторичной обмотки	w_2	1200
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	$21{,}5*10^{-4}$
Средняя длина силовой линии, м	l	1,06

Таблица 3.2

Исходные данные ТТ ТФНД-220-3Т (СТ4)		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1500
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	16
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	50
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	8,8
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	22
Число витков вторичной обмотки	w_2	1500
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	$30{,}5*10^{-4}$
Средняя длина силовой линии, м	l	1,55

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 3.3

Параметры нагрузки ТТ			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,12	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	150	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 2,5	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{150}{1 \cdot 2{,}5} = 1{,}05$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п} = R_{каб}$	1,05	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 1{,}05 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 1{,}27$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$2 \cdot 1{,}05 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 2{,}32$	n = 2 при $K^{(1)}$
Для ТТ ТФЗМ-220Б (СТ1 – СТ3, СТ5 – СТ7)			
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(7+1{,}27)^2 + 0{,}54^2} = 8{,}29$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$\sqrt{(7+2{,}32)^2 + 0{,}54^2} = 9{,}34$	n = 2 при $K^{(1)}$
Для ТТ ТФНД-220-3Т (СТ4)			
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(8{,}8+1{,}27)^2 + 22^2} = 24{,}2$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$\sqrt{(8{,}8+2{,}32)^2 + 22^2} = 24{,}7$	n = 2 при $K^{(1)}$

Таблица 3.4

Уставки ДЗШ-220 БЭ2704V061		
№ пп	**Наименование величин**	**Значения**
1	Базисный ток присоединения с наибольшим коэффициентом трансформации 1500/1 (СТ4), А	1
2	Базисный ток остальных присоединений с коэффициентами трансформации 1200/1, А	1,25
3	Фиксация присоединения ШСВ (СТ7) – зона	ИО2
4	Фиксация присоединения ШСВ (СТ6) – зона	ИО1
5	Фиксация присоединения ВЛ1 (СТ1) – зона	ПО-ИО1
6	Фиксация присоединения ВЛ3 (СТ4) – зона	ПО-ИО2
7	Фиксация присоединения Т1 (СТ2) – зона	ПО-ИО1
8	Фиксация присоединения ВЛ2 (СТ3) – зона	ПО-ИО1
9	Фиксация присоединения ВЛ4 (СТ5) – зона	ПО-ИО2
10	Ток срабатывания ПО, отн.ед.	1,2
11	Ток начала торможения ПО, отн.ед.	1,0
12	Коэффициент торможения ПО	0,6
13	Ток срабатывания ИО1, отн.ед.	1,2
14	Ток начала торможения ИО1, отн.ед.	1,0
15	Коэффициент торможения ИО1	0,6
16	Ток срабатывания ИО2, отн.ед.	1,2
17	Ток начала торможения ИО2, отн.ед.	1,0
18	Коэффициент торможения ИО2	0,6

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

3.5.1 Проверка ТТ для ДЗШ 220 кВ при КЗ в зоне действия

В примере проверка проводится только для случая КЗ в зоне действия ИО2 – точка К9. В общем случае также необходимо провести проверку при КЗ в зоне действия ИО1 – точка К8. Проверку ПО допускается не производить, так как в наиболее тяжёлых условиях по времени до насыщения находятся ТТ в цепи ШСВ, не входящие в контур дифференциального тока указанного органа.

Параметры токов при КЗ в зоне действия приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Параметры токов короткого замыкания при КЗ в зоне действия ИО2 – точка К9			
Наименование ТТ	**Обозначение**	**Значение при К(3)**	**Значение при К(1)**
СТ4	$I_{КЗ.4}$	2 969 А	2 293 А
СТ5	$I_{КЗ.5}$	5 219 А	4 109 А
СТ7	$I_{КЗ.7}$	4 492 А	4 131 А
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс			
СТ4	$T_{p.4}$	150	150
СТ5	$T_{p.5}$	150	150
СТ7	$T_{p.7}$	93	99

Так как ВАХ ТТ отсутствует, а размеры магнитопровода ТТ известны, то расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) выполняется по *B*(*H*). Результаты расчёта времени до насыщения и проверки ТТ для ДЗШ при КЗ в зоне действия приведены в табл. 3.6 – 3.8.

Таблица 3.6

Результаты расчёта времени до насыщения для *СТ4*			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		***К*(3)**	***К*(1)**
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{факт} = \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}}$	$\frac{2969}{1500} = 1{,}98$	$\frac{2293}{1500} = 1{,}53$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 1{,}98 = 0{,}198$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 1{,}53 = 0{,}153$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{нас} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$0{,}198 \cdot \frac{1500}{1{,}55} = 192$	$0{,}153 \cdot \frac{1500}{1{,}55} = 148$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{нас}$	1,838	1,826
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{факт} \cdot I_{2ном} \cdot z_{2\Sigma факт}$	$1{,}98 \cdot 1 \cdot 24{,}2 = 48$	$1{,}53 \cdot 1 \cdot 24{,}7 = 38$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{48}{222 \cdot 1500 \cdot 30{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}047$	$\frac{38}{222 \cdot 1500 \cdot 30{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}037$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{нас}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}838}{0{,}047} = 39$ $39 \cdot (1 - 0{,}86) = 5{,}3$	$\frac{1{,}826}{0{,}037} = 49$ $49 \cdot (1 - 0{,}86) = 6{,}9$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{нелин} = \frac{y_\varepsilon}{y_{лин}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции; – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	Больше $5T_p$ 31,6	Больше $5T_p$ 47,5
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{нас.1} > t_{реш.1}$; $t_{нас.2} > t_{реш.1}$	Выпол. (>> 5 мс) Выпол. (31,6 > 5 мс)	Выпол. (>> 5 мс) Выпол. (47,5 > 5 мс)

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 3.7

Результаты расчёта времени до насыщения для *СТ5*			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		***K*(3)**	***K*(1)**
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{\text{факт}} = \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$	$\frac{5219}{1200} = 4{,}35$	$\frac{4109}{1200} = 3{,}42$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 4{,}35 = 0{,}435$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 3{,}42 = 0{,}342$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{\text{нас}} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$0{,}435 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 493$	$0{,}342 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 387$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{\text{нас}}$	1,88	1,87
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}$	$4{,}35 \cdot 1 \cdot 8{,}29 = 36$	$3{,}42 \cdot 1 \cdot 9{,}34 = 31{,}9$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{36}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}063$	$\frac{31{,}9}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}057$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{\text{нас}}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}88}{0{,}063} = 29{,}8$ $29{,}8 \cdot (1 - 0{,}86) = 4{,}2$	$\frac{1{,}87}{0{,}057} = 33$ $33 \cdot (1 - 0{,}86) = 4{,}6$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{\text{нелин}} = \frac{y_\varepsilon}{y_{\text{лин}}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции; – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	150 10,9	189 12,1
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{\text{нас.1}} > t_{\text{реш.1}}$; $t_{\text{нас.2}} > t_{\text{реш.1}}$	Выпол. (150 > 5 мс) Выпол. (10,9 > 5 мс)	Выпол. (189 > 5 мс) Выпол. (12,1 > 5 мс)

Таблица 3.8

Результаты расчёта времени до насыщения для *СТ7*			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		***K*(3)**	***K*(1)**
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{\text{факт}} = \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$	$\frac{4492}{1200} = 3{,}74$	$\frac{4131}{1200} = 3{,}44$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 3{,}74 = 0{,}374$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 3{,}44 = 0{,}344$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{\text{нас}} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$0{,}374 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 424$	$0{,}344 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 389$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{\text{нас}}$	1,876	1,874
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}$	$3{,}74 \cdot 1 \cdot 8{,}29 = 31$	$3{,}44 \cdot 1 \cdot 9{,}34 = 32$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{31}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}054$	$\frac{32}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}056$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{\text{нас}}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}876}{0{,}054} = 34{,}7$ $34{,}7 \cdot (1 - 0{,}86) = 4{,}85$	$\frac{1{,}874}{0{,}056} = 33{,}5$ $33{,}5 \cdot (1 - 0{,}86) = 4{,}7$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{\text{нелин}} = \frac{y_\varepsilon}{y_{\text{лин}}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции; – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше $5T_p$ 12,7	Больше $5T_p$ 12,2
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{\text{нас.1}} > t_{\text{реш.1}}$; $t_{\text{нас.2}} > t_{\text{реш.1}}$	Выпол. (>> 5 мс) Выпол. (12,7 > 5 мс)	Выпол. (>> 5 мс) Выпол. (12,2 > 5 мс)

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Условие пригодности ТТ по времени до насыщения при КЗ в зоне действия ($t_{нас} > 5$ мс) ИО2 ДЗШ выполняется. Проверка считается успешно завершённой.

3.5.2 Проверка ТТ для ДЗШ 220 кВ при КЗ вне зоны действия

В данном примере проверка проводится только для случая КЗ в точке К2. В общем случае необходимо провести проверку каждого ТТ при близком КЗ за ним – точки К1 – К7.

Параметры токов при КЗ вне зоны действия приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Параметры токов короткого замыкания при КЗ вне зоны действия ДЗШ – точка К2			
Наименование ТТ	**Обозначение**	**Значение при К(3)**	**Значение при К(1)**
СТ2	$I_{К3.2}$	12 566 А	9 748 А
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс			
СТ2	$T_{p.2}$	129,5	129,6

Расчёт времени до насыщения выполняется по *B*(*H*). Результаты расчёта времени до насыщения и проверки ТТ для ДЗШ при КЗ вне зоны действия приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Результаты расчёта времени до насыщения для *СТ2*			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		***К*(3)**	***К*(1)**
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{факт} = \frac{I_{К3}}{I_{1.ном}}$	$\frac{12566}{1200} = 10{,}47$	$\frac{9748}{1200} = 8{,}12$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 10{,}47 = 1{,}05$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 8{,}12 = 0{,}812$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{нас} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$1{,}05 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 1189$	$0{,}812 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 919$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{нас}$	1,91	1,9
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{факт} \cdot I_{2ном} \cdot z_{2\Sigma факт}$	$10{,}47 \cdot 1 \cdot 8{,}29 = 87$	$8{,}12 \cdot 1 \cdot 9{,}34 = 75{,}8$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{87}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}152$	$\frac{75{,}8}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}132$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{нас}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}91}{0{,}152} = 12{,}6$ $12{,}6 \cdot (1 - 0{,}86) = 1{,}76$	$\frac{1{,}9}{0{,}132} = 14{,}4$ $14{,}4 \cdot (1 - 0{,}86) = 2{,}02$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{нелин} = \frac{y_\varepsilon}{y_{лин}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции; – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	48,7 6,2	52,3 6,7
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{нас.1} > t_{реш.2}$; $t_{нас.2} > t_{реш.2}$	Выпол. (48,7>2 мс) Выпол. (6,2>2 мс)	Выпол. (52,3>2 мс) Выпол. (6,7>2 мс)

Условие пригодности *СТ*2 по времени до насыщения при КЗ вне зоны действия ДЗШ (точка К2) выполняется ($t_{нас} > 2$ мс). Проверка *СТ*2 считается успешно завершённой.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

3.6 Пример выбора ТТ класса Р для ДЗШ 500 кВ с учётом переходных режимов

В общем случае для ДЗШ по времени до насыщения необходимо провести выбор каждого ТТ, входящего в контур дифференциального тока ИО1 и ИО2. При этом должны рассматриваться режимы КЗ в зоне и близкого вне зоны действия с максимально возможными токами через соответствующий ТТ.

В данном примере проводится выбор только ТТ1. Максимальный ток через ТТ1 в режиме КЗ в зоне действия (точка К1) проходит при отключенном выключателе В3, а в режиме КЗ вне зоны действия (точка К2) – при отключенном выключателе В2.

Расчетные точки КЗ для выбора ТТ класса Р для ДЗШ с учётом переходных режимов, в условиях данного примера показаны на рис. 3.4. Параметры токов КЗ для выбора ТТ приведены в табл. 3.11.

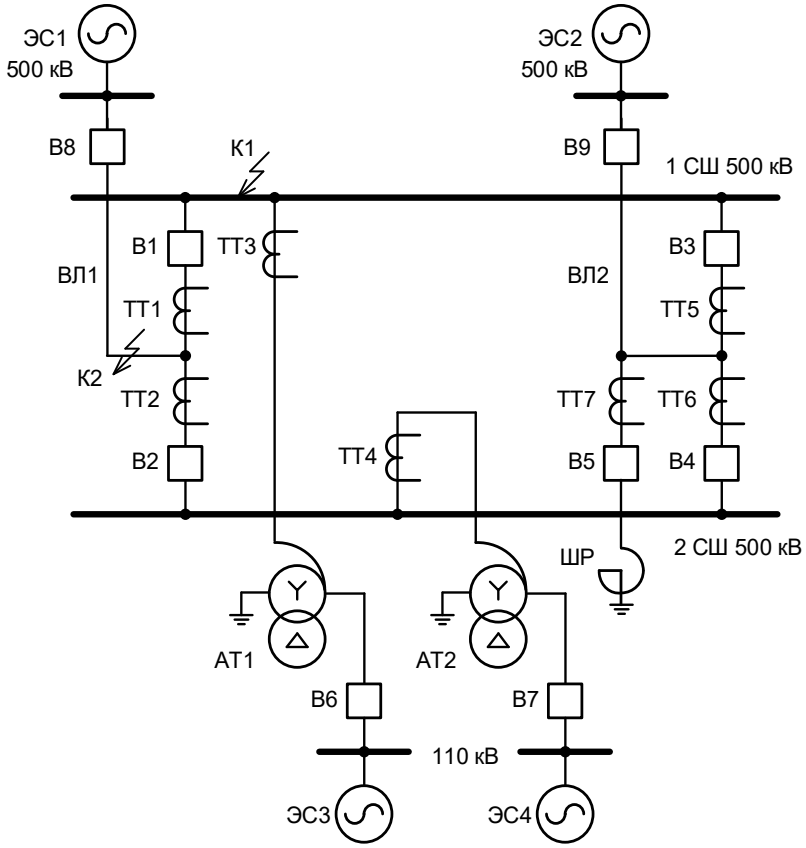


Рисунок 3.4 – Фрагмент понизительной подстанции и прилегающей питающей сети 500 и 110 кВ

Таблица 3.11

Параметры токов КЗ для выбора ТТ1			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		$К^{(3)}$	**$К^{(1)}$**
Максимальный ток через ТТ1 при КЗ в точке К1, А	$I_{КЗ.1}$	17 577	3 032
Максимальный ток через ТТ1 при КЗ в точке К2, А	$I_{КЗ.2}$	7 216	2 320
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс			
При КЗ в точке К1, мс	$T_{p.1}$	45	72
При КЗ в точке К2, мс	$T_{p.2}$	45	72

Так как время принятия решения значительно меньше 10 мс, то коэффициент переходного режима определяется по значениям $t_{реш}$, T_p с помощью диаграмм зависимости $K_{п.р}(t)$ от

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

времени, приведённых в Приложении А ГОСТ Р 58669-2019 [1]

– для КЗ в зоне действия

$$K_{\text{п.р}}^{(3)}(t_{\text{реш.1}}) = K_{\text{п.р}}^{(3)}(0{,}005) = 1{,}1\,,$$

$$K_{\text{п.р}}^{(1)}(t_{\text{реш.1}}) = K_{\text{п.р}}^{(1)}(0{,}005) = 1{,}1\,;$$

– для КЗ вне зоны действия

$$K_{\text{п.р}}^{(3)}(t_{\text{реш.2}}) = K_{\text{п.р}}^{(3)}(0{,}002) = 0{,}2\,,$$

$$K_{\text{п.р}}^{(1)}(t_{\text{реш.2}}) = K_{\text{п.р}}^{(1)}(0{,}002) = 0{,}2\,.$$

По нагрузке присоединения определяется значение номинального первичного тока $I_{1.\text{ном}}$ = 2000 А. Значение номинального вторичного тока $I_{2.\text{ном}}$ в электроустановках сверхвысокого напряжения целесообразно принять равным 1 А. Расчёт фактического сопротивления нагрузки на ТТ приведен в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Параметры нагрузки ТТ			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{\text{терм}}$	0,12	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_{\text{н}}$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{\text{пер}}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{\text{т.ц}}$	250	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм²	$S_{\text{ж}}$	Cu – 2,5	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_{\text{ж}}$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{\text{каб}} = \rho \cdot \dfrac{L_{\text{т.ц}}}{k_{\text{ж}} \cdot S_{\text{ж}}}$	$0{,}0175 \cdot \dfrac{250}{1 \cdot 2{,}5} = 1{,}75$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{\text{н.п}} = R_{\text{каб}}$	1,75	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{\text{н.факт}} = n \cdot R_{\text{каб}} + m \cdot R_{\text{терм}} + R_{\text{пер}}$	$1 \cdot 1{,}75 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 1{,}97$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$2 \cdot 1{,}75 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 3{,}72$	n = 2 при $K^{(1)}$

Так как косинус угла фактического сопротивления нагрузки на ТТ равен 1, то

$$z_{\text{н.факт}} = R_{\text{н.факт}}.$$

Задаётся номинальное сопротивление нагрузки на ТТ ($z_{\text{н.ном}}$), которое для ТТ с номинальным вторичным током равным 1 А обычно находится в пределах 20 … 100 Ом. Пусть $z_{\text{н.ном}} = 40$ Ом. Значение сопротивления вторичной обмотки ТТ допустимо принять равным 20 % от номинальной нагрузки.

Определяются номинальное и фактическое сопротивления ветви вторичного тока ТТ по выражениям:

$$z_{2\sum\text{ном}} = 1{,}2 z_{\text{н.ном}} = 1{,}2 \cdot 40 = 48 \text{ Ом},$$

$$z_{2\sum\text{факт}}^{(3)} = 0{,}2 z_{\text{н.ном}} + z_{\text{н.факт}} = 0{,}2 \cdot 40 + 1{,}97 = 9{,}97 \text{ Ом},$$

$$z_{2\sum\text{факт}}^{(1)} = 0{,}2 z_{\text{н.ном}} + z_{\text{н.факт}}^{(1)} = 0{,}2 \cdot 40 + 3{,}72 = 11{,}72 \text{ Ом}.$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Находят значения требуемой номинальной предельной кратности ТТ для каждого расчетного режима по выражению:

– для КЗ в зоне действия

$$K^{(3)}_{\text{ном.треб.1}} = \frac{K^{(3)}_{\text{п.р}}(t_{\text{реш.1}})}{1-K_r} \cdot \frac{I^{(3)}_{\text{КЗ.1}} \cdot z^{(3)}_{2\Sigma\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}} = \frac{1{,}1}{1-0{,}86} \cdot \frac{17577 \cdot 9{,}97}{2000 \cdot 48} \approx 14{,}4\,,$$

$$K^{(1)}_{\text{ном.треб.1}} = \frac{K^{(1)}_{\text{п.р}}(t_{\text{реш.1}})}{1-K_r} \cdot \frac{I^{(1)}_{\text{КЗ.1}} \cdot z^{(1)}_{2\Sigma\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}} = \frac{1{,}1}{1-0{,}86} \cdot \frac{3032 \cdot 11{,}72}{2000 \cdot 48} \approx 3\,;$$

– для КЗ вне зоны действия

$$K^{(3)}_{\text{ном.треб.2}} = \frac{K^{(3)}_{\text{п.р}}(t_{\text{реш.2}})}{1-K_r} \cdot \frac{I^{(3)}_{\text{КЗ.2}} \cdot z^{(3)}_{2\Sigma\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}} = \frac{0{,}2}{1-0{,}86} \cdot \frac{7216 \cdot 9{,}97}{2000 \cdot 48} \approx 1{,}1\,,$$

$$K^{(1)}_{\text{ном.треб.2}} = \frac{K^{(1)}_{\text{п.р}}(t_{\text{реш.2}})}{1-K_r} \cdot \frac{I^{(1)}_{\text{КЗ.2}} \cdot z^{(1)}_{2\Sigma\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}} = \frac{0{,}2}{1-0{,}86} \cdot \frac{2320 \cdot 11{,}72}{2000 \cdot 48} \approx 0{,}5\,.$$

В качестве требуемой номинальной предельной кратности ($K_{\text{ном.треб}}$) принимается максимальное из значений $K^{(j)}_{\text{ном.треб}i}$:

$$K_{\text{ном.треб}} = 14{,}4.$$

Принимается ТТ класса Р типа ТФРМ-500Б У1 с наиболее близкими к заданным заданных ($I_{1.\text{ном}}$ = 2000 А; $z_{\text{н.ном}} = 40$ Ом; $K_{\text{ном}} = 14{,}4$) значениями. Исходные данные ТТ1 приведены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Параметры предварительно выбранного ТТ1 типа ТФРМ-500Б У1		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.\text{ном}}$	2000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.\text{ном}}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{\text{ном}}$	18
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{\text{н.ном}}$	40
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	4,23
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0
Число витков вторичной обмотки	w_2	2000
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	23,6*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	2,28

3.7 Пример формирования задания заводу изготовителю на разработку и изготовление ТТ класса Р с учётом переходных режимов

Данный пример построен на основе исходных данных и расчетов, выполненных в предыдущем разделе.

В общем случае задание заводу изготовителю на ТТ класса Р для ДЗШ формируется отдельно для каждого ТТ, входящего в контур дифференциального тока ИО1 и ИО2. При этом должны рассматриваться режимы КЗ в зоне и близкого вне зоны действия с максимально возможными токами через соответствующий ТТ.

В данном примере задание заводу изготовителю формируется только на ТТ1 (рис. 3.4).

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Максимальный ток через ТТ1 в режиме КЗ в зоне действия (точка К1) проходит при отключенном выключателе В3, а в режиме КЗ вне зоны действия (точка К2) – при отключенном выключателе В2.

Расчетные точки КЗ для выбора ТТ класса Р для ДЗШ с учётом переходных режимов, в условиях данного примера показаны на рис. 3.4. Параметры токов КЗ приведены в табл. 3.11.

Так как время принятия решения значительно меньше 10 мс, то коэффициент переходного режима определяется по значениям $t_{\text{реш}}$, T_p с помощью диаграмм зависимости $K_{\text{п.р}}(t)$ от времени, приведённых в Приложении А ГОСТ Р 58669-2019 [1]:

– для КЗ в зоне действия

$$K_{\text{п.р}}^{(3)}(t_{\text{реш.1}}) = K_{\text{п.р}}^{(3)}(0{,}005) = 1{,}1\,,$$

$$K_{\text{п.р}}^{(1)}(t_{\text{реш.1}}) = K_{\text{п.р}}^{(1)}(0{,}005) = 1{,}1\,;$$

– для КЗ вне зоны действия

$$K_{\text{п.р}}^{(3)}(t_{\text{реш.2}}) = K_{\text{п.р}}^{(3)}(0{,}002) = 0{,}2\,,$$

$$K_{\text{п.р}}^{(1)}(t_{\text{реш.2}}) = K_{\text{п.р}}^{(1)}(0{,}002) = 0{,}2\,.$$

По нагрузке присоединения определяется значение номинального первичного тока $I_{1.\text{ном}}$ = 2000 А. Значение номинального вторичного тока $I_{2.\text{ном}}$ в электроустановках сверхвысокого напряжения целесообразно принять равным 1 А. Расчёт фактического сопротивления нагрузки на ТТ приведен в табл. 3.12.

Так как косинус угла фактического сопротивления нагрузки на ТТ1 равен 1, то

$$z_{\text{н.факт}}^{(3)} = 1{,}97 \text{ Ом}, \; z_{\text{н.факт}}^{(1)} = 3{,}72 \text{ Ом}.$$

Требуемое номинальное сопротивление нагрузки принимается равным ближайшему к максимальному из $z_{\text{н.факт}}$ значению (в сторону увеличения) из ряда рекомендуемых значений [21, 22]:

$$z_{\text{н.ном}} = 5 \text{ Ом}.$$

Значение сопротивления вторичной обмотки может варьироваться в зависимости от конструкции ТТ, однако реальный диапазон значений будет составлять от 20 до 80 % от номинальной нагрузки. Предположим, что сопротивление вторичной обмотки ТТ составляет 60% от номинального, что дает z_2 = 3 Ом.

Рассчитывается фактическое предельное значение вторичного напряжения:

– для КЗ в зоне действия

$$U_{\text{нас.факт.1}}^{(3)} \approx \frac{K_{\text{п.р}}^{(3)}(t_{\text{реш.1}})}{(1-K_r)} \cdot \frac{I_{\text{КЗ.1}}^{(3)}}{I_{1.\text{ном}}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (z_2 + z_{\text{н.факт}}^{(3)}) = \frac{1{,}1}{(1-0{,}86)} \cdot \frac{17577}{2000} \cdot 1 \cdot (3+1{,}97) \approx 344 \text{ В};$$

$$U_{\text{нас.факт.1}}^{(1)} \approx \frac{K_{\text{п.р}}^{(1)}(t_{\text{реш.1}})}{(1-K_r)} \cdot \frac{I_{\text{КЗ.1}}^{(1)}}{I_{1.\text{ном}}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (z_2 + z_{\text{н.факт}}^{(1)}) = \frac{2{,}52}{(1-0{,}86)} \cdot \frac{3032}{2000} \cdot 1 \cdot (3+3{,}72) \approx 80 \text{ В};$$

– для КЗ вне зоны действия

$$U_{\text{нас.факт.2}}^{(3)} \approx \frac{K_{\text{п.р}}^{(3)}(t_{\text{реш.2}})}{(1-K_r)} \cdot \frac{I_{\text{КЗ.2}}^{(3)}}{I_{1.\text{ном}}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (z_2 + z_{\text{н.факт}}^{(3)}) = \frac{0{,}2}{(1-0{,}86)} \cdot \frac{7216}{2000} \cdot 1 \cdot (3+1{,}97) \approx 26 \text{ В};$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$$U^{(1)}_{\text{нас.факт.1}} \approx \frac{K^{(1)}_{\text{п.р}}(t_{\text{реш.1}})}{(1-K_r)} \cdot \frac{I^{(1)}_{\text{КЗ.1}}}{I_{1.\text{ном}}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (z_2 + z^{(1)}_{\text{н.факт}}) = \frac{0{,}2}{(1-0{,}86)} \cdot \frac{2320}{2000} \cdot 1 \cdot (3+3{,}72) \approx 12 \text{ В.}$$

В качестве предельного значения вторичного напряжения принимается максимальное из полученных фактических значений

$$U_{\text{нас.факт}} = 344 \text{ В.}$$

Чтобы дать возможность производителю оптимизировать отношение между активным сопротивлением обмотки ТТ и площадью поперечного сечения сердечника достаточно задать следующее неравенство:

$$U_{\text{нас.факт}} \le K_{\text{ном}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (z_2 + z_{\text{н.ном}});$$

$$344 \le K_{\text{ном}} \cdot 1 \cdot (z_2 + z_{\text{н.ном}}).$$

Дополнительно приближенно определим требуемое значение номинальной предельной кратности:

$$K_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{нас.факт}}}{I_{2.\text{ном}}(z_2 + z_{\text{н.ном}})} = \frac{344}{1 \cdot (3+5)} = 43.$$

В табл. 3.14 приведены сведения, которые необходимо привести в задании заводу изготовителю для ТТ класса Р.

Таблица 3.14

Задание заводу изготовителю ТТ		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальное первичное напряжение, кВ	$U_{1.\text{ном}}$	500
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.\text{ном}}$	2000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.\text{ном}}$	1
Класс точности		10Р
Фактическая вторичная нагрузка, Ом	$z_{\text{н.факт}}$	3,72
Предельное вторичное напряжение, В	$U_{\text{нас.факт}}$	344
Дополнительные		
Действующее значение периодической составляющей тока КЗ, А	$I_{\text{КЗ}}$	17577
Значение коэффициента переходного режима	$K_{\text{п.р}}$	1,1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{\text{ном}}$	43
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{\text{н.ном}}$	5

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

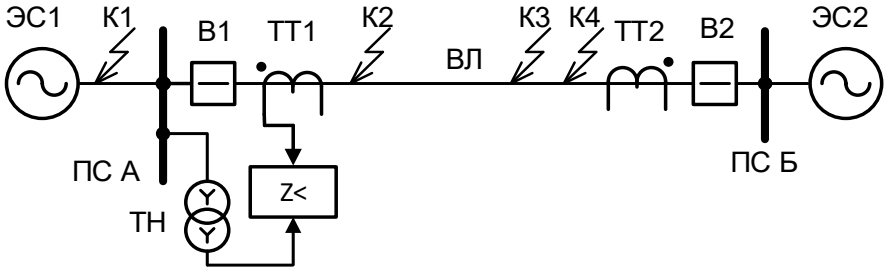
4 ПРОВЕРКА И ВЫБОР ТТ КЛАССА Р ДЛЯ ПЕРВЫХ СТУПЕНЕЙ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С УЧЁТОМ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

4.1 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах ДЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения с учётом переходных режимов

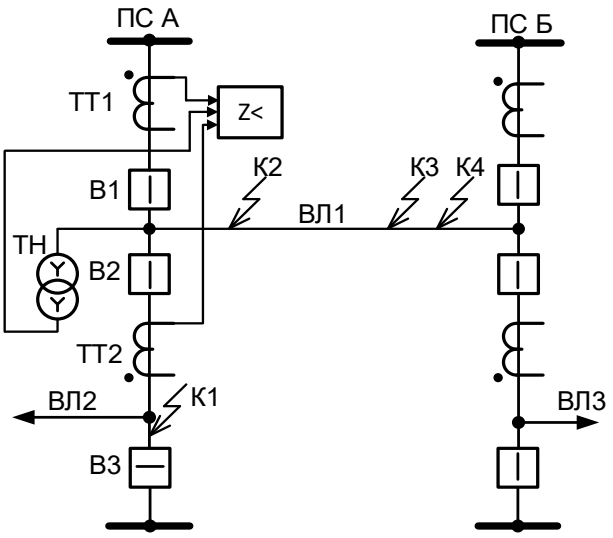
В число расчётных условий входят значения первичных и вторичных токов ТТ при КЗ в характерных точках, показанных в соответствии с [3] на рис. 4.1:

– близкое КЗ «за спиной» (точки К1). Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к неселективному срабатыванию защиты. Для варианта подключения, показанного на рис. 4.1, *б*, наибольший сквозной ток, протекающий по ТТ1 и ТТ2, имеет место при отключённом выключателе В3 (ремонтный режим выключателя);

– близкое КЗ в зоне действия (в месте установки защиты) – точка К2. Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к замедлению в срабатывании первой ступени защиты на время, в первом приближении превышающее значение постоянной времени T_p, и отключению повреждения с выдержкой времени действием второй ступени защиты;



а)



б)

Рисунок 4.1 – Варианты подключения УРЗ:
а – ТТ установлен в цепи линии;
б – ТТ установлены в цепях выключателей В1 и В2

– удалённое КЗ на расстоянии 80% от начала зоны действия– точка К3. Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к замедлению в срабатывании защиты на время, в первом

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

приближении превышающее значение постоянной времени первичной сети T_p, и отключению повреждения с выдержкой времени действием второй ступени защиты;

– удалённое КЗ вне зоны действия (110% от зоны действия) – точка К4.

В качестве расчётных видов КЗ в международной практике приняты трехфазное и однофазное в максимальном режиме работы ЭЭС. Однако, проведенные исследования показали, что режим двухфазного КЗ для первой ступени ДЗ от междуфазных КЗ при насыщении ТТ в обоих поврежденных фазах является более тяжелым, чем режим трехфазного КЗ.

Условия работы ТТ быстродействующих защит в переходных режимах существенным образом утяжеляются при учёте остаточной магнитной индукции в сердечнике и автоматическом повторном включении (АПВ) повреждённого оборудования. Поведение защиты в случае близких КЗ вне зоны действия (точка К1 на рис. 4.1) зависит от места установки ТТ: в цепях выключателей или в цепи защищаемой линии.

ДЗ линий электропередачи производства ООО НПП «ЭКРА» имеет блокировку при насыщении ТТ, установленных в цепях выключателей [4 – 6], которая реагирует на направление векторов первых гармоник вторичных токов ТТ. Время надежного распознавания внешнего КЗ указанной блокировкой при максимальном относительном содержании апериодической составляющей в токе КЗ – не более четверти периода основной гармоники тока. Следует отметить, что на функционирование указанной блокировки насыщение ТТ практически не влияет. Таким образом, при наличии этой блокировки не требуется проверка пригодности ТТ для ДЗ при близких КЗ вне зоны действия («за спиной» защиты).

Если ТТ установлены в цепи защищаемой линии, то правильную работу первых ступеней защиты обеспечивает орган направления мощности (ОНМ), входящий в состав ДЗ. Исключением является режим трехфазного КЗ «за спиной» ДЗ от КЗ на землю, если уровень напряжения поляризации ОНМ этой защиты недостаточен для его устойчивой работы. В указанном режиме правильное несрабатывание ДЗ от КЗ на землю в защитах ООО НПП «ЭКРА» обеспечивается за счет использования быстродействующего реле тока нулевой последовательности с торможением от одного из фазных токов и реле напряжения нулевой последовательности. Пара указанных реле фактически составляет орган, распознающий КЗ с землей.

Таким образом, нет необходимости в проверке пригодности ТТ для ДЗ в режиме КЗ «за спиной».

Анализ поведения первых ступеней ДЗ в режиме близкого КЗ в зоне действия (точка К2 на рис. 4.1) показал, что РС и ОНМ функционируют правильно. Это относится как к ДЗ, подключённой к ТТ в цепях выключателей, так и в цепи защищаемой линии. По этой причине нет необходимости в проверке пригодности ТТ для ДЗ в этом режиме.

В режиме удалённого КЗ в зоне действия первой ступени ДЗ (точка К3 на рис. 4.1) насыщение магнитопроводов ТТ, как установленных в цепи защищаемой линии, так и в цепях выключателей, приводит к задержке в её срабатывании. Данное положение объясняется тем, что при насыщении ТТ его вторичный ток уменьшается и, следовательно, замеры сопротивления оказы-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

ваются вне характеристики срабатывания РС. В режиме двухфазного КЗ возможна более существенная задержка в срабатывании защиты, чем в режиме трехфазного КЗ. При этом ОНМ функционирует правильно.

Аналогично предыдущему режиму, при удалённом КЗ вне зоны действия первой ступени ДЗ (точка К4 на рис. 4.1) насыщение магнитопроводов ТТ независимо от варианта их установки приводит лишь к дополнительному удалению замеров сопротивления от зоны срабатывания РС (укорочение зоны действия первой ступени ДЗ). При данных условиях неселективное срабатывание первой ступени ДЗ при КЗ на шинах подстанции противоположного конца линии только за счет насыщения ТТ исключено. Таким образом, в этом режиме также не требуется проверка ТТ.

В результате при проверке и выборе ТТ для ДЗ должен быть рассмотрен только один режим: КЗ на расстоянии, равном 80% зоны действия первой ступени защиты.

Более подробно результаты исследования влияния насыщения ТТ класса Р в переходных режимах на работу первых ступеней ДЗ приведены в [7].

4.2 Методика проверки ТТ для первых ступеней ДЗ от междуфазных и однофазных КЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения

Максимальное время принятия решения о срабатывании ДЗ с момента начала КЗ ($t_{\text{реш.1}}$) не превышает 25 мс.

Проверка производится только для режима КЗ на расстоянии, равном 80% зоны действия первой ступени защиты в следующей последовательности.

1. В соответствии с [1] для режимов трехфазного и однофазного КЗ выполняется расчёт времени до насыщения ($t_{\text{нас}}$) ТТ по ВАХ или *B*(*H*), а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. В последнем случае необходимо в соответствии с Приложением А данных Методических указаний вычислить значение фактической предельной кратности ТТ.

2. Время до насыщения ТТ сравнивается с временем принятия решения ДЗ при КЗ в зоне действия:

$$t_{\text{нас}} \geq t_{\text{реш.1}}. \tag{4.1}$$

где $t_{\text{реш.1}}$ – время принятия решения о КЗ в зоне действия для первой ступени ДЗ. По данным производителя $t_{\text{реш.1}}$ = 25 мс.

3. Если условие (4.1) выполняется, то ТТ пригоден для использования в схеме ДЗ. На этом проверка успешно закончена.

4. Если условие (4.1) не выполняется, то переходят к проверке допустимости замедления в срабатывании ДЗ при насыщении ТТ.

5. Для периода n, соответствующего допустимой задержке в принятии решения о срабатывании при КЗ в зоне действия по условию устойчивости ЭЭС, определяют относительное действующее значение $I_{2.1.n*}$ и угловую погрешность $\delta_{2.1.n}$ первой гармоники по рис. Б.1 и рис. Б.2, приведенным в Приложении Б, где индекс n соответствует номеру периода:

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$$n = \text{ЦЧ}\left(\frac{t_{\text{доп.з.реш}}}{0{,}02}\right), \tag{4.2}$$

где $t_{\text{доп.з.реш}}$ – допустимая задержка в принятии решения о срабатывании при КЗ в зоне действия защиты

$$t_{\text{доп.з.реш}} = t_{\text{пред.доп.откл}} - t_{\text{О.В}} - t_{\text{внутр.рел}} - t_{\text{пром.рел}};$$

$t_{\text{пред.доп.откл}}$ – предельно допустимые значения времени отключения КЗ. В настоящее время рассчитываются филиалами СО ЕЭС конкретно для каждого ответственного объекта ЭЭС;

$t_{\text{О.В}}$ – полное время отключения выключателя с учётом времени гашения электрической дуги во всех его полюсах;

$t_{\text{внутр.рел}}$ – время срабатывания внутреннего реле терминала защиты (составляет порядка 10 мс);

$t_{\text{пром.рел}}$ – время срабатывания промежуточного реле шкафа защиты (составляет порядка 10 мс).

6. Вычисляют значения вектора сопротивления для периода с номером n:

– для ДЗ от междуфазных КЗ по выражению (4.3)

$$\vec{z}_{AB.\text{РС}.n} = \frac{\vec{U}_A - \vec{U}_B}{I_{2.1.n*} \cdot e^{j\delta_{2.1.n}} \left(\vec{I}_A - \vec{I}_B\right)}, \tag{4.3}$$

где $\vec{z}_{AB.\text{РС}.n}$ – вектор сопротивления РС петли *А-В* для ДЗ от междуфазных КЗ;

$\vec{U}_A$, $\vec{U}_B$, $\vec{U}_C$ – векторы периодических составляющих напряжений фаз *А*, *В* и *С* в режиме КЗ;

$\vec{I}_A$, $\vec{I}_B$, $\vec{I}_C$ – векторы периодических составляющих токов фаз *А*, *В* и *С* в режиме КЗ;

– для ДЗ от КЗ на землю без учета влияния параллельной ВЛ по выражению (4.4)

$$\vec{z}_{A.\text{РС}.n} = \frac{\vec{U}_A}{\vec{I}_A I_{2.1.n*} \cdot e^{j\delta_{2.1.n}} + \dfrac{\vec{Z}_0 - \vec{Z}_1}{\vec{Z}_1} \vec{I}_{0.n}}, \tag{4.4}$$

где $\vec{z}_{A.\text{РС}.n}$ – вектор сопротивления РС поврежденной фазы *А* для ДЗ от КЗ на землю;

$\vec{I}_{0.n} = \left(\vec{I}_A I_{2.1.n*} \cdot e^{j\delta_{2.1.n}} + \vec{I}_B + \vec{I}_C\right)/3$ – вектор тока нулевой последовательности;

$\vec{Z}_0$, $\vec{Z}_1$ – полные удельные сопротивления защищаемой линии по нулевой и прямой последовательности, соответственно.

7. Используя параметры срабатывания первой ступени ДЗ, строят на комплексной плоскости характеристику срабатывания защиты.

8. Проверяют, находится ли полученный вектор сопротивления внутри характеристики срабатывания. При положительном результате проверка считается успешно завершённой.

9. Иначе следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм^2) и повторно выполнить расчет времени до насыщения.

Необходимо учитывать, что нагрузка на ТТ влияет только на продолжительность времени до первого момента насыщения. После первого момента насыщения в переходном процессе погрешности ТТ не зависят от его нагрузки. Поэтому значения сопротивления, вычисленные по

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

выражениям (4.3) и (4.4), также не зависят от нагрузки на ТТ.

10. Если вычисленное повторно время до насыщения превысит время принятия решения о КЗ в зоне действия ($t_{\text{реш.1}} = 25$ мс), то ТТ пригоден для использования в схеме ДЗ ответственных объектов ЭЭС. Проверка закончена с положительным результатом. Иначе – ТТ не пригоден для использования в схеме ДЗ вышеуказанных объектов, и проверка закончена с отрицательным результатом. Необходимо выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий требованиям по условию переходных процессов.

Однако следует учитывать следующее обстоятельство. При КЗ на линии насыщение ТТ приводит к укорочению зоны действия первой ступени ДЗ, в которой последняя срабатывает с допустимым замедлением. В особо ответственных случаях, когда по условиям устойчивости недопустимо значительное увеличение времени действия первой ступени резервной защиты, рекомендуется использовать телеускорение второй ступени ДЗ при срабатывании РС первой ступени противоположного конца линии, для которого место КЗ ближе к началу зоны действия. При этом следует учитывать время передачи сигналов ускорения.

В этом случае необходимо проверять замедление РС при насыщении ТТ в режиме КЗ на расстоянии 0,5 от длины защищаемой линии.

4.3 Методика выбора ТТ для первых ступеней ДЗ от междуфазных и однофазных КЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения

Должны быть известны следующие исходные данные:

– паспортные данные ТТ и его ВАХ (или *B*(*H*) и размеры магнитопровода);

– токи трёхфазного и однофазного КЗ для точки КЗ, указанной на рис. 4.1;

– эквивалентные постоянные времени затухания апериодических составляющих токов КЗ, указанных выше;

– время принятия решения ДЗ при КЗ в зоне действия ($t_{\text{реш.1}}$ по данным производителя составляет 25 мс);

– параметры срабатывания УРЗ.

Возможны два подхода к выбору ТТ для ДЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения в режиме удаленного КЗ в зоне действия.

1. По времени до насыщения.
2. По условию допустимого замедления.

Достоинством первого подхода является его относительно небольшая трудоемкость, а второго – возможность выбрать ТТ с оптимальными характеристиками в условиях координации его функционирования с ДЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения.

4.3.1 Методика выбора ТТ для первых ступеней ДЗ по времени до насыщения

Методика выбора ТТ по условиям правильного функционирования первых ступеней ДЗ при переходных процессах следующая.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

1. По значениям $t_{\text{реш.1}}$ и T_p для ТТ класса Р определяют значения коэффициента переходного режима $K_{\text{п.р}}(t_{\text{реш.1}})$ с помощью следующего выражения:

$$K_{\text{п.р}}^{(j)}(t_{\text{реш.1}}) = \omega \cdot T_p^{(j)} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{реш.1}}}{T_p^{(j)}}} \right) + 1, \tag{4.5}$$

где j – вид КЗ в выбранной расчетной точке: 1 – однофазное; 3 – трехфазное;

2. Предварительно по нагрузке присоединения определяют значение номинального первичного тока $I_{\text{ном.1}}$. Значение номинального вторичного тока $I_{\text{ном.2}}$ в электроустановках сверхвысокого напряжения и напряжением 220 кВ и выше целесообразно принять равным 1 А, так как это облегчает условия работы ТТ в переходном режиме по сравнению с номинальным вторичным током, равным 5 А.

3. Производят расчёт фактического сопротивления нагрузки на ТТ $z_{\text{н.факт}}$.

4. Задаётся номинальное сопротивление нагрузки на ТТ ($z_{\text{н.ном}}$), которое для ТТ с номинальным вторичным током равным 1 А обычно находится в пределах 20 … 100 Ом, а для пятиамперных – 0,8 … 2,4 Ом.

5. Определяется номинальное и фактическое сопротивления ветви вторичного тока ТТ по выражениям:

$$z_{2\sum\text{ном}} = z_2 + z_{\text{н.ном}} \approx 1{,}2 z_{\text{н.ном}}, \tag{4.6}$$

$$z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)} = z_2 + z_{\text{н.факт}}^{(j)} \approx 0{,}2 z_{\text{н.ном}} + z_{\text{н.факт}}^{(j)}, \tag{4.7}$$

где z_2 – сопротивления вторичной обмотки ТТ. При выборе ТТ значение сопротивления его вторичной обмотки допустимо принять равным 20 % от номинальной нагрузки.

6. Находят значения требуемой номинальной предельной кратности ТТ для каждого расчетного режима по выражению:

$$K_{\text{ном.треб}}^{(j)} = \frac{K_{\text{п.р}}^{(j)}(t_{\text{реш.1}})}{1 - K_r} \cdot \frac{I_{\text{КЗ}.i}^{(j)} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}, \tag{4.8}$$

где $I_{\text{КЗ}}^{(j)}$ – ток соответствующего вида КЗ.

7. В качестве требуемой номинальной предельной кратности ($K_{\text{ном.треб}}$) принимается максимальное из значений $K_{\text{ном.треб}}^{(j)}$:

$$K_{\text{ном.треб}} > \max\left(K_{\text{ном.треб}}^{(j)}\right). \tag{4.9}$$

8. По каталогу находят ТТ класса Р того же класса напряжения с заданным значением номинального первичного тока и номинальной предельной кратностью, соответствующей выражению (4.9), а также с суммой сопротивления вторичной обмотки и номинального сопротивления нагрузки не ниже значения, вычисленного по выражению (4.6).

9. Если подобрать ТТ со значениями параметров не ниже заданных не удаётся, то принимается ТТ со значениями параметров наиболее близкими к заданным. Для указанного ТТ выполняется дополнительная проверка:

$$I_{1.\text{ном}} \cdot K_{\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}} \geq \frac{K_{\text{п.р}}^{(j)}(t_{\text{реш.1}})}{1 - K_r} \cdot I_{\text{КЗ}}^{(j)} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)}, \tag{4.10}$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

где

$$z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)} = \sqrt{\left(R_2 + R_{\text{н.факт}}^{(j)}\right)^2 + \left(X_2 + X_{\text{н.факт}}^{(j)}\right)^2}\,, \tag{4.11}$$

$$z_{2\Sigma\text{ном}} = \sqrt{\left(R_2 + 0{,}8 z_{\text{н.ном}}\right)^2 + \left(X_2 + 0{,}6 z_{\text{н.ном}}\right)^2}\,. \tag{4.12}$$

10. Если условие (4.10) выполняется, то данный ТТ пригоден для использования в схеме ДЗ. Иначе следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей) и повторно выполнить расчёт по пунктам 5 – 9.

11. Если вышеуказанная мера окажется неэффективной, следует перейти на ТТ того же класса P с более высокими значениями первичного тока или номинального сопротивления нагрузки. Повторно выполнить расчёт по пунктам 5 – 9.

12. Если и эта мера окажется неэффективной, то следует выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ.

4.3.2 Методика выбора ТТ по условию допустимого замедления первых ступеней ДЗ

Методика выбора ТТ по условиям допустимого замедления ДЗ при переходных процессах в режиме удаленного КЗ в зоне действия следующая.

1. Предварительно по нагрузке присоединения определяют значение номинального первичного тока $I_{1.\text{ном}}$. Значение номинального вторичного тока $I_{2.\text{ном}}$ в электроустановках сверхвысокого напряжения и напряжением 220 кВ и выше целесообразно принять равным 1 А, так как это облегчает условия работы ТТ в переходном режиме по сравнению с номинальным вторичным током, равным 5 А.

2. Производят расчёт фактического сопротивления нагрузки на ТТ $z_{\text{н.факт}}$.

3. По $I_{\text{ном.1}}$, $I_{\text{ном.2}}$ и $z_{\text{н.факт}}$ производят предварительный выбор ТТ.

4. В соответствии с [1] выполняется расчёт времени до насыщения ТТ ($t_{\text{нас}}$) по паспортным данным.

5. Время до насыщения ТТ сравнивается с временем принятия решения о срабатывании ДЗ при КЗ в зоне действия ($t_{\text{реш.1}} = 25$ мс). Если условие (4.1) выполняется, то ТТ пригоден для использования в схеме ДЗ. На этом выбор ТТ успешно закончен.

6. Если условие (4.1) не выполняется, то переходят к проверке допустимости замедления в срабатывании ДЗ при насыщении ТТ.

7. Для периода n (см. выражение (4.2)), соответствующего допустимой задержке в принятии решения о срабатывании при КЗ в зоне действия ($t_{\text{доп.з.реш}}$) по условию устойчивости ЭЭС, определяют относительное действующее значение $I_{2.1.n*}$ и угловую погрешность $\delta_{2.1.n}$ первой гармоники по рис. Б.1 и рис. Б.2, приведенным в Приложении Б, где индекс n соответствует номеру периода. Предельно допустимые значения времени отключения КЗ в настоящее время рассчитываются филиалами СО ЕЭС конкретно для каждого ответственного объекта ЭЭС.

8. Вычисляют значения вектора сопротивления для периода с номером n:

– для ДЗ от междуфазных КЗ по выражению (4.3);

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

– для ДЗ от КЗ на землю по выражению (4.4).

9. Используя параметры срабатывания первой ступени ДЗ, строят на комплексной плоскости характеристику срабатывания защиты.

10. Проверяют, находится ли полученный вектор сопротивления внутри характеристики срабатывания. При положительном результате проверка считается успешно завершённой.

11. Иначе следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей) и повторно выполнить расчет времени до насыщения.

12. Если вычисленное повторно время до насыщения превысит время принятия решения о КЗ в зоне действия ($t_{\text{реш.1}} = 25$ мс), то ТТ пригоден для использования в схеме ДЗ. На этом выбор окончен.

13. Иначе необходимо выбрать ТТ с увеличенными значениями первичного номинального тока, номинальной предельной кратности тока, номинального сопротивления вторичной нагрузки. При этом следует выбрать допустимое сечение контрольного кабеля в диапазоне 4 – 10 мм^2.

14. Повторить пункты 4 – 10.

15. Если и после принятия таких мер не удается выбрать ТТ класса Р, удовлетворяющий условию (4.1) или условию допустимого замедления в срабатывании ДЗ, то необходимо выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий требованиям по условию переходных процессов.

4.4 Пример проверки ТТ класса Р для первых ступеней ДЗ ВЛ-220 кВ с учётом переходных режимов

Расчетные точки КЗ для проверки правильности функционирования первых ступеней ДЗ, использующих информацию от ТТ класса Р, в условиях данного примера показаны на рис. 4.2.

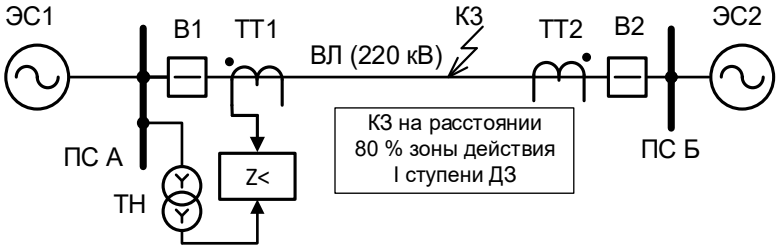


Рисунок 4.2 – Расположение расчетных точек КЗ для проверки ДЗ ВЛ 220 кВ

Исходные данные для проверки ТТ приведены в табл. 4.1 – 4.5.

Таблица 4.1

Параметры токов для режима КЗ на расстоянии, равном 80% зоны действия первой ступени ДЗ			
Наименование величины	Обозначение	Значение	
		$К^{(3)}$	$К^{(1)}$
Ток через ТТ1 при КЗ в расчетной точке, А	$I_{КЗ}$	5 947	4 305
Постоянная времени затухания апериодической составляющей, мс	T_p	18,8	15,7

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 4.2

Параметры векторов токов и напряжений для режима КЗ на расстоянии, равном 80% зоны действия первой ступени		
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение при трёхфазном КЗ**
Вектор тока через ТТ фазы *A* при КЗ в расчетной точке, А	$\vec{I}_A$	5 947 $e^{-j\,79{,}2^\circ}$
Вектор тока через ТТ фазы *B* при КЗ в расчетной точке, А	$\vec{I}_B$	5 947 $e^{j\,160{,}8^\circ}$
Вектор тока через ТТ фазы *C* при КЗ в расчетной точке, А	$\vec{I}_C$	5 947 $e^{j\,40{,}8^\circ}$
Вектор напряжения фазы *A* при КЗ в расчетной точке, В	$\vec{U}_A$	112 772 $e^{j\,0^\circ}$
Вектор напряжения фазы *B* при КЗ в расчетной точке, В	$\vec{U}_B$	112 772 $e^{-j\,120^\circ}$
Вектор напряжения фазы *C* при КЗ в расчетной точке, В	$\vec{U}_C$	112 772 $e^{j\,120^\circ}$
Постоянная времени затухания апериодической составляющей, мс	T_p	18,8

Таблица 4.3

Исходные данные ТТ (ТФНД-220-II)		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1200
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	30
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	30
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	7
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,54
Число витков вторичной обмотки	w_2	1200
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	21,5*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	1,06

Таблица 4.4

Параметры нагрузки ТТ			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,12	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	150	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 2,5	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{150}{1 \cdot 2{,}5} = 1{,}05$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п} = R_{каб}$	1,05	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 1{,}05 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 1{,}27$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$2 \cdot 1{,}05 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 2{,}32$	n = 2 при $K^{(1)}$
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(7+1{,}27)^2 + 0{,}54^2} = 8{,}3$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$\sqrt{(7+2{,}32)^2 + 0{,}54^2} = 9{,}4$	n = 2 при $K^{(1)}$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 4.5

Параметры срабатывания первой ступени ДЗ ВЛ	
Наименование параметра	**Значение**
Наименование терминала защиты	ШЭ2607 021
Наименование защиты	ДЗ от междуфазных КЗ и от КЗ на землю
Уставка по оси X характеристики РС I ступени, Ом	24,7
Уставка по оси R характеристики РС I ступени, Ом	12
Угол наклона φ_1 характеристики РС I ступени, °	79
Угол наклона φ_4 верхней части характеристики РС I ступени, °	20
Угол наклона φ_3 нижней левой части характеристики, °	115
Угол наклона φ_2 нижней правой части характеристики, °	-15
Максимальное время срабатывания без насыщения ТТ ($t_{доп.1}$), мс	25

Так как ВАХ ТТ отсутствует, а размеры магнитопровода ТТ известны, то расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) выполняется по $B(H)$. Результаты расчёта времени до насыщения и проверки ТТ для первых ступеней ДЗ приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Результаты расчёта времени до насыщения для *СТ4*			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		$K^{(3)}$	$K^{(1)}$
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{факт} = \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}}$	$\frac{5947}{1200} = 4{,}96$	$\frac{4305}{1200} = 3{,}6$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 4{,}96 = 0{,}496$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 3{,}6 = 0{,}36$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{нас} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$0{,}496 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 561$	$0{,}36 \cdot \frac{1200}{1{,}06} = 408$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{нас}$	1,88	1,875
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{факт} \cdot I_{2ном} \cdot z_{2\Sigma факт}$	$4{,}96 \cdot 1 \cdot 8{,}3 = 41{,}2$	$3{,}6 \cdot 1 \cdot 9{,}4 = 33{,}8$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{41{,}2}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}072$	$\frac{33{,}8}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}059$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{нас}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}88}{0{,}072} = 26{,}1$ $26{,}1 \cdot (1 - 0{,}86) = 3{,}7$	$\frac{1{,}875}{0{,}059} = 31{,}8$ $31{,}8 \cdot (1 - 0{,}86) = 4{,}5$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{нелин} = \frac{y_\varepsilon}{y_{лин}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции; – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	Больше $5T_p$ 11,3	Больше $5T_p$ 29,4

Так как при трехфазном КЗ условие пригодности ТТ по времени до насыщения не выполняется ($t_{нас.2}$ < 25 мс), то необходимо выполнить проверку допустимости замедления в срабатывании ДЗ от междуфазных КЗ. Для ДЗ от КЗ на землю проверка выполнена успешно

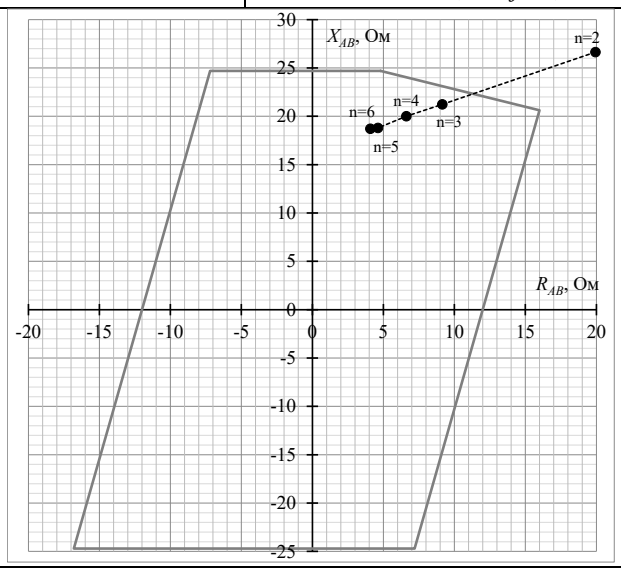
Расчёт выполнен при условии, что соответствующий Филиал СО ЕЭС предоставил данные о допустимом значений времени отключения КЗ ($t_{пред.доп.откл}$) для данной ВЛ-220 кВ:

$$t_{пред.доп.откл} = 0{,}16 \text{ с.}$$

Результаты проверки допустимости замедления в срабатывании ДЗ от междуфазных КЗ приведены в табл. 4.7.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 4.7

Проверка допустимости замедления в срабатывании ДЗ от междуфазных КЗ в режиме трехфазного КЗ			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечания**
Допустимая задержка в принятии решения о срабатывание при КЗ в зоне действия защиты, с	$t_{\text{доп.з.реш}} = t_{\text{пред.доп. откл}} - t_{\text{О.В}} - t_{\text{внутр.рел}} - t_{\text{пром.рел}}$	$0{,}16 - 0{,}035 - 0{,}01 - 0{,}01 = 0{,}105$	$t_{\text{пред.доп.откл}}$ = 0,16 с, $t_{\text{О.В}}$ = 0,035 с, $t_{\text{внутр.рел}}$ = 0,01 с, $t_{\text{пром.рел}}$ = 0,01 с
Номер периода, соответствующего допустимому времени срабатывания	$n = \text{ЦЧ}\left(\frac{t_{\text{доп.з.реш}}}{0{,}02}\right)$	$\text{ЦЧ}\left(\frac{0{,}105}{0{,}02}\right) = 5$	
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока и его угловая погрешность	$I_{2.1.n*}(\delta_{2.1.n})$	0,98 (3°)	*n* = 5
Вектор сопротивления петли КЗ *А-В*	$\vec{z}_{AB.\text{РС}.n} = \frac{\vec{U}_A - \vec{U}_B}{I_{2.1.n*} e^{j\delta_{2.1.n}} \left(\vec{I}_A - \vec{I}_B\right)}$	$\frac{112772 - 112772 \cdot e^{-j120^\circ}}{0{,}98 e^{j3^\circ}\left(5947 \cdot e^{-j79{,}2^\circ} - 5947 \cdot e^{-j160{,}8^\circ}\right)} = 4{,}6 + j\,18{,}8$	*n* = 5
Траектория движения рабочей точки реле сопротивления на комплексной плоскости			На 5-ом периоде переходного процесса вектор сопротивления находится в зоне срабатывания
Проверка ТТ для первых ступеней ДЗ пройдена успешно. ДЗ от междуфазных КЗ в условиях удаленного КЗ работает с допустимым замедлением.			

4.5 Пример выбора ТТ класса Р для первых ступеней ДЗ ВЛ-500 кВ с учётом переходных режимов

Расчетные точки КЗ для выбора ТТ класса Р с учётом переходных режимов для первых ступеней ДЗ в условиях данного примера показаны на рис. 4.3.

Выбор ТТ по условию правильного функционирования ДЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения при переходных процессах выполняется для режима КЗ на расстоянии, равном 80% зоны действия первой ступени.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

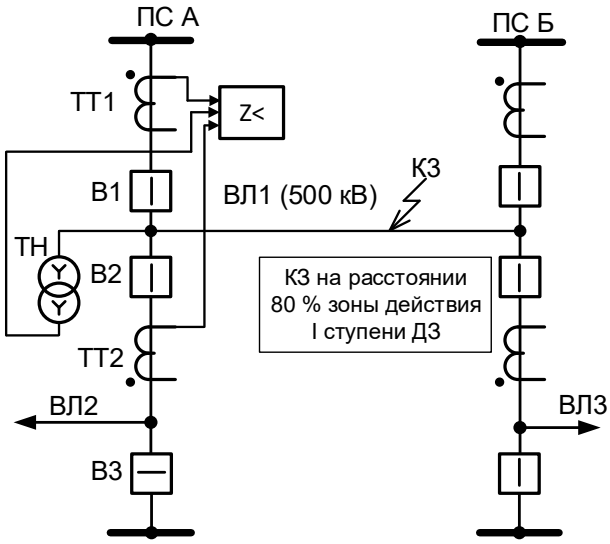


Рисунок 4.3 – Расположение расчетных точек КЗ для выбора ТТ для ДЗ ВЛ 500 кВ

Параметры тока для режима КЗ на расстоянии, равном 80% зоны действия первой ступени, приведены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Параметры токов для режима КЗ на расстоянии, равном 80% зоны действия первой ступени ДЗ			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		К$^{(3)}$	**К$^{(1)}$**
Ток через ТТ1 при КЗ в расчетной точке, А	$I_{КЗ}$	7 215	4 783
Постоянная времени затухания апериодической составляющей, мс	T_p	41	41

Вычисляются значения коэффициента переходного режима $K_{п.р}(t_{реш.1})$ для ТТ с ПХН. Так как значения постоянных времени затухания апериодических составляющих для режимов трехфазного и однофазного КЗ одинаковы, то и значения $K_{п.р}(t_{реш.1})$ для указанных режимов также одинаковы.

$$K_{п.р}\left(t_{реш.1}\right) = \omega \cdot T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{реш.1}}{T_p}}\right) + 1 = 314 \cdot 0{,}041 \cdot \left(1 - e^{-\frac{0{,}025}{0{,}041}}\right) + 1 = 6{,}9 .$$

По нагрузке присоединения определяется значение номинального первичного тока $I_{1.ном}$ = 2000 А. Значение номинального вторичного тока $I_{2.ном}$ в электроустановках сверхвысокого напряжения целесообразно принять равным 1 А.

Расчёт фактического сопротивления нагрузки на ТТ приведен в табл. 4.9.

Так как косинус угла фактического сопротивления нагрузки на ТТ равен 1, то

$$z_{н.факт} = R_{н.факт}.$$

Задаётся номинальное сопротивление нагрузки на ТТ ($z_{н.ном}$), которое для ТТ с номинальным вторичным током равным 1 А обычно находится в пределах 20 … 100 Ом. Пусть $z_{н.ном}$ = 40 Ом. Значение сопротивления вторичной обмотки ТТ допустимо принять равным 20 % от номинальной нагрузки.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 4.9

Параметры нагрузки ТТ			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,12	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	250	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 4	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{250}{1 \cdot 4} = 1{,}1$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п} = R_{каб}$	1,1	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 1{,}1 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 1{,}32$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$2 \cdot 1{,}1 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 2{,}42$	n = 2 при $K^{(1)}$

Определяются номинальное и фактическое сопротивления ветви вторичного тока ТТ по выражениям:

$$z_{2\sum ном} = 1{,}2 z_{н.ном} = 1{,}2 \cdot 40 = 48 \text{ Ом},$$

$$z^{(3)}_{2\sum факт} = 0{,}2 z_{н.ном} + z_{н.факт} = 0{,}2 \cdot 40 + 1{,}32 = 9{,}32 \text{ Ом},$$

$$z^{(1)}_{2\sum факт} = 0{,}2 z_{н.ном} + z^{(1)}_{н.факт} = 0{,}2 \cdot 40 + 2{,}42 = 10{,}42 \text{ Ом}.$$

Находят значения требуемой номинальной предельной кратности ТТ для каждого расчетного режима по выражению:

$$K^{(3)}_{ном.треб} = \frac{K_{п.р}\left(t_{реш.1}\right)}{1 - K_r} \cdot \frac{I^{(3)}_{КЗ} \cdot z^{(3)}_{2\Sigma факт}}{I_{1.ном} \cdot z_{2\Sigma ном}} = \frac{6{,}9}{1 - 0{,}86} \cdot \frac{7215 \cdot 9{,}32}{2000 \cdot 48} \approx 34{,}5\,,$$

$$K^{(1)}_{ном.треб} = \frac{K_{п.р}\left(t_{реш.1}\right)}{1 - K_r} \cdot \frac{I^{(1)}_{КЗ} \cdot z^{(1)}_{2\Sigma факт}}{I_{1.ном} \cdot z_{2\Sigma ном}} = \frac{6{,}9}{1 - 0{,}86} \cdot \frac{4783 \cdot 10{,}42}{2000 \cdot 48} \approx 25{,}6\,.$$

В качестве требуемой номинальной предельной кратности ($K_{ном.треб}$) принимается максимальное из значений $K^{(j)}_{ном.треб\,i}$:

$$K_{ном.треб} = 34{,}5.$$

Так как подобрать ТТ со значениями параметров не ниже заданных ($I_{1.ном}$ = 2000 А; $z_{н.ном}$ = 40 Ом; $K_{ном}$ = 34,5) не удаётся, то принимается ТТ класса Р типа ТФРМ-500Б У1 с наиболее близкими к заданным значениями. Исходные данные ТТ1 приведены в табл. 4.10.

Однако паспортные значения номинальных предельных кратностей ТТ могут быть занижены. Поэтому рекомендуется выбирать ТТ по фактическому значению номинальной предельной кратности.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 4.10

Параметры предварительно выбранного ТТ1 типа ТФРМ-500Б У1		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	2000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	18
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	40
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	4,23
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0
Число витков вторичной обмотки	w_2	2000
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	23,6*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	2,28

Паспортное значение номинальной предельной кратности для указанного ТТ класса Р типа ТФРМ-500Б У1 равно 18. Определим паспортное значение амплитуды магнитной индукции в магнитопроводе ТТ ($B_{m.пасп}$), соответствующее паспортному значению номинальной предельной кратности первичного тока ТТ $K_{ном.пасп}$ в условиях 10%-ной погрешности с помощью следующего выражения:

$$B_{нас.пасп} = \frac{K_{ном.пасп} \cdot I_{2.ном} \cdot \sqrt{(R_2 + 0{,}8 \cdot Z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 \cdot Z_{н.ном})^2}}{222 \cdot w_2 \cdot s_м} =$$

$$= \frac{18 \cdot 1 \cdot \sqrt{(4{,}23 + 0{,}8 \cdot 40)^2 + (0 + 0{,}6 \cdot 40)^2}}{222 \cdot 2000 \cdot 23{,}6 \cdot 10^{-4}} = 0{,}75 \text{ Тл.}$$

Фактическое значение амплитуды магнитной индукции насыщения приближенно равно

$$B_{нас.факт} = 1{,}9 \text{ Тл.}$$

Определим фактическое значение номинальной предельной кратности тока ТТ с помощью следующего выражения:

$$K_{ном.факт} = K_{ном.пасп} \frac{B_{нас.факт}}{B_{нас.пасп}} = 18 \cdot \frac{1{,}9}{0{,}75} = 45{,}6 \ .$$

Таким образом, фактическое значение номинально предельной кратности больше требуемого (45,6 > 34,5), т.е. ТТ класса Р типа ТФРМ-500Б У1 2000/1 подходит для условий данного примера. Выбор ТТ успешно завершён.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

5 ПРОВЕРКА И ВЫБОР ТТ КЛАССА Р ДЛЯ ТОКОВЫХ ОТСЕЧЕК И ПЕРВЫХ СТУПЕНЕЙ ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТ КЗ НА ЗЕМЛЮ С УЧЁТОМ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

5.1 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах ТО и первых ступеней ТНЗНП линий высокого и сверхвысокого напряжения с учётом переходных режимов

С целью проверки правильности функционирования токовых отсечек (ТО) и первых ступеней токовых направленных защит нулевой последовательности (ТНЗНП), использующих информацию от ТТ класса Р, необходимо произвести расчёты первичных и вторичных токов ТТ при КЗ в характерных точках, показанных на рис. 5.1 и 5.2.

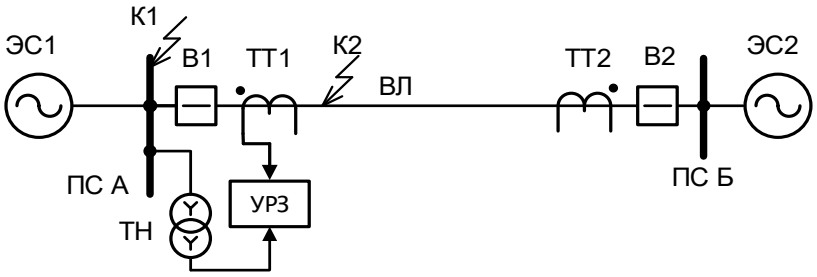


Рисунок 5.1 – Устройство защиты подключено к ТТ, установленным в цепи защищаемой линии ВЛ

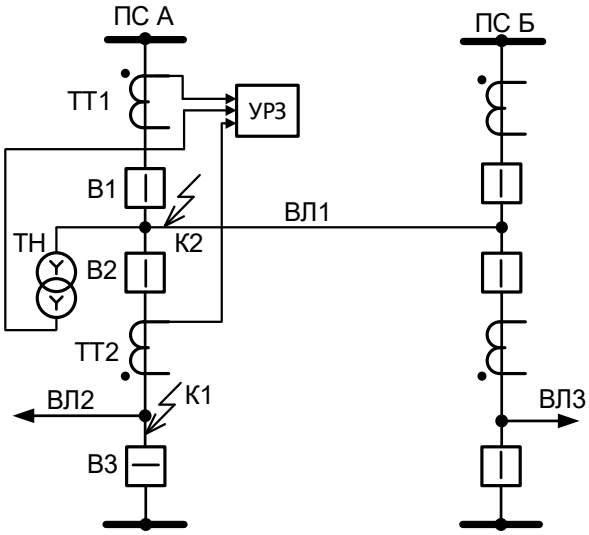


Рисунок 5.2 – Устройство защиты подключено к ТТ, установленным в цепях выключателей В1, В2 и ШР

На рис. 5.1 устройство защиты подключено к ТТ, установленным в цепи защищаемой линии. Характерные точки в этом случае следующие:

– близкое КЗ «за спиной» – точка К1. КЗ в данной точке не оказывает влияние на селективность функционирования ТО и пускового органа тока нулевой последовательности, так как при насыщении ТТ вторичные токи уменьшаются и не превышают уставку срабатывания. Исследования показали, что если ТТ установлены в цепи защищаемой линии, то ОНМ, входящий в

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

состав ТНЗНП, работает правильно. Исключением является режим трехфазного КЗ «за спиной» защиты, когда уровень напряжения на входе ОНМ недостаточен для его устойчивой работы. В указанном режиме правильное несрабатывание ТНЗНП в защитах ООО НПП «ЭКРА» обеспечивается за счет органа, распознающего КЗ с землей. По указанным причинам нет необходимости в проверке пригодности ТТ для ТО и ТНЗНП в данном режиме КЗ;

– близкое КЗ в зоне действия (в месте установки защиты) – точка К2. Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к замедлению в срабатывании ТО и пускового органа тока нулевой последовательности на время, в первом приближении превышающее значение постоянной времени T_p. В указанном случае отключение повреждения выполняется с выдержкой времени действием второй ступени МТЗ или ТНЗНП, соответственно. Исследования показали, что в переходных режимах, связанных с насыщением ТТ, поведение ОНМ для обоих вариантов подключения ТТ к ТНЗНП практически не оказывает влияния на замедление в срабатывании защиты.

На рисунке 5.2 УРЗ подключено к ТТ, установленным в цепях выключателей В1 и В2. Характерные точки в этом случае следующие:

– близкое КЗ «за спиной» (точка К1). Наибольший сквозной ток, протекающий по ТТ1 и ТТ2, имеет место при отключённом выключателе В3 (ремонтный режим выключателя). Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к неселективному срабатыванию ТО и первых ступеней ТНЗНП;

– близкое КЗ в зоне действия (в прямом направлении) – точка К2. Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к замедлению в срабатывании ТО и пускового органа тока нулевой последовательности на время, в первом приближении превышающее значение постоянной времени T_p. В указанном случае отключение повреждения выполняется с выдержкой времени действием второй ступени МТЗ или ТНЗНП, соответственно. Аналогично случаю с ТТ установленными в цепи линии, поведение ОНМ не оказывает влияния на замедление в срабатывании ТНЗНП.

Исследования показали, что при включении ТО и первых ступеней ТНЗНП на сумму токов в цепях выключателей обеспечить их правильную работу в режимах близких КЗ вне зоны действия путем выбора ТТ класса Р по времени до насыщения в некоторых случаях невозможно. Поэтому при указанном варианте подключения ТТ к устройству защиты необходимо использовать дополнительные меры. В УРЗ линий сверхвысокого напряжения производства ООО НПП «ЭКРА» имеется блокировка при внешних КЗ, которая реагирует на направление векторов первых гармоник вторичных токов ТТ.

Таким образом, нет необходимости в проверке пригодности ТТ для ТО и ТНЗНП в режимах КЗ «за спиной».

В результате при проверке и выборе ТТ для ТО и первых ступеней ТНЗНП должен быть рассмотрен только один режим: близкое КЗ в зоне действия (точка К2).

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

5.2 Методика проверки ТТ для ТО и первых ступеней ТНЗНП линий высокого и сверхвысокого напряжения

Время принятия решения для ТО и первых ступеней ТНЗНП при КЗ в зоне действия зависит от начальной фазы и кратности тока КЗ. При превышении током КЗ порога срабатывания ТО и первых ступеней ТНЗНП в два раза, время принятия решения не превышает 10 мс с момента начала КЗ.

Проверка производится только для режима близкого КЗ в зоне действия в следующей последовательности.

1. В соответствии с [1] для режимов трехфазного и однофазного КЗ выполняется расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) ТТ по ВАХ или $B(H)$, а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. В последнем случае необходимо в соответствии с Приложением А данных Методических указаний вычислить значение фактической предельной кратности ТТ.

2. Время до насыщения ТТ сравнивается с временем принятия решения ТО и первых ступеней ТНЗНП при КЗ в зоне действия:

$$t_{нас} \geq t_{реш.1}, \tag{5.1}$$

где $t_{реш.1}$ – время принятия решения о КЗ в зоне действия для ТО и первой ступени ТНЗНП. По данным производителя $t_{реш.1}$ = 10 мс.

3. Если условие (5.1) выполняется для режимов близкого трехфазного и однофазного КЗ в зоне действия, то ТТ пригоден для использования в схемах ТО и первой ступени ТНЗНП. На этом проверка успешно закончена.

4. Дальнейшие действия по проверке выполняются для ТО, если условие (5.1) не выполняется для режима трехфазного КЗ; для ТНЗНП, если условие (5.1) не выполняется для режима однофазного КЗ.

5. Если условие (5.1) не выполняется хотя бы для одного вида КЗ, то переходят к проверке условия срабатывания ТО и первых ступеней ТНЗНП на первом периоде КЗ в зоне действия.

6. Для момента времени $t_{нас}$ по зависимости рис. Б.4, Приложение Б, полученной с помощью дискретного преобразования Фурье методом скользящего окна, определяется действующее значение первой гармоники $I_{2.1.1*}$, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ.

7. По приближённым выражениям на первом периоде КЗ вычисляется:

– для ТО – относительное действующее значение вторичного тока, насыщенного ТТ по выражению (5.2)

$$I_{ТО.1*} = \frac{I_{КЗ}^{(3)}}{I_{1.ном}} \cdot I_{2.1.1*}, \tag{5.2}$$

где $I_{КЗ}^{(3)}$ – действующее значение тока трехфазного КЗ;

– для первой ступени ТНЗНП – относительное действующее значение тока нулевой последовательности при насыщении ТТ в поврежденной фазе по выражению (5.3):

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$$I_{\text{ТНЗНП.1*}} = \frac{\left|\vec{I}_A I_{2.1.1*} + \vec{I}_B + \vec{I}_C\right|}{I_{1.\text{ном}}}, \tag{5.3}$$

где $\vec{I}_A$, $\vec{I}_B$, $\vec{I}_C$ – векторы периодических составляющих токов фаз *A*, *B* и *C* в режиме КЗ.

8. Проверяют условие срабатывания ТО и первых ступеней ТНЗНП при КЗ в зоне действия:

$$I_{\text{ТО.1*}} > I_{\text{ТО.ср}}, \tag{5.4}$$

$$I_{\text{ТНЗНП.1*}} > I_{\text{ТНЗНП.I.ср}}, \tag{5.5}$$

где $I_{\text{ТО.ср}}$, $I_{\text{ТНЗНП.ср}}$ – выраженные в относительных единицах параметры срабатывания ТО и пускового органа первой ступени ТНЗНП.

9. Если условия (5.4) и (5.5) выполняются, то проверка ТО и первых ступеней ТНЗНП закончена с положительным результатом. Иначе рекомендуется выполнить проверку условия срабатывания ТО и первых ступеней ТНЗНП на втором периоде КЗ в зоне действия.

С указанной целью для второго периода рассчитывают:

– для ТО – относительное действующее значение вторичного тока

$$I_{\text{ТО.1*}} = \frac{I_{\text{КЗ}}^{(3)}}{I_{1.\text{ном}}} \cdot I_{2.1.2*}, \tag{5.6}$$

где $I_{2.1.2*}$ – относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока ТТ на втором периоде КЗ, определённое по рис. Б.1 Приложения Б;

– для первой ступени ТНЗНП – относительное действующее значение тока нулевой последовательности

$$I_{\text{ТНЗНП.2*}} = \frac{\left|\vec{I}_A I_{2.1.2*} \cdot e^{j\delta_{2.1.n}} + \vec{I}_B + \vec{I}_C\right|}{I_{1.\text{ном}}} \tag{5.7}$$

где $\delta_{2.1.2}$ – угловая погрешность первой гармоники вторичного тока ТТ на втором периоде КЗ, определённая по рис. Б.2 Приложения Б;

10. Проверяют условие срабатывания ТО и первых ступеней ТНЗНП на втором периоде при КЗ в зоне действия:

$$I_{\text{ТО.2*}} > I_{\text{ТО.ср}}, \tag{5.8}$$

$$I_{\text{ТНЗНП.2*}} > I_{\text{ТНЗНП.I.ср}}, \tag{5.9}$$

11. Если условия (5.8), (5.9) выполняются, то проверка ТО и первых ступеней ТНЗНП закончена с положительным результатом.

12. Иначе следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм^2), повторно рассчитать время до насыщения ТТ.

13. Если вычисленное повторно время до насыщения превысит значение времени принятия решения о КЗ в зоне действия для ТО и первых ступеней ТНЗНП ($t_{\text{реш.1}}$ = 10 мс), то ТТ

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

пригоден для использования в схемах ТО и ТНЗНП. Проверка закончена с положительным результатом.

14. Иначе следует повторно выполнить проверку по пунктам 6 – 7.

15. Если условие (5.4) или (5.5) снова не выполняется, то ТТ не пригоден для использования в схеме ТО и ТНЗНП. Необходимо выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий требованиям по условию переходных процессов.

5.3 Методика выбора ТТ для ТО и первых ступеней ТНЗНП линий высокого и сверхвысокого напряжения

Должны быть известны следующие исходные данные:

– паспортные данные ТТ и его ВАХ (или *B*(*H*) и размеры магнитопровода);

– токи трёхфазного и однофазного КЗ для точек К2, указанных на рисунках 5.1 и 5.2;

– эквивалентные постоянные времени затухания апериодических составляющих токов КЗ, указанных выше;

– параметры срабатывания УРЗ.

Методика выбора ТТ по условиям правильного функционирования ТО и первых ступеней ТНЗНП линий высокого и сверхвысокого напряжения при переходных процессах следующая.

1. Предварительно по нагрузке присоединения определяют значение номинального первичного тока $I_{1.\text{ном}}$. Значение номинального вторичного тока $I_{2.\text{ном}}$ в электроустановках сверхвысокого напряжения и напряжением 220 кВ и выше целесообразно принять равным 1 А, так как это облегчает условия работы ТТ в переходном режиме по сравнению с номинальным вторичным током, равным 5 А.

2. Приближенно рассчитывают относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока ТТ для режима близкого КЗ в зоне действия, соответствующее уровню срабатывания ТО и первой ступеней ТНЗНП, с помощью следующих выражений:

– для ТО

$$I_{2.1.1*} = I_{\text{ТО.ср}} \cdot \frac{I_{1.\text{ном}}}{I_{\text{КЗ}}^{(3)}}, \tag{5.10}$$

где $I_{\text{КЗ}}^{(3)}$ – действующее значение тока близкого трехфазного КЗ в зоне действия;

$I_{\text{ТО.ср}}$ – выраженное в относительных единицах значение тока срабатывания ТО;

– для первой ступени ТНЗНП

$$I_{2.1.1*} = I_{\text{ТНЗНП.ср}} \cdot \frac{I_{1.\text{ном}}}{I_{\text{КЗ}}^{(1)}}, \tag{5.11}$$

где $I_{\text{КЗ}}^{(1)}$ – ток нулевой последовательности при близком однофазном КЗ в зоне действия;

$I_{\text{ТНЗНП.ср}}$ – выраженное в относительных единицах значение тока срабатывания пускового органа первой ступени ТНЗНП.

3. По рассчитанным относительным действующим значениям первой гармоники $I_{2.1.1*}$ с

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

помощью зависимости рис. Б.4, Приложение Б определяется время до насыщения ТТ ($t_{нас}$), соответствующее времени принятия решения ($t_{реш.1}$) о КЗ в зоне действия для ТО и первой ступени ТНЗНП.

4. По значениям $t_{реш.1}^{(j)}$ и $T_p^{(j)}$ для ТТ класса Р определяют значения коэффициента переходного режима с помощью следующего выражения:

$$K_{п.р}^{(j)}\left(t_{реш.1}^{(j)}\right) = \omega \cdot T_p^{(j)}\left(1 - e^{-\frac{t_{реш.1}^{(j)}}{T_p^{(j)}}}\right) + 1, \quad (5.12)$$

где j – вид КЗ в выбранной расчетной точке: 1 – однофазное; 3 – трехфазное;

T_p – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока при КЗ в зоне действия ($I_{КЗ}$).

Однако, если время принятия решения окажется меньше 10 мс, то коэффициент переходного режима $K_{п.р}^{(j)}(t_{реш\,i})$ для ТТ класса Р рекомендуется определять по значениям $t_{реш.i}$ и $T_{p.i}^{(j)}$ с помощью диаграмм зависимости $K_{п.р}(t)$ от времени, приведённых в Приложении А ГОСТ Р 58669-2019 [1].

5. Производят расчёт фактического сопротивления нагрузки на ТТ ($z_{н.факт}$).

6. Задаётся номинальное сопротивление нагрузки на ТТ ($z_{н.ном}$), которое для ТТ с номинальным вторичным током равным 1 А обычно находится в пределах 20 … 100 Ом, а для пятиамперных – 0,8 … 2,4 Ом.

7. Определяется номинальное и фактическое сопротивления ветви вторичного тока ТТ по выражениям:

$$z_{2\Sigma ном} = z_2 + z_{н.ном} \approx 1{,}2 z_{н.ном}, \quad (5.13)$$

$$z_{2\Sigma факт}^{(j)} = z_2 + z_{н.факт}^{(j)} \approx 0{,}2 z_{н.ном} + z_{н.факт}^{(j)}, \quad (5.14)$$

где z_2 – сопротивления вторичной обмотки ТТ. При выборе ТТ значение сопротивления его вторичной обмотки допустимо принять равным 20 % от номинальной нагрузки.

8. Находят значения требуемой номинальной предельной кратности ТТ для каждого расчетного режима по выражению:

$$K_{ном.треб}^{(j)} = \frac{K_{п.р}^{(j)}(t_{реш.1})}{1 - K_r} \cdot \frac{I_{КЗ}^{(j)} \cdot z_{2\Sigma факт}^{(j)}}{I_{1.ном} \cdot z_{2\Sigma ном}}, \quad (5.15)$$

где $I_{КЗ}^{(j)}$ – ток соответствующего вида КЗ.

9. В качестве требуемой номинальной предельной кратности ($K_{ном.треб}$) принимается максимальное из значений $K_{ном.треб}^{(j)}$:

$$K_{ном.треб} > \max\left(K_{ном.треб}^{(j)}\right). \quad (5.16)$$

10. По каталогу находят ТТ класса Р того же класса напряжения с заданным значением

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

номинального первичного тока и номинальной предельной кратностью, соответствующей выражению (5.16), а также с суммой сопротивления вторичной обмотки и номинального сопротивления нагрузки не ниже значения, вычисленного по выражению (5.13).

11. Если подобрать ТТ со значениями параметров не ниже заданных не удаётся, то принимается ТТ с наиболее близкими к заданным значениями. Для указанного ТТ выполняется дополнительная проверка:

$$I_{1.\text{ном}} \cdot K_{\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}} \geq \frac{K_{\text{п.р}}^{(j)}(t_{\text{реш.1}})}{1-K_r} \cdot I_{\text{КЗ}}^{(j)} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)}, \quad (5.17)$$

где

$$z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)} = \sqrt{\left(R_2 + R_{\text{н.факт}}^{(j)}\right)^2 + \left(X_2 + X_{\text{н.факт}}^{(j)}\right)^2}, \quad (5.18)$$

$$z_{2\Sigma\text{ном}} = \sqrt{\left(R_2 + 0{,}8 z_{\text{н.ном}}\right)^2 + \left(X_2 + 0{,}6 z_{\text{н.ном}}\right)^2}. \quad (5.19)$$

12. Если условие (5.17) выполняется, то данный ТТ пригоден для использования в схеме ТО и ТНЗНП.

13. Иначе следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей) и повторно выполнить расчёт по пунктам 7 – 11.

14. Если вышеуказанная мера окажется неэффективной, следует перейти на ТТ того же класса Р с более высокими значениями первичного тока или номинального сопротивления нагрузки. Повторно выполнить расчёт по пунктам 7 – 11.

15. Если и эта мера окажется неэффективной, то следует выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ.

5.4 Пример проверки ТТ класса Р для ТО и первой ступени ТНЗНП ВЛ-220 кВ

Расчетные точки КЗ для проверки правильности функционирования ТО и первой ступени ТНЗНП, использующих информацию от ТТ класса Р, в условиях данного примера показаны на рис. 5.3.

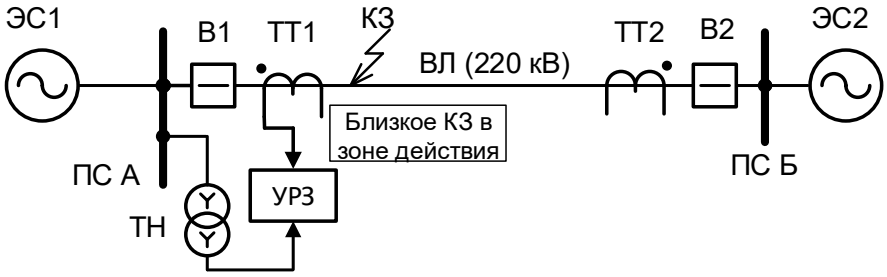


Рисунок 5.3 – Расположение расчетных точек КЗ для проверки ТО и первой ступени ТНЗНП ВЛ 220 кВ

Исходные данные для проверки ТТ приведены в табл. 5.1 – 5.5.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 5.1

Параметры токов для режима близкого КЗ в зоне действия ТО и первой ступени ТНЗНП			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		$K^{(3)}$	**$K^{(1)}$**
Ток через ТТ1 при КЗ в расчетной точке, А	$I_{КЗ}$	32 157	32 794
Постоянная времени затухания апериодической составляющей, мс	T_p	32	29,4

Таблица 5.2

Исходные данные ТТ (ТФНД-220-II)		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1200
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	30
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	30
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	7
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,54
Число витков вторичной обмотки	w_2	1200
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	S	$21{,}5*10^{-4}$
Средняя длина силовой линии, м	l	1,06

Таблица 5.3

Параметры нагрузки ТТ			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,12	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	150	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 2,5	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{150}{1 \cdot 2{,}5} = 1{,}05$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п} = R_{каб}$	1,05	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 1{,}05 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 1{,}27$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$2 \cdot 1{,}05 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 2{,}32$	n = 2 при $K^{(1)}$
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(7+1{,}27)^2 + 0{,}54^2} = 8{,}3$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$\sqrt{(7+2{,}32)^2 + 0{,}54^2} = 9{,}4$	n = 2 при $K^{(1)}$

Таблица 5.4

Параметры срабатывания ТО и первой ступени ТНЗНП		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Наименование терминала защиты	–	ШЭ2607 021
Наименование защиты	–	Междуфазная ТО и первая ступень ТНЗНП
Ток срабатывания токовой отсечки, отн.ед.	$I_{ТО.ср}$	4,1
Ток срабатывания ПО первой ступени ТНЗНП, отн.ед.	$I_{ТНЗНП.ср}$	3,5
Время принятия решения о КЗ в зоне действия, мс	$t_{реш.1}$	10

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 5.5

Параметры векторов токов для режима близкого КЗ в зоне действия			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		К(3)	**К(1)**
Вектор тока через ТТ фазы *А* при КЗ в расчетной точке, А	$\vec{I}_A$	32 157 $e^{j\,0^\circ}$	32 794 $e^{j\,0^\circ}$
Вектор тока через ТТ фазы *В* при КЗ в расчетной точке, А	$\vec{I}_B$	32 157 $e^{-j\,120^\circ}$	814 $e^{-j\,13{,}9^\circ}$
Вектор тока через ТТ фазы *С* при КЗ в расчетной точке, А	$\vec{I}_C$	32 157 $e^{j\,120^\circ}$	217 $e^{-j\,75{,}16^\circ}$
Постоянная времени затухания апериодической составляющей, мс	T_p	32,0	29,4

Так как ВАХ ТТ отсутствует, а размеры магнитопровода ТТ известны, то расчёт времени до насыщения ($t_{\text{нас}}$) выполняется по *B*(*H*). Результаты расчёта времени до насыщения и проверки ТТ для первых ступеней ДЗ приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Результаты расчёта времени до насыщения для ТТ1			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		***К*(3)**	***К*(1)**
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{\text{факт}} = \dfrac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$	$\dfrac{32157}{1200} = 26{,}8$	$\dfrac{32794}{1200} = 27{,}33$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \dfrac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}$	$\dfrac{10}{100} \cdot 1 \cdot 26{,}8 = 2{,}68$	$\dfrac{10}{100} \cdot 1 \cdot 27{,}33 = 2{,}73$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{\text{нас}} = I_{0.\varepsilon} \cdot \dfrac{w_2}{l}$	$2{,}68 \cdot \dfrac{1200}{1{,}06} = 3034$	$2{,}73 \cdot \dfrac{1200}{1{,}06} = 3091$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{\text{нас}}$	1,96	1,96
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}$	$26{,}8 \cdot 1 \cdot 8{,}3 = 222$	$27{,}33 \cdot 1 \cdot 9{,}4 = 257$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \dfrac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\dfrac{222}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}388$	$\dfrac{257}{222 \cdot 1200 \cdot 21{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}449$
Параметр режима работы ТТ *А* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \dfrac{B_{\text{нас}}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\dfrac{1{,}96}{0{,}388} = 5{,}1$ $5{,}1 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}71$	$\dfrac{1{,}96}{0{,}449} = 4{,}4$ $4{,}4 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}62$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{\text{нелин}} = \dfrac{y_\varepsilon}{y_{\text{лин}}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции; – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	26,5 3,7	12,8 3,5
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{\text{нас.1}} > t_{\text{реш.1}}$; $t_{\text{нас.2}} > t_{\text{реш.1}}$	Выпол. (26,5 > 10 мс) Не выпол. (3,7 < 10 мс)	Выпол. (12,8 > 10 мс) Не выпол. (3,5 < 10 мс)

Так как при максимальном значении остаточной индукции условие пригодности ТТ по времени до насыщения не выполняется для обоих режимов КЗ, то для ТО и первой ступени ТНЗНП необходимо выполнить проверку условия срабатывания на первом периоде КЗ в зоне действия по относительному действующему значению первой гармоники $I_{2.1.1*}$, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ. Из результатов указанной проверки, приведённых в табл. 5.7, следует, что условие срабатывания ТО и первой ступени ТНЗНП на первом периоде КЗ в зоне при насыщении ТТ не выполняется.

Необходимо выполнить проверку условия срабатывания ТО и первой ступени ТНЗНП на втором периоде КЗ в зоне действия. Из результатов указанной проверки, приведённых в табл. 5.8, следует, что условие срабатывания ТО и первой ступени ТНЗНП на втором периоде КЗ в зоне при насыщении ТТ выполняется. Проверка успешно завершена.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 5.7

Проверка ТТ по условию срабатывания ТО и первой ступени ТНЗНП на первом периоде КЗ в зоне действия				Примечание
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**		
		$K^{(3)}$	$K^{(1)}$	
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока к моменту времени $t_{нас}$, отн.ед.	$I_{2.1.1*}$	0,05	0,05	Рис. Б.4, Приложение Б
Относительное действующее значение вторичного тока насыщенного ТТ для ТО на первом периоде КЗ, отн.ед.	$I_{ТО.1*} = \frac{I_{КЗ}^{(3)}}{I_{1.ном}} \cdot I_{2.1.1*}$	$\frac{32157}{1200} \cdot 0{,}05 = 1{,}34$	–	
Относительное действующее значение тока нулевой последовательности для первой ступени ТНЗНП на первом периоде КЗ, отн.ед.	$I_{ТНЗНП.1*} = \frac{\left\lvert \vec{I}_A I_{2.1.1*} + \vec{I}_B + \vec{I}_C \right\rvert}{I_{1.ном}}$	–	$\frac{\left\lvert 32794 \cdot e^{j0^{\circ}}\, 0{,}05 + 814 \cdot e^{-j13{,}9^{\circ}} + 217 \cdot e^{-j75{,}2^{\circ}} \right\rvert}{1200} = 2{,}1$	
Проверка условия срабатывания ТО на первом периоде КЗ в зоне действия	$I_{ТО.1*} > I_{ТО.ср}$	$1{,}34 < 4{,}1$	–	$I_{ТО.ср} = 4{,}1$ отн.ед.
Проверка условия срабатывания первой ступени ТНЗНП на первом периоде КЗ в зоне действия	$I_{ТНЗНП.1*} > I_{ТНЗНП.I.ср}$	–	$2{,}1 < 3{,}5$	$I_{ТНЗНП.I.ср} = 3{,}5$ отн.ед.
Условие срабатывания ТО и первой ступени ТНЗНП на первом периоде КЗ в зоне при насыщении ТТ не выполняется.				

Редакция от 13.09.2021

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 5.8

Проверка ТТ по условию срабатывания ТО и первой ступени ТНЗНП на втором периоде КЗ в зоне действия				Примечание
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**		
		$K^{(3)}$	$K^{(1)}$	
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока на втором периоде КЗ, отн.ед.	$I_{2.1.2*}$	0,41	0,41	Рис. Б.1, Приложение Б
Угловая погрешность первой гармоники вторичного тока ТТ на втором периоде КЗ, град.	$\delta_{2.1.2}$	35	35	Рис. Б.2, Приложение Б
Относительное действующее значение вторичного тока насыщенного ТТ для ТО на втором периоде КЗ, отн.ед.	$I_{\text{ТО}.2*} = \frac{I_{\text{КЗ}}^{(3)}}{I_{1.\text{ном}}} \cdot I_{2.1.2*}$	$\frac{32157 \cdot 0{,}41}{1200} = 10{,}9$	–	
Относительное действующее значение тока нулевой последовательности для первой ступени ТНЗНП на втором периоде КЗ, отн.ед.	$I_{\text{ТНЗНП}.2*} = \frac{\left\lvert \vec{I}_A I_{2.1.2*} \cdot e^{j\delta_{2.1.2}} + \vec{I}_B + \vec{I}_C \right\rvert}{I_{1.\text{ном}}}$	–	$\frac{\left\lvert 32794 \cdot 0{,}41 e^{j35^\circ} + 814 \cdot e^{-j13{,}9^\circ} + 217 \cdot e^{-j75{,}2^\circ} \right\rvert}{1200} = 11{,}6$	
Проверка условия срабатывания ТО на втором периоде КЗ в зоне действия	$I_{\text{ТО}.1*} > I_{\text{ТО.ср}}$	$10{,}9 > 4{,}1$	–	$I_{\text{ТО.ср}} = 4{,}1$ отн.ед.
Проверка условия срабатывания первой ступени ТНЗНП на втором периоде КЗ в зоне действия	$I_{\text{ТНЗНП}.1*} > I_{\text{ТНЗНП.I.ср}}$	–	$11{,}6 > 3{,}5$	$I_{\text{ТНЗНП.I.ср}} = 3{,}5$ отн.ед.
Условие срабатывания ТО и первой ступени ТНЗНП на втором периоде КЗ в зоне при насыщении ТТ выполняется.				

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

5.5 Пример выбора ТТ класса Р для ТО и первой ступени ТНЗНП ВЛ-500 кВ с учётом переходных режимов

Расчетные точки КЗ для выбора ТТ класса Р с учётом переходных режимов для ТО и первой ступени ТНЗНП в условиях данного примера показаны на рис. 5.4.

Выбор ТТ по условию правильного функционирования ТО и первой ступени ТНЗНП линий высокого и сверхвысокого напряжения при переходных процессах выполняется для режима близкого КЗ в зоне действия.

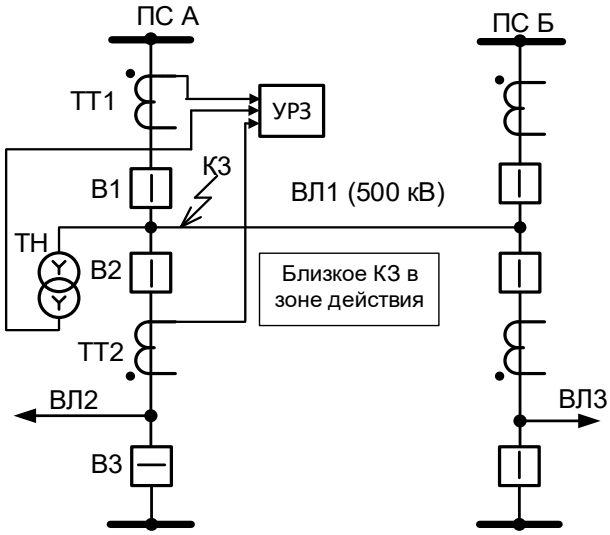


Рисунок 5.4 – Расположение расчетных точек КЗ для выбора ТТ для ТО и первой ступени ТНЗНП ВЛ 500 кВ

Параметры тока для режима близкого КЗ в зоне действия ТО и первой ступени ТНЗНП приведены в табл. 5.9.

Таблица 5.9

Параметры токов для режима близкого КЗ в зоне действия ТО и первой ступени ТНЗНП			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		К(3)	**К(1)**
Ток через ТТ1 при КЗ в расчетной точке, А	$I_{КЗ}$	22 592	20 910
Постоянная времени затухания апериодической составляющей, мс	T_p	41	41

Параметры срабатывания ТО и первой ступени ТНЗНП приведены в табл. 5.10.

Таблица 5.10

Параметры срабатывания ТО и первой ступени ТНЗНП		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Наименование терминала защиты	–	ШЭ2710 521
Наименование защиты	–	Междуфазная ТО и первая ступень ТНЗНП
Ток срабатывания токовой отсечки, отн.ед.	$I_{ТО.ср}$	3,1
Ток срабатывания ПО первой ступени ТНЗНП, отн.ед.	$I_{ТНЗНП.ср}$	2,08

По нагрузке присоединения определяется значение номинального первичного тока $I_{1.ном}$ = 2000 А. Значение номинального вторичного тока $I_{2.ном}$ в электроустановках сверхвысокого напряжения целесообразно принять равным 1 А.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Приближенно рассчитывают относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока ТТ для режима близкого КЗ в зоне действия, соответствующее уровню срабатывания ТО и первой ступеней ТНЗНП, с помощью следующих выражений:

– для ТО

$$I_{2.1.1*} = I_{\text{ТО.ср}} \cdot \frac{I_{1.\text{ном}}}{I_{\text{КЗ}}^{(3)}} = 3{,}1 \cdot \frac{2000}{22592} = 0{,}27 \text{ отн. ед.};$$

– для первой ступени ТНЗНП

$$I_{2.1.1*} = I_{\text{ТНЗНП.ср}} \cdot \frac{I_{1.\text{ном}}}{I_{\text{КЗ}}^{(1)}} = 2{,}08 \cdot \frac{2000}{20910} = 0{,}2 \text{ отн. ед.}$$

По рассчитанным относительным действующим значениям первой гармоники $I_{2.1.1*}$ с помощью зависимости рис. Б.4, Приложение Б для T_p = 41 мс определяется время до насыщения ТТ ($t_{\text{нас}}$), соответствующее времени принятия решения ($t_{\text{реш.1}}$) о КЗ в зоне действия:

– для ТО

$$t_{\text{реш.1}}^{(3)} = 6{,}4 \text{ мс};$$

– для первой ступени ТНЗНП

$$t_{\text{реш.1}}^{(1)} = 5{,}6 \text{ мс}.$$

Так как время принятия решения значительно меньше 10 мс, то коэффициент переходного режима определяется по значениям $t_{\text{реш.1}}$, T_p с помощью диаграмм зависимости $K_{\text{п.р}}(t)$ от времени, приведённых в Приложении А ГОСТ Р 58669-2019 [1]

$$K_{\text{п.р}}^{(3)}\left(t_{\text{реш.1}}^{(3)}\right) = 1{,}6,$$

$$K_{\text{п.р}}^{(1)}\left(t_{\text{реш.1}}^{(1)}\right) = 1{,}4.$$

Расчёт фактического сопротивления нагрузки на ТТ приведен в табл. 5.11.

Так как косинус угла фактического сопротивления нагрузки на ТТ равен 1, то

$$z_{\text{н.факт}} = R_{\text{н.факт}}.$$

Задаётся номинальное сопротивление нагрузки на ТТ ($z_{\text{н.ном}}$), которое для ТТ с номинальным вторичным током равным 1 А обычно находится в пределах 20 … 100 Ом. Пусть $z_{\text{н.ном}} = 40$ Ом. Значение сопротивления вторичной обмотки ТТ допустимо принять равным 20 % от номинальной нагрузки.

Определяются номинальное и фактическое сопротивления ветви вторичного тока ТТ по выражениям:

$$z_{2\sum\text{ном}} = 1{,}2 z_{\text{н.ном}} = 1{,}2 \cdot 40 = 48 \text{ Ом},$$

$$z_{2\sum\text{факт}}^{(3)} = 0{,}2 z_{\text{н.ном}} + z_{\text{н.факт}} = 0{,}2 \cdot 40 + 1{,}32 = 9{,}32 \text{ Ом},$$

$$z_{2\sum\text{факт}}^{(1)} = 0{,}2 z_{\text{н.ном}} + z_{\text{н.факт}}^{(1)} = 0{,}2 \cdot 40 + 2{,}42 = 10{,}42 \text{ Ом}.$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 5.11

Параметры нагрузки ТТ			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,12	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	250	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 4	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{250}{1 \cdot 4} = 1{,}1$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п} = R_{каб}$	1,1	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 1{,}1 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 1{,}32$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$2 \cdot 1{,}1 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 2{,}42$	n = 2 при $K^{(1)}$

Находят значения требуемой номинальной предельной кратности ТТ для каждого расчетного режима по выражению:

$$K^{(3)}_{ном.треб} = \frac{K^{(3)}_{п.р}\left(t^{(3)}_{реш.1}\right)}{1 - K_r} \cdot \frac{I^{(3)}_{КЗ} \cdot z^{(3)}_{2\Sigma факт}}{I_{1.ном} \cdot z_{2\Sigma ном}} = \frac{1{,}6}{1 - 0{,}86} \cdot \frac{22592 \cdot 9{,}32}{2000 \cdot 48} \approx 25,$$

$$K^{(1)}_{ном.треб} = \frac{K^{(1)}_{п.р}\left(t^{(1)}_{реш.1}\right)}{1 - K_r} \cdot \frac{I^{(1)}_{КЗ} \cdot z^{(1)}_{2\Sigma факт}}{I_{1.ном} \cdot z_{2\Sigma ном}} = \frac{1{,}4}{1 - 0{,}86} \cdot \frac{20910 \cdot 10{,}42}{2000 \cdot 48} \approx 23.$$

В качестве требуемой номинальной предельной кратности ($K_{ном.треб}$) принимается максимальное из значений $K^{(j)}_{ном.треб\,i}$:

$$K_{ном.треб} = 25.$$

Так как подобрать ТТ со значениями параметров не ниже заданных ($I_{1.ном}$ = 2000 А; $z_{н.ном}$ = 40 Ом; $K_{ном}$ = 25) не удаётся, то принимается ТТ класса Р типа ТФРМ-500Б У1 с наиболее близкими к заданным значениями. Исходные данные ТТ1 приведены в табл. 5.12.

Таблица 5.12

Параметры предварительно выбранного ТТ1 типа ТФРМ-500Б У1		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	2000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	18
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	40
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	4,23
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0
Число витков вторичной обмотки	w_2	2000
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	S	23,6*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	2,28

Однако паспортные значения номинальных предельных кратностей ТТ могут быть зани-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

жены. Поэтому рекомендуется выбирать ТТ по фактическому значению номинальной предельной кратности.

Паспортное значение номинальной предельной кратности для указанного ТТ класса Р типа ТФРМ-500Б У1 равно 18. Определим паспортное значение амплитуды магнитной индукции в магнитопроводе ТТ ($B_{m.\text{пасп}}$), соответствующее паспортному значению номинальной предельной кратности первичного тока ТТ $K_{\text{ном.пасп}}$ в условиях 10%-ной погрешности с помощью следующего выражения:

$$B_{\text{нас.пасп}} = \frac{K_{\text{ном.пасп}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot \sqrt{(R_2 + 0{,}8 \cdot Z_{\text{н.ном}})^2 + (X_2 + 0{,}6 \cdot Z_{\text{н.ном}})^2}}{222 \cdot w_2 \cdot s_{\text{м}}} =$$

$$= \frac{18 \cdot 1 \cdot \sqrt{(4{,}23 + 0{,}8 \cdot 40)^2 + (0 + 0{,}6 \cdot 40)^2}}{222 \cdot 2000 \cdot 23{,}6 \cdot 10^{-4}} = 0{,}75 \text{ Тл.}$$

Фактическое значение амплитуды магнитной индукции насыщения приближенно равно

$$B_{\text{нас.факт}} = 1{,}9 \text{ Тл.}$$

Определим фактическое значение номинальной предельной кратности тока ТТ с помощью следующего выражения:

$$K_{\text{ном.факт}} = K_{\text{ном.пасп}} \frac{B_{\text{нас.факт}}}{B_{\text{нас.пасп}}} = 18 \cdot \frac{1{,}9}{0{,}75} = 45{,}6 \ .$$

Таким образом, фактическое значение номинально предельной кратности больше требуемого (45,6 > 25), т.е. ТТ класса Р типа ТФРМ-500Б У1 2000/1 подходит для условий данного примера. Выбор ТТ успешно завершён.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

6 ПРОВЕРКА И ВЫБОР ТТ КЛАССА Р ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ПОНИЖАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ, А ТАКЖЕ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОШИНОВКИ СТОРОНЫ НН АВТОТРАНСФОРМАТОРА С УЧЁТОМ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

6.1 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах ДТЗ Т, АТ и ошиновки стороны НН АТ

Для обеспечения несрабатывания дифференциальных защит понижающих трансформаторов (Т), автотрансформаторов (АТ) и ошиновки стороны НН АТ при синусоидальных первичных токах ТТ должны проверяться на 10%-ную погрешность при максимальном уровне тока внешнего короткого замыкания (вне зоны действия защиты).

С целью проверки правильности функционирования дифференциальных токовых защит (ДТЗ) Т, АТ и ошиновки стороны НН АТ, использующих информацию от ТТ класса Р, необходимо произвести расчёты первичных и вторичных токов ТТ при КЗ в характерных точках, показанных на рис. 6.1 – 6.5.

В режиме КЗ в зоне действия необходимо провести проверку ТТ всех сторон объекта защиты, откуда возможна подпитка места повреждения. Вначале проводится проверка по времени до насыщения. Если указанную проверку не прошел хотя бы один ТТ, то предлагаются меры, обеспечивающие правильную работу защиты.

В режиме КЗ вне зоны действия необходимо провести проверку ТТ всех сторон объекта защиты. При этом каждый ТТ проверяется отдельно в наихудших условиях, т.е. предполагается, что насыщается только проверяемый ТТ (небаланс в таких условиях максимален).

6.1.1 Расчётные точки КЗ для ДТЗ Т

На рисунках 6.1 – 6.3 показаны характерные точки КЗ при проверке ТТ для дифференциальных защит понижающих силовых трансформаторов:

– КЗ в зоне действия защиты – точки К1 и К4 (рис. 6.1 – 6.3). Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к замедлению в срабатывании защиты, в первом приближении превышающему значение постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ. При КЗ в точке К1 проверяется ТТ1, а в точке К4 – ТТ3;

– КЗ вне зоны действия защиты – точки К2 и К3 (рис. 6.1 – 6.3). Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к неселективному срабатыванию дифференциальных защит понижающих силовых трансформаторов. При КЗ в точке К2 проверяются ТТ1 и ТТ2, а ТТ1 и ТТ3 – при КЗ в точке К3.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

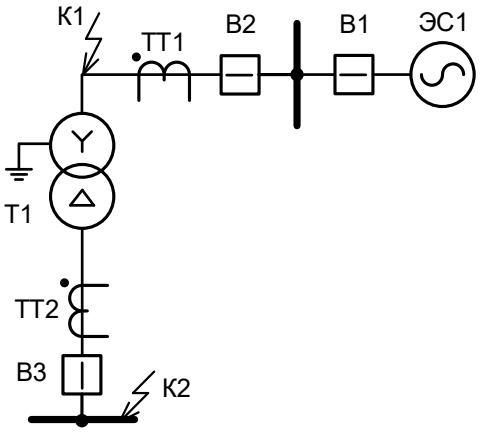


Рисунок 6.1 – Расположение расчетных точек КЗ для дифференциальной защиты понижающего силового двухобмоточного трансформатора

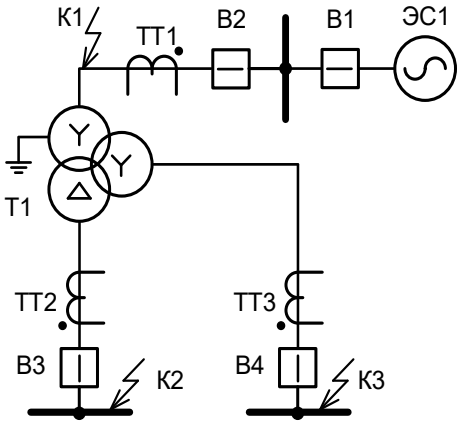


Рисунок 6.2 – Расположение расчетных точек КЗ для дифференциальной защиты понижающего силового трёхобмоточного трансформатора

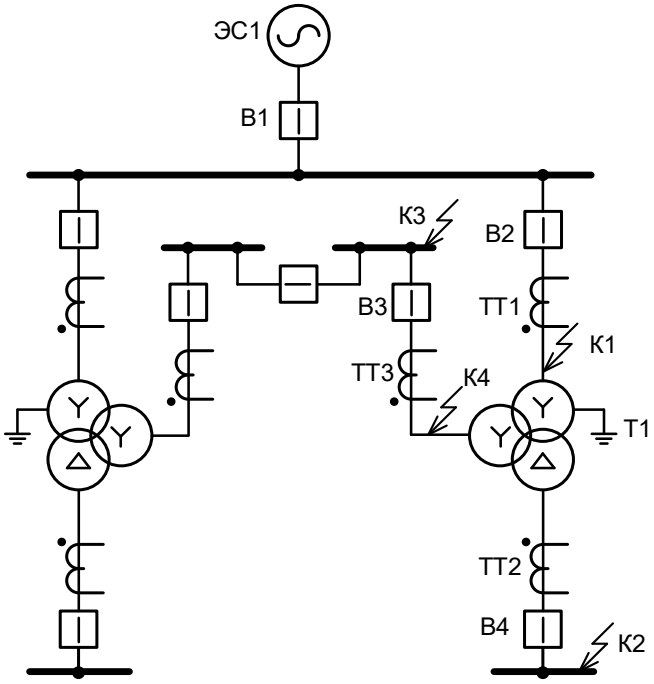


Рисунок 6.3 – Расположение расчетных точек КЗ для дифференциальной защиты понижающего силового трёхобмоточного трансформатора, работающего в параллель

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

6.1.2 Расчётные точки КЗ для ДТЗ АТ

На рисунке 6.4 показаны характерные точки КЗ при проверке ТТ для защит автотрансформаторов:

– КЗ в зоне действия защиты – точки К2 и К3. Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к замедлению в срабатывании защиты, в первом приближении превышающему значение постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ. При КЗ в точке К2 проверяется ТТ1, а в точке К3 – ТТ3;

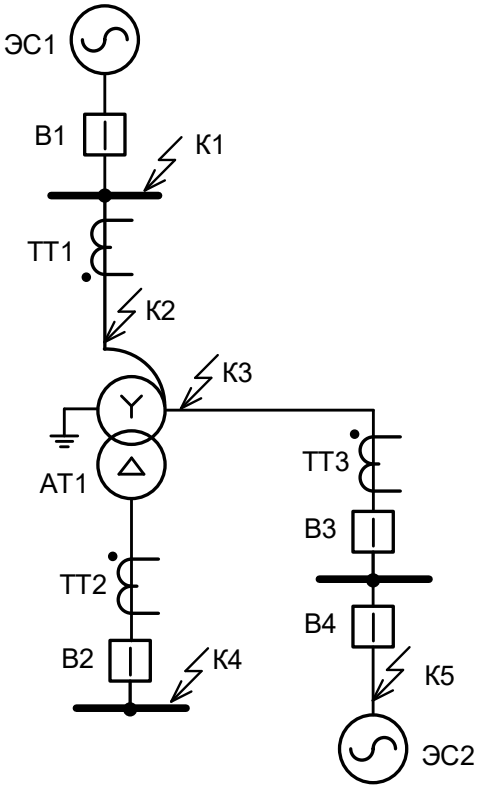


Рисунок 6.4 – Расположение расчетных точек КЗ для защиты автотрансформатора

– КЗ вне зоны действия защиты – точки К1, К4 и К5. Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к неселективному срабатыванию защит автотрансформаторов. ТТ1 проверяется при КЗ в точке К4 или К5 в зависимости от того, в каком из этих режимов меньше время до насыщения. При КЗ в точке К4 проверяется ТТ2. ТТ3 проверяется при КЗ в точке К1 или К5 в зависимости от того в каком из этих режимов меньше время до насыщения.

6.1.3 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах ошиновки стороны НН автотрансформатора

На рисунке 6.5 показаны характерные точки КЗ при проверке ТТ для дифференциальной защиты ошиновки (ДЗО) АТ:

– КЗ в зоне действия защиты – точка К1. В данном режиме проверяется ТТ1. Насыщение магнитопровода ТТ может привести к замедлению в срабатывании защиты, в первом приближении, превышающем значение постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ;

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

– КЗ вне зоны действия защиты – точка К2. Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к неселективному срабатыванию защиты ошиновки стороны НН автотрансформатора. В данном режиме проверяется ТТ2.

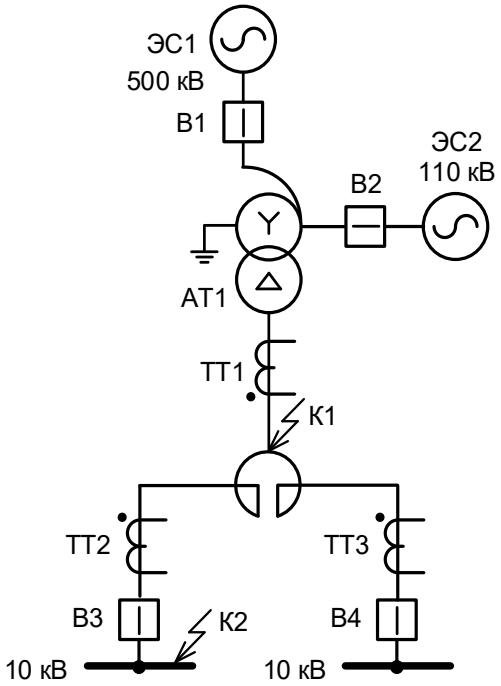


Рисунок 6.5 – Расположение расчетных точек КЗ для защиты ошиновки стороны НН автотрансформатора

6.2 Методика проверки ТТ для ДТЗ Т, АТ и ошиновки стороны НН АТ при КЗ в зоне действия

Так как угловая погрешность ($\delta_{2.1}$) по первой гармонике вторичного тока ТТ в переходном режиме КЗ не превышает 70 град. (см. рис. Б.2), то согласно алгоритму работы ДТЗ тормозной ток при КЗ в зоне действия равен нулю.

Проверка при КЗ в зоне действия для ТТ защищаемых объектов выполняется по времени до насыщения. Если в составе программного обеспечения ДТЗ имеется быстродействующий элемент дифференциальной отсечки, то указанное время должно быть не менее, чем время принятия решения отсечкой о срабатывании при КЗ в зоне действия, которое зависит от начальной фазы и кратности тока КЗ. При превышении током КЗ порога срабатывания отсечки в два раза и более время принятия решения о срабатывании отсечкой не более 3,4 мс с момента начала КЗ. Для остальных версий ПО, если ТТ насыщается на первом периоде КЗ, требуется дополнительная проверка пригодности ТТ для ДТЗ. Порядок проверки функционирования ДТЗ при КЗ в зоне действия в условиях насыщения ТТ следующий.

1. В соответствии с [1] для режимов трехфазного и однофазного КЗ выполняется расчёт времени до насыщения ТТ ($t_{нас}$) по ВАХ или $B(H)$, а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. В последнем случае необходимо в соответствии с Приложением А данных Методических указаний вычислить значение фактической предельной кратности ТТ. Указанный

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

расчёт выполняется для ТТ в следующих характерных точках:

– ТТ1 на рис. 6.1 – 6.2– точка К1;

– ТТ1, ТТ3 на рис. 6.3 – точках К1, К4;

– ТТ1, ТТ3 на рис. 6.4 – точках К2, К3;

– ТТ1 на рис. 6.5 – точки К1.

2. Если в составе ДТЗ имеется быстродействующий элемент дифференциальной отсечки, то время до насыщения ТТ сравнивается с временем принятия решения ДТЗ при КЗ в зоне действия:

$$t_{\text{нас}} \geq t_{\text{реш.1}}, \tag{6.1}$$

где $t_{\text{реш.1}}$ – время принятия решения быстродействующим элементом дифференциальной отсечки о КЗ в зоне действия. По данным производителя $t_{\text{реш.1}}$ = 3,4 мс.

3. Если условие (6.1) выполняется, то ТТ пригоден для использования в схеме ДТЗ. Проверка считается успешно завершённой. Иначе – перейти к п. 12.

4. Если быстродействующий элемент отсечки отсутствует, то требуется проверка ТТ по методике, изложенной ниже. При этом возможны следующие варианты:

– время до насыщения ТТ больше 20 мс – проверка не требуется, ТТ пригоден для использования в схеме ДТЗ;

– время до насыщения ТТ меньше 20 мс – необходима дополнительная проверка.

Во втором случае по зависимости рис. Б.4, Приложение Б, полученной с помощью дискретного преобразования Фурье методом скользящего окна, для момента времени $t_{\text{нас}}$ определяется действующее значение первой гармоники $I_{2.1.1*}$, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ.

5. В соответствии с рекомендациями, приведёнными, в частности, в [8, 12, 13] и в [9] вычисляют значения базисных токов $I_{\text{Б.стор}}$ на всех сторонах защищаемого объекта.

6. Токи, проходящие через ТТ при КЗ в расчетных точках, приводят к расчётной стороне (если он был приведён к другой стороне) объекта по выражению:

$$I'_{\text{ТТ.стор}*} = \frac{I_{\text{ТТ.стор}}}{I_{\text{Б.стор}} \cdot k_{\text{ТТ.стор}}}, \tag{6.2}$$

где $I_{\text{ТТ.стор}}$ – ток, проходящий через ТТ при КЗ в данной расчетной точке, приведённый к данной стороне;

$I_{\text{Б.стор}}, k_{\text{ТТ.стор}}$ – соответственно, базисный ток расчётной стороны и коэффициент трансформации ТТ на этой стороне.

7. Вычисляют соответствующее относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока ($I_{\text{Д.нас}*}$) по выражениям:

– КЗ в точке К1 на рисунках 6.1, 6.2

$$I_{\text{Д.нас}*} = I'_{\text{ТТ.ВН}*} \cdot I_{2.1.1.\text{ВН}*}; \tag{6.3}$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

– КЗ в точках К1, К4 на рис. 6.3 или в точках К2, К3 на рис. 6.4

$$I_{\text{Д.нас}*} = I'_{\text{ТТ.ВН}*} \cdot I_{2.1.1.\text{ВН}*} + I'_{\text{ТТ.СН}*} \cdot I_{2.1.1.\text{СН}*}; \quad (6.4)$$

– КЗ в точке К1 на рисунке 6.5

$$I_{\text{Д.нас}*} = I'_{\text{ТТ1}*} \cdot I_{2.1.1*}. \quad (6.5)$$

8. Проверяют условие срабатывания ДТЗ при КЗ в зоне действия:

$$I_{\text{Д.нас}*} > I_{\text{ОТС}*}, \quad (6.6)$$

где $I_{\text{ОТС}*}$ – значение уставки по току срабатывания дифференциальной отсечки ДТЗ, отн.ед.

9. Если условие (6.6) выполняется, то проверка ДТЗ закончена с положительным результатом. Иначе рекомендуется выполнить проверку условия срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия.

С указанной целью для второго периода рассчитывают относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока по выражению:

– КЗ в точке К1 на рисунках 6.1, 6.2

$$I_{\text{Д.2}*} = I'_{\text{ТТ.ВН}*} \cdot I_{2.1.2.\text{ВН}*}, \quad (6.7)$$

где $I_{2.1.2.\text{ВН}*}$ – относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока ТТ стороны ВН на втором периоде КЗ, определённая по рис. Б.1 Приложения Б;

– КЗ в точках К1, К4 на рис. 6.3 или в точках К2, К3 на рис. 6.4

$$I_{\text{Д.2}*} = \left| I'_{\text{ТТ.ВН}*} \cdot I_{2.1.2.\text{ВН}*} \cdot e^{j\delta_{2.1.\text{ВН}}} + I'_{\text{ТТ.СН}*} \cdot I_{2.1.2.\text{СН}*} \cdot e^{j\delta_{2.1.\text{СН}}} \right|, \quad (6.8)$$

где $\delta_{2.1.2}$ – угловая погрешность первой гармоники вторичного тока ТТ на втором периоде КЗ, определённая по Б.2 Приложения Б;

– КЗ в точке К1 на рисунке 6.5

$$I_{\text{Д.2}*} = I'_{\text{ТТ1}*} \cdot I_{2.1.2*}. \quad (6.9)$$

10. Проверяют условие срабатывания дифференциальной отсечки при КЗ в зоне действия с помощью следующего выражения:

$$I_{\text{Д.2}*} > I_{\text{ОТС}*}. \quad (6.10)$$

11. Если условие (6.10) выполняется, то проверка ДТЗ закончена с положительным результатом.

12. Если условие (6.1) или (6.10) не выполняется, то следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм^2), повторно рассчитать время до насыщения ТТ и выполнить проверку:

– по пункту 2 при наличии в составе ДЗЛ быстродействующего элемента дифференциальной отсечки;

– иначе, по пунктам 4 – 8.

Если условие (6.1) или (6.10) не выполняется или задержка в срабатывании на 0,02 с недопустима, то ТТ не пригоден для использования в схеме ДТЗ. Необходимо выбрать ТТ другого

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий требованиям по условию переходных процессов.

6.3 Методика проверки ТТ для ДТЗ Т, АТ, АТ и ошиновки стороны НН АТ при КЗ вне зоны действия

Проверка при КЗ вне зоны действия для ТТ защищаемых объектов выполняется по времени до насыщения. Если в составе ДТЗ для обеспечения правильного несрабатывания при внешнем КЗ имеется блокирующий орган, то время до насыщения ТТ должно быть больше (или равно) времени принятия решения ($t_{\text{реш.2}}$) данного органа. Указанное время зависит от начальной фазы и кратности тока КЗ, но в наихудшем случае не превышает 3 мс с момента начала КЗ. Для остальных версий ПО, если ТТ насыщается в режиме внешнего КЗ – требуется дополнительная проверка пригодности ТТ с помощью характеристик относительного действующего значения и угловой погрешности первой гармоники (Приложение Б).

Порядок проверки функционирования реле ДТЗ при КЗ вне зоны действия в условиях насыщения ТТ следующий.

1. В соответствии с [1] для режимов трехфазного и однофазного КЗ выполняется расчёт времени до насыщения ТТ ($t_{\text{нас}}$) по ВАХ или $B(H)$, а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. В последнем случае необходимо в соответствии с Приложением А данных Методических указаний вычислить значение фактической предельной кратности ТТ. Указанный расчёт выполняется для ТТ в следующих характерных точках:

– ТТ1 на рис. 6.1 – 6.2 – точка К2;

– ТТ1 на рис. 6.3 – проверяется при КЗ в точке К2 или К3 в зависимости от того в каком из этих режимов меньше время до насыщения;

– ТТ1 на рис. 6.4 – проверяется при КЗ в точке К4 или К5 в зависимости от того в каком из этих режимов меньше время до насыщения;

– ТТ1 на рис. 6.5 – точка К2;

– ТТ2 на рис. 6.1 – 6.3 – точка К2;

– ТТ2 на рис. 6.4 – точка К4;

– ТТ2 на рис. 6.5 – точка К2;

– ТТ3 на рис. 6.2 – точка К3;

– ТТ3 на рис. 6.3 – проверяется при КЗ в точке К2 или К3 в зависимости от того в каком из этих режимов меньше время до насыщения;

– ТТ3 на рис. 6.4 – проверяется при КЗ в точке К1, К4 или К5 в зависимости от того в каком из этих режимов меньше время до насыщения.

2. Если в составе ДТЗ имеется блокирующий орган, то время до насыщения ТТ сравнивается с временем принятия решения данным органом:

$$t_{\text{нас}} \geq t_{\text{реш.2}}, \tag{6.11}$$

где $t_{\text{реш.2}}$ – время принятия решения блокирующим органом при КЗ вне зоны действия. По

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

данным производителя $t_{\text{реш.1}}$ = 3 мс.

3. Если условие (6.11) выполняется, то ТТ пригоден для использования в схеме ДТЗ. Проверка считается успешно завершённой. Иначе – перейти к п. 14 .

4. Если быстродействующий элемент отсечки отсутствует, то требуется проверка ТТ по методике, изложенной ниже.

5. В соответствии с рекомендациями, приведёнными, в частности, в [8, 12, 13] и в [9] вычисляют значения базисных токов $I_{\text{Б.стор}}$ на всех сторонах защищаемого объекта.

6. Приводят сквозной ток КЗ данного ТТ к расчётной стороне (если он был приведён к другой стороне) объекта по выражению:

$$I'_{\text{скв.стор}*} = \frac{I_{\text{скв}}}{I_{\text{Б.стор}} \cdot k_{\text{ТТ.стор}}}, \tag{6.12}$$

где $I_{\text{скв}}$ – сквозной ток КЗ в данной расчётной точке, приведённый к расчётной стороне;

$I_{\text{Б.стор}}$, $k_{\text{ТТ.стор}}$ – соответственно, базисный ток расчётной стороны и коэффициент трансформации ТТ на этой стороне.

7. По значению $t_{\text{нас}}$ для данного ТТ определяют номер n периода, следующего за периодом, на котором было насыщение.

8. По рис. Б.3 в Приложении Б для периода n определяют относительное действующее значение первой гармоники намагничивающего тока насыщенного ТТ по отношению к действующему значению сквозного тока КЗ, приведённого к вторичной стороне ТТ $I_{0.1.n*}$.

9. Вычисляют относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока по выражению:

$$I_{\text{Д}*} = I'_{\text{скв.стор}*} \cdot (I_{0.1.n*} + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{выр}} + \Delta f_{\text{ПТТ}}), \tag{6.13}$$

где

$\Delta U_{\text{РПН}} = \dfrac{|\Delta U_{\text{РПН max}} - \Delta U_{\text{РПН min}}|}{2 \cdot 100\%}$ – относительная погрешность, обусловленная наличием РПН;

$\Delta f_{\text{выр}}$ – относительная погрешность выравнивания токов плеч. Может быть принята $\Delta f_{\text{выр}} = 0{,}02$;

$\Delta f_{\text{ПТТ}}$ – относительная погрешность внешнего выравнивающего трансформатора или автотрансформатора. Может быть принята $\Delta f_{\text{ПТТ}} = 0{,}05$.

10. Определяют относительное действующее значение $I_{2.1.n*}$ и угловую погрешность $\delta_{2.1.n}$ первой гармоники по рис. Б.1 и рис. Б.2, приведенным в Приложении Б, где индекс *n* соответствует номеру периода.

11. Относительное действующее значение первой гармоники тормозного тока определяют с помощью следующего выражения:

$$I_{\text{Т}*} = I'_{\text{скв.стор}*} \cdot \sqrt{I_{2.1.n*} \cdot \cos\delta_{2.1.n}}. \tag{6.14}$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

12. Проверка чувствительного органа с торможением по условию отстройки от тока небаланса при КЗ вне зоны действия выполняется с помощью следующего выражения:

$$I_{Д0*} + K_{Т}(I_{Т*} - I_{Т0*}) > I_{Д*}. \quad (6.15)$$

Если выражение (6.15) выполняется, то проверка чувствительного органа с торможением закончена с положительным результатом.

13. Проверка дифференциальной токовой отсечки по условию отстройки от тока небаланса при КЗ вне зоны действия выполняется с помощью следующего выражения:

$$I_{ОТС*} > I_{Д*}, \quad (6.16)$$

где $I_{ОТС*}$ – значение уставки срабатывания дифференциальной токовой отсечки.

Если выражение (6.16) выполняется, то проверка дифференциальной токовой отсечки закончена с положительным результатом.

14. Если или условие (6.11) не выполняется, или чувствительный орган с торможением, или дифференциальная токовая отсечка проверку по условию отстройки от тока небаланса при КЗ вне зоны действия не прошли, то максимально снижают нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм^2).

15. Повторно выполняют пункты 1 – 3, 7 – 13. При положительном результате проверка считается успешно завершённой. Иначе ТТ непригоден для использования в схеме ДТЗ. Необходимо выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ, удовлетворяющий условиям отстройки от токов небаланса при внешних КЗ.

6.4 Методика выбора ТТ по времени до насыщения для ДТЗ Т, АТ и ошиновки НН АТ

Должны быть известны следующие исходные данные:

– паспортные данные ТТ и его ВАХ (или *B*(*H*) и размеры магнитопровода);

– токи трёхфазных и однофазных КЗ для точек, указанных на рис. 6.1 – 6.5;

– эквивалентные постоянные времени затухания апериодических составляющих токов КЗ, указанных выше;

– время принятия решения ДТЗ при КЗ в зоне действия ($t_{реш.1}$ = 3,4 мс по данным производителя);

– время принятия решения блокирующим органом ДТЗ при внешнем КЗ ($t_{реш.2}$ = 3 мс по данным производителя).

В общем случае для ДТЗ по времени до насыщения необходимо провести выбор ТТ всех сторон объекта защиты. При этом должны рассматриваться режимы КЗ в зоне и близкого вне зоны действия с максимально возможными токами через соответствующий ТТ.

Методика выбора ТТ по условиям правильного функционирования ДТЗ при переходных процессах следующая.

1. Так как время принятия решения значительно меньше 10 мс, то коэффициент переходного режима $K_{п.р}^{(j)}(t_{реш\,i})$ для ТТ класса Р рекомендуется определять по значениям $t_{реш.i}$ и

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$T_{p.i}^{(j)}$ с помощью диаграмм зависимости $K_{\text{п.р}}(t)$ от времени, приведённых в Приложении А ГОСТ Р 58669-2019 [1]. При этом под i понимается номер режима КЗ: 1 – внешнее КЗ; 2 – КЗ в зоне действия, а под j – вид КЗ в выбранной расчетной точке: 1 – однофазное; 3 – трехфазное.

2. Предварительно по нагрузке присоединения определяют значение номинального первичного тока $I_{1.\text{ном}}$. Значение номинального вторичного тока $I_{2.\text{ном}}$ в электроустановках сверхвысокого напряжения и напряжением 220 кВ целесообразно принять равным 1 А, так как это облегчает условия работы ТТ в переходном режиме по сравнению с номинальным вторичным током, равным 5 А.

3. Производят расчёт фактического сопротивления нагрузки на ТТ ($z_{\text{н.факт}}$).

4. Задаётся номинальное сопротивление нагрузки на ТТ ($z_{\text{н.ном}}$), которое для ТТ с номинальным вторичным током равным 1 А обычно находится в пределах 20 … 100 Ом, а для пятиамперных – 0,8 … 2,4 Ом.

5. Определяется номинальное и фактическое сопротивления ветви вторичного тока ТТ по выражениям:

$$z_{2\sum\text{ном}} = z_2 + z_{\text{н.ном}} \approx 1{,}2 z_{\text{н.ном}}, \tag{6.17}$$

$$z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)} = z_2 + z_{\text{н.факт}}^{(j)} \approx 0{,}2 z_{\text{н.ном}} + z_{\text{н.факт}}^{(j)}, \tag{6.18}$$

где z_2 – сопротивления вторичной обмотки ТТ. При выборе ТТ значение сопротивления его вторичной обмотки допустимо принять равным 20 % от номинальной нагрузки.

6. Находят значения требуемой номинальной предельной кратности ТТ для каждого расчетного режима по выражению:

$$K_{\text{ном.треб}i}^{(j)} = \frac{K_{\text{п.р}}^{(j)}(t_{\text{реш}i})}{1 - K_r} \cdot \frac{I_{\text{КЗ}.i}^{(j)} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}, \tag{6.19}$$

где $I_{\text{КЗ}.i}^{(j)}$ – ток соответствующего вида и режима КЗ.

7. В качестве требуемой номинальной предельной кратности ($K_{\text{ном.треб}}$) принимается максимальное из значений $K_{\text{ном.треб}i}^{(j)}$:

$$K_{\text{ном.треб}} > \max\left(K_{\text{ном.треб}i}^{(j)}\right). \tag{6.20}$$

8. По каталогу находят ТТ класса Р того же класса напряжения с заданным значением номинального первичного тока и номинальной предельной кратностью, соответствующей выражению (6.20), а также с суммой сопротивления вторичной обмотки и номинального сопротивления нагрузки не ниже значения, вычисленного по выражению (6.17).

9. Если подобрать ТТ со значениями параметров не ниже заданных не удаётся, то принимается ТТ с наиболее близкими к заданным значениями. Для указанного ТТ выполняется дополнительная проверка:

$$I_{1.\text{ном}} \cdot K_{\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}} \geq \frac{K_{\text{п.р}}^{(j)}(t_{\text{реш}i})}{1 - K_r} \cdot I_{\text{КЗ}.i}^{(j)} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)}, \tag{6.21}$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

где

$$z_{2\Sigma\text{факт}}^{(j)} = \sqrt{\left(R_2 + R_{\text{н.факт}}^{(j)}\right)^2 + \left(X_2 + X_{\text{н.факт}}^{(j)}\right)^2}\,, \tag{6.22}$$

$$z_{2\Sigma\text{ном}} = \sqrt{\left(R_2 + 0{,}8 z_{\text{н.ном}}\right)^2 + \left(X_2 + 0{,}6 z_{\text{н.ном}}\right)^2}\,. \tag{6.23}$$

10. Если условие (6.21) выполняется, то данный ТТ пригоден для использования в схеме ДТЗ. Иначе следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей) и повторно выполнить расчёт по пунктам 5 – 9.

11. Если вышеуказанная мера окажется неэффективной, следует перейти на ТТ того же класса Р с более высокими значениями первичного тока или номинального сопротивления нагрузки. Повторно выполнить расчёт по пунктам 5 – 9.

12. Если и эта мера окажется неэффективной, то следует выбрать ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или электронный ТТ.

6.5 Пример проверки ТТ класса Р для дифференциальных защит понижающих трансформаторов с учётом переходных режимов

Исходные данные по токам КЗ приняты в соответствии с примером расчета ДТЗ трехобмоточного трансформатора, приведенного в [8, 10]. Трехфазные группы ТТ на всех сторонах трехобмоточного трансформатора соединены по схеме звезды с нулевым проводом.

Расчетные точки КЗ для проверки правильности функционирования ДТЗ трехобмоточного трансформатора, использующей информацию от ТТ класса Р, в условиях данного примера показаны на рис. 6.6.

Исходные данные для проверки ТТ приведены в табл. 6.1 – 6.6.

Первичные токи трансформатора, соответствующие его номинальной мощности, составляют:

– на стороне ВН 110кВ, А – $I_{\text{ном.ВН}} = \dfrac{S_{\text{ном.тр-ра}}}{\sqrt{3}\cdot U_{\text{ном.ВН}}} = \dfrac{40000}{\sqrt{3}\cdot 115} = 201;$

– на стороне СН 35кВ, А – $I_{\text{ном.СН}} = \dfrac{S_{\text{ном.тр-ра}}}{\sqrt{3}\cdot U_{\text{ном.СН}}} = \dfrac{40000}{\sqrt{3}\cdot 38{,}5} \approx 600;$

– на сторонах НН1 и НН2 10кВ, А – $I_{\text{ном.НН}} = \dfrac{S_{\text{ном.тр-ра}}}{\sqrt{3}\cdot U_{\text{ном.НН}}} = \dfrac{40000}{\sqrt{3}\cdot 11} \approx 2102.$

Базисные токи по сторонам, соответственно, равны:

– на стороне ВН110кВ – $I_{\text{Б.ВН}} = \dfrac{k_{\text{сх.ТТ.ВН}}\cdot k_{\text{АТ.ВН}}}{k_{\text{ТТ.ВН}}}\cdot I_{\text{ном.ВН}} = \dfrac{1\cdot 1}{400/5}\cdot 201 = 2{,}512\text{А};$

– на стороне СН 35кВ – $I_{\text{Б.СН}} = \dfrac{k_{\text{сх.ТТ.СН}}\cdot k_{\text{АТ.СН}}}{k_{\text{ТТ.СН}}}\cdot I_{\text{ном.СН}} = \dfrac{1\cdot 1}{1500/5}\cdot 600 = 2{,}0\text{А};$

– на стороне НН1 (НН2) – $I_{\text{Б.НН}} = \dfrac{k_{\text{сх.ТТ.НН}}\cdot k_{\text{АТ.НН}}}{k_{\text{ТТ.НН}}}\cdot I_{\text{ном.НН}} = \dfrac{1\cdot 1}{3000/5}\cdot 2102 = 3{,}5\text{А}.$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

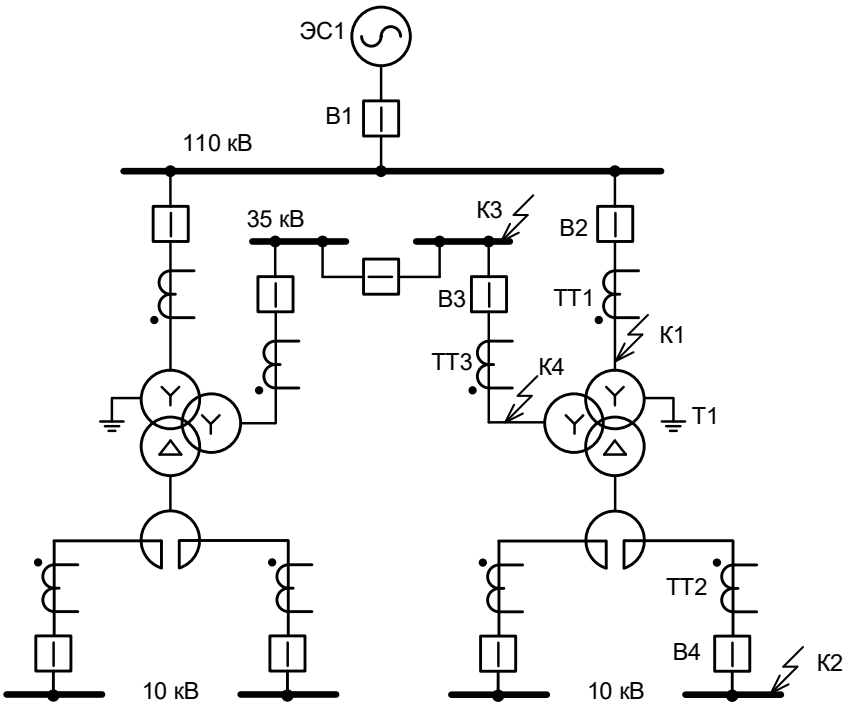


Рисунок 6.6 – Расположение расчетных точек КЗ для проверки ТТ в схеме ДТЗ Т1

Таблица 6.1

Исходные данные				
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**		
		ВН	**СН**	**НН**
Номинальная мощность трансформатора, МВА	$S_{\text{ном.т}}$	40		
Номинальное напряжение, кВ	$U_{\text{ном.стор}}$	115	38,5	11
Сквозной ток КЗ, приведённый к стороне ВН при КЗ на стороне, А	$I'_{\text{сквоз.стор}}$	-	1656	1158
Базисный ток, А	$I_{\text{Б.стор}}$	2,512	2	3,5
Номинальные токи ТТ, А	$K_{\text{ТТ.стор}}$	400/5	1500/5	3000/5
Коэффициент схемы соединения ТТ	$K_{\text{СХ.стор}}$	1	1	1

Таблица 6.2

Параметры тормозной характеристики		
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**
Начальный ток срабатывания, отн.ед.	$I_{\text{Д.0*}}$	0,43
Ток начала торможения пускового органа, отн.ед.	$I_{\text{Т.0*}}$	1
Ток торможения блокировки, отн.ед.	$I_{\text{Т.БЛ*}}$	2
Коэффициент торможения	$K_{\text{Т}}$	0,45
Ток срабатывания дифференциальной отсечки, отн.ед.	$I_{\text{ОТС*}}$	6,5

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.3

Параметры нагрузки ТТ		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение при $K^{(3)}$**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,12
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1
Количество последовательно включённых терминалов	m	1
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	50
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 2,5
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{50}{1 \cdot 2{,}5} = 0{,}35$
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п}$	0,35
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 0{,}35 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 0{,}57$
Для ТТ1 типа ТВ-110 400/5		
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(0{,}4 + 0{,}57)^2 + 0{,}78^2} = 1{,}24$
Для ТТ2 типа ТПШЛ-10 3000/5		
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(1{,}04 + 0{,}57)^2 + 0{,}27^2} = 1{,}63$
Для ТТ3 типа ТВТ-35М 1500/5		
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(0{,}78 + 0{,}57)^2 + 1{,}1^2} = 1{,}74$

Таблица 6.4

Исходные данные ТТ1 типа ТВ-110 400/5		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	400
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	5
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	27
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	1,2
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	0,4
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,78
Число витков вторичной обмотки	w_2	78
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	$80 \cdot 10^{-4}$
Средняя длина силовой линии, м	l	1,38

Таблица 6.5

Исходные данные ТТ2 типа ТПШЛ-10 3000/5		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	3000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	5
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	24
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	1,2
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	1,04
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,27
Число витков вторичной обмотки	w_2	600
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	$13{,}5 \cdot 10^{-4}$
Средняя длина силовой линии, м	l	0,526

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.6

Исходные данные ТТ3 типа ТВТ-35М 1500/5		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1500
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	5
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	24
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	1,2
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	0,78
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	1,1
Число витков вторичной обмотки	w_2	300
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	46,8*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	0,88

6.5.1 Проверка ТТ для ДТЗ Т при КЗ в зоне действия

Расчёт времени до насыщения выполняется для ТТ в следующих характерных точках:

– ТТ1 на рис. 6.6 – точка К1;

– ТТ1 и ТТ3 на рис. 6.6 – точка К4.

Параметры токов при КЗ в зоне действия приведены в табл. 6.7.

Таблица 6.7

Параметры токов при КЗ в зоне действия		
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение при трёх-фазном КЗ**
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К1, А	$I_{К1.ВН}$	4 239
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К4, А	$I_{К4.ВН}$	1 191
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К4, А	$I_{К4.СН}$	3 603
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс		
При КЗ в точке К1, мс	$T_{p.К1}$	30
При КЗ в точке К4, мс	$T_{p.К1}$	30

Так как ВАХ ТТ отсутствует, а размеры магнитопровода ТТ известны, то расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) выполняется по $B(H)$. Результаты расчёта времени до насыщения ТТ и проверки пригодности ТТ для быстродействующего элемента отсечки приведены в табл. 6.8.

Из результатов проверки по времени до насыщения, приведенных в табл. 6.8, следует, что при трехфазном КЗ в точке К1 условие пригодности ТТ1 для быстродействующего элемента отсечки не выполняется, так как $t_{нас.2}$ < 3,4 мс. При КЗ в точке К4 быстродействующий элемент отсечки срабатывает, т.е. необходимости замены ТТ3 по условию функционирования быстродействующего элемента отсечки нет.

Если быстродействующий элемент отсечки в составе ДТЗ отсутствует, то требуется дополнительная проверка небыстродействующего органа отсечки по значение первой гармоники $I_{2.1.1*}$, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ на первом периоде КЗ. Из результатов указанной дополнительной проверки, приведенных в табл. 6.9, следует, что небыстродействующий орган отсечки на первом периоде также не срабатывает.

Производится проверка небыстродействующего органа отсечки на втором периоде КЗ. Результаты указанной проверки приведены в табл. 6.10.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.8

Наименование величины	Обозначение	Значения при $K^{(3)}$		
		Для ТТ1 при КЗ в точке К1	Для ТТ1 при КЗ в точке К4	Для ТТ3 при КЗ в точке К4
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{факт} = \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}}$	$\frac{4239}{400} = 10{,}6$	$\frac{1191}{400} = 2{,}98$	$\frac{3603}{1500} = 2{,}4$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 10{,}6 = 5{,}29$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 2{,}98 = 1{,}489$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 2{,}4 = 1{,}2$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{нас} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$5{,}29 \cdot \frac{78}{1{,}38} = 299$	$1{,}489 \cdot \frac{78}{1{,}38} = 84$	$1{,}2 \cdot \frac{300}{0{,}88} = 409$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{нас}$	1,86	1,79	1,88
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{факт} \cdot I_{2ном} \cdot z_{2\Sigma факт}$	$10{,}6 \cdot 5 \cdot 1{,}24 = 66$	$2{,}98 \cdot 5 \cdot 1{,}24 = 18{,}5$	$2{,}4 \cdot 5 \cdot 1{,}74 = 21$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{66}{222 \cdot 78 \cdot 80 \cdot 10^{-4}} = 0{,}476$	$\frac{18{,}5}{222 \cdot 78 \cdot 80 \cdot 10^{-4}} = 0{,}134$	$\frac{21}{222 \cdot 300 \cdot 46{,}8 \cdot 10^{-4}} = 0{,}067$
Параметр режима работы ТТ A – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{нас}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}86}{0{,}476} = 3{,}9$ $3{,}9 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}55$	$\frac{1{,}79}{0{,}134} = 13{,}35$ $13{,}35 \cdot (1 - 0{,}86) = 1{,}87$	$\frac{1{,}88}{0{,}067} = 28$ $28 \cdot (1 - 0{,}86) = 3{,}9$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{нелин} = \frac{y_\varepsilon}{y_{лин}} \geq 3$	>3	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	10,7 2,1	Больше $5T_p$ 5,4	Больше $5T_p$ 10,8
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{нас.1} > t_{реш.1}$; $t_{нас.2} > t_{реш.1}$	Выпол. (10,7 > 3,4 мс) Не выпол. (2,1 < 3,4 мс)	Выпол. (>> 3,4 мс) Выпол. (5,4 > 3,4 мс)	Выпол. (>> 3,4 мс) Выпол. (10,8 > 3,4 мс)

Редакция от 13.09.2021

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.9

Проверка ТТ по действующему значению первой гармоники, содержащейся в импульсе вторичного тока к моменту времени $t_{нас}$					
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**			**Примечания**
		Для ТТ1 при трехфазном КЗ в точке К1	**При трехфазном КЗ в точке К4**		
			ТТ1	**ТТ3**	
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока к моменту времени $t_{нас}$, отн.ед.	$I_{2.1.1*}$	0,02	0,18	0,83	По рис. Б.4 при T_p = 0,05 с
Токи, проходящие через ТТ при КЗ в расчетных точках, отн.ед.	$I'_{ТТ.стор*} = \dfrac{I_{ТТ.стор}}{I_{Б.стор} \cdot k_{ТТ.стор}}$	$\dfrac{4239}{2{,}512 \cdot 80} = 21$	$\dfrac{1191}{2{,}512 \cdot 80} = 5{,}9$	$\dfrac{3603}{2 \cdot 300} = 6$	
Относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока на втором периоде, отн.ед	$I_{Д.нас*} = I'_{ТТ.ВН*} \cdot I_{2.1.1.ВН*}$	$21 \cdot 0{,}02 = 0{,}42$	–	–	
	$I_{Д.нас*} = \left\lvert I'_{ТТ.ВН*} \cdot I_{2.1.1.ВН*} + I'_{ТТ.СН*} \cdot I_{2.1.1.СН*} \right\rvert$	–	$5{,}9 \cdot 0{,}18 + 6 \cdot 0{,}83 = 6{,}04$		
Проверка условия срабатывания дифференциальной отсечки на первом периоде КЗ в зоне	$I_{Д.нас*} > I_{ОТС*}$	$0{,}42 < 6{,}5$	$6{,}04 < 6{,}5$		$I_{ОТС*} = 6{,}5$ отн.ед.
Условие срабатывания дифференциальной отсечки на первом периоде КЗ в зоне при насыщении ТТ1 и ТТ3 не выполняется.					

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.10

Проверка ТТ по условию срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия					
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**			**Примечания**
		Для ТТ1 при трехфазном КЗ в точке К1	**При трехфазном КЗ в точке К4**		
			ТТ1	**ТТ3**	
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока к моменту времени $t_{нас}$, отн.ед.	$I_{2.1.2*}$	0,24	0,24	0,24	По рис. Б.1 при T_p = 0,05 с
Угловая погрешность первой гармоники вторичного тока ТТ на втором периоде КЗ	$\delta_{2.1.2}$	43	43	43	По рис. Б.2 при T_p = 0,05 с
Токи, проходящие через ТТ при КЗ в расчетных точках, отн.ед.	$I'_{ТТ.стор*} = \dfrac{I_{ТТ.стор}}{I_{Б.стор} \cdot k_{ТТ.стор}}$	$\dfrac{4239}{2{,}512 \cdot 80} = 21$	$\dfrac{1191}{2{,}512 \cdot 80} = 5{,}9$	$\dfrac{3603}{2 \cdot 300} = 6$	
Относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока на втором периоде, отн.ед	$I_{Д.2*} = I'_{ТТ.ВН*} \cdot I_{2.1.2.ВН*}$	$21 \cdot 0{,}24 = 5$	–	–	
	$I_{Д.2*} = \left\lvert I'_{ТТ.ВН*} \cdot I_{2.1.2.ВН*} \cdot e^{j\delta_{2.1.ВН}} + I'_{ТТ.СН*} \cdot I_{2.1.2.СН*} \cdot e^{j\delta_{2.1.СН}} \right\rvert$	–	$\left\lvert 5{,}9 \cdot 0{,}24 \cdot e^{j43^o} + 6 \cdot 0{,}24 \cdot e^{j43} \right\rvert = 2{,}9$		
Проверка условия срабатывания дифференциальной отсечки на первом периоде КЗ в зоне	$I_{Д.2*} > I_{ОТС*}$	$5 < 6{,}5$	$2{,}9 < 6{,}5$		$I_{ОТС*} = 6{,}5$ отн.ед.
Условие срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне при насыщении ТТ1 и ТТ3 не выполняется.					

Редакция от 13.09.2021

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таким образом, требуется замена ТТ1, а при отсутствии в составе ДТЗ быстродействующего элемента отсечки – и ТТ3.

Выбран новые ТТ класса Р типа:

– ТТ1 – ТВ-110 1000/5;

– ТТ3 – ТВТ-35М 2000/5

Исходные данные ТТ1 и ТТ3 с увеличенным значением первичного тока приведены в табл. 6.11.

Таблица 6.11

Исходные данные ТТ1 с увеличенным $I_{1.ном}$ ТВ-110 1000/5		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	5
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	45
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	1,2
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	0,57
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	1,2
Число витков вторичной обмотки	w_2	200
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	80*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	1,38
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{\left(R_2 + R_{н.факт}\right)^2 + \left(X_2 + X_{н.факт}\right)^2}$	$\sqrt{(0{,}57+0{,}57)^2 + 1{,}2^2} = 1{,}66$
Исходные данные ТТ3 типа ТВТ-35М 2000/5		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	2000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	5
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	24
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	1,2
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	1,05
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	1
Число витков вторичной обмотки	w_2	400
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	46,8*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	0,88
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{\left(R_2 + R_{н.факт}\right)^2 + \left(X_2 + X_{н.факт}\right)^2}$	$\sqrt{(1{,}05+0{,}57)^2 + 1^2} = 1{,}9$

Результаты повторного расчета времени до насыщения ТТ1 и ТТ3 и проверки пригодности ТТ для быстродействующего элемента дифференциальной отсечки при КЗ в зоне действия приведены в табл. 6.12.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.12

Наименование величины	Обозначение	Значения при $K^{(3)}$		
		Для ТТ1 при КЗ в точке К1	Для ТТ1 при КЗ в точке К4	Для ТТ3 при КЗ в точке К4
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{факт} = \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}}$	$\frac{4239}{1000} = 4{,}24$	$\frac{1191}{1000} = 1{,}19$	$\frac{3603}{2000} = 1{,}8$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 4{,}24 = 2{,}12$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 0{,}119 = 0{,}596$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 1{,}8 = 0{,}9$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{нас} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$2{,}12 \cdot \frac{200}{1{,}38} = 307$	$0{,}596 \cdot \frac{200}{1{,}38} = 86$	$0{,}9 \cdot \frac{400}{0{,}88} = 409$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{нас}$	1,86	1,79	1,87
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{факт} \cdot I_{2ном} \cdot z_{2\Sigma факт}$	$4{,}24 \cdot 5 \cdot 1{,}66 = 35$	$1{,}19 \cdot 5 \cdot 1{,}66 = 9{,}9$	$1{,}8 \cdot 5 \cdot 1{,}9 = 17{,}1$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{35}{222 \cdot 200 \cdot 80 \cdot 10^{-4}} = 0{,}099$	$\frac{9{,}9}{222 \cdot 200 \cdot 80 \cdot 10^{-4}} = 0{,}028$	$\frac{17{,}1}{222 \cdot 400 \cdot 46{,}8 \cdot 10^{-4}} = 0{,}041$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{нас}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}86}{0{,}099} = 18{,}8$ $18{,}8 \cdot (1 - 0{,}86) = 2{,}64$	$\frac{1{,}79}{0{,}028} = 64$ $64 \cdot (1 - 0{,}86) = 9$	$\frac{1{,}87}{0{,}041} = 45{,}6$ $45{,}6 \cdot (1 - 0{,}86) = 6{,}4$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{нелин} = \frac{y_\varepsilon}{y_{лин}} \geq 3$	>3	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	Больше $5T_p$ 7,3	Больше $5T_p$ 69,4	Больше $5T_p$ 28,3
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{нас.1} > t_{реш.1}$; $t_{нас.2} > t_{реш.1}$	Выпол. (>> 3,4 мс) Выпол. (7,3 > 3,4 мс)	Выпол. (>> 3,4 мс) Выпол. (69,4 > 3,4 мс)	Выпол. (>> 3,4 мс) Выпол. (28,3 > 3,4 мс)

Редакция от 13.09.2021

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Из результатов расчета, представленных в табл. 6.12, следует, что время до насыщения ТТ1 и ТТ3 в при КЗ в зоне действия превышает 3,4 мс, т.е. быстродействующий элемент дифференциальной отсечки срабатывает на первом периоде КЗ.

Проверку небыстродействующего органа отсечки по значению первой гармоники $I_{2.1.1*}$, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ на первом периоде КЗ, необходимо провести только для ТТ1 в режиме КЗ в точке К1, так как в остальных случаях время до насыщения ТТ превышает 20 мс:

$$I_{\text{Д.нас}*} = I'_{\text{ТТ.ВН}*} \cdot I_{2.1.1.\text{ВН}*} = 21 \cdot 0{,}4 = 8{,}4 > I_{\text{ОТС}*} = 6{,}5\,,$$

где $I_{2.1.1.\text{ВН}*}$ – относительное действующее первой гармоники, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ на первом периоде КЗ (рис. Б.4 в Приложении Б). Таким образом, условие срабатывания небыстродействующего органа отсечки на первом периоде КЗ в зоне действия выполняется.

Проверка ТТ в режиме КЗ в зоне действия закончена успешно.

6.5.2 Проверка ТТ для ДТЗ Т при КЗ вне зоны действия

В режиме КЗ вне зоны действия необходимо провести проверку ТТ всех сторон объекта защиты. При этом каждый ТТ проверяется отдельно в наихудших условиях, т.е. предполагается, что насыщается только проверяемый ТТ (небаланс в таких условиях максимален).

Расчёт времени до насыщения для ТТ выполняется в соответствии с рис. 6.6 в следующих характерных точках:

– ТТ1 – проверяется при КЗ в точке К2 или КЗ в зависимости от того в каком из этих режимов меньше время до насыщения;

– ТТ2 – проверяется при КЗ в точке К2;

– ТТ3 – проверяется при КЗ в точке К2 или КЗ в зависимости от того в каком из этих режимов меньше время до насыщения.

Так как на обоих выводах стороны НН токоограничивающего реактора установлены ТТ одного типа и нагрузки в их вторичных цепях совпадают, то допускается выполнять проверку только одного ТТ, в данном примере это ТТ2.

Параметры токов при КЗ вне зоны действия приведены в табл. 6.13.

Таблица 6.13

Параметры токов при КЗ вне зоны действия		
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение при трёхфазном КЗ**
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К2, А	$I_{\text{К2.ВН}}$	1 154
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К3, А	$I_{\text{К3.ВН}}$	1 656
Ток через ТТ2 при КЗ в точке К2, А	$I_{\text{К2.НН}}$	12 065
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К2, А	$I_{\text{К2.СН}}$	2 473
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К3, А	$I_{\text{К3.СН}}$	4 946
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс		
При КЗ в точке К2, мс	$T_{p.\text{К2}}$	30
При КЗ в точке К3, мс	$T_{p.\text{К3}}$	30

Так как постоянные времени затухания апериодических составляющих при КЗ в точках К2

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

и КЗ одинаковы, то расчетные точки для проверки ТТ1 и ТТ3 выбираются по максимальному току через них: проверка ТТ1 и ТТ3 проводится только для режима КЗ в точке КЗ.

Так как ВАХ ТТ отсутствует, а размеры магнитопровода ТТ известны, то расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) выполняется по $B(H)$. Результаты расчёта времени до насыщения при КЗ вне зоны действия приведены в табл. 6.14.

Из результатов проверки ТТ по времени до насыщения, приведенным в табл. 6.14, следует, что при трехфазном КЗ вне зоны действия условие пригодности ТТ при наличии блокирующего органа в составе ДТЗ выполняется, так как $t_{нас.2}$ > 3 мс. При отсутствии блокирующего органа требуется дополнительная проверка с помощью универсальных характеристик ТТ с ПХН.

Результаты дополнительной проверки ДТЗ Т в переходном режиме КЗ вне зоны действия приведены в табл. 6.15. Из указанных результатов следует, что условия отстройки дифференциальной токовой отсечки и чувствительного органа ДТЗ при КЗ вне зоны действия выполняются. Проверка успешно завершена.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.14

Наименование величины	Обозначение	Значения при $K^{(3)}$		
		Для ТТ1 при КЗ в точке К3	Для ТТ2 при КЗ в точке К2	Для ТТ3 при КЗ в точке К3
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{\text{факт}} = \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$	$\frac{1656}{1000} = 1{,}66$	$\frac{12065}{3000} = 4{,}02$	$\frac{4946}{2000} = 2{,}47$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 1{,}66 = 0{,}828$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 4{,}02 = 2{,}01$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 2{,}47 = 1{,}24$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{\text{нас}} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$0{,}828 \cdot \frac{200}{1{,}38} = 120$	$4{,}02 \cdot \frac{600}{0{,}526} = 2293$	$1{,}24 \cdot \frac{400}{0{,}88} = 563$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{\text{нас}}$	1,814	1,94	1,88
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}$	$1{,}66 \cdot 5 \cdot 1{,}66 = 13{,}8$	$4{,}02 \cdot 5 \cdot 1{,}63 = 32{,}8$	$2{,}47 \cdot 5 \cdot 1{,}9 = 23{,}5$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{13{,}8}{222 \cdot 200 \cdot 80 \cdot 10^{-4}} = 0{,}039$	$\frac{32{,}8}{222 \cdot 600 \cdot 13{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}183$	$\frac{23{,}5}{222 \cdot 400 \cdot 46{,}8 \cdot 10^{-4}} = 0{,}057$
Параметр режима работы ТТ A – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{\text{нас}}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}814}{0{,}039} = 47$ $47 \cdot (1 - 0{,}86) = 6{,}6$	$\frac{1{,}94}{0{,}183} = 10{,}6$ $10{,}6 \cdot (1 - 0{,}86) = 1{,}48$	$\frac{1{,}88}{0{,}057} = 33$ $33 \cdot (1 - 0{,}86) = 4{,}62$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{\text{нелин}} = \frac{y_\varepsilon}{y_{\text{лин}}} \geq 3$	>3	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше $5T_p$ 69,1	Больше $5T_p$ 5,5	Больше $5T_p$ 26,3
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{\text{нас.1}} > t_{\text{реш.2}}$; $t_{\text{нас.2}} > t_{\text{реш.2}}$	Выпол. (>> 3 мс) Выпол. (69,1 > 3 мс)	Выпол. (>> 3 мс) Выпол. (5,5 > 3 мс)	Выпол. (>> 3 мс) Выпол. (26,3 > 3 мс)

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.15

Проверка ДТЗ Т в переходном режиме КЗ вне зоны действия					
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения при $K^{(3)}$**			**Примечания**
		Для ТТ1 при КЗ в точке К3	**Для ТТ2 при КЗ в точке К2**	**Для ТТ3 при КЗ в точке К3**	
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение	n	5	2	3	ТТ1: $t_{нас.2}$ = 69,1 мс ТТ2: $t_{нас.2}$ = 5,5 мс ТТ3: $t_{нас.2}$ = 26,3 мс
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока, отн.ед.	$I_{2.1*.n}$	0,92	0,41	0,65	
Угловая погрешность первой гармоники, град.	$\delta_{2.1}$	8,5	35	22	
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1*.n}$	0,13	0,69	0,41	
Относительный ток КЗ через ТТ, отн.ед.	$I'_{скв.стор*} = \frac{I_{скв}}{I_{Б.стор} \cdot k_{ТТ.стор}}$	$\frac{1656}{1{,}005 \cdot 200} = 8{,}24$	$\frac{12065}{3{,}5 \cdot 600} = 5{,}74$	$\frac{4946}{1{,}5 \cdot 400} = 8{,}24$	
Относительное значение дифференциального тока, отн.ед.	$I_{Д*} = I'_{скв.стор*} \cdot (I_{0.1.n*} + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{выр} + \Delta f_{ПТТ})$	$8{,}24 \cdot (0{,}13 + 0{,}16 + 0{,}02 + 0) = 2{,}55$	$5{,}74 \cdot (0{,}69 + 0{,}16 + 0{,}02 + 0) = 5$	$8{,}24 \cdot (0{,}41 + 0{,}16 + 0{,}02 + 0) = 4{,}86$	
Относительное значение тормозного тока, отн.ед.	$I_{Т*} = I'_{скв.стор*} \cdot \sqrt{I_{2.1.n*} \cdot \cos\delta_{2.1.n}}$	$8{,}24\sqrt{0{,}92 \cdot \cos 8{,}5} = 7{,}86$	$5{,}74\sqrt{0{,}41 \cdot \cos 35} = 3{,}33$	$8{,}24\sqrt{0{,}65 \cdot \cos 22} = 6{,}4$	
Проверка условия отстройки чувствительного органа ДТЗ	$I_{Т*} > I_{Т.БЛ*}$	$7{,}86 > 2$	$3{,}33 > 2$	$6{,}4 > 2$	$I_{Т.БЛ*} = 2$
Проверка условия отстройки дифференциальной токовой отсечки	$I_{ОТС*} > I_{Д*}$	$6{,}5 > 2{,}55$	$6{,}5 > 5$	$6{,}5 > 4{,}86$	$I_{ОТС*} = 6{,}5$ отн.ед.
Проверка ТТ1, ТТ2 и ТТ3 при КЗ вне зоны действия успешно завершена.					

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

6.6 Пример проверки ТТ класса Р для дифференциальных защит автотрансформаторов с учётом переходных режимов

Исходные данные по токам КЗ приняты в соответствии с примером расчета ДТЗ автотрансформатора, приведенного в [11]. Трехфазные группы ТТ на всех сторонах автотрансформатора соединены по схеме звезды с нулевым проводом.

Расчетные точки КЗ для проверки ТТ класса Р с учётом переходных режимов для дифференциальной защиты автотрансформатора в условиях данного примера показаны на рис. 6.7.

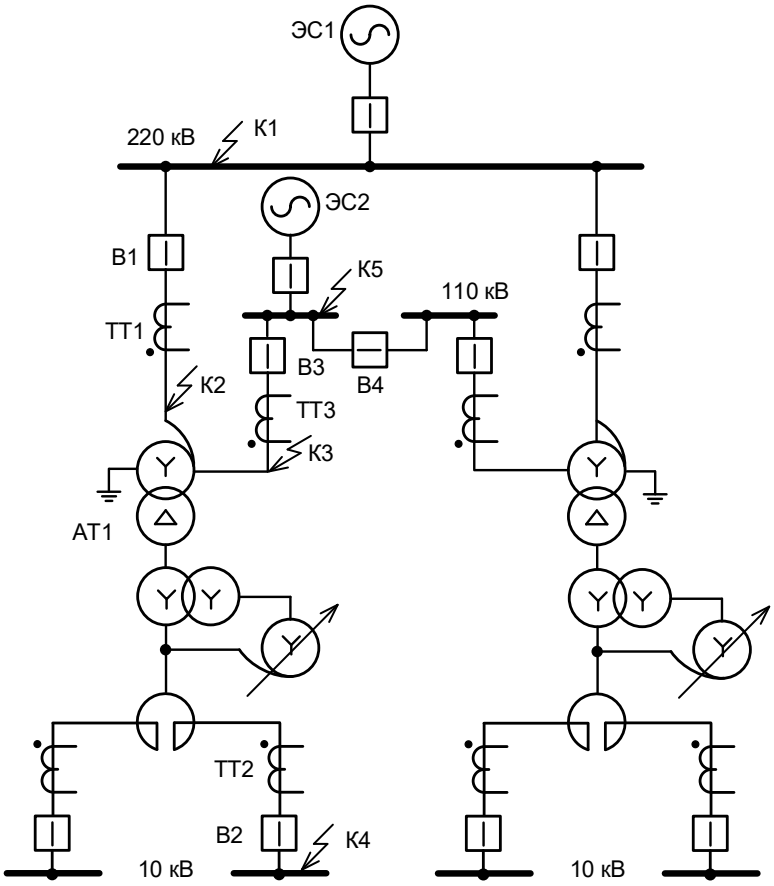


Рисунок 6.7 – Расположение расчетных точек КЗ для проверки ТТ в схеме ДТЗ АТ1

Первичные токи АТ, соответствующие его номинальной мощности, составляют:

– на стороне ВН 220кВ, А – $I_{\text{ном.ВН}} = \dfrac{S_{\text{ном.тр-ра}}}{\sqrt{3}\cdot U_{\text{ном.ВН}}} = \dfrac{125000}{\sqrt{3}\cdot 230} = 314;$

– на стороне СН 110кВ, А – $I_{\text{ном.СН}} = \dfrac{S_{\text{ном.тр-ра}}}{\sqrt{3}\cdot U_{\text{ном.СН}}} = \dfrac{125000}{\sqrt{3}\cdot 121} \approx 597;$

– на сторонах НН1 и НН2 10кВ, А – $I_{\text{ном.НН}} = \dfrac{S_{\text{ном.тр-ра}}}{\sqrt{3}\cdot U_{\text{ном.НН}}} = \dfrac{125000}{\sqrt{3}\cdot 11} \approx 6569.$

Базисные токи по сторонам, соответственно, равны:

– на стороне ВН 220кВ – $I_{\text{Б.ВН}} = \dfrac{k_{\text{сх.ТТ.ВН}}\cdot k_{\text{АТ.ВН}}}{k_{\text{ТТ.ВН}}}\cdot I_{\text{ном.ВН}} = \dfrac{1\cdot 1}{750/5}\cdot 314 = 2{,}093;$

– на стороне СН 110кВ – $I_{\text{Б.СН}} = \dfrac{k_{\text{сх.ТТ.СН}}\cdot k_{\text{АТ.СН}}}{k_{\text{ТТ.СН}}}\cdot I_{\text{ном.СН}} = \dfrac{1\cdot 1}{1000/5}\cdot 597 = 2{,}985\text{А};$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

– на стороне НН1 (НН2) 10кВ – $I_{Б.НН} = \frac{k_{сх.ТТ.НН} \cdot k_{АТ.НН}}{k_{ТТ.НН}} \cdot I_{ном.НН} = \frac{1 \cdot 1}{3000/5} \cdot 6569 = 10{,}95А.$

Исходные данные для проверки ТТ приведены в табл. 6.16 – 6.21.

Таблица 6.16

Исходные данные				
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**		
		ВН	**СН**	**НН**
Номинальная мощность трансформатора, МВА	$S_{ном.т}$	125		
Номинальное напряжение, кВ	$U_{ном.стор}$	230	121	11
Первичный ток, соответствующий проходной мощности автотрансформатора, А	$I_{ном.стор}$	314	597	6569
Номинальные токи ТТ, А	$K_{ТТ.стор}$	750/5	1000/5	3000/5
Базисный ток, А	$I_{Б.стор}$	2,093	2,985	10,95
Коэффициент схемы соединения ТТ	$K_{СХ.стор}$	1	1	1

Таблица 6.17

Исходные данные ТТ1 типа ТВТ-220-154 750/5		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	750
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	5
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	55
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	1,6
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	0,455
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,12
Число витков вторичной обмотки	w_2	149
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	94,5*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	2,5

Таблица 6.18

Исходные данные ТТ2 типа ТПШЛ-10 3000/5		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	3000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	5
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	24
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	1,2
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	1,04
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,27
Число витков вторичной обмотки	w_2	600
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	13,5*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	0,526

Таблица 6.19

Исходные данные ТТ3 типа ТВ-110 1000/5		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	5
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	45
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	1,2
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	0,57
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	1,2
Число витков вторичной обмотки	w_2	200
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	80*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	1,38

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.20

Параметры нагрузки ТТ		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение при $K^{(3)}$**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,12
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1
Количество последовательно включённых терминалов	m	1
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	150
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 4
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{150}{1 \cdot 4} = 0{,}656$
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п}$	0,656
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 0{,}656 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 0{,}88$
Для ТТ1 типа ТВТ-220-154 750/5		
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(0{,}455 + 0{,}88)^2 + 0{,}12^2} = 1{,}34$
Для ТТ2 типа ТПШЛ-10 3000/5		
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(1{,}04 + 0{,}88)^2 + 0{,}27^2} = 1{,}94$
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(1{,}04 + 0{,}8 \cdot 1{,}2)^2 + (0{,}27 + 0{,}6 \cdot 1{,}2)^2} =$
Для ТТ3 типа ТВ-110 1000/5		
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(0{,}57 + 0{,}88)^2 + 1{,}2^2} = 1{,}88$

Таблица 6.21

Параметры тормозной характеристики		
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**
Начальный ток срабатывания, отн.ед.	$I_{Д.0*}$	0,408
Ток начала торможения пускового органа, отн.ед.	$I_{Т.0*}$	1
Ток торможения блокировки, отн.ед.	$I_{Т.БЛ*}$	2
Коэффициент торможения	$K_Т$	0,47
Ток срабатывания дифференциальной отсечки, отн.ед.	$I_{ОТС*}$	7,73

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

6.6.1 Проверка ТТ для ДТЗ АТ при КЗ в зоне действия

Вначале выполняется проверка по времени до насыщения ТТ по условию правильного функционирования быстродействующего элемента дифференциальной отсечки при КЗ в зоне действия. Указанное время должно быть не менее, чем время принятия решения этим элементом при КЗ в зоне действия, которое составляет не менее 3,4 мс с момента начала КЗ.

Расчёт времени до насыщения для ТТ выполняется в соответствии рис. 6.7 в следующих характерных точках:

- ТТ1 и ТТ3 – точка К2;
- ТТ1 и ТТ3 – точка К3.

Параметры токов при КЗ в зоне действия приведены в табл. 6.22.

Таблица 6.22

Параметры токов при КЗ в зоне действия			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение при трёхфазном КЗ**	**Примечания**
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К2, А	$I_{К2.ВН}$	21 627	Выключатель АТ2 на стороне 110 кВ отключен
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К2, А	$I_{К2.СН}$	6 311	
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К3, А	$I_{К3.ВН}$	3 677	
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К3, А	$I_{К3.СН}$	25 180	
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К2, А	$I_{К2.ВН}$	24 282	Выключатель АТ2 на стороне 110 кВ включен
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К2, А	$I_{К2.СН}$	5 046	
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К3, А	$I_{К3.ВН}$	3 143	
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К3, А	$I_{К3.СН}$	31 154	
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс			
При КЗ в точке К2, мс	$T_{p.К2}$	35	
При КЗ в точке К3, мс	$T_{p.К3}$	35	

В общем случае проверку необходимо проводить как при отключённом, так и при включённом положении выключателя В4. Но в данном примере, когда постоянные времени затухания апериодических составляющих для токов КЗ одинаковы, с целью уменьшения количества расчетов допустимо выполнить проверку только при максимальных токах, протекающих по ТТ в данных режимах КЗ в зоне действия. Наибольшие значения токов КЗ для ТТ1 и ТТ3 соответствуют включенному положению выключателя АТ2 на стороне 110 кВ (соответственно, 24 282 А и 31 154 А).

Так как ВАХ ТТ отсутствует, а размеры магнитопровода ТТ известны, то расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) выполняется по $B(H)$. Результаты расчёта времени до насыщения при КЗ в зоне действия приведены в табл. 6.23 – 6.24.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.23

Наименование величины	Обозначение	Значения при $K^{(3)}$ в точке К2	
		ТТ1	ТТ3
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{\text{факт}} = \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$	$\frac{24282}{750} = 32{,}38$	$\frac{5046}{1000} = 5{,}05$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 32{,}38 = 16{,}19$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 5{,}05 = 2{,}52$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{\text{нас}} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$16{,}19 \cdot \frac{149}{2{,}5} = 965$	$2{,}52 \cdot \frac{200}{1{,}38} = 365$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{\text{нас}}$	1,9	1,87
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}$	$32{,}38 \cdot 5 \cdot 1{,}34 = 217$	$5{,}05 \cdot 5 \cdot 1{,}88 = 47{,}5$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{217}{222 \cdot 149 \cdot 94{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}69$	$\frac{47{,}5}{222 \cdot 200 \cdot 80 \cdot 10^{-4}} = 0{,}134$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{\text{нас}}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}9}{0{,}69} = 2{,}75$ $2{,}75 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}39$	$\frac{1{,}87}{0{,}134} = 14$ $14 \cdot (1 - 0{,}86) = 1{,}96$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{\text{нелин}} = \frac{y_\varepsilon}{y_{\text{лин}}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	8,3 2,6	Больше $5T_p$ 5,7

Таблица 6.24

Наименование величины	Обозначение	Значения при $K^{(3)}$ в точке К3	
		ТТ1	ТТ3
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{\text{факт}} = \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$	$\frac{3143}{750} = 4{,}19$	$\frac{31154}{1000} = 31{,}15$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 4{,}19 = 2{,}1$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 31{,}15 = 15{,}6$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{\text{нас}} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$2{,}1 \cdot \frac{149}{2{,}5} = 125$	$15{,}6 \cdot \frac{200}{1{,}38} = 2261$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{\text{нас}}$	1,82	1,94
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}$	$4{,}19 \cdot 5 \cdot 1{,}34 = 28{,}1$	$31{,}15 \cdot 5 \cdot 1{,}88 = 293$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{28{,}1}{222 \cdot 149 \cdot 94{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}09$	$\frac{293}{222 \cdot 200 \cdot 80 \cdot 10^{-4}} = 0{,}83$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{\text{нас}}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}82}{0{,}09} = 20{,}2$ $20{,}2 \cdot (1 - 0{,}86) = 2{,}83$	$\frac{1{,}94}{0{,}83} = 2{,}3$ $2{,}3 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}32$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{\text{нелин}} = \frac{y_\varepsilon}{y_{\text{лин}}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше $5T_p$ 8,5	6,6 1,3

Из результатов проверки по времени до насыщения, приведенным в табл. 6.23 – 6.24, следует, что при трехфазном КЗ в зоне действия условие пригодности ТТ1 и ТТ3 для быстродействующего элемента отсечки не выполняется, так как в наихудшем случае $t_{\text{нас.2}}$ < 3,4 мс

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

(2,6 мс и 1,3 мс, соответственно). Действующие значения первой гармоники вторичного тока для ТТ1 при КЗ в точке К2 и ТТ3 при КЗ в точке К3 на первом периоде по рис.Б.4 Приложения Б пренебрежимо малы (менее 1%), поэтому небыстродействующий орган отсечки на первом периоде также не срабатывает.

Производится проверка условия срабатывания небыстродействующего элемента дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия. Результаты указанной проверки приведены в табл. 6.25 – 6.26.

Таблица 6.25

Проверка ТТ по условию срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия в точке К2			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		ТТ1	**ТТ3**
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока к моменту времени $t_{нас}$, отн.ед.	$I_{2.1.2*}$	0,47	0,47
Угловая погрешность первой гармоники вторичного тока ТТ на втором периоде КЗ	$\delta_{2.1.2}$	37	37
Токи, проходящие через ТТ при КЗ в расчетных точках, отн.ед.	$I'_{ТТ.стор*} = \dfrac{I_{ТТ.стор}}{I_{Б.стор} \cdot k_{ТТ.стор}}$	$\dfrac{24282}{2{,}093 \cdot 150} = 77{,}34$	$\dfrac{5046}{2{,}985 \cdot 200} = 8{,}45$
Относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока на втором периоде, отн.ед	$I_{Д.2*} = \left\lvert \begin{matrix} I'_{ТТ.ВН*} \cdot I_{2.1.2.ВН*} \cdot e^{j\delta_{2.1.ВН}} + \\ + I'_{ТТ.СН*} \cdot I_{2.1.2.СН*} \cdot e^{j\delta_{2.1.СН}} \end{matrix} \right\rvert$	$\left\lvert \begin{matrix} 77{,}34 \cdot 0{,}47 \cdot e^{j37^{\circ}} + \\ + 8{,}45 \cdot 0{,}47 \cdot e^{j37^{\circ}} \end{matrix} \right\rvert = 40{,}3$	
Проверка условия срабатывания дифференциальной отсечки на первом периоде КЗ в зоне	$I_{Д.2*} > I_{ОТС*}$	$40{,}3 > 7{,}73$	
Условие срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне в точке К2 при насыщении ТТ1 и ТТ3 выполняется.			

Таблица 6.26

Проверка ТТ по условию срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия в точке К3			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		ТТ1	**ТТ3**
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока к моменту времени $t_{нас}$, отн.ед.	$I_{2.1.2*}$	0,47	0,47
Угловая погрешность первой гармоники вторичного тока ТТ на втором периоде КЗ	$\delta_{2.1.2}$	37	37
Токи, проходящие через ТТ при КЗ в расчетных точках, отн.ед.	$I'_{ТТ.стор*} = \dfrac{I_{ТТ.стор}}{I_{Б.стор} \cdot k_{ТТ.стор}}$	$\dfrac{3143}{2{,}093 \cdot 150} = 10$	$\dfrac{31154}{2{,}985 \cdot 200} = 52{,}2$
Относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока на втором периоде, отн.ед	$I_{Д.2*} = \left\lvert \begin{matrix} I'_{ТТ.ВН*} \cdot I_{2.1.2.ВН*} \cdot e^{j\delta_{2.1.ВН}} + \\ + I'_{ТТ.СН*} \cdot I_{2.1.2.СН*} \cdot e^{j\delta_{2.1.СН}} \end{matrix} \right\rvert$	$\left\lvert \begin{matrix} 10 \cdot 0{,}47 \cdot e^{j37^{\circ}} + \\ + 52{,}2 \cdot 0{,}47 \cdot e^{j37^{\circ}} \end{matrix} \right\rvert = 29{,}2$	
Проверка условия срабатывания дифференциальной отсечки на первом периоде КЗ в зоне	$I_{Д.2*} > I_{ОТС*}$	$29{,}2 > 7{,}73$	
Условие срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне в точке К3 при насыщении ТТ1 и ТТ3 выполняется.			

Из результатов проверки, приведённых в табл. 6.25 – 6.26, следует, что условие срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия при насыщении ТТ1 и ТТ3 гарантированно выполняется.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Если необходимо обеспечить срабатывание дифференциальной отсечки на первом периоде КЗ в зоне действия, то производится выбор ТТ с номинальными вторичными токами 1 А.

Исходные данные повторно выбранных ТТ приведены в табл. 6.27 – 6.28.

Таблица 6.27

Исходные данные ТТ1 типа ТВТ-220-I-1-83 750/1		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	750
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	25,5
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	40
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	6
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0
Число витков вторичной обмотки	w_2	750
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	86*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	1,947
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(6+0{,}88)^2 + 0} = 6{,}88$

Таблица 6.28

Исходные данные ТТ3 типа ТВТ-110-III-1-83 1000/1		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	25,5
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	40
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	6,6
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0
Число витков вторичной обмотки	w_2	1000
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	56*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	0,98
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(6{,}6+0{,}88)^2 + 1{,}2^2} = 7{,}48$

Результаты повторного расчёта времени до насыщения при КЗ в зоне действия приведены в табл. 6.29 – 6.30.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.29

Наименование величины	Обозначение	Значения при $K^{(3)}$ в точке К2	
		ТТ1	ТТ3
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{\text{факт}} = \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$	$\frac{24282}{750} = 32{,}38$	$\frac{5046}{1000} = 5{,}05$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 32{,}38 = 3{,}24$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 5{,}05 = 0{,}505$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{\text{нас}} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$3{,}24 \cdot \frac{750}{1{,}947} = 1248$	$0{,}505 \cdot \frac{1000}{0{,}98} = 515$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{\text{нас}}$	1,91	1,88
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}$	$32{,}38 \cdot 1 \cdot 6{,}88 = 223$	$5{,}05 \cdot 1 \cdot 7{,}48 = 38$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{223}{222 \cdot 750 \cdot 86 \cdot 10^{-4}} = 0{,}156$	$\frac{38}{222 \cdot 1000 \cdot 56 \cdot 10^{-4}} = 0{,}031$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{\text{нас}}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}91}{0{,}156} = 12{,}24$ $12{,}24 \cdot (1 - 0{,}86) = 1{,}7$	$\frac{1{,}88}{0{,}031} = 61$ $61 \cdot (1 - 0{,}86) = 8{,}5$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{\text{нелин}} = \frac{y_\varepsilon}{y_{\text{лин}}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше $5T_p$ 6,4	Больше $5T_p$ 50,2

Таблица 6.30

Наименование величины	Обозначение	Значения при $K^{(3)}$ в точке К3	
		ТТ1	ТТ3
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{\text{факт}} = \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$	$\frac{3143}{750} = 4{,}19$	$\frac{31154}{1000} = 31{,}15$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 4{,}19 = 0{,}42$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 31{,}15 = 3{,}12$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{\text{нас}} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$0{,}42 \cdot \frac{750}{1{,}947} = 162$	$3{,}12 \cdot \frac{1000}{0{,}98} = 3184$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{\text{нас}}$	1,83	1,966
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}$	$4{,}19 \cdot 1 \cdot 6{,}88 = 28{,}8$	$31{,}15 \cdot 1 \cdot 7{,}48 = 233$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{28{,}8}{222 \cdot 149 \cdot 86 \cdot 10^{-4}} = 0{,}02$	$\frac{233}{222 \cdot 1000 \cdot 56 \cdot 10^{-4}} = 0{,}187$
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{\text{нас}}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}83}{0{,}02} = 91$ $91 \cdot (1 - 0{,}86) = 12{,}7$	$\frac{1{,}966}{0{,}187} = 10{,}5$ $10{,}5 \cdot (1 - 0{,}86) = 1{,}47$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{\text{нелин}} = \frac{y_\varepsilon}{y_{\text{лин}}} \geq 3$	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше $5T_p$ Больше $5T_p$	Больше $5T_p$ 5,9

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Из результатов расчета, представленных в табл. 6.29 – 6.30, следует, что время до насыщения ТТ1 и ТТ3 в при КЗ в зоне действия превышает 3,4 мс, т.е. быстродействующий элемент дифференциальной отсечки срабатывает на первом периоде КЗ.

Проверку небыстродействующего органа отсечки по значение первой гармоники $I_{2.1.1*}$, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ на первом периоде КЗ, необходимо провести только для ТТ3 в режиме КЗ в точке КЗ, так как в остальных случаях время до насыщения ТТ превышает 20 мс:

$$I_{\text{Д.нас}*} = I'_{\text{ТТ.ВН}*} \cdot I_{2.1.1.\text{ВН}*} + I'_{\text{ТТ.СН}*} \cdot I_{2.1.1.\text{СН}*} = 10{,}1 \cdot 1 + 52{,}18 \cdot 0{,}23 = 22{,}1 > I_{\text{ОТС}*} = 7{,}73,$$

где $I_{2.1.1.\text{СН}*}$, $I_{2.1.1.\text{ВН}*}$ – относительное действующее первой гармоники, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ на первом периоде КЗ (рис. Б.4 в Приложении Б). Таким образом, условие срабатывания небыстродействующего органа отсечки на первом периоде КЗ в зоне действия выполняется.

Таким образом, использование выбранных ТТ с вторичным номинальным током 1 А обеспечивает срабатывание быстродействующего и небыстродействующего элементов отсечки на первом периоде КЗ в зоне действия.

Проверка ТТ в режиме КЗ в зоне действия закончена успешно.

6.6.2 Проверка ТТ для ДТЗ АТ при КЗ вне зоны действия

Параметры токов при КЗ вне зоны действия приведены в табл. 6.31.

Таблица 6.31

Параметры токов при КЗ вне зоны действия			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение при трёхфазном КЗ**	**Примечания**
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К1, А	$I_{\text{К1.ВН}}$	3 320	Выключатель В4 отключен
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К1, А	$I_{\text{К1.СН}}$	6 311	
Ток через ТТ2 при КЗ в точке К4, А	$I_{\text{К4.НН}}$	15 159	
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К4, А	$I_{\text{К4.СН}}$	1 349	
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К5, А	$I_{\text{К5.ВН}}$	3 677	
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К5, А	$I_{\text{К5.СН}}$	6 990	
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К1, А	$I_{\text{К1.ВН}}$	2 655	Выключатель В4 включен
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К1, А	$I_{\text{К1.СН}}$	5 046	
Ток через ТТ2 при КЗ в точке К4, А	$I_{\text{К4.НН}}$	15 347	
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К4, А	$I_{\text{К4.СН}}$	1 485	
Ток через ТТ1 при КЗ в точке К5, А	$I_{\text{К5.ВН}}$	3 143	
Ток через ТТ3 при КЗ в точке К5, А	$I_{\text{К5.СН}}$	5 794	
Постоянные времени затухания апериодической составляющей, мс			
При КЗ в точке К1, мс	$T_{p.\text{К1}}$	35	
При КЗ в точке К4, мс	$T_{p.\text{К4}}$	35	
При КЗ в точке К5, мс	$T_{p.\text{К5}}$	35	

Расчёт времени до насыщения для ТТ выполняется в соответствии с рис. 6.7 в следующих характерных точках:

– ТТ1 проверяется при КЗ в точке К1, К4 или К5 в зависимости от того в каком из этих режимов меньше время до насыщения;

– ТТ2 проверяется при КЗ в точке К4;

– ТТ3 проверяется при КЗ в точке К1, К4 или К5 в зависимости от того в каком из этих

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

режимов меньше время до насыщения.

Так как на обоих выводах стороны НН токоограничивающего реактора установлены ТТ одного типа и нагрузки в их вторичных цепях совпадают, то допускается выполнять проверку только одного ТТ, в данном примере это ТТ2.

Так как постоянные времени затухания апериодических составляющих при КЗ в точках К1, К4 и К5 одинаковы, то расчетные точки для проверки ТТ1 и ТТ3 выбираются по максимальному току через них: проверка ТТ1 и ТТ3 проводится только для режима КЗ в точке К5 при отключенном выключателе В4. ТТ2 проверяется при КЗ в точке точка К4 с включённым выключателем В4.

Так как ВАХ ТТ отсутствует, а размеры магнитопровода ТТ известны, то расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) выполняется по $B(H)$. Результаты расчёта времени до насыщения и проверки пригодности ТТ для ДТЗ при наличии блокирующего органа в её составе приведены в табл. 6.32.

Из результатов проверки по времени до насыщения, приведенным в табл. 6.32, следует, что при трехфазном КЗ вне зоны действия условие пригодности ТТ при наличии блокирующего органа в составе ДТЗ выполняется, так как $t_{нас.2}$ > 3 мс. При отсутствии блокирующего органа требуется дополнительная проверка с помощью универсальных характеристик ТТ с ПХН.

Результаты дополнительной проверки ДТЗ АТ в переходном режиме КЗ вне зоны действия приведены в табл. 6.33. Из указанных результатов следует, что для ТТ1 и ТТ3 при КЗ вне зоны действия проверка успешно завершена. Проверка ТТ2 показала, что при внешнем КЗ в точке К4 относительное значение тормозного тока не превышает значение уставки $I_{Т.БЛ*}$, т.е. рабочая точка находится на наклонном участке тормозной характеристики и чувствительный орган ДТЗ срабатывает неправильно. Максимальная разгрузка ТТ2 и переход на ТТ с увеличенным $I_{1.ном}$ желаемого эффекта не дают. Необходимо перейти на ТТ2 другого класса, например, PR.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.32

Наименование величины	Обозначение	Значения при $K^{(3)}$		
		Для ТТ1 при КЗ в точке К5	Для ТТ2 при КЗ в точке К4	Для ТТ3 при КЗ в точке К5
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{\text{факт}} = \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$	$\frac{3677}{750} = 4{,}9$	$\frac{15347}{3000} = 5{,}12$	$\frac{6990}{1000} = 6{,}99$
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 4{,}9 = 0{,}49$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 5{,}12 = 2{,}56$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 6{,}99 = 0{,}699$
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{\text{нас}} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$0{,}49 \cdot \frac{750}{1{,}947} = 189$	$2{,}56 \cdot \frac{600}{0{,}526} = 2920$	$0{,}699 \cdot \frac{1000}{0{,}98} = 713$
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{\text{нас}}$	1,84	1,96	1,89
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}$	$4{,}9 \cdot 1 \cdot 6{,}88 = 33{,}7$	$5{,}12 \cdot 5 \cdot 1{,}94 = 49{,}6$	$6{,}99 \cdot 1 \cdot 7{,}48 = 52{,}3$
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{33{,}7}{222 \cdot 750 \cdot 86 \cdot 10^{-4}} = 0{,}024$	$\frac{49{,}6}{222 \cdot 600 \cdot 13{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}276$	$\frac{52{,}3}{222 \cdot 1000 \cdot 56 \cdot 10^{-4}} = 0{,}042$
Параметр режима работы ТТ A – без учета остаточной магнитной индукции (K_r = 0); – с учетом остаточной магнитной индукции (K_r = 0,86)	$A = \frac{B_{\text{нас}}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}84}{0{,}024} = 77$ $77 \cdot (1 - 0{,}86) = 10{,}9$	$\frac{1{,}96}{0{,}276} = 7{,}1$ $7{,}1 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}99$	$\frac{1{,}89}{0{,}042} = 45$ $45 \cdot (1 - 0{,}86) = 6{,}3$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{\text{нелин}} = \frac{y_\varepsilon}{y_{\text{лин}}} \geq 3$	>3	>3	>3
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше $5T_p$ 91,9	30,9 4,3	Больше $5T_p$ 29,2
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{\text{нас.1}} > t_{\text{реш.2}}$; $t_{\text{нас.2}} > t_{\text{реш.2}}$	Выпол. (>> 3 мс) Выпол. (91,9 > 3 мс)	Выпол. (30,9 > 3 мс) Выпол. (4,3 > 3 мс)	Выпол. (>> 3 мс) Выпол. (29,2 > 3 мс)

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.33

Проверка ДТЗ АТ в переходном режиме КЗ вне зоны действия					
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения при $K^{(3)}$**			**Примечания**
		Для ТТ1 при КЗ в точке К5	**Для ТТ2 при КЗ в точке К4**	**Для ТТ3 при КЗ в точке К5**	
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение	n	6	2	3	ТТ1: $t_{нас.2}$ = 91,9 мс ТТ2: $t_{нас.2}$ = 4,3 мс ТТ3: $t_{нас.2}$ = 29,2 мс
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока, отн.ед.	$I_{2.1*.n}$	0,93	0,37	0,57	
Угловая погрешность первой гармоники, град.	$\delta_{2.1}$	7	37	25	
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1*.n}$	0,11	0,73	0,48	
Относительный ток КЗ через ТТ, отн.ед.	$I'_{скв.стор*} = \frac{I_{скв}}{I_{Б.стор} \cdot k_{ТТ.стор}}$	$\frac{3677}{0{,}419 \cdot 750} = 11{,}7$	$\frac{15347}{10{,}95 \cdot 600} = 2{,}34$	$\frac{6990}{0{,}597 \cdot 1000} = 11{,}7$	
Относительное значение дифференциального тока, отн.ед.	$I_{Д*} = I'_{скв.стор*} \cdot (I_{0.1.n*} + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{выр} + \Delta f_{ПТТ})$	$11{,}7 \cdot (0{,}11 + 0{,}12 + 0{,}02 + 0) = 2{,}93$	$2{,}34 \cdot (0{,}73 + 0{,}12 + 0{,}02 + 0) = 2{,}04$	$11{,}7 \cdot (0{,}48 + 0{,}12 + 0{,}02 + 0) = 7{,}25$	
Относительное значение тормозного тока, отн.ед.	$I_{Т*} = I'_{скв.стор*} \cdot \sqrt{I_{2.1.n*} \cdot \cos\delta_{2.1.n}}$	$11{,}7\sqrt{0{,}93 \cdot \cos 7} = 11{,}24$	$2{,}34\sqrt{0{,}37 \cdot \cos 37} = 1{,}27$	$11{,}7\sqrt{0{,}57 \cdot \cos 25} = 8{,}41$	
Проверка условия отстройки чувствительного органа ДТЗ	$I_{Т*} > I_{Т.БЛ*}$	$11{,}24 > 2$	$1{,}27 < 2$	$8{,}41 > 2$	$I_{Т.БЛ*} = 2$
	$I_{ср*} = I_{Д0*} + K_Т(I_{Т*} - I_{Т0*}) > I_{Д*}$	Блокируется	$0{,}408 + 0{,}47 \cdot (1{,}27 - 1) = 0{,}53 < 2{,}04$	Блокируется	
Проверка условия отстройки дифференциальной токовой отсечки	$I_{ОТС*} > I_{Д*}$	$7{,}73 > 2{,}93$	$7{,}73 > 2{,}04$	$7{,}73 > 7{,}25$	$I_{ОТС*} = 7{,}73$ отн.ед.
Проверка ТТ1 и ТТ3 при КЗ вне зоны действия успешно завершена. **Проверка ТТ2 показала, что при насыщении его магнитопровода на первом периоде КЗ вне зоны действия чувствительный орган ДТЗ срабатывает неправильно.**					

Редакция от 13.09.2021

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Из-за отсутствия данных по серийно выпускаемым ТТ с немагнитным зазором на напряжение 10 кВ в проверке используется условный ТТ класса PR, реализованный в габаритах ТПШЛ-10 4000/5, у которого K_r = 0,1, а постоянная времени вторичного контура равна T_s = 1,5 с. Параметры ТТ приведены в табл. 6.34.

Таблица 6.34

Исходные данные ТТ2 класса PR в габаритах ТПШЛ-10 4000/5		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	4000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	5
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	26
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	1,2
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	0,88
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,2
Постоянная времени вторичного контура, с	T_s	1,5
Коэффициент остаточной намагниченности, %	K_r	10

Кроме того, для ТТ2 увеличено сечение жилы контрольного кабеля во вторичных цепях с 4 мм^2 до 6 мм^2. Результаты нового расчёта нагрузки для ТТ2 приведены в табл. 6.35.

Таблица 6.35

Параметры нагрузки ТТ2		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение при $K^{(3)}$**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,12
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1
Количество последовательно включённых терминалов	m	1
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	150
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 6
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{150}{1 \cdot 6} = 0{,}438$
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п}$	0,438
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 0{,}438 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 0{,}66$
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(0{,}88 + 0{,}66)^2 + 0{,}2^2} = 1{,}55$
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(0{,}88 + 0{,}8 \cdot 1{,}2)^2 + (0{,}2 + 0{,}6 \cdot 1{,}2)^2} = 2{,}06$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Расчет времени до насыщения для ТТ класса PR выполняется графическим методом с помощью предварительно построенной кривой $K_{\text{п.р}}(t)$ по выражению (Б.15) из [16].

Результаты расчёта времени до насыщения ТТ2 режиме КЗ вне зоны действия в точке К4 приведены в табл. 6.36.

Таблица 6.36

Расчёт времени до насыщения ТТ2 класса PR в габаритах ТПШЛ-10 4000/5			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения для ТТ2**	**Примечания**
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$A = \dfrac{I_{1\,\text{ном}} \cdot K_{\text{ном.факт}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}{I_{\text{К4.НН}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\dfrac{4000 \cdot 26 \cdot 2{,}06}{15347 \cdot 1{,}55} = 9$; $9 \cdot (1 - 0{,}1) = 8{,}1$	$K_r = 0{,}1$
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	52,2 49,7	

Результаты проверки ДТЗ АТ с помощью характеристик относительного действующего значения и угловой погрешности первой гармоники вторичного тока ТТ с ПХН в переходном режиме КЗ вне зоны действия приведены в табл. 6.37.

Таблица 6.37

Проверка ДТЗ АТ в переходном режиме КЗ вне зоны действия			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения для ТТ2 при КЗ в точке К4**	**Примечания**
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение	n	4	ТТ2: $t_{\text{нас.2}}$ = 49,7 мс
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока, отн.ед.	$I_{2.1*.n}$	0,77	
Угловая погрешность первой гармоники, град.	$\delta_{2.1}$	16	
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1*.n}$	0,3	
Относительный ток КЗ через ТТ, отн.ед.	$I'_{\text{скв.стор}*} = \dfrac{I_{\text{скв}}}{I_{\text{Б.стор}} \cdot k_{\text{ТТ.стор}}}$	$\dfrac{15347}{8{,}2 \cdot 800} = 2{,}34$	
Относительное значение дифференциального тока, отн.ед.	$I_{\text{Д}*} = I'_{\text{скв.стор}*} \cdot (I_{0.1.n*} + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{выр}} + \Delta f_{\text{ПТТ}})$	$2{,}34 \cdot (0{,}3 + 0{,}12 + 0{,}02 + 0) = 1{,}03$	
Относительное значение тормозного тока, отн.ед.	$I_{\text{Т}*} = I'_{\text{скв.стор}*} \cdot \sqrt{I_{2.1.n*} \cdot \cos\delta_{2.1.n}}$	$2{,}34\sqrt{0{,}77 \cdot \cos 16} = 2{,}013$	
Проверка условия отстройки чувствительного органа ДТЗ	$I_{\text{Т}*} > I_{\text{Т.БЛ}*}$	$2{,}013 > 2$	$I_{\text{Т.БЛ}*} = 2$
Проверка условия отстройки дифференциальной токовой отсечки	$I_{\text{ОТС}*} > I_{\text{Д}*}$	$7{,}73 > 1{,}03$	$I_{\text{ОТС}*} = 7{,}73$ отн.ед.
Проверка ТТ2 при КЗ вне зоны действия успешно завершена.			

Следует отметить, что проверка ТТ класса PR для ДТЗ с помощью характеристик, приведённых на рис. Б.1 – Б.3 в Приложении Б, возможна только при выполнении следующего условия:

$$T_s >> T_p.$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Из результатов, приведённых в табл. 6.37, следует, что условия отстройки дифференциальной токовой отсечки и чувствительного органа ДТЗ при КЗ вне зоны действия выполняются. Проверка успешно завершена.

6.7 Пример формирования задания заводу изготовителю на разработку и изготовление ТТ класса PR с учётом переходных режимов

Данный пример построен на основе исходных данных и расчетов, выполненных в предыдущем разделе.

В общем случае задание заводу изготовителю на разработку и изготовление ТТ класса PR для ДТЗ АТ формируется отдельно для ТТ каждой стороны АТ. При этом должны рассматриваться режимы КЗ в зоне и близкого вне зоны действия с максимально возможными токами через соответствующий ТТ.

В данном примере задание заводу изготовителю формируется только на ТТ2 (рис. 6.7).

Расчетные точки КЗ для ДТЗ АТ с учётом переходных режимов, в условиях данного примера показаны на рис. 6.7. Максимальный ток через ТТ2 проходит при КЗ в точке К4.

Параметры токов КЗ приведены в табл. 6.31.

Исходя из требований к угловой погрешности для ТТ класса TPY (±60 мин) задаётся начальное приближение:

$$T_s = \frac{1}{\omega \cdot tg(\delta)} = \frac{1}{314 \cdot tg(1^{\circ})} \approx 0{,}182 \text{ с.}$$

В режиме КЗ вне зоны действия при наличии блокирующего органа в составе ДТЗ АТ время принятия решения ($t_{\text{реш.2}}$) не превышает 3 мс. По выражению (А.28) рассчитывают значение $K_{\text{п.р}}(t_{\text{реш.2}})$:

$$K_{\text{п.р}}^{(3)}(t_{\text{реш.2}}) = \frac{\omega \cdot T_p \cdot T_s}{T_p - T_s}\left(e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}}\right) + 1 = \frac{314 \cdot 0{,}035 \cdot 0{,}182}{0{,}035 - 0{,}182}\left(e^{-\frac{0{,}003}{0{,}035}} - e^{-\frac{0{,}003}{0{,}182}}\right) + 1 = 1{,}895.$$

Проверяют выполнение условия (А.31):

$$0{,}182 \geq \frac{1{,}895}{314 \cdot 0{,}1} = 0{,}06$$

Условия выполняется.

По нагрузке присоединения определяется значение номинального первичного тока $I_{1.\text{ном}}$ = 1000 А. Значение номинального вторичного тока $I_{2.\text{ном}}$ в электроустановках 10 кВ принимается равным 5 А. Расчёт фактического сопротивления нагрузки на ТТ приведен в табл. 6.20.

Так как косинус угла фактического сопротивления нагрузки на ТТ1 равен 1 (см. табл. 6.20), то

$$z_{\text{н.факт}}^{(3)} = 0{,}88 \text{ Ом.}$$

Требуемое номинальное сопротивление нагрузки принимается равным ближайшему к

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

максимальному из $z_{\text{н.факт}}$ значению (в сторону увеличения) из ряда рекомендуемых значений [21, 22]:

$$z_{\text{н.ном}} = 1 \text{ Ом}.$$

Значение сопротивления вторичной обмотки может варьироваться в зависимости от конструкции ТТ, однако реальный диапазон значений будет составлять от 20 до 80 % от номинальной нагрузки. Предположим, что сопротивление вторичной обмотки ТТ составляет 60% от номинального, что дает z_2 = 0,6 Ом.

Рассчитывается фактическое предельное значение вторичного напряжения:

$$U^{(3)}_{\text{нас.факт}} \approx \frac{K^{(3)}_{\text{п.р}}(t_{\text{реш.2}})}{(1-K_r)} \cdot \frac{I^{(3)}_{\text{КЗ.4}}}{I_{1.\text{ном}}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (z_2 + z^{(3)}_{\text{н.факт}}) = \frac{1{,}895}{(1-0{,}1)} \cdot \frac{15347}{1000} \cdot 5 \cdot (0{,}6+0{,}88) \approx 240 \text{ В}.$$

Чтобы дать возможность производителю оптимизировать отношение между активным сопротивлением обмотки ТТ и площадью поперечного сечения сердечника достаточно задать следующее неравенство:

$$U_{\text{нас.факт}} \le K_{\text{ном}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (z_2 + z_{\text{н.ном}})$$

$$240 \le K_{\text{ном}} \cdot 5 \cdot (z_2 + z_{\text{н.ном}}).$$

Дополнительно приближенно определим требуемое значение номинальной предельной кратности:

$$K_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{нас.факт}}}{I_{2.\text{ном}}(z_2 + z_{\text{н.ном}})} = \frac{240}{5 \cdot (0{,}6+1)} \approx 30.$$

В табл. 6.38 приведены сведения, которые необходимо привести в задании заводу изготовителю для ТТ класса Р.

Таблица 6.38

Задание заводу изготовителю ТТ		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальное первичное напряжение, кВ	$U_{1.\text{ном}}$	10
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.\text{ном}}$	1000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.\text{ном}}$	5
Класс точности		10PR
Фактическая вторичная нагрузка, Ом	$z_{\text{н.факт}}$	0,88
Предельное вторичное напряжение, В	$U_{\text{нас.факт}}$	240
Дополнительные		
Действующее значение периодической составляющей тока КЗ, А	$I_{\text{КЗ}}$	15347
Значение коэффициента переходного режима	$K_{\text{п.р}}$	1,895
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{\text{ном}}$	30
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{\text{н.ном}}$	1

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

6.8 Пример проверки ТТ класса Р для дифференциальных защит ошиновки стороны НН автотрансформаторов (трансформаторов) с учётом переходных режимов

В примере принято, что трехфазные группы ТТ на всех сторонах ошиновки стороны НН автотрансформатора соединены по схеме звезды с нулевым проводом.

Расчетные точки КЗ для проверки правильности функционирования защиты ошиновки стороны НН автотрансформатора, использующей информацию от ТТ класса Р, в условиях данного примера показаны на рис. 6.8.

Исходные данные для проверки ТТ приведены в табл. 6.39 – 6.42.

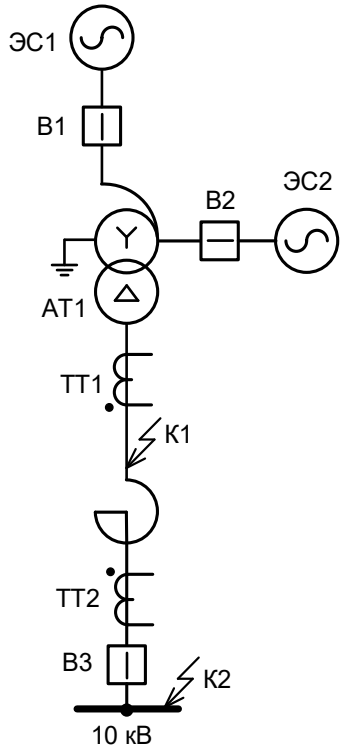


Рисунок 6.8 – Расположение расчетных точек КЗ для проверки ТТ в схеме ДТЗ ошиновки стороны НН АТ

Таблица 6.39

Наименование величины	Обозначение	Значение при трёхфазном КЗ
Параметры тока при КЗ в зоне действия		
Ток КЗ в точке К1, А	$I_{К1}$	115600
Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ в точке К1, мс	$T_{р.К1}$	100
Параметры тока при КЗ вне зоны действия		
Ток КЗ в точке К2, А	$I_{К2}$	20000
Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ в точке К2, мс	$T_{р.К2}$	100

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.40

Параметры тормозной характеристики		
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**
Начальный ток срабатывания, отн. ед.	$I_{Д.0*}$	0,324
Ток начала торможения пускового органа, отн. ед.	$I_{Т.0*}$	1
Ток торможения блокировки, отн. ед.	$I_{Т.БЛ*}$	2,2
Коэффициент торможения	$K_Т$	0,35
Ток срабатывания дифференциальной отсечки, отн. ед.	$I_{ОТС*}$	2,1

Таблица 6.41

Исходные данные ТТ1 типа ТВТ-10-XI 6000/5		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение при $K^{(3)}$**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	6000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	5
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	30
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	1,2
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	1
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0
Параметры нагрузки ТТ1		
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,08
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1
Количество последовательно включённых терминалов	m	1
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	190
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 4
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{190}{1 \cdot 4} = 0{,}832$
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п}$	0,832
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 0{,}832 + 1 \cdot 0{,}08 + 0{,}1 = 1{,}01$
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(1+1{,}01)^2 + 0} = 2{,}01$
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(1 + 0{,}8 \cdot 1{,}2)^2 + (0{,}6 \cdot 1{,}2)^2} = 2{,}09$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.42

Исходные данные ТТ2 типа ТЛО-10 1000/5		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение при $K^{(3)}$**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	5
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	20
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	0,5
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	0,196
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0
Параметры нагрузки ТТ2		
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,08
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1
Количество последовательно включённых терминалов	m	1
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	45
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 6
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	2
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{45}{2 \cdot 6} = 0{,}066$
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п}$	0,066
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 0{,}066 + 1 \cdot 0{,}08 + 0{,}1 = 0{,}246$
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(0{,}196 + 0{,}246)^2 + 0} = 0{,}442$
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(0{,}196 + 0{,}8 \cdot 0{,}5)^2 + (0{,}6 \cdot 0{,}5)^2} = 0{,}667$

6.8.1 Проверка ТТ для ДТЗ ошиновки стороны НН АТ при КЗ в зоне действия

Выполняется проверка срабатывания быстродействующего элемента дифференциальной отсечки по времени до насыщения ТТ2. Указанное время должно быть не менее, чем время принятия решения указанным элементом о КЗ в зоне действия, которое составляет не менее 3,4 мс с момента начала КЗ. Так как для ТТ1 данные по ВАХ и *B*(*H*) отсутствуют, то расчёт времени до насыщения выполняется по паспортным данным.

Расчёт времени до насыщения выполняется для ТТ1 при КЗ в точке К1 (рис. 6.8).

Результаты проверки ТТ1 по времени до насыщения приведены в табл. 6.43.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.43

Наименование величины	Обозначение	Значения для ТТ1 при $K^{(3)}$ в точке К1	Примечания
Параметр режима работы ТТ A – без учета остаточной магнитной индукции – с учетом остаточной магнитной индукции	$A = \frac{I_{1\,\text{ном}} \cdot K_{\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}{I_{\text{КЗ}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{6000 \cdot 30 \cdot 2{,}09}{115600 \cdot 2{,}01} = 1{,}62$; $1{,}62 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}23$ 0,17	$K_r = 0{,}86$
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	6,1 2,2	
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{\text{нас.1}} > t_{\text{реш.1}}$; $t_{\text{нас.2}} > t_{\text{реш.1}}$	Выпол. (6,1 > 3,4 мс) Не выпол. (2,2 < 3,4 мс)	$t_{\text{реш.1}} = 3{,}4$ мс
Так как при трехфазном КЗ условие пригодности ТТ1 для быстродействующего элемента отсечки по времени до насыщения не выполняется, то необходимо выполнить проверку срабатывания медленнодействующего элемента отсечки на первом и втором периодах КЗ.			

Производится проверка условия срабатывания небыстродействующего элемента дифференциальной отсечки на первом периоде КЗ в зоне действия. Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока для ТТ1 при КЗ в точке К1 на первом периоде определяется по рис.Б.4 Приложения Б:

$$I_{2.1.1*} = 0{,}02 \text{ отн.ед.}$$

Базисный ток на стороне ТТ1 равен:

$$I_{\text{Б.ТТ1}} = \frac{K_{\text{ТТ.МАКС}}}{K_{\text{ТТ1}}} \cdot K_{\text{СХ.ТТ1}} \cdot K_{\text{ВКЛ.ТТ1}} \cdot I_{\text{НОМ.ТТ.МАКС}} = \frac{1200}{1200} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 5 = 5 \text{ А.}$$

Ток, проходящий через ТТ1 при КЗ в точке К1, приводят к расчётной стороне объекта по выражению:

$$I'_{\text{ТТ1}*} = \frac{I_{\text{ТТ.стор}}}{I_{\text{Б.стор}} \cdot k_{\text{ТТ.стор}}} = \frac{115600}{5 \cdot 1200} = 19{,}27 \text{ отн.ед.}$$

Относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока на первом периоде КЗ в зоне действия равно:

$$I_{\text{Д.нас}*} = I'_{\text{ТТ1}*} \cdot I_{2.1.1*} = 19{,}27 \cdot 0{,}02 = 0{,}39 < I_{\text{ОТС}*} = 2{,}1.$$

Таким образом, условие срабатывания небыстродействующего элемента дифференциальной отсечки на первом периоде КЗ в зоне действия не выполняется.

Производится проверка условия срабатывания небыстродействующего элемента дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия. Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока для ТТ1 при КЗ в точке К1 на втором периоде определяется по рис.Б.1 Приложения Б:

$$I_{2.1.2*} = 0{,}09 \text{ отн.ед.}$$

Относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока на втором периоде КЗ в зоне действия равно:

$$I_{\text{Д.2}*} = I'_{\text{ТТ1}*} \cdot I_{2.1.2*} = 19{,}27 \cdot 0{,}09 = 1{,}73 \text{ отн.ед.}$$

Условие пригодности ТТ класса Р типа ТВТ-10-XI 6000/5 при КЗ в зоне действия не выполняется. Необходимо выбрать ТТ класса PR.

Из-за отсутствия данных по серийно выпускаемым ТТ с немагнитным зазором на напряжение 10 кВ, в проверке используется условный ТТ класса PR, реализованный в габаритах ТВТ-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

10-XI 6000/5, у которого K_r = 0,1, а постоянная времени вторичного контура равна T_s = 1,5 с. Параметры ТТ приведены в табл. 6.41.

Расчет времени до насыщения для ТТ1 класса PR выполняется графическим методом с помощью предварительно построенной кривой $K_{\text{п.р}}(t)$ по выражению (Б.15) из [16].

Результаты расчёта времени до насыщения ТТ1 режиме КЗ в зоне действия в точке К1 приведены в табл. 6.44.

Таблица 6.44

Расчёт времени до насыщения ТТ1 класса PR в габаритах ТВТ-10-XI 6000/5			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения для ТТ1**	**Примечания**
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$A = \dfrac{I_{1\,\text{ном}} \cdot K_{\text{ном.факт}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}{I_{\text{К4.НН}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\dfrac{6000 \cdot 30 \cdot 2{,}09}{115600 \cdot 2{,}01} = 1{,}62$; $1{,}62 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}23$	$K_r = 0{,}1$
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	7,6 7,3	
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{\text{нас.1}} > t_{\text{реш.1}}$; $t_{\text{нас.2}} > t_{\text{реш.1}}$	Выпол. (7,6 > 3,4 мс) Выпол. (7,3 > 3,4 мс)	$t_{\text{реш.1}} = 3{,}4$ мс
Условие пригодности ТТ1 для быстродействующего элемента отсечки по времени до насыщения выполняется			

Из табл. 6.44 видно, что при трёхфазном КЗ в зоне действия время до насыщения ТТ1 больше 3,4 мс, то есть условие пригодности ТТ1 для быстродействующего элемента отсечки по времени до насыщения выполняется. Для ДТЗ ошиновки НН АТ без указанного быстродействующего элемента требуется дополнительная проверка по действующему значению первой гармоники $I_{2.1.1*}$, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ к моменту времени $t_{\text{нас}}$.

Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока для ТТ1 класса PR при КЗ в точке К1 на первом периоде определяется по рис.Б.4 Приложения Б:

$$I_{2.1.1*} = 0{,}43 \text{ отн.ед.}$$

Относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока на первом периоде КЗ в зоне действия равно:

$$I_{\text{Д.нас}*} = I'_{\text{ТТ1}*} \cdot I_{2.1.1*} = 19{,}27 \cdot 0{,}43 = 8{,}28 > I_{\text{ОТС}*} = 2{,}1.$$

Таким образом, условие срабатывания небыстродействующего элемента дифференциальной отсечки на первом периоде КЗ в зоне действия выполняется. Проверка успешно закончена.

6.8.2 Проверка ТТ для ДТЗ ошиновки НН АТ при КЗ вне зоны действия

В общем случае, для ДТЗ ошиновки НН АТ при КЗ вне зоны действия необходимо проверить ТТ1 и ТТ2 (рис. 6.8). Однако, в условиях данного примера $I_{1.\text{ном}}$ у ТТ2 в шесть раз меньше (1000 А), чем у ТТ1 (6000 А). Поэтому проверку целесообразно выполнить только для ТТ2.

Расчёт времени до насыщения для ТТ2 выполняется в соответствии с рис. 6.8 при КЗ в точке К2. Так как для ТТ2 данные по ВАХ и *B*(*H*) отсутствуют, то расчёт времени до насыщения выполняется по паспортным данным. Результаты расчёта времени до насыщения приведены в табл. 6.45.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 6.45

Наименование величины	Обозначение	Значения для ТТ2 при $K^{(3)}$ в точке К2	Примечания
Параметр режима работы ТТ A – без учета остаточной магнитной индукции – с учетом остаточной магнитной индукции	$A = \frac{I_{1\,ном} \cdot K_{ном} \cdot z_{2\Sigma\,ном}}{I_{КЗ} \cdot z_{2\Sigma факт}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1000 \cdot 20 \cdot 0{,}667}{20000 \cdot 0{,}442} = 1{,}51$; $1{,}51 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}21$	$K_r = 0{,}86$
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	5,9 2,1	
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{нас.1} > t_{реш.2}$; $t_{нас.2} > t_{реш.2}$	Выпол. (5,9 > 3 мс) Не выпол. (2,1 < 3 мс)	$t_{реш.2} = 3$ мс

Из результатов проверки по времени до насыщения, приведенным в табл. 6.45, следует, что при трехфазном КЗ вне зоны действия условие пригодности ТТ при наличии блокирующего органа в составе ДТЗ не выполняется, так как $t_{нас.2}$ < 3 мс. Из результатов дополнительной проверки, приведенных в табл. 6.46, следует, что относительное значение тормозного тока не превышает значение уставки $I_{Т.БЛ*}$, т.е. рабочая точка находится на наклонном участке тормозной характеристики и чувствительный орган ДТЗ срабатывает неправильно. Кроме того, не выполняется условие отстройки от тока небаланса дифференциальной токовой отсечки. Необходимо выбрать ТТ2 большим значением первичного номинального тока.

Таблица 6.46

Проверка ДТЗ ошиновки стороны НН АТ в переходном режиме КЗ вне зоны действия			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения для ТТ2 при $K^{(3)}$ в точке К2**	**Примечания**
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение	n	2	ТТ2: $t_{нас.2}$ = 2,1 мс
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока, отн.ед.	$I_{2.1*.n}$	0,09	
Угловая погрешность первой гармоники, град.	$\delta_{2.1}$	53	
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1*.n}$	0,98	
Базисный ток на стороне ТТ2, А	$I_{БАЗ.стор} = \frac{K_{ТТ.МАКС}}{K_{ТТ.стор}} \cdot K_{СХ.ТТ.стор} \cdot$ $\cdot K_{ВКЛ.ТТ.стор} \cdot I_{НОМ.ТТ.МАКС}$	$\frac{1200}{200} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 5 = 30$	
Относительный ток КЗ через ТТ2, отн.ед.	$I'_{скв.стор*} = \frac{I_{ТТ.стор}}{I_{Б.стор} \cdot k_{ТТ.стор}}$	$\frac{20000}{30 \cdot 200} = 3{,}33$	
Относительное значение дифференциального тока, отн.ед.	$I_{Д*} = I'_{скв.стор*} \cdot (I_{0.1.n*} +$ $+ \Delta f_{выр} + \Delta f_{ПТТ})$	$3{,}33 \cdot (0{,}98 + 0{,}02 +$ $+ 0{,}05) = 3{,}5$	
Относительное значение тормозного тока, отн.ед.	$I_{Т*} = I'_{скв.стор*} \cdot \sqrt{I_{2.1.n*} \cdot \cos\delta_{2.1.n}}$	$3{,}33 \cdot \sqrt{0{,}09 \cdot \cos 53} = 0{,}77$	
Проверка условия отстройки чувствительного органа ДТЗ.	Условие проверки зависит от участка тормозной характеристи: 1. Если $I_{Т*} \le I_{Т.0*}$, то $I_{Д.0*} > I_{Д*}$; 2. Если $I_{Т.БЛ*} > I_{Т*} > I_{Т.0}$, то $I_{Д0*} + K_Т(I_{Т*} - I_{Т0*}) > I_{Д*}$ 3. Если $I_{Т*} > I_{Т.БЛ*}$, то блокировка	Так как $I_{Т*} < I_{Т.0*}$ или $0{,}77 < 1$, то должно выполняться $I_{Д.0*} > I_{Д*}$. Условие не выполняется $0{,}324 < 3{,}5$	$I_{Т.0*} = 1$ отн.ед., $I_{Д0*} = 0{,}324$ отн.ед.
Проверка условия отстройки дифференциальной токовой отсечки	$I_{ОТС*} > I_{Д*}$	$2{,}1 < 3{,}5$	$I_{ОТС*} = 2{,}1$ отн.ед.
Условие отстройки дифференциальной токовой отсечки и чувствительного органа ДТЗ в режиме КЗ вне зоны действия (К2) не выполняется.			

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Исходные данные вновь выбранного ТТ2 приведены в табл. 6.47.

Таблица 6.47

Исходные данные ТТ2 с увеличенным $I_{1.ном}$ ТПШЛ-10 3000/5		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	3000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	5
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	24
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	1,2
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	1,04
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,27
Число витков вторичной обмотки	w_2	600
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	13,5*10^{-4}
Средняя длина силовой линии, м	l	0,526
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(1{,}04 + 0{,}246)^2 + 0{,}27^2} = 1{,}314$

Результаты расчёта времени до насыщения для вновь выбранного ТТ2 с увеличенным $I_{1.ном}$ выполнен по характеристике *B*(*H*), а его результаты приведены в табл. 6.48.

Таблица 6.48

Расчёт времени до насыщения ТТ2 типа ТПШЛ-10 3000/5 при трехфазном КЗ в точке К2			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{факт} = \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}}$	$\frac{20000}{3000} = 6{,}67$	
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}$	$\frac{10}{100} \cdot 5 \cdot 6{,}67 = 3{,}33$	
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{нас} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$3{,}33 \cdot \frac{600}{0{,}526} = 3802$	
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{нас}$	1,98	По *B*(*H*)
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{факт} \cdot I_{2ном} \cdot z_{2\Sigma факт}$	$6{,}67 \cdot 5 \cdot 1{,}314 = 43{,}8$	
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{43{,}8}{222 \cdot 600 \cdot 13{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}244$	
Параметр режима работы ТТ A – без учета остаточной магнитной индукции – с учетом остаточной магнитной индукции	$A = \frac{B_{нас}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}98}{0{,}244} = 8{,}1$ $8{,}1 \cdot (1 - 0{,}86) = 1{,}13$	$K_r = 0{,}86$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{нелин} = \frac{y_\varepsilon}{y_{лин}} \geq 3$	>3	
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	29,2 4,4	
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{нас.1} > t_{реш.2}$; $t_{нас.2} > t_{реш.2}$	Выпол. (29,2 > 3 мс) Выпол. (4,4 > 3 мс)	$t_{реш.2} = 3$ мс

Из результатов проверки по времени до насыщения, приведенным в табл. 6.48, следует, что при трехфазном КЗ вне зоны действия условие пригодности ТТ2 при наличии блокирующего органа в составе ДТЗ выполняется, так как $t_{нас.2}$ > 3 мс. Проверка ТТ при КЗ вне зоны действия успешно завершена.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

7 ПРОВЕРКА И ВЫБОР ТТ КЛАССА Р ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ С УЧЁТОМ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

7.1 Расчётные условия при проверке и выборе ТТ, используемых в схемах дифференциальных защит шунтирующих реакторов

Трансформаторы тока, установленные на стороне линейного ввода (ЛВ) шунтирующих реакторов (ШР) используются не только в ДТЗ ШР, но и в дифференциальной защите ошиновки узла РУ электростанции или подстанции. Поэтому они выбираются по требованиям к ТТ для дифференциальной защиты ошиновки. Их номинальный первичный ток определяется нагрузкой других присоединений РУ, входящих в состав ошиновки, и, как правило, находится в пределах 1000 – 3000 А. ТТ, установленные на вводах ШР со стороны нейтрали (НВ), определяются номинальным током ШР и их номинальные первичные токи находятся в пределах 200 – 1000 А. К указанным ТТ предъявляются требования по времени до насыщения при токах включения ШР, включая БНТ.

Значение номинального вторичного тока ТТ в электроустановках сверхвысокого напряжения и напряжением 220 кВ целесообразно принять равным 1 А, так как это облегчает условия работы ТТ в переходном режиме по сравнению с номинальным вторичным током, равным 5 А.

С целью проверки правильности функционирования продольной ДТЗ ШР, использующей информацию от ТТ класса Р, установленных на сторонах ЛВ и НВ, необходимо произвести расчёт первичных и вторичных токов ТТ в следующих режимах:

– КЗ в зоне действия продольной дифференциальной защиты (ПДЗ) ШР (рис. 7.1, точка К1). Насыщение магнитопроводов ТТ, установленных на стороне ЛВ ШР может привести к замедлению в срабатывании защиты, в первом приближении, превышающему значение постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ. В данном режиме проверяется ТТ1;

– включение реактора под рабочее напряжение. Насыщение магнитопроводов ТТ, установленных на стороне ЛВ, а также на сторонах НВ ШР, может привести к неправильному срабатыванию ПДЗ и поперечной ДТЗ шунтирующего реактора.

Замыкание $З^{(1)}$ на корпус в точке между концом полуобмотки ШР и ТТ стороны НВ1 или НВ2 является простым, а не коротким замыканием и не сопровождается сверхтоком. На указанный вид повреждения успешно реагирует поперечная ДТЗ ШР. По этой причине не следует возлагать на ПДЗ ШР функцию действия при данном виде повреждения, которое для неё не является расчётным. Следует учитывать также, что защита ШР обеспечивается двумя дублирующими друг друга шкафами.

ТТ, установленные на сторонах НВ1 и НВ2 используются также в схеме поперечной ДТЗ ШР, реагирующей на витковые замыкания, а также на повреждение вида $З^{(1)}$. Указанные ТТ не обтекаются сверхтоками КЗ, однако в режиме включения ШР под напряжение возможно неправильное срабатывание поперечной ДТЗ ШР из-за насыщения магнитопровода одного из этих ТТ в переходном режиме. По этой причине требуется их проверка в режиме включения ШР.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

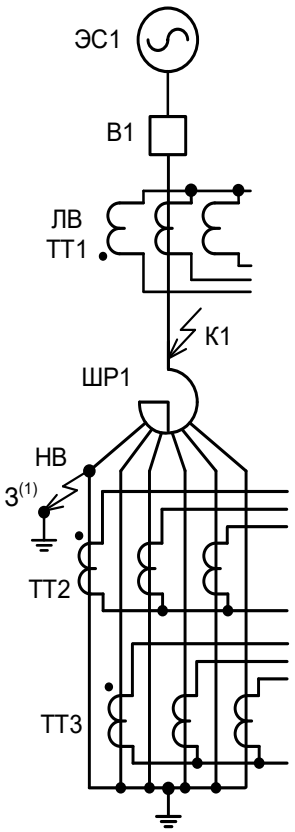


Рисунок 7.1 – Расчетные точки для дифференциальных защит шунтирующих реакторов

7.2 Методика проверки ТТ для продольной ДТЗ ШР при КЗ в зоне действия

Проверка при КЗ в зоне действия для ТТ, установленных на стороне ЛВ ШР, выполняется по времени до насыщения. Для версий программного обеспечения терминалов защиты, имеющих в составе ДТЗ ШР быстродействующий элемент дифференциальной отсечки, указанное время должно быть не менее, чем время принятия решения отсечкой при КЗ в зоне действия, которое зависит от начальной фазы и кратности тока КЗ. При превышении током КЗ порога срабатывания отсечки в два раза, время принятия решения отсечкой не превышает 3,4 мс с момента начала КЗ. Для остальных версий ПО, если ТТ насыщается на первом периоде КЗ, требуется дополнительная проверка пригодности ТТ для ДТЗ ШР.

Порядок проверки функционирования реле ДТЗ при КЗ в зоне действия в условиях насыщения ТТ ЛВ следующий.

1. В соответствии с [1] для режимов трехфазного и однофазного КЗ (если ШР однофазного исполнения, то рассматривается только режим однофазного КЗ) выполняется расчёт времени до насыщения ТТ ($t_{нас}$) по ВАХ или $B(H)$, а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. В последнем случае необходимо в соответствии с Приложением А данных Методических указаний вычислить значение фактической предельной кратности ТТ. Указанный расчёт выполняется для ТТ1 в режиме КЗ в точке К1 (рис. 7.1).

2. Если в составе ДТЗ ШР имеется быстродействующий элемент дифференциальной отсечки, то время до насыщения ТТ сравнивается с временем принятия решения указанным

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

элементом при КЗ в зоне действия:

$$t_{\text{нас}} \geq t_{\text{реш.1}}, \tag{7.1}$$

где $t_{\text{реш.1}}$ – время принятия решения быстродействующим элементом ДТЗ ШР при КЗ в зоне действия по данным производителя ($t_{\text{реш.1}}$ = 3,4 мс).

Если условие (7.1) выполняется, то ТТ пригоден для использования в схеме ДТЗ ШР. Проверка считается успешно завершённой.

3. Если в составе ДТЗ ШР отсутствует быстродействующий элемент дифференциальной отсечки, то возможны следующие варианты:

– время до насыщения ТТ больше 20 мс – проверка не требуется, ТТ пригоден для использования в схеме ДТЗ ШР;

– время до насыщения ТТ меньше 20 мс – необходима дополнительная проверка.

Во втором случае по зависимости рис. Б.4, Приложение Б, полученной с помощью дискретного преобразования Фурье методом скользящего окна, для момента времени $t_{\text{нас}}$ определяется действующее значение первой гармоники $I_{2.1.1*}$, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ.

В соответствии с рекомендациями, приведёнными, в частности, в [14] и в [9] вычисляют значение базисного тока $I_{\text{Б.ЛВ}}$ для стороны ЛВ.

Ток, проходящий через ТТ1 при КЗ в расчетной точке К1, переводят в относительные единицы:

$$I'_{\text{ТТ.ЛВ}*} = \frac{I_{\text{ТТ.ЛВ}}}{I_{\text{Б.ЛВ}} \cdot k_{\text{ТТ.ЛВ}}}, \tag{7.2}$$

где $I_{\text{ТТ.ЛВ}}$ – ток КЗ в данной расчетной точке;

$I_{\text{Б.ЛВ}}, k_{\text{ТТ.ЛВ}}$ – соответственно, базисный ток стороны ЛВ и коэффициент трансформации ТТ на этой стороне.

Вычисляют соответствующее относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока по выражению:

$$I_{\text{Д.нас}*} = I'_{\text{ТТ.ЛВ}*} \cdot I_{2.1.1*}. \tag{7.3}$$

Проверяют условие срабатывания дифференциальной отсечки при КЗ в зоне действия с учетом времени до насыщения ТТ:

$$I_{\text{Д.нас}*} > I_{\text{ОТС}*}, \tag{7.4}$$

где $I_{\text{ОТС}*}$ – значение уставки по току срабатывания дифференциальной отсечки.

Если условие (7.4) выполняется, то проверка продольной ДТЗ закончена с положительным результатом.

4. Если условия (7.4) не выполняется, то следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм^2), повторно рассчитать время до насыщения ТТ и выполнить проверку:

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

– по пункту 2 при наличии в составе ДТЗ ШР быстродействующего элемента дифференциальной отсечки;

– иначе по пункту 3.

5. Если результат повторной проверки отрицательный, то рекомендуется выполнить проверку условия срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия.

С указанной целью для второго периода рассчитывают относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока ($I_{2.1.2*}$) по выражению:

$$I_{Д.2*} = I'_{ТТ.ЛВ*} \cdot I_{2.1.2*}. \quad (7.5)$$

где $I_{2.1.2*}$ – относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока ТТ с ПХН (рис. Б.1 в Приложении Б) для второго периода.

Проверяют условие срабатывания дифференциальной отсечки при КЗ в зоне действия с помощью следующего выражения:

$$I_{Д.2*} > I_{ОТС*}. \quad (7.6)$$

Если условие (7.6) выполняется, то проверка продольной ДТЗ закончена с положительным результатом.

6. Если условие (7.6) не выполняется или задержка в срабатывании на 0,02 с недопустима, то ТТ не пригоден для использования в схеме продольной ДТЗ ШР данного объекта. Необходимо выполнить выбор ТТ, удовлетворяющего требованиям по условию переходных процессов.

7.3 Методика проверки ТТ для продольной и поперечной ДТЗ в режиме включения ШР под напряжение

Порядок проверки функционирования реле ДТЗ в режиме включения ШР под напряжение (общий для продольной и поперечной ДТЗ) в условиях насыщения ТТ следующий.

1. В соответствии с рекомендациями, приведёнными, в частности, в [14] и в [9], вычисляют значения базисных токов $I_{Б.стор}$ на всех сторонах защищаемого объекта.

2. В соответствии с [1] для режима включения ШР под напряжение выполняется расчёт времени до насыщения ТТ ($t_{нас}$) по ВАХ или *B*(*H*), а при отсутствии указанных характеристик по паспортным данным. Указанный расчёт выполняется для ТТ сторон ЛВ и НВ.

3. Токи, проходящие через ТТ сторон ЛВ и НВ в режиме включения ШР под напряжение, переводят в относительные единицы по выражению:

$$I'_{вкл.стор*} = \frac{I_{вкл.ШР}}{m \cdot I_{Б.стор} \cdot k_{ТТ.стор}}, \quad (7.7)$$

где m – коэффициент стороны ШР: для стороны ЛВ m = 1, а для НВ1 и НВ2 m = 2;

$I_{вкл.ШР}$ – первичный ток включения ШР;

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$I_{\text{Б.стор}}$,$k_{\text{ТТ.стор}}$ – соответственно, базисный ток стороны ШР и коэффициент трансформации ТТ на этой стороне.

4. По значению $t_{\text{нас}}$ для данного ТТ определяют номер n периода, следующего за периодом, на котором было насыщение.

5. По рис. Б.3 в Приложении Б для периода n определяют относительное действующее значение первой гармоники намагничивающего тока насыщенного ТТ по отношению к действующему значению сквозного тока КЗ, приведённого к вторичной стороне ТТ $I_{0.1.n*}$.

6. Вычисляют относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока по выражению:

$$I_{\text{Д}*} = I'_{\text{вкл.стор}*} \cdot (I_{0.1.n*} + \Delta f_{\text{выр}} + \Delta f_{\text{ПТТ}}), \tag{7.8}$$

где $\Delta f_{\text{выр}}$ – относительная погрешность выравнивания токов плеч в терминале защиты. Может быть принята $\Delta f_{\text{выр}} = 0{,}02$;

$\Delta f_{\text{ПТТ}}$ – относительная погрешность внешнего выравнивающего трансформатора или автотрансформатора. Может быть принята $\Delta f_{\text{ПТТ}} = 0{,}05$.

7. Определяют относительное действующее значение $I_{2.1.n*}$ первой гармоники вторичного тока ТТ с ПХН (рис. Б.1 в Приложении Б), где индекс n соответствует номеру периода.

8. Относительное действующее значение первой гармоники тормозного тока определяют с помощью следующего выражения:

– при проверке ТТ стороны ЛВ для продольной ДТЗ:

$$I_{\text{Т}*} = I'_{\text{вкл.НВ1}*} + I'_{\text{вкл.НВ2}*} = I'_{\text{вкл.ЛВ}*}; \tag{7.9}$$

– при проверке ТТ стороны НВ1 (НВ2)

$$I_{\text{Т}*} = I'_{\text{вкл.НВ1}*} \cdot (1 + I_{2.1.n*}). \tag{7.10}$$

9. Проверяют условие надёжной отстройки дифференциальной токовой отсечки от тока небаланса при насыщении ТТ в режиме включения ШР под напряжение с помощью следующего выражению:

$$I_{\text{ОТС}*} > I_{\text{Д}*}, \tag{7.11}$$

где $I_{\text{ОТС}*}$ – значение уставки дифференциальной токовой отсечки.

10. Проверка чувствительного органа с торможением по условию отстройки от тока небаланса при включении ШР под напряжение выполняется с помощью следующего выражения:

– если $I_{\text{Т}*} \le I_{\text{Т0}*}$, то

$$I_{\text{Д0}*} > I_{\text{Д}*}; \tag{7.12}$$

– если $I_{\text{Т}*} > I_{\text{Т0}*}$, то

$$I_{\text{Д0}*} + K_{\text{Т}}(I_{\text{Т}*} - I_{\text{Т0}*}) > I_{\text{Д}*}. \tag{7.13}$$

11. Если условия (7.11) и (7.12) (или (7.13)) выполняются, то проверка ДТЗ ШР закончена с положительным результатом.

12. Иначе максимально снижают нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм^2).

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

13. Повторно выполняют пункты с 2 по 11. При положительном результате проверка считается успешно завершённой. Иначе ТТ непригоден для использования в схеме ДТЗ ШР. Необходимо произвести выбор ТТ, удовлетворяющего требованиям по условию переходных процессов.

7.4 Методика выбора ТТ по времени до насыщения для ДТЗ ШР

Должны быть известны следующие исходные данные:

– паспортные данные ТТ и их ВАХ (или *B*(*H*) и размеры магнитопровода);

– токи трёхфазных и однофазных КЗ для расчетной точки К1, указанной на рис. 7.1;

– эквивалентные постоянные времени затухания апериодических составляющих тока КЗ в точке К1 (рис. 7.1) и тока включения ШР;

– время принятия решения ДТЗ при КЗ в зоне действия;

– параметры срабатывания ДТЗ.

Методика выбора ТТ по условиям правильного функционирования ДТЗ ШР при переходных процессах следующая.

1. Номинальный первичный ток ($I_{1.ном}$) ТТ, установленных на стороне ЛВ ШР, определяется нагрузкой других присоединений РУ, входящих в состав ошиновки, и, как правило, находится в пределах 1000 – 3000 А.

2. Значение номинального вторичного тока ($I_{2.ном}$) в электроустановках сверхвысокого напряжения и напряжением 220 кВ целесообразно принять равным 1 А.

3. ТТ, установленные на вводах стороны НВ ШР, определяются номинальным током ШР и их номинальные первичные токи находятся в пределах 200 – 1000 А.

4. Значение номинального вторичного тока ТТ на стороне НВ целесообразно принять равным 1 А, так как уменьшение номинального вторичного тока ТТ с 5 А на номинальный вторичный ток 1 А приводит к увеличению напряжения насыщения в 5 раз, а допустимого сопротивления – в 25 раз.

5. Рассчитывается фактическое сопротивление нагрузки для ТТ сторон ЛВ и НВ ШР ($z_{н.факт}$).

6. Задаётся номинальное сопротивление нагрузки на ТТ ЛВ и НВ ШР ($z_{н.ном}$), которое для ТТ с номинальным вторичным током равным 1 А обычно находится в пределах 20 … 100 Ом.

7. Определяется номинальное и фактическое сопротивления ветви вторичного тока ТТ по выражениям:

$$z_{2\sum ном} = z_2 + z_{н.ном} \approx 1{,}2 z_{н.ном}, \quad (7.14)$$

$$z_{2\sum факт} = z_2 + z_{н.факт} \approx 0{,}2 z_{н.ном} + z_{н.факт}, \quad (7.15)$$

где z_2 – сопротивления вторичной обмотки ТТ. При выборе ТТ значение сопротивления его вторичной обмотки допустимо принять равным 20 % от номинальной нагрузки.

8. Время до насыщения ТТ на стороне ЛВ ШР принимается равным времени принятия

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

решения ДТЗ с быстродействующим элементом дифференциальной отсечки при КЗ в зоне действия:

$$t_{\text{нас}} = t_{\text{реш.1}} = 3{,}4 \text{ мс.} \tag{7.16}$$

9. Так как время принятия решения значительно меньше 10 мс, то коэффициент переходного режима $K_{\text{п.р}}(t_{\text{реш.1}})$ для ТТ класса Р рекомендуется определять по значениям $t_{\text{реш.1}}$, T_p с помощью диаграмм зависимости $K_{\text{п.р}}(t)$ от времени, приведённых в Приложении А ГОСТ Р 58669-2019 [1].

10. Находят значение требуемой номинальной предельной кратности ТТ на стороне ЛВ ШР ($K_{\text{ном.треб}}$) по выражению:

$$K_{\text{ном.треб}} = \frac{K_{\text{п.р}}(t_{\text{реш}})}{1 - K_r} \cdot \frac{I_{\text{КЗ}} \cdot z_{2\sum\text{факт}}}{I_{1.\text{ном}} \cdot z_{2\sum\text{ном}}}. \tag{7.17}$$

11. По каталогу находят ТТ класса Р для стороны ЛВ ШР данного класса напряжения с заданными значениями номинальных первичного и вторичного токов и номинальной предельной кратностью, соответствующей выражению (7.17), а также с суммой сопротивления вторичной обмотки и номинального сопротивления нагрузки не ниже значения, вычисленного по выражению (7.14).

12. Для стороны НВ ШР по каталогу находят ТТ класса Р данного класса напряжения с заданными значениями номинальных первичного и вторичного токов и, а также с суммой сопротивления вторичной обмотки и номинального сопротивления нагрузки не ниже значения, вычисленного по выражению (7.14).

13. В соответствии с разделом 7.3 выполняют проверку ТТ сторон ЛВ и НВ в режиме включения ШР под напряжение.

14. Если проверка выполнена успешно, то данные ТТ пригодны для использования в схеме ДТЗ ШР.

15. Иначе необходимо выбрать ТТ с увеличенными значениями первичного номинального тока, номинальной предельной кратности тока, номинального сопротивления вторичной нагрузки. При этом следует выбрать допустимое сечение контрольного кабеля в диапазоне 4 – 10 мм^2. Повторить проверку ТТ.

16. Если и после принятия таких мер условие отстройки от тока небаланса при включении ШР под напряжение по-прежнему не выполняется, то необходимо перейти на ТТ другого класса, например, PR, TPY, TPZ или на электронный ТТ.

17. Следует отметить, что при максимальном относительном содержании апериодической составляющей в токе КЗ и предельной остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака в ТТ ($K_r = 0{,}86$), не всегда удаётся выбрать ТТ класса Р с более высокими номинальными параметрами (номинальный первичный ток, номинальная предельная кратность, номинальное сопротивление), которые бы не насыщались в переходном процессе включения ШР. В таком

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

случае следует увеличить начальный ток срабатывания чувствительного органа ДТЗ ШР до значения, близкого к номинальному току последнего.

7.5 Пример проверки ТТ класса Р для дифференциальных защит шунтирующего реактора с учётом переходных режимов

Трехфазные группы ТТ на всех сторонах ШР соединены по схеме звезды с нулевым проводом. Расчетная точка КЗ для проверки правильности функционирования защиты ошиновки стороны НН автотрансформатора, использующей информацию от ТТ класса Р, в условиях данного примера показана на рис. 7.2.

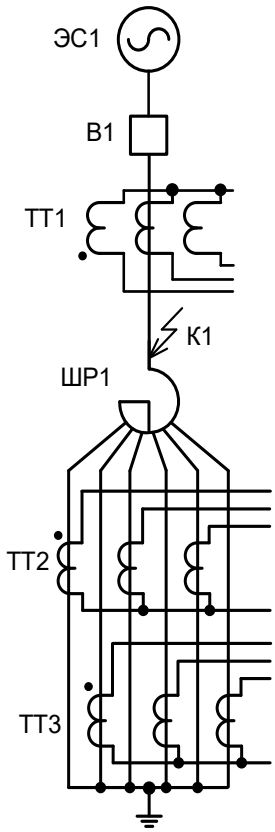


Рисунок 7.2 – Расчетная точка КЗ для проверки ТТ в схеме ДТЗ ШР

Исходные данные для проверки ТТ приведены в табл. 7.1 – 7.6.

Таблица 7.1

Исходные данные			
Наименование величины	Обозначение	Значение	
		ЛВ	НВ
Номинальная мощность трёх фаз шунтирующего реактора, МВА	$S_{\text{ном.ШР}}$	180	
Номинальное напряжение, кВ	$U_{\text{ном}}$	347	
Номинальный первичный ток, А	$I_{\text{ном}}$	300	
Номинальные токи ТТ, А	$K_{\text{ТТ.стор}}$	1000/1	200/1
Базисный ток, А	$I_{\text{Б.стор}}$	0,3	1,5
Коэффициент схемы соединения ТТ	$K_{\text{СХ.стор}}$	1	

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.2

Наименование величины	Обозначение	Однофазное КЗ
Параметры тока при КЗ в зоне действия		
Ток КЗ в точке К1, А	$I_{К1}$	41 800
Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ в точке К1, с	$T_{p.К1}$	0,1
Параметры тока при включении ШР по напряжение		
Ток включения ШР, А	$I_{вкл.ШР}$	300
Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока включения ШР, с	$T_{p.вкл}$	0,58

Таблица 7.3

Параметры тормозной характеристики ДТЗ			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	
		Продольная	**Поперечная**
Начальный ток срабатывания, отн.ед.	$I_{Д.0*}$	0,21	0,12
Ток начала торможения пускового органа, отн.ед.	$I_{Т.0*}$	1	
Ток торможения блокировки, отн.ед.	$I_{Т.БЛ*}$	–	3
Коэффициент торможения	$K_Т$	0,3	
Ток срабатывания дифференциальной отсечки, о. е.	$I_{ОТС*}$	1,3	

Таблица 7.4

Исходные данные ТТ1 (ЛВ) типа ТТВ 330-III-5Р 1000/1		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1000
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	54
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	20
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	5,1
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0

Таблица 7.5

Исходные данные ТТ2, ТТ3 (НВ) типа ТТВ 10-I-5Р 600/1		
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	600
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	20
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	20
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	3,8
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.6

Параметры нагрузки ТТ			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,5	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	260	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 2,5	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{260}{1 \cdot 2{,}5} = 1{,}82$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п}$	1,82	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 1{,}82 + 1 \cdot 0{,}5 + 0{,}1 = 2{,}42$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$2 \cdot 1{,}82 + 1 \cdot 0{,}5 + 0{,}1 = 4{,}24$	n = 2 при $K^{(1)}$
Для ТТ1 (ЛВ) типа ТТВ 330-III-5Р 1000/1			
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(5{,}1 + 2{,}42)^2 + 0} = 7{,}52$	
		$\sqrt{(5{,}1 + 4{,}24)^2 + 0} = 9{,}34$	
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(5{,}1 + 0{,}8 \cdot 20)^2 + (0{,}6 \cdot 20)^2} = 24{,}27$	
Для ТТ2, ТТ3 (НВ) типа ТТВ 10-I-5Р 600/1			
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(3{,}8 + 2{,}42)^2 + 0} = 6{,}22$	
		$\sqrt{(3{,}8 + 4{,}24)^2 + 0} = 8{,}04$	
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(3{,}8 + 0{,}8 \cdot 20)^2 + (0{,}6 \cdot 20)^2} = 23{,}15$	

7.5.1 Проверка ТТ для продольной ДТЗ ШР при КЗ в зоне действия

Выполняется проверка по времени до насыщения ТТ. Указанное время должно быть не менее 3,4 мс с момента начала КЗ. Расчёт времени до насыщения выполняется для ТТ1 при КЗ в точке К1 (рис. 7.2). Так как для расчета времени до насыщения ТТ типа ТТВ 330-III-5Р и ТТВ 10-I-5Р по ВАХ или по характеристикам намагничивания недостаточно данных, то расчет выполнен по паспортным данным.

Результаты расчёта времени до насыщения и проверки ТТ для быстродействующего элемента дифференциальной отсечки продольной ДТЗ ШР при КЗ в зоне действия приведены в табл. 7.7.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.7

Расчёт времени до насыщения ТТ1 типа ТТВ 330-III-5P (1000/1) при КЗ в точке К1			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$A = \frac{I_{1\,\text{ном}} \cdot K_{\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\,\text{ном}}}{I_{\text{КЗ}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1000 \cdot 54 \cdot 24{,}27}{41800 \cdot 9{,}34} = 3{,}36$; $3{,}36 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}47$	$K_r = 0{,}86$
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	9,5 3,2	
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{\text{нас.1}} > t_{\text{реш.1}}$; $t_{\text{нас.2}} > t_{\text{реш.1}}$	Выпол. (9,5 > 3,4 мс) Не выпол. (3,2 < 3,4 мс)	$t_{\text{реш.1}} = 3{,}4$ мс

При однофазном КЗ в зоне действия условие пригодности ТТ1 по времени до насыщения не выполняется. Максимальная разгрузка ТТ1 желаемого эффекта не даёт. Возможны следующие варианты:

– если допустима задержка в срабатывании ДТЗ ШР на 0,02 с, то выполнить проверку условия срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия;

– перейти на ТТ с увеличенным значением $I_{1.\text{ном}}$;

– перейти на ТТ класса PR;

Ниже рассмотрены все три варианта.

7.5.1.1 Проверка условия срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия

Результаты указанной проверки ДТЗ ШР приведены в табл. 7.8.

Таблица 7.8

Проверка ТТ1 типа ТТВ 330-III-5P (1000/1) по условию срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечания**
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока на втором периоде, отн.ед.	$I_{2.1.2*}$	0,09	По рис. Б.1 для T_p = 0,1 с
Ток через ТТ1 при КЗ в расчетной точке К1, отн.ед	$I'_{\text{ТТ.ЛВ}*} = \frac{I_{\text{ТТ.ЛВ}}}{I_{\text{Б.ЛВ}} \cdot k_{\text{ТТ.ЛВ}}}$	$\frac{41800}{0{,}3 \cdot 1000} = 139{,}3$	
Относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока на втором периоде, отн.ед	$I_{\text{Д.2}*} = I'_{\text{ТТ.ЛВ}*} \cdot I_{2.1.2*}$	$139{,}3 \cdot 0{,}09 = 12{,}52$	
Проверка условия срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне	$I_{\text{Д.2}*} > I_{\text{ОТС}*}$	+	$I_{\text{ОТС}*} = 1{,}3$ отн.ед.
Проверка ТТ1 по условию срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне действия выполнена успешно.			

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

7.5.1.2 Переход на ТТ с увеличенным значением $I_{1.ном}$

Исходные данные ТТ1 с увеличенными значениями $I_{1.ном}$ (2000/1) приведены в табл. 7.9.

Таблица 7.9

Исходные данные ТТ1 типа ТВТ-330 2000/1 (исполнение 3000)			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	2000	
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1	
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	30	
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	40	
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8	
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	6,9	
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	22	
Число витков вторичной обмотки	w_2	2000	
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	$94{,}5*10^{-4}$	
Средняя длина силовой линии, м	l	2,09	
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(6{,}9+2{,}42)^2 + (22+0)^2} = 23{,}89$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$\sqrt{(6{,}9+4{,}24)^2 + (22+0)^2} = 24{,}66$	n = 2 при $K^{(1)}$
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(6{,}9+0{,}8\cdot 40)^2 + (22+0{,}6\cdot 40)^2} = 60{,}24$	

Так как ВАХ ТТ1 отсутствует, а размеры магнитопровода ТТ известны, то расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) выполняется по $B(H)$. Результаты повторного расчёта времени до насыщения для ТТ1 приведены в табл. 7.10.

Из табл. 7.10 видно, что при однофазном КЗ в зоне действия время до насыщения ТТ1 больше 3,4 мс, то есть:

– условие пригодности ТТ1 по времени до насыщения выполняется для ДТЗ ШР в составе, которой имеется быстродействующий элемент дифференциальной отсечки;

– для ДТЗ ШР без указанного элемента требуется дополнительная проверка по действующему значению первой гармоники $I_{2.1.1*}$, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ к моменту времени $t_{нас}$. Результаты указанной проверки приведены в табл. 7.11.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.10

Расчёт времени до насыщения ТТ1 типа ТВТ-330 2000/1 (исполнение 3000) при КЗ в точке К1			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Фактическая кратность тока КЗ	$K_{\text{факт}} = \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$	$\frac{41800}{2000} = 20{,}9$	
Намагничивающий ток ТТ, А	$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}$	$\frac{10}{100} \cdot 1 \cdot 20{,}9 = 2{,}09$	
Действующее значение напряжённости магнитного поля, А/м	$H_{\text{нас}} = I_{0.\varepsilon} \cdot \frac{w_2}{l}$	$2{,}09 \cdot \frac{2000}{2{,}09} = 2000$	
Магнитная индукция насыщения, Тл	$B_{\text{нас}}$	1,93	По *B*(*H*)
Действующее значение периодической составляющей напряжения на вторичной обмотке, В	$U_{2\sin} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}$	$20{,}9 \cdot 1 \cdot 24{,}66 = 515{,}39$	
Амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению $U_{2.\sin}$ при частоте 50 Гц, Тл	$B_m = \frac{U_{2.\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s}$	$\frac{515{,}39}{222 \cdot 2000 \cdot 94{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}123$	
Параметр режима работы ТТ A – без учета остаточной магнитной индукции – с учетом остаточной магнитной индукции	$A = \frac{B_{\text{нас}}}{B_m}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1{,}93}{0{,}123} = 15{,}7$ $15{,}7 \cdot (1 - 0{,}86) = 2{,}2$	$K_r = 0{,}86$
Условие допустимости аппроксимации ПХН	$k_{\text{нелин}} = \frac{y_\varepsilon}{y_{\text{лин}}} \geq 3$	>3	
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	>1000 6,3	
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{\text{нас.1}} > t_{\text{реш.1}}$; $t_{\text{нас.2}} > t_{\text{реш.1}}$	Выпол. (>> 3,4 мс) Выпол. (6,3 > 3,4 мс)	$t_{\text{реш.1}} = 3{,}4$ мс

Таблица 7.11

Проверка ТТ1 типа ТВТ-330 2000/1 по действующему значению первой гармоники, содержащейся в импульсе вторичного тока к моменту времени $t_{\text{нас}}$			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечания**
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока к моменту времени $t_{\text{нас}}$, отн.ед.	$I_{2.1.1*}$	0,3	По рис. Б.4 для $t_{\text{нас}}$ = 6,3 мс при T_p = 0,1 с
Ток через ТТ1 при КЗ в расчетной точке К1, отн.ед	$I'_{\text{ТТ.ЛВ}*} = \frac{I_{\text{ТТ.ЛВ}}}{I_{\text{Б.ЛВ}} \cdot k_{\text{ТТ.ЛВ}}}$	$\frac{41800}{0{,}15 \cdot 2000} = 139{,}3$	
Относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока на втором периоде, отн.ед	$I_{\text{Д.нас}*} = I'_{\text{ТТ.ЛВ}*} \cdot I_{2.1.\text{нас}*}$	$139{,}3 \cdot 0{,}3 = 41{,}8$	
Проверка условия срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне	$I_{\text{Д.нас}*} > I_{\text{ОТС}*}$	$41{,}8 > 1{,}3$	$I_{\text{ОТС}*} = 1{,}3$ отн.ед.
Проверка ТТ1 по действующему значению первой гармоники, содержащейся в импульсе вторичного тока к моменту времени $t_{\text{нас}}$ выполнена успешно.			

7.5.1.3 Переход на ТТ класса PR

Исходные данные ТТ1 класса PR приведены в табл. 7.12.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.12

Исходные данные ТТ1 класса PR типа ТВГ-УЭТМ-330/500 1000/1			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1000	
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1	
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	30	
Фактическая номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном.факт}$	60,58	
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	30	
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8	
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	5,76	
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	7,46	
Индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом	X_0	4077,78	
Коэффициент остаточной намагниченности, %	K_r	6,2	
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(5{,}76+2{,}42)^2 + (7{,}46+0)^2} = 11{,}07$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$\sqrt{(5{,}76+4{,}24)^2 + (7{,}46+0)^2} = 12{,}48$	n = 2 при $K^{(1)}$
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(5{,}76+0{,}8\cdot 30)^2 + (7{,}46+0{,}6\cdot 40)^2} = 39{,}17$	

Расчет времени до насыщения для ТТ класса PR выполняется графическим методом с помощью предварительно построенной кривой $K_{п.р}(t)$ по выражению (Б.15) из [16]:

$$K_{п.р}(t) = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) + \frac{\omega T_s}{1+\omega^2 T_s^2} \left[e^{-\frac{t}{T_s}} - \sqrt{1+\omega^2 T_s^2} \sin\left[\omega t + arctg\left(\frac{1}{\omega \cdot T_s} \right) \right] \right].$$

Результаты расчёта времени до насыщения для ТТ1 класса PR приведены в табл. 7.13.

Таблица 7.13

Расчёт времени до насыщения ТТ1 класса PR типа ТВГ-УЭТМ-330/500 1000/1 при КЗ в точке К1			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Параметр режима работы ТТ A – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$A = \frac{I_{1\,ном} \cdot K_{ном.факт} \cdot z_{2\Sigma ном}}{I_{КЗ} \cdot z_{2\Sigma факт}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1000 \cdot 60{,}58 \cdot 39{,}17}{41800 \cdot 12{,}48} = 4{,}55$; $4{,}55 \cdot (1 - 0{,}062) = 4{,}27$	$K_r = 0{,}062$
Постоянная времени вторичного контура, с	$T_s = \frac{X_0 + X_2 + X_{н.факт}}{\omega (R_2 + R_{н.факт})}$	$\frac{4077{,}78 + 7{,}46}{314 \cdot (5{,}76 + 4{,}24)} = 1{,}3$	
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	12,8 12,3	
Пригодность ТТ по условию времени до насыщения	$t_{нас.1} > t_{реш.1}$; $t_{нас.2} > t_{реш.1}$	Выпол. (12,8 > 3,4 мс) Выпол. (12,3 > 3,4 мс)	$t_{реш.1} = 3{,}4$ мс

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Из табл. 7.13 видно, что при однофазном КЗ в зоне действия время до насыщения ТТ1 больше 3,4 мс, то есть:

– условие пригодности ТТ1 класса PR типа ТВГ-УЭТМ-330/500 1000/1 по времени до насыщения выполняется для ДТЗ ШР в составе, которой имеется быстродействующий элемент дифференциальной отсечки;

– для ДТЗ ШР без указанного элемента требуется дополнительная проверка по действующему значению первой гармоники $I_{2.1.1*}$, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ к моменту времени $t_{нас}$. Результаты указанной проверки приведены в табл. 7.14.

Таблица 7.14

Проверка ТТ1 класса PR типа ТВГ-УЭТМ-330/500 1000/1 по действующему значению первой гармоники, содержащейся в импульсе вторичного тока к моменту времени $t_{нас}$			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечания**
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока к моменту времени $t_{нас}$, отн.ед.	$I_{2.1.1*}$	0,8	По рис. Б.4 для $t_{нас}$ = 12,3 мс при T_p = 0,1 с
Ток через ТТ1 при КЗ в расчетной точке К1, отн.ед	$I'_{ТТ.ЛВ*} = \frac{I_{ТТ.ЛВ}}{I_{Б.ЛВ} \cdot k_{ТТ.ЛВ}}$	$\frac{41800}{0,3 \cdot 1000} = 139,3$	
Относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока на втором периоде, отн.ед	$I_{Д.нас*} = I'_{ТТ.ЛВ*} \cdot I_{2.1.нас*}$	$139,3 \cdot 0,8 = 111,4$	
Проверка условия срабатывания дифференциальной отсечки на втором периоде КЗ в зоне	$I_{Д.нас*} > I_{ОТС*}$	$111,4 > 1,3$	$I_{ОТС*} = 1,3$ отн.ед.
Проверка ТТ1 класса PR типа ТВГ-УЭТМ-330/500 1000/1 по действующему значению первой гармоники, содержащейся в импульсе вторичного тока к моменту времени $t_{нас}$ выполнена успешно.			

7.5.2 Проверка ТТ для ДТЗ в режиме включения ШР под напряжение

Расчёт времени до насыщения ТТ1 и ТТ2 выполняется для режима включения ШР под напряжение. Ток включения ШР принимается равным его номинальному току.

Время до насыщения ТТ ($t_{нас}$) вычисляется по паспортным данным. Результаты расчёта времени до насыщения ТТ1 (ТТВ 330-III-5P 1000/1) и ТТ2, ТТ3 (ТТВ 10-I-5P 600/1) в режиме включения ШР под напряжение приведены в табл. 7.15 – 7.16, соответственно.

Таблица 7.15

Расчёт времени до насыщения ТТ1 типа ТТВ 330-III-5P (1000/1) в режиме включения ШР под напряжение			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения**	**Примечания**
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$A = \frac{I_{1\,ном} \cdot K_{ном} \cdot z_{2\Sigma ном}}{I_{ВКЛ} \cdot z_{2\Sigma факт}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1000 \cdot 54 \cdot 24,27}{300 \cdot 7,52} = 581$; $467,8 \cdot (1 - 0,86) = 81,3$	$K_r = 0,86$
Время до насыщения, с – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{нас.1}$ $t_{нас.2}$	Больше 5 T_p 0,347	

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.16

Расчёт времени до насыщения ТТ2, ТТ3 типа ТТВ 10-I-5Р (600/1) в режиме включения ШР под напряжение			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения для ТТ1**	**Примечания**
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$A = \frac{I_{1\,\text{ном}} \cdot K_{\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}{I_{\text{ВКЛ}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{600 \cdot 52 \cdot 23{,}15}{150 \cdot 6{,}22} = 774{,}2$; $467{,}8 \cdot (1 - 0{,}86) = 108{,}4$	$K_r = 0{,}86$
Время до насыщения, с – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше 5 T_p 0,528	

Результаты проверки продольной и поперечной ДТЗ ШР в переходном режиме включения под напряжение приведены в табл. 7.17 – 7.18, соответственно.

Условие отстройки дифференциальной токовой отсечки при проверке ТТ1, ТТ2 и ТТ3 в режиме включения ШР под напряжение выполняется. Условие отстройки чувствительных органов продольной и поперечной ДТЗ в режиме включения ШР под напряжение не выполняется. Максимальная разгрузка ТТ1, ТТ2 и ТТ3 желаемого эффекта не даёт. Возможны следующие варианты:

– изменить уставки срабатывания продольной и поперечной ДТЗ ШР. Это допустимо, так как на витковые замыкания продольная ДТЗ ШР не реагирует по принципу действия. На указанные замыкания успешно реагирует поперечная ДТЗ;

– перейти на ТТ с увеличенным значением $I_{1.\text{ном}}$;

– перейти на ТТ класса PR.

Ниже рассмотрены все три варианта.

7.5.2.1 Проверка ТТ для ДТЗ в режиме включения ШР под напряжение после изменения параметров срабатывания

Новые значения параметров тормозной характеристики ДТЗ ШР приведены в табл. 7.19.

Результаты проверки продольной и поперечной ДТЗ ШР с новыми значениями параметров срабатывания приведены в табл. 7.20 и 7.21, соответственно.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.17

Проверка ТТ1 типа ТТВ 330-III-5Р (1000/1) и ТТ2, ТТ3 типа ТТВ 10-I-5Р (600/1) для продольной ДТЗ ШР в переходном режиме включения под напряжение				
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения**		**Примечания**
		ТТ1	**ТТ2, ТТ3**	
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение	n	19	28	ТТ1: $t_{нас}$ = 347 мс; ТТ2: $t_{нас}$ = 528 мс
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока, отн.ед.	$I_{2.1*.n}$	0,26	0,42	По рис. Б.1 при T_p = 0,6 с
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1*.n}$	0,82	0,67	По рис. Б.3 при T_p = 0,6 с
Базисный ток на стороне, А	$I_{Б.ЛВ} = \frac{I_{НОМ.ШР}}{K_{ТТ.ЛВ}}$	$\frac{300}{1000} = 0{,}3$	$\frac{300}{600} = 0{,}5$	
Ток включения ШР под напряжение, отн.ед.	$I'_{вкл.ЛВ*} = \frac{I_{вкл.ШР}}{m \cdot I_{Б.ЛВ} \cdot k_{ТТ.ЛВ}}$	$\frac{300}{0{,}3 \cdot 1000} = 1$	$\frac{300}{2 \cdot 0{,}5 \cdot 600} = 0{,}5$	
Относительное значение дифференциального тока, отн.ед.	$I_{Д*} = I'_{вкл.ЛВ*} \cdot (I_{0.1.n*} + \Delta f_{выр} + \Delta f_{ПТТ})$	$1 \cdot (0{,}82 + 0{,}02 + 0{,}05) = 0{,}89$	$0{,}5 \cdot (0{,}67 + 0{,}02 + 0{,}05) = 0{,}37$	
Относительное значение тормозного тока, отн.ед.	Для ТТ1: $I_{Т*} = I'_{вкл.ЛВ*}$	1	–	
	Для ТТ2, ТТ3: $I_{Т*} = I'_{вкл.НВ\,I*} \cdot (1 + I_{2.1.n*})$	–	$0{,}5 \cdot (1 + 0{,}42) = 0{,}71$	
Проверка условия отстройки чувствительного органа ДТЗ	Если $I_{Т*} < I_{Т0*}$, то $I_{Д0*} > I_{Д*}$, иначе $I_{Д0*} + K_Т(I_{Т*} - I_{Т0*}) > I_{Д*}$	Не выполняется: $0{,}21 < 0{,}89$	Не выполняется: $0{,}21 < 0{,}37$	$I_{Д0*} = 0{,}21$ отн.ед.
Проверка условия отстройки дифференциальной токовой отсечки	$I_{ОТС*} > I_{Д*}$	Выполняется: $1{,}3 > 0{,}89$	Выполняется: $1{,}3 > 0{,}37$	$I_{ОТС*} = 1{,}3$ отн.ед.
Условие отстройки чувствительного органа продольной ДТЗ в режиме включения ШР под напряжение не выполняется. **Условие отстройки дифференциальной токовой отсечки продольной ДТЗ при проверке ТТ1, ТТ2, ТТ3 в режиме включения ШР под напряжение выполняется.**				

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.18

Проверка ТТ2 и ТТ3 типа ТТВ 10-I-5Р (600/1) для поперечной ДТЗ ШР в переходном режиме включения под напряжение			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения**	**Примечания**
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение	n	28	$t_{нас}$ = 528 мс
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока, отн.ед.	$I_{2.1*.n}$	0,42	По рис. Б.1 при $T_р$ = 0,6 с
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1*.n}$	0,67	По рис. Б.3 при $T_р$ = 0,6 с
Базисный ток на стороне, А	$I_{Б.НВ} = \frac{I_{НОМ.ШР}}{K_{ТТ.НВ}}$	$\frac{300}{600} = 0,5$	
Ток включения ШР под напряжение, отн.ед.	$I'_{вкл.НВ*} = \frac{I_{вкл.ШР}}{m \cdot I_{Б.НВ} \cdot k_{ТТ.НВ}}$	$\frac{300}{2 \cdot 0,5 \cdot 600} = 0,5$	
Относительное значение дифференциального тока, отн.ед.	$I_{Д*} = I'_{вкл.НВ*} \cdot (I_{0.1.n*} + \Delta f_{выр} + \Delta f_{ПТТ})$	$0,5 \cdot (0,67 + 0,02 + 0,05) = 0,37$	
Относительное значение тормозного тока, отн.ед.	$I_{Т*} = I'_{вкл.НВ*} \cdot (1 + I_{2.1.n*})$	$0,5 \cdot (1 + 0,42) = 0,71$	
Проверка условия отстройки чувствительного органа ДТЗ	$I_{Д0*} > I_{Д*}$	Не выполняется: $0,12 < 0,37$	$I_{Д0*} = 0,12$ отн.ед.
Проверка условия отстройки дифференциальной токовой отсечки	$I_{ОТС*} > I_{Д*}$	Выполняется: $1,3 > 0,37$	$I_{ОТС*} = 1,3$ отн.ед.
Условие отстройки чувствительного органа поперечной ДТЗ в режиме включения ШР под напряжение не выполняется. **Условие отстройки дифференциальной токовой отсечки поперечной ДТЗ при проверке ТТ2 и ТТ3 в режиме включения ШР под напряжение выполняется.**			

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.19

Параметры тормозной характеристики ДТЗ					
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**			
		Новые		**Старые**	
		Продольная	**Поперечная**	**Продольная**	**Поперечная**
Начальный ток срабатывания, отн.ед.	$I_{Д.0*}$	1	0,2	0,21	0,12
Ток начала торможения пускового органа, отн.ед.	$I_{Т.0*}$	0,5	0,25	1	
Ток торможения блокировки, отн.ед.	$I_{Т.БЛ*}$	-	3	–	3
Коэффициент торможения	$K_Т$	0,5		0,3	
Ток срабатывания дифференциальной отсечки, о. е.	$I_{ОТС*}$	1,3		1,3	

Таблица 7.20

Проверка ТТ1 типа ТТВ 330-III-5Р (1000/1) и ТТ2, ТТ3 типа ТТВ 10-I-5Р (600/1) в переходном режиме включения под напряжение с новыми значениями параметров срабатывания для продольной ДТЗ ШР				
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения**		**Примечания**
		ТТ1	**ТТ2, ТТ3**	
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение	n	19	28	ТТ1: $t_{нас}$ = 347 мс; ТТ2: $t_{нас}$ = 528 мс
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока, отн.ед.	$I_{2.1*.n}$	0,26	0,42	По рис. Б.1 при $T_р$ = 0,6 с
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1*.n}$	0,82	0,67	По рис. Б.3 при $T_р$ = 0,6 с
Базисный ток на стороне, А	$I_{Б.стор} = \frac{I_{НОМ.ШР}}{K_{ТТ.стор}}$	$\frac{300}{1000} = 0{,}3$	$\frac{300}{600} = 0{,}5$	
Ток включения ШР под напряжение, отн.ед.	$I'_{вкл.стор*} = \frac{I_{вкл.ШР}}{m \cdot I_{Б.стор} \cdot k_{ТТ.стор}}$	$\frac{300}{0{,}3 \cdot 1000} = 1$	$\frac{300}{2 \cdot 0{,}5 \cdot 600} = 0{,}5$	
Относительное значение дифференциального тока, отн.ед.	$I_{Д*} = I'_{вкл.стор*} \cdot (I_{0.1.n*} + \Delta f_{выр} + \Delta f_{ПТТ})$	$1 \cdot (0{,}82 + 0{,}02 + 0{,}05) = 0{,}89$	$0{,}5 \cdot (0{,}67 + 0{,}02 + 0{,}05) = 0{,}37$	
Относительное значение тормозного тока, отн.ед.	Для ТТ1: $I_{Т*} = I'_{вкл.ЛВ*}$	1	–	
	Для ТТ2, ТТ3: $I_{Т*} = I'_{вкл.НВ*} \cdot (1 + I_{2.1.n*})$	–	$0{,}5 \cdot (1 + 0{,}42) = 0{,}71$	
Проверка условия отстройки чувствительного органа ДТЗ	Если $I_{Т*} < I_{Т0*}$, то $I_{Д0*} > I_{Д*}$, иначе $I_{Д0*} + K_Т(I_{Т*} - I_{Т0*}) > I_{Д*}$	Выполняется: $1 + 0{,}5 \cdot (1 - 0{,}5) > 0{,}89$ $1{,}25 > 0{,}89$	Выполняется: $1 + 0{,}5 \cdot (0{,}5 - 0{,}5) > 0{,}37$ $1 > 0{,}37$	
Проверка условия отстройки дифференциальной токовой отсечки	$I_{ОТС*} > I_{Д*}$	Выполняется: $1{,}3 > 0{,}89$	Выполняется: $1{,}3 > 0{,}37$	
Условие отстройки продольной ДТЗ при проверке ТТ1 и ТТ2, ТТ3 в режиме включения ШР под напряжение выполняется.				

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.21

Проверка ТТ2 и ТТ3 типа ТТВ 10-I-5P (600/1) в переходном режиме включения под напряжение с новыми значениями параметров срабатывания поперечной ДТЗ ШР			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения**	**Примечания**
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение	n	28	$t_{нас}$ = 528 мс
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока, отн.ед.	$I_{2.1*.n}$	0,42	По рис. Б.1 при $T_р$ = 0,6 с
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1*.n}$	0,67	По рис. Б.3 при $T_р$ = 0,6 с
Базисный ток на стороне, А	$I_{Б.НВ} = \frac{I_{НОМ.ШР}}{K_{ТТ.НВ}}$	$\frac{300}{600} = 0{,}5$	
Ток включения ШР под напряжение, отн.ед.	$I'_{вкл.НВ*} = \frac{I_{вкл.ШР}}{m \cdot I_{Б.НВ} \cdot k_{ТТ.НВ}}$	$\frac{300}{2 \cdot 0{,}5 \cdot 600} = 0{,}5$	
Относительное значение дифференциального тока, отн.ед.	$I_{Д*} = I'_{вкл.НВ*} \cdot (I_{0.1.n*} + \Delta f_{выр} + \Delta f_{ПТТ})$	$0{,}5 \cdot (0{,}67 + 0{,}02 + 0{,}05) = 0{,}37$	
Относительное значение тормозного тока, отн.ед.	$I_{Т*} = I'_{вкл.НВ*} \cdot (1 + I_{2.1.n*})$	$0{,}5 \cdot (1 + 0{,}42) = 0{,}71$	
Проверка условия отстройки чувствительного органа ДТЗ	$I_{Д0*} > I_{Д*}$	Выполняется: $0{,}2 + 0{,}5 \cdot (0{,}71 - 0{,}25) > 0{,}37$ $0{,}43 > 0{,}37$	
Проверка условия отстройки дифференциальной токовой отсечки	$I_{ОТС*} > I_{Д*}$	Выполняется: $1{,}3 > 0{,}37$	
Условие отстройки поперечной ДТЗ при проверке ТТ2 и ТТ3 в режиме включения ШР под напряжение выполняется.			

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

7.5.2.2 Переход на ТТ с увеличенным значением $I_{1.ном}$

Для проверки ДЗТ ШР в режиме включения ШР под напряжение принимаются следующие типы вновь выбранных ТТ:

– сторона ЛВ (ТТ1) – ТВТ-330 2000/1 (исполнение 3000). Исходные данные ТТ1 приведены в табл. 7.9;

– сторона НВ (ТТ2, ТТ3) – ТВТ-35М 1000/1 (исполнение 3000). Исходные данные ТТ2, ТТ3 приведены в табл. 7.22.

Таблица 7.22

Исходные данные ТТ2, ТТ3 типа ТВТ-35М 1000/1 (исполнение 3000)			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	1000	
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1	
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	20	
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	40	
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8	
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	9,1	
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	22,4	
Число витков вторичной обмотки	w_2	2000	
Поперечное сечение магнитопровода, м^2	s	46,8*10^{-4}	
Средняя длина силовой линии, м	l	0,88	
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,5	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos(\varphi_н)$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	260	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 6	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{260}{1 \cdot 6} = 0{,}758$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п} = R_{каб}$	0,758	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 0{,}758 + 1 \cdot 0{,}5 + 0{,}1 = 1{,}358$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$2 \cdot 0{,}758 + 1 \cdot 0{,}5 + 0{,}1 = 2{,}117$	n = 2 при $K^{(1)}$
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(6{,}9 + 2{,}42)^2 + (22 + 0)^2} = 24{,}72$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$\sqrt{(6{,}9 + 4{,}24)^2 + (22 + 0)^2} = 25{,}05$	n = 2 при $K^{(1)}$
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(6{,}9 + 0{,}8 \cdot 40)^2 + (22 + 0{,}6 \cdot 40)^2} = 61{,}99$	

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Расчёт времени до насыщения ($t_{нас}$) по ВАХ или $B(H)$ невозможен, так как ток в режиме включения под напряжение меньше номинальных токов ТТ1, ТТ2 и ТТ3, т.е. рабочая точка находится на линейном участке ВАХ (или $B(H)$) и условие допустимости аппроксимации ПХН не выполняется. Таким образом, расчет $t_{нас}$ нужно выполнять по паспортным данным. Однако паспортные значения номинальных предельных кратностей ТТ могут быть занижены. Поэтому определим паспортное значение амплитуды магнитной индукции в магнитопроводе ТТ ($B_{m.пасп}$), соответствующее паспортному значению номинальной предельной кратности первичного тока ТТ $K_{ном.пасп}$ в условиях 10%-ной погрешности с помощью следующего выражения:

$$B_{нас.пасп} = \frac{K_{ном.пасп} \cdot I_{2.ном} \cdot \sqrt{(R_2 + 0{,}8 \cdot Z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 \cdot Z_{н.ном})^2}}{222 \cdot w_2 \cdot s_м},$$

– для ТТ1 – ТВТ-330 2000/1:

$$B_{нас.пасп} = \frac{30 \cdot 1 \cdot \sqrt{(6{,}9 + 0{,}8 \cdot 40)^2 + (22 + 0{,}6 \cdot 40)^2}}{222 \cdot 2000 \cdot 94{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}43\,\text{Тл};$$

– для ТТ2, ТТ3 – ТВТ-35М 1000/1:

$$B_{нас.пасп} = \frac{20 \cdot 1 \cdot \sqrt{(9{,}1 + 0{,}8 \cdot 40)^2 + (22{,}4 + 0{,}6 \cdot 40)^2}}{222 \cdot 1000 \cdot 46{,}8 \cdot 10^{-4}} = 1{,}19\,\text{Тл}.$$

Фактическое значение амплитуды магнитной индукции насыщения приближенно равно

$$B_{нас.факт} = 1{,}9\,\text{Тл}.$$

Определим фактические номинальные предельные кратности тока ТТ с помощью следующего выражения:

$$K_{ном.факт} = K_{ном.пасп} \frac{B_{нас.факт}}{B_{нас.пасп}},$$

– для ТТ1 – ТВТ-330 2000/1:

$$K_{ном.факт} = 30 \cdot \frac{1{,}9}{0{,}43} = 132;$$

– для ТТ2, ТТ3 – ТВТ-35М 1000/1:

$$K_{ном.факт} = 20 \cdot \frac{1{,}9}{1.19} = 31{,}8.$$

Результаты расчёта времени до насыщения ТТ1 (ТТВ 330-III-5Р 1000/1) и ТТ2 (ТТВ 10-I-5Р 200/1) в режиме включения ШР под напряжение приведены в табл. 7.23 и 7.24, соответственно.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.23

Расчёт времени до насыщения ТТ1 типа ТВТ-330 2000/1 в режиме включения ШР под напряжение			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения**	**Примечания**
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$A = \frac{I_{1\,\text{ном}} \cdot K_{\text{ном.факт}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}{I_{\text{ВКЛ}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{2000 \cdot 132 \cdot 60{,}24}{300 \cdot 23{,}89} = 2219$; $2219 \cdot (1 - 0{,}86) = 311$	$K_r = 0{,}86$
Время до насыщения, с – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше 5 T_p Больше 5 T_p	

Таблица 7.24

Расчёт времени до насыщения ТТ2, ТТ3 типа ТВТ-35М 1000/1 в режиме включения ШР под напряжение			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения для ТТ1**	**Примечания**
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$A = \frac{I_{1\,\text{ном}} \cdot K_{\text{ном.факт}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}{I_{\text{ВКЛ}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1000 \cdot 31{,}8 \cdot 61{,}99}{150 \cdot 24{,}72} = 532$; $532 \cdot (1 - 0{,}86) = 74{,}5$	$K_r = 0{,}86$
Время до насыщения, с – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше 5 T_p 1,79	

Так как ТТ1 типа ТВТ-330 2000/1 в режиме включения ШР под напряжение не насыщается, то проверка ДТЗ ШР проводится только для ТТ2, ТТ3.

Результаты повторной проверки продольной и поперечной ДТЗ ШР в переходном режиме включения под напряжение приведены в табл. 7.25.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.25

Проверка ТТ2, ТТ3 типа ТВТ-35М 1000/1 для продольной и поперечной ДТЗ ШР в переходном режиме включения под напряжение				
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения**		**Примечания**
		Продольная	**Поперечная**	
Номер периода, следующего за периодом, на котором было насыщение	n	90	90	$t_{нас}$ = 1,79 с
Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока, отн.ед.	$I_{2.1*.n}$	0,95	0,95	По рис. Б.1 при T_p = 0,6 с
Относительное действующее значение намагничивающего тока, отн.ед.	$I_{0.1*.n}$	0,11	0,11	По рис. Б.3 при T_p = 0,6 с
Базисный ток на стороне, А	$I_{Б.НВ} = \frac{I_{НОМ.ШР}}{K_{ТТ.НВ}}$	$\frac{300}{1000} = 0{,}3$	$\frac{300}{1000} = 0{,}3$	
Ток включения ШР под напряжение, отн.ед.	$I'_{вкл.НВ*} = \frac{I_{вкл.ШР}}{m \cdot I_{Б.НВ} \cdot k_{ТТ.НВ}}$	$\frac{300}{2 \cdot 0{,}3 \cdot 1000} = 0{,}5$	$\frac{300}{2 \cdot 0{,}3 \cdot 1000} = 0{,}5$	
Относительное значение дифференциального тока, отн.ед.	$I_{Д*} = I'_{вкл.НВ*} \cdot (I_{0.1n*} + \Delta f_{выр} + \Delta f_{ПТТ})$	$0{,}5 \cdot (0{,}11 + 0{,}02 + 0{,}05) = 0{,}09$	$0{,}5 \cdot (0{,}11 + 0{,}02 + 0{,}05) = 0{,}09$	
Относительное значение тормозного тока, отн.ед.	Для ТТ2, ТТ3: $I_{Т*} = I'_{вкл.НВ*} \cdot (1 + I_{2.1.n*})$	$0{,}5 \cdot (1 + 0{,}95) = 0{,}975$	$0{,}5 \cdot (1 + 0{,}95) = 0{,}975$	
Проверка условия отстройки чувствительного органа ДТЗ	Если $I_{Т*} < I_{Т0*}$, то $I_{Д0*} > I_{Д*}$, иначе $I_{Д0*} + K_Т(I_{Т*} - I_{Т0*}) > I_{Д*}$	Выполняется: $0{,}21 > 0{,}09$	Выполняется: $0{,}12 > 0{,}09$	$I_{Д0*} = 0{,}21$ отн.ед., $I_{Т0*} = 1$ отн.ед., $K_Т = 0{,}3$ отн.ед.
Проверка условия отстройки дифференциальной токовой отсечки	$I_{ОТС*} > I_{Д*}$	Выполняется: $1{,}3 > 0{,}09$	Выполняется: $1{,}3 > 0{,}09$	$I_{ОТС*} = 1{,}3$ отн.ед.
Условие отстройки продольной и поперечной ДТЗ при проверке ТТ2 и ТТ3 в режиме включения ШР под напряжение выполняется.				

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

7.5.2.3 Переход на ТТ класса PR

Для повторной проверки ДЗТ ШР в режиме включения ШР под напряжение принимаются следующие типы ТТ:

– сторона ЛВ (ТТ1) – ТВГ-УЭТМ-330/500 1000/1 класса PR. Исходные данные ТТ1 приведены в табл. 7.12;

– из-за отсутствия данных по серийно выпускаемым ТТ с немагнитным зазором на напряжение 10 – 35 кВ, в проверке используется условный ТТ класса PR, реализованный в габаритах ТТВ 10-I-5P 200/1, у которого K_r = 0,1, а постоянная времени вторичного контура равна T_s = 1,5 с. Параметры ТТ приведены в табл. 7.26.

Таблица 7.26

Исходные данные ТТ2, ТТ3 (НВ) класса PR в габаритах ТТВ 10-I-5P 200/1			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Номинальный первичный ток, А	$I_{1.ном}$	200	
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2.ном}$	1	
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном}$	20	
Фактическая номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{ном.факт}$	20	
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{н.ном}$	20	
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8	
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	1,2	
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0	
Постоянная времени вторичного контура, с	T_s	1,5	
Коэффициент остаточной намагниченности, %	K_r	10	
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(1{,}2 + 2{,}42)^2 + 0} = 3{,}62$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$\sqrt{(1{,}2 + 4{,}24)^2 + 0} = 5{,}44$	n = 2 при $K^{(1)}$
Номинальное сопротивление ветви вторичного тока, Ом	$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{(R_2 + 0{,}8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0{,}6 z_{н.ном})^2}$	$\sqrt{(1{,}2 + 0{,}8 \cdot 20)^2 + (0{,}6 \cdot 20)^2} = 20{,}97$	

Расчет времени до насыщения для ТТ класса PR выполняется графическим методом с помощью предварительно построенной кривой $K_{п.р}(t)$ по выражению (Б.15) из [16].

Результаты расчёта времени до насыщения ТТ1, ТТ2 и ТТ3 в режиме включения ШР под напряжение приведены в табл. 7.27 и 7.28, соответственно.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 7.27

Расчёт времени до насыщения ТТ1 типа ТВГ-УЭТМ-330/500 1000/1 класса PR в режиме включения ШР под напряжение			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$A = \frac{I_{1\,\text{ном}} \cdot K_{\text{ном.факт}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}{I_{\text{КЗ}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{1000 \cdot 60{,}58 \cdot 39{,}17}{300 \cdot 11{,}07} = 714$; $714 \cdot (1 - 0{,}062) = 670$	$K_r = 0{,}062$
Постоянная времени вторичного контура, с	$T_s = \frac{X_0 + X_2 + X_{\text{н.факт}}}{\omega(R_2 + R_{\text{н.факт}})}$	$\frac{4077{,}78 + 7{,}46}{314 \cdot (5{,}76 + 2{,}42)} = 1{,}59$	
Время до насыщения, мс – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше 5 T_p Больше 5 T_p	

Таблица 7.28

Расчёт времени до насыщения ТТ2, ТТ3 класса PR в габаритах ТТВ 10-I-5Р 200/1 в режиме включения ШР под напряжение			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения для ТТ1**	**Примечания**
Параметр режима работы ТТ *A* – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$A = \frac{I_{1\,\text{ном}} \cdot K_{\text{ном.факт}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}{I_{\text{ВКЛ}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}}$; $A_r = A \cdot (1 - K_r)$	$\frac{200 \cdot 20 \cdot 20{,}97}{150 \cdot 3{,}62} = 154{,}5$; $154{,}5 \cdot (1 - 0{,}1) = 139$	$K_r = 0{,}1$
Время до насыщения, с – без учета остаточной индукции – с учетом остаточной индукции	$t_{\text{нас.1}}$ $t_{\text{нас.2}}$	Больше 5 T_p Больше 5 T_p	

Так как ТТ1, ТТ2 и ТТ3 класса PR в режиме включения ШР под напряжение не насыщаются, то проверка ДТЗ ШР завершена успешно.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

8 МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ ТТ ПО УСЛОВИЮ НЕСРАБАТЫВАНИЯ УРЗ ПРИ НАСЫЩЕНИИ ТТ В НЕПОВРЕЖДЁННОЙ ФАЗЕ

С целью исключения неселективного срабатывания УРЗ при несимметричных КЗ вне зоны действия вследствие насыщения ТТ, включённого в неповреждённую фазу, выполняют следующие действия [15].

8.1 Проверка эффективности уменьшения сопротивления нулевого проводника

Проверяется возможность исключения неправильного срабатывания УРЗ по условию обеспечения насыщения ТТ в повреждённой фазе раньше, чем в неповреждённой фазе за счёт уменьшения сопротивления нулевого проводника.

1. Вычисляют требуемое сопротивление нулевого проводника $R_{\text{н.п.треб}}$ по выражениям:

$$R_{\text{н.п.треб}} < z_{s.\text{ф}} \cdot K_{\text{тр}} \cdot \frac{1-K_r}{2K_r}; \tag{8.1}$$

где $z_{s.\text{ф}}$ – суммарное сопротивление фазного проводника с учётом сопротивления вторичной обмотки и нагрузки. Равно фактическому сопротивлению ветви вторичного тока (т.е. без учета $R_{\text{н.п}}$)

$$z_{s.\text{ф}} = z^{(3)}_{2\Sigma\text{факт}} = \sqrt{\left(R_2 + R^{(3)}_{\text{н.факт}}\right)^2 + \left(X_2 + X^{(3)}_{\text{н.факт}}\right)^2};$$

$K_{\text{тр}}$ – коэффициент токораспределения. $K_{\text{тр}} = 0{,}5$ для ТТ в цепи ШСВ, $K_{\text{тр}} = 1$ для ТТ в цепи присоединения;

$K_r = 0{,}86$ – коэффициент остаточной индукции.

2. Зная исходное сопротивление нулевого проводника $R_{\text{н.п}}$, вычисляют число $k_{\text{ж}}$ дополнительных жил контрольного кабеля, включаемых параллельно нулевому проводнику, по выражению:

$$k_{\text{ж}} \geq \left\lceil \frac{R_{\text{н.п}}}{R_{\text{н.п.треб}}} - 1 \right\rceil, \tag{8.2}$$

где $\lceil\ \rceil$ – символ округление числа до целого в большую сторону.

Или определяют требуемое сечение нулевого проводника ($S_{\text{ж.треб}}$) с помощью следующего выражения:

$$S_{\text{ж.треб}} = \rho \cdot \frac{L_{\text{т.ц}}}{R_{\text{н.п.треб}}}, \tag{8.3}$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление меди;

$L_{\text{т.ц}}$ – длина токовых цепей.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

3. Если полученное число дополнительных жил контрольного кабеля окажется технически целесообразным для реализации, то ТТ пригоден для использования в схеме ДЗШ.

4. Если полученное число дополнительных жил контрольного кабеля оказалось технически нецелесообразным для реализации, то переходят к п. 8.2.

8.2 Выбор ТТ со вторичным номинальным током 1 А

Производится выбор ТТ со вторичным номинальным током 1 А. Данный пункт эффективен при переходе от ТТ с номинальный вторичный ток 5 А. Указанное объясняется тем, что при уменьшении номинального вторичного тока ТТ со значения 5 А до 1 А напряжение насыщения увеличивается в 5 раз. Выбор ТТ со вторичным номинальным током 1 А выполняется в соответствии с рекомендациями, приведенными выше для конкретных видов УРЗ.

8.3 Подключение ТТ к терминалу УРЗ индивидуальными фазными и нулевыми проводниками.

Данная мера является радикальной и при её использовании исключается срабатывание УРЗ при КЗ вне зоны действия по причине насыщения ТТ, включённых в неповреждённые фазы.

В случае её реализации необходимо выполнить следующие действия.

1. Повторно провести проверку ТТ по времени до насыщения для трёхфазного КЗ с учётом удвоения длины контрольного кабеля в ветвях вторичного тока ТТ.

2. Если повторная проверка ТТ по времени до насыщения приведёт к положительному результату, то ТТ пригоден для использования в схеме УРЗ.

3. Если повторная проверка ТТ по времени до насыщения приведёт к отрицательному результату, то необходимо выполнить выбора ТТ по времени до насыщения.

8.4 Пример проверки ТТ по условию несрабатывания УРЗ при насыщении ТТ в неповреждённой фазе

В качестве примера ниже выполняется проверка по условию несрабатывания УРЗ при насыщении ТТ в неповреждённой фазе для схемы ДЗЛ рассмотренной в п. 1.6. Все необходимые данные так же взяты из п. 1.6 и продублированы в табл. 8.1.

Результаты проверки на возможность неправильного срабатывания ДЗЛ по условию насыщения ТТ в неповреждённой фазе приведены в табл. 8.2.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Таблица 8.1

Параметры нагрузки ТТ			
Наименование параметра	**Обозначение**	**Значение**	**Примечание**
Сопротивление терминала защиты, Ом	$R_{терм}$	0,12	
Косинус угла нагрузки терминала	$\cos\varphi_н$	1	
Количество последовательно включённых терминалов	m	1	
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{пер}$	0,1	
Длина токовых цепей, м	$L_{т.ц}$	250	
Сечение жилы контрольного кабеля, мм^2	$S_ж$	Cu – 2,5	
Количество параллельно включённых жил контрольного кабеля	$k_ж$	1	
Сопротивление токовой цепи от выводов вторичной обмотки ТТ до терминала защиты, Ом	$R_{каб} = \rho \cdot \frac{L_{т.ц}}{k_ж \cdot S_ж}$	$0{,}0175 \cdot \frac{250}{1 \cdot 2{,}5} = 1{,}75$	
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п} = R_{каб}$	1,75	
Фактическое сопротивление нагрузки токовых цепей ТТ, установленных в повреждённых фазах, Ом	$R_{н.факт} = n \cdot R_{каб} + m \cdot R_{терм} + R_{пер}$	$1 \cdot 1{,}75 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 1{,}97$	n = 1 при $K^{(3)}$
		$2 \cdot 1{,}75 + 1 \cdot 0{,}12 + 0{,}1 = 3{,}72$	n = 2 при $K^{(1)}$
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{2\Sigma факт} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$	$\sqrt{(4{,}23+1{,}97)^2 + 0^2} = 6{,}2$	$X_{н.факт} = 0$, $R_2 = 4{,}23$, $X_2 = 0$
		$\sqrt{(4{,}23+3{,}72)^2 + 0^2} = 7{,}95$	

Таблица 8.2

Проверка возможности неправильного срабатывания ДЗЛ по условию насыщения ТТ в неповреждённой фазе			
Наименование величины	**Обозначение**	**Значения**	**Примечания**
Фактическое сопротивление ветви вторичного тока ТТ, Ом	$z_{s.ф} = z^{(3)}_{2\Sigma факт}$	6,2	Для режима $K^{(3)}$
Сопротивление нулевого проводника ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п}$	1,75	
Сопротивление нулевого проводника группы ТТ, соединённых в звезду, Ом	$R_{н.п.треб} = z_{s.ф} \cdot K_{тр} \cdot \frac{1-K_r}{2K_r}$	$6{,}2 \cdot 1 \cdot \frac{1-0{,}86}{2 \cdot 0{,}86} = 0{,}505$	$K_r = 0{,}86$, $K_{тр} = 1$
Число дополнительных жил контрольного кабеля, шт.	$k_ж = \left\lceil \frac{R_{н.п}}{R_{н.п.треб}} - 1 \right\rceil$	$\left\lceil \frac{1{,}75}{0{,}505} - 1 \right\rceil = \lceil 2{,}47 \rceil = 3$	
Для исключения неправильных срабатываний в данной схеме ДЗЛ при насыщении ТТ в неповреждённой фазе необходимо параллельно нулевому проводнику (сечением 2,5 мм^2) группы ТТ, соединённых в звезду, подключить ещё 3 жилы контрольного кабеля сечением 2,5 мм^2.			

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 58669-2019 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях». Введен в действие в РФ с 1 января 2020 г.

2. Рекомендации по выбору уставок функции продольной дифференциальной защиты линии электропередачи, используемой в терминалах БЭ 2704 09х, БЭ2704 59х, БЭ2502Б 21хх и в шкафах серий ШЭ2607 09х, ШЭ2710 59х, ШЭ2607 29х. ЭКРА.650323.037 Д7. 2018. – 51 с.

3. Стандарт МЭК 60255-121:2014. Измерительные реле и оборудование релейной защиты. Часть 121: Функциональные требования к дистанционной защите.

4. Шкаф дистанционной и токовой защиты линии ШЭ2607 021 (версия 021_400) (для первичной схемы подстанции с одним выключателем). Руководство по эксплуатации. ЭКРА.656453.902 РЭ.

5. Шкаф защиты линии и ОАПВ типа ШЭ2710 521 (версии 521_305, 521_365). Руководство по эксплуатации. ЭКРА.656453.044 РЭ.

6. Возможность неселективного действия быстродействующих дистанционных защит при внешних повреждениях с большими токами КЗ / Дони Н.А. – Релейщик, 2015, № 04 (24), с. 30 – 33.

7. Дегтярев А.А, Кужеков С.Л, Дони Н.А., Шурупов А.А., Федотов А.Ю. Анализ и проверка соответствия характеристик трансформаторов тока класса Р условиям функционирования первых ступеней дистанционных защит линий электропередачи при переходных процессах. Электрические станции. – 2020. – №3. – С. 43 – 53.

8. Шкаф защиты трансформатора типа ШЭ2607 041 (ПО 041_305). Руководство по эксплуатации ЭКРА.656453.031 РЭ.

9. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.70.136-2012. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА серии SIPROTEC (Siemens AG) дифференциальной токовой защиты шин 110-750 кВ. Дата введения: 13.12.2012.

10. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.70.99-2011. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ООО НПП «ЭКРА».

11. Руководящие указания по релейной защите. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110 – 500 кВ: Расчёты. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.

12. Шкаф защиты автотрансформатора типа ШЭ2607 042 (ПО 042_305). Руководство по эксплуатации ЭКРА.656453.032 РЭ.

13. Шкаф защиты ошиновки НН автотрансформатора (трансформатора) типа ШЭ2607

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

043 (ПО 043_305). Руководство по эксплуатации ЭКРА.656453.129 РЭ.

14. Шкаф защиты шунтирующего реактора напряжением 330 - 750 кВ типа ШЭ2710 541 (версия ПО 541_201). Руководство по эксплуатации ЭКРА.656453.046 РЭ.

15. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А., Дони Н.А., Шурупов А.А., Костарев Л.Н., Федотов А.Ю. Анализ мероприятий, исключающих неселективные действия дифференциальных защит сборных шин при внешних двухфазных коротких замыканиях с насыщением трансформаторов тока, включённых в неповрежденную фазу. – Электрические станции. – 2019. – № 9 – С. 22 – 29.

16. Предварительный национальный стандарт ПНСТ 283-2018 ГОСТ Р «Трансформаторы измерительные. Часть 2: Требования к трансформаторам тока».

17. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.241-2017. Технические требования к устройствам РЗА.

18. Правила технологического функционирования электроэнергетических систем. Утверждены Постановлением правительства Российской Федерации от 13 августа 2018 г. №937.

19. Приказ министра энергетики Российской Федерации А.В. Новака от 13.02.2019 г. № 101 «Об утверждении требований к оснащению линий электропередачи и оборудования объектов электроэнергетики классом напряжения 110 кВ и выше устройствами и комплексами релейной защиты и автоматики, а также к принципам функционирования устройств и комплексов релейной защиты и автоматики».

20. Письмо Заместителя министра энергетики от 02.04.2019 за № ЧА-3440/10. «О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты».

21. Стандарт МЭК 61869-2. Издание 1.0 2012-09. Международный стандарт. Измерительные трансформаторы. Часть 2: Дополнительные требования для трансформаторов тока. Редакция 1.0 2012 – 09.

22. Предварительный национальный стандарт ПНСТ 283-2018 ГОСТ Р «Трансформаторы измерительные. Часть 2: Требования к трансформаторам тока».

23. IEC TR 61869-100: 2017. Instrument Transformers. Part 100 Guidance for Application of Current Transformers in Power System Protection.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ПРОВЕРКЕ И ВЫБОРУ ТТ ПО ВРЕМЕНИ ДО НАСЫЩЕНИЯ С УЧЁТОМ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

Во вторую редакцию документа «Шкафы РЗА серий ШЭ2607, ШЭ2710. Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока» внесены следующие изменения:

– вместо проверки ТТ по времени срабатывания устройств релейной защиты (УРЗ) производится проверка по времени принятия решения функцией защиты о местонажождении точки КЗ в зоне или вне зоны действия;

– проверка ТТ производится с учётом алгоритмических решений, повышающих устойчивость функционирования УРЗ при переходных процессах, связанных с насыщением ТТ. В частности, рассматривается применение быстродействующего элемента токовой и дифференциальной отсечек, имеющего время принятия решения до 3,4 мс;

– учтено, что паспортные значения номинальных предельных кратностей ТТ могут быть занижены. По этой причине проверка ТТ производится по характеристикам намагничивания или по вольт – амперным характеристикам (ВАХ) ТТ;

– при проверке по паспортным данным используется вычисленная фактическая номинальная предельная кратность первичного тока ТТ;

– в случае отсутствия быстродействующего элемента в составе токовой или дифференциальной отсечек, имеющего время принятия решения до 3,4 мс, проверки ТТ для защит сосредоточенных объектов производятся по результатам дискретного преобразования Фурье методом скользящего окна. При этом, в дополнении к первой редакции документа, используются зависимости действующего значения первой гармоники, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ, магнитопровод которого насыщается на первом периоде КЗ. Кроме этого, если для указанных отсечек условие срабатывания на первом периоде КЗ в зоне действия не выполняется, то проверка ТТ может производиться на втором периоде переходного процесса;

– особое внимание уделено обеспечению быстродействия УРЗ при близких коротких замыканиях (КЗ) в зоне и вне зоны действия.

Проблема насыщения магнитопроводов ТТ в переходных режимах КЗ. Поведение быстродействующих устройств релейной защиты в переходных режимах КЗ зависит от выбранных уставок, кратностей токов КЗ, мест возникновения КЗ: в зоне или вне зоны действия, вида КЗ (симметричное или несимметричное), постоянной времени затухания и относительного содержания апериодической составляющей в токе КЗ, наличия и знака остаточной магнитной индукции в магнитопроводах ТТ, нагрузки на ТТ, а также от схемы соединения ТТ и способа передачи информации от последних в устройства защиты.

В связи с имевшими место нарушениями в работе ЭЭС по причине насыщения магнитопроводов ТТ класса Р Руководящими документами [17 – 20] предписано обеспечить правильное функционирование устройств релейной защиты при наличии в токах КЗ апериодической составляющей. Поэтому для ответственных объектов электроэнергетики выполняются

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

расчёты времени до насыщения ТТ при КЗ. На основании расчётов должны быть определены требования к техническим характеристикам устройств релейной защиты в части минимально необходимого времени достоверного измерения значений тока ТТ, при котором обеспечивается правильная работа релейной защиты в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ ($t_{изм}$).

На практике поставленная задача может быть разделена на три:

– проверка соответствия (оценка пригодности) существующих ТТ параметрам УРЗ в переходных режимах;

– выбор ТТ из числа существующих, характеристики которых соответствуют параметрам УРЗ в переходных режимах;

– выдача задания производителю на разработку новых преобразователей тока для УРЗ с требуемыми характеристиками.

Проверка пригодности ТТ. Указанную проверку производят в соответствии с международными и отечественными стандартами [21, 22] путем сравнения времени до насыщения ТТ в режиме КЗ ($t_{нас}$) с временем достоверного измерения тока ТТ $t_{изм}$, с использованием неравенства:

$$t_{нас} \geq t_{изм}\,. \qquad (А.1)$$

Условием отсутствия насыщения магнитопровода ТТ класса Р в переходном режиме КЗ в течение $t_{изм}$ является неравенство:

$$A \cdot (1 - K_r) \geq K_{п.р}(t_{изм})\,, \qquad (А.2)$$

где A – параметр режима ТТ;

$K_{п.р}(t_{изм})$ – значение коэффициента переходного режима ТТ в момент времени $t_{изм}$;

K_r – коэффициент остаточной намагниченности.

При КЗ в зоне действия время до насыщения ТТ $t_{нас.1}$ должно удовлетворять условию:

$$t_{нас.1} \geq t_{изм.1}\,, \qquad (А.3)$$

где $t_{изм.1}$ − минимально необходимое время достоверного измерения значений тока ТТ при КЗ в зоне действия.

Необходимо отметить, что проверка последнего условия на практике затруднительна по следующим причинам:

– для параметра $t_{нас}$ разработаны методики расчета, а значение $t_{изм.1}$ не является расчетной величиной и зависит от многих факторов: алгоритмов и уставок УРЗ, конфигурации защищаемой сети, параметров и способа подключения ТТ, вида, условий КЗ и др.;

– в условиях указанной выше неопределенности зачастую в качестве $t_{изм.1}$ используется максимально допустимое время срабатывания измерительного органа конкретного типа защиты;

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

– в паспортных данных ТТ часто приводятся заниженные значения номинальной предельной кратности ТТ.

По указанным причинам результатом проверки по условию (А.3) с учетом предельного значения остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака в магнитопроводе ТТ часто является вывод о необходимости замены ТТ класса Р без немагнитного зазора в магнитопроводе на ТТ с немагнитным зазором или на электронный преобразователь тока.

Таким образом, соответствие времени до насыщения ТТ максимально допустимому времени срабатывания измерительного органа защиты является избыточным условием правильного функционирования быстродействующих УРЗ в переходных режимах КЗ в зоне действия, сопровождающихся насыщением магнитопроводов ТТ класса Р.

Исследования показали, что во многих случаях устройства защиты правильно функционируют при невыполнении указанного условия. В частности, первые ступени дистанционных защит линий, реализованные в шкафах ШЭ2607 021 и ШЭ2710 521, правильно функционируют при максимальных токах КЗ и насыщении ТТ в режимах близких КЗ в зоне и вне зоны действия.

В Техническом докладе МЭК 61869 – 100. Часть 100. Руководство по применению трансформаторов тока в защите энергосистем [23] говорится о необходимости сравнения времени до насыщения ТТ $t_{нас}$ с **временем принятия решения функцией защиты** <u>без учёта выходных реле</u> ($t_{реш}$). Возможность неучёта указанного времени объясняется тем, что в устройствах УРЗ расширителем длительности импульса срабатывания производится удлинение сигнала воздействия на выходное реле на время, большее его времени срабатывания. Благодаря этому положению значения $t_{изм.1}$ уменьшаются, что существенно облегчает условия проверки и выбора ТТ.

В соответствии с вышеуказанным во второй редакции Методических указаний при КЗ в зоне действия производится сравнение времени до насыщения ТТ с временем принятия решения функциями защитами о действии, обозначаемым как $t_{реш.1}$:

$$t_{нас.1} \geq t_{реш.1}. \qquad (А.4)$$

Срабатывание выходных реле быстродействующих устройств защиты часто происходит в условиях определённой степени насыщения ТТ. Это объясняет причину, по которой установленные зарубежными производителями путём испытаний микропроцессорных терминалов быстродействующих защит допустимые значения времени до насыщения ТТ при КЗ в зоне действия значительно ниже времени срабатывания защит.

При КЗ вне зоны действия возможны два варианта:

– функция УРЗ имеет специальный алгоритм распознавания данного режима и блокирует действие защиты;

– функция УРЗ такого алгоритма не имеет.

При наличии указанного алгоритма время до насыщения ТТ при КЗ вне зоны действия

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$t_{нас.2}$ должно удовлетворять условию:

$$t_{нас.2} \geq t_{реш.2}, \quad (А.5)$$

где $t_{реш.2}$ – время принятия решения функцией защиты о не действии (блокировке) в режиме внешнего КЗ.

Если указанный выше алгоритм отсутствует, то при КЗ вне зоны действия с наличием в токе апериодической составляющей, магнитопровод ТТ не должен насыщаться в течение времени, необходимого для отключения внешнего КЗ быстродействующей защитой смежного элемента, на котором произошло КЗ, с учётом возможной задержки в срабатывании последней. В этом случае время до насыщения ТТ должно удовлетворять неравенству:

$$t_{нас.2} \geq t_{ср.смеж} + \Delta t_{з.ср.смеж} + t_{О.В}, \quad (А.6)$$

где $t_{ср.смеж}$ – время срабатывания быстродействующей защиты смежного элемента по паспортным данным;

$\Delta t_{з.ср.смеж}$ – задержка в срабатывании быстродействующей защиты смежного элемента в переходном режиме;

$t_{О.В}$ – полное время отключения выключателя с учётом времени гашения электрической дуги во всех его полюсах.

Следует отметить, что при отсутствии в УРЗ специальных алгоритмов распознавания режима внешних КЗ время до насыщения ТТ $t_{нас.2}$, как правило, оказывается значительно выше, чем при КЗ в зоне действия $t_{нас.1}$. По указанным причинам результатом проверки по условию (А.6) с учетом предельного значения остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака в магнитопроводе ТТ часто является вывод о необходимости замены ТТ класса Р без немагнитного зазора в магнитопроводе на ТТ с немагнитным зазором или на электронный преобразователь тока.

Выбор ТТ из числа существующих. Теоретической основой методик проверки и выбора ТТ по условиям функционирования в переходных режимах является выражение (А.2). На его основе получено выражение (А.7), связывающее номинальные параметры ТТ с фактическими данными и допустимым временем до насыщения:

$$I_{1.ном} \cdot K_{ном} \cdot \left|z_2 + z_{н.ном}\right| \geq \frac{K_{п.р}(t_{реш})}{1 - K_r} \cdot I_{КЗ} \cdot \left|z_2 + z_{н.факт}\right|. \quad (А.7)$$

Вычисленное по выражению (А.7) значение $K_{ном}$ является допустимой номинальной предельной кратностью ТТ с принятым в расчёте номинальным первичным током $I_{1.ном}$, сопротивлением вторичной обмотки (z_2) и номинальным сопротивлением нагрузки ($z_{н.ном}$). Поэтому часто не удаётся выбрать ТТ класса Р, удовлетворяющий условию (А.6), и требуется переход на ТТ с немагнитным зазором.

Следует отметить, что приводимые в паспортных данных ТТ классов Р и PR, значения номинальных предельных кратностей токов в ряде случаев занижены. В частности, для ТТ

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

класса PR это было отмечено сотрудниками ООО «Эльмаш (УЭТМ)» в письме от 23.01.2020 № 64/04-59 «О внесении уточнений в ГОСТ Р «Методические указания»». Это может иметь место и у ТТ класса Р, причём погрешности результатов расчёта времени до насыщения ТТ по паспортным данным могут достигать 50% и более.

Расчёты показали, что во многих случаях расчётная амплитуда магнитной индукции в магнитопроводе ТТ $B_{m.\text{пасп}}$, соответствующая паспортному значению номинальной предельной кратности первичного тока ТТ класса Р $K_{\text{ном.пасп}}$ в условиях 10%-ной погрешности, располагается на ненасыщенном участке характеристики намагничивания, значительно ниже точки её перегиба. Однако при этом расчётная напряжённость магнитного поля, соответствующая 10%-ной погрешности, находится на насыщенной части характеристики намагничивания. Определённая по указанной напряжённости магнитного поля фактическая амплитуда магнитной индукции $B_{m.\text{факт}}$ оказывается выше, чем $B_{m.\text{пасп}}$, соответственно, фактическая номинальная предельная кратность первичного тока $K_{\text{ном.факт}}$ оказывается выше, чем её паспортное значение. Учитывая изложенное, при выборе ТТ класса Р целесообразно выполнить расчёт фактической номинальной предельной кратности первичного тока ТТ $K_{\text{ном.факт}}$.

Порядок вычисления $K_{\text{ном.факт}}$ следующий.

<u>1. С использованием характеристики намагничивания ТТ</u>

1.1. По паспортным данным вычисляется паспортное значение напряжения, соответствующего нормированному значению ε (10 или 5%):

$$U_{\text{нас.пасп}} = K_{\text{ном.пасп}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot \sqrt{(R_2 + 0{,}8 \cdot z_{\text{н.ном}})^2 + (X_2 + 0{,}6 \cdot z_{\text{н.ном}})^2}\ . \quad (\text{А.8})$$

1.2. Вычисляется паспортное значение амплитуды магнитной индукции $B_{m.\text{нас.пасп}}$, соответствующее ε (10 или 5%) по выражению:

$$B_{m.\text{нас.пасп}} = \frac{U_{\text{нас.пасп}}}{222 \cdot w_2 \cdot s_{\text{м}}}\ , \quad (\text{А.9})$$

где w_2 – число витков вторичной обмотки ТТ;

$s_{\text{м}}$ – сечение магнитопровода, м^2.

1.3. Вычисляется значению напряженности магнитного поля в сердечнике ТТ, соответствующее нормированного значения ε (10 или 5%):

$$H_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon\%}{100} \cdot K_{\text{ном}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot \frac{w_2}{l_{\text{ср}}}\ . \quad (\text{А.10})$$

1.4. По характеристике намагничивания ТТ $B_m(H)$ по H_{ε} определяется фактическое значение амплитуды магнитной индукции $B_{m.\text{нас.факт}}$, соответствующее нормированному значению ε (10 или 5%).

1.5. Вычисляется отношение магнитных индукций по выражению:

$$k_{B.\text{нас}} = \frac{B_{m.\text{нас.факт}}}{B_{m.\text{нас.пасп}}}\ . \quad (\text{А.11})$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

1.6. Производится расчёт фактической номинальной предельной кратности тока ТТ $K_{\text{ном.факт}}$ по выражению:

$$K_{\text{ном.факт}} = k_{B.\text{нас}} \cdot K_{\text{ном.пасп}}, \qquad (A.12)$$

где $K_{\text{ном.пасп}}$ − паспортное значение номинальной предельной кратности.

1.7. Вычисляется фактическое напряжение $U_{2.sin}$ на вторичной обмотке при протекании тока КЗ:

$$U_{2.\sin} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{факт}}, \qquad (A.13)$$

где $K_{\text{факт}} = \dfrac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$;

$I_{\text{КЗ}}$ − действующее значение периодической составляющей тока КЗ;

$I_{1.\text{ном}}$ − номинальный первичный ток ТТ.

1.8. Вычисляется фактическое значение напряжения, соответствующего нормированному значению ε (10 или 5%):

$$U_{\text{нас.факт}} = K_{\text{ном.факт}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot \sqrt{(R_2 + 0{,}8 \cdot z_{\text{н.ном}})^2 + (X_2 + 0{,}6 \cdot z_{\text{н.ном}})^2}\,. \qquad (A.14)$$

1.9. Вычисляется параметр *A*:

$$A = \frac{U_{sat.\text{факт}}}{U_{2.\sin}}\,. \qquad (A.15)$$

1.10. Далее по универсальным характеристикам ТТ с ПХН по значению *A* находится время до насыщения ТТ $t_{\text{нас}}$ без учёта остаточной магнитной индукции, а по значению $A_r = A \cdot (1 - K_r)$ − с учётом остаточной индукции.

Расчёт показал, что, например, у ТТ типа ТВТ-110 – 1000/5 паспортному значению номинальной предельной кратности $K_{\text{ном.пасп}}$ = 24 соответствует амплитуда магнитной индукции в сердечнике 1,15 Тл. Однако действующее значение напряжённости магнитного поля в условиях 10%-ной погрешности (ε = 10 %), определённое по выражению (А.10)

$$H_\varepsilon = \frac{\varepsilon\%}{100} \cdot K_{\text{ном}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot \frac{w_2}{l_{\text{ср}}} = \frac{10}{100} \cdot 24 \cdot 5 \cdot \frac{200}{1{,}95} = 1231 \text{ А/м},$$

где $w_2 = 200$ вит. – число витков вторичной обмотки ТТ;

$l_{\text{ср}} = 1{,}95$ м – средняя длина силовой линии магнитопровода,

после подстановки числовых значений равно: $H_\varepsilon \approx 1231$А/м.

Такому значению напряжённости магнитного поля для холоднокатаной электротехнической стали марки 3408 соответствует амплитуда магнитной индукции $B_{m.\text{факт}} \approx 1{,}9$ Тл. Таким образом, фактическое значение номинальной предельной кратности ТТ равно:

$$K_{\text{ном.факт}} = k_{B.\text{нас}} \cdot K_{\text{ном.пасп}} = \frac{1{,}9}{1{,}15} \cdot K_{\text{ном.пасп}} \approx 1{,}65 \cdot K_{\text{ном.пасп}},$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

т.е. превышает паспортное значение в 1,65 раз.

2. С использованием вольт - амперной характеристики (ВАХ) ТТ

2.1 По выражению (А.8) вычисляется паспортное значение напряжения, соответствующее нормированному значению ε (10 или 5%):

$$U_{\text{нас.пасп}} = K_{\text{ном.факт}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot \sqrt{(R_2 + 0{,}8 \cdot z_{\text{н.ном}})^2 + (X_2 + 0{,}6 \cdot z_{\text{н.ном}})^2}\,.$$

2.2. Вычисляется действующее значение намагничивающего тока ТТ, соответствующее 5%-ной или 10%-ной полной погрешности ε:

$$I_{0.\varepsilon} = \varepsilon \cdot I_{\text{КЗ}}\,, \qquad \text{(А.16)}$$

2.3. По ВАХ ТТ при токе $I_{0.\varepsilon}$ определяется фактическое напряжение насыщения ТТ при синусоидальном токе $U_{\text{нас.факт}}$.

2.4. Вычисляется отношение напряжений насыщения по выражению:

$$K_{U.\text{нас}} = \frac{U_{\text{нас.факт}}}{U_{\text{нас.пасп}}}\,. \qquad \text{(А.17)}$$

2.5. Производится расчёт фактической номинальной предельной кратности тока ТТ $K_{\text{ном.факт}}$ по выражению:

$$K_{\text{ном.факт}} = K_{U.\text{нас}} \cdot K_{\text{ном.пасп}}. \qquad \text{(А.18)}$$

2.6. Далее по выражению (А.15) вычисляется параметр *A* и по универсальным кривым ТТ с ПХН находится время до насыщения ТТ $t_{\text{нас}}$ без учёта остаточной магнитной индукции, а по значению $A_r = A \cdot (1 - K_r)$ − с учётом остаточной индукции.

Очевидно, что расчёт времени до насыщения ТТ по паспортным данным без проверки значения номинальной предельной кратности и при необходимости его корректировки может дать заниженный результат.

Выдача задания производителю ТТ с учётом переходных режимов. Производитель ТТ класса P или PR должен иметь следующие сведения:

- основные:
  - номинальное первичное напряжение ($U_{1.\text{ном}}$);
  - первичный ($I_{1.\text{ном}}$) и вторичный ($I_{2.\text{ном}}$) номинальные токи;
  - класс точности (5P, 5PR или 10P, 10PR);
  - фактическая вторичная нагрузка ($z_{\text{н.факт}}$);
  - предельное вторичное напряжение ($U_{\text{нас.факт}}$) или ЭДС (E_{ALF});
  - для класса PR постоянная времени вторичного контура (T_s);
- дополнительные:
  - действующее значение периодической составляющей тока КЗ ($I_{\text{КЗ}}$);
  - значение коэффициента переходного режима ($K_{\text{п.р}}$);
  - номинальная предельная кратность ($K_{\text{ном}}$);

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

- номинальное сопротивление нагрузки ($z_{\text{н.ном}}$);
- постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ (T_p).

Значение номинального первичного тока ($I_{1.\text{ном}}$) определяют по нагрузке присоединения. Значение номинального вторичного тока ($I_{2.\text{ном}}$) в электроустановках сверхвысокого напряжения и напряжением 220 кВ целесообразно принять равным 1 А, так как это облегчает условия работы ТТ в переходном режиме по сравнению с номинальным вторичным током, равным 5 А.

Номинальное предельное вторичное напряжение, соответствующее нормированному значению полной погрешности (10 или 5%), для ТТ классов P и PR определяется с помощью следующего выражения:

$$U_{\text{нас.ном}} = K_{\text{ном}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot \sqrt{(R_2 + 0{,}8 \cdot z_{\text{н.ном}})^2 + (X_2 + 0{,}6 \cdot z_{\text{н.ном}})^2} = K_{\text{ном}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}. \quad \text{(A.19)}$$

Согласно стандартам [21, 22] параметры ТТ классов P и PR не нормируются в переходных режимах КЗ. Для работы в указанных режимах согласно стандартам [21, 22] предназначены ТТ классов TPZ и TPY, которые характеризуются предельным значением вторичного напряжения ($U_{\text{н.ном}}$) или ЭДС (E_{al}), соответствующим максимальному допустимому значению погрешности по периодической составляющей или по мгновенному значению, соответственно. Указанное напряжение (ЭДС) определяется с помощью следующего выражения:

$$U_{\text{н.ном}} = \frac{K_{\text{п.р.ном}}}{(1 - K_r)} \cdot K_{\text{п.ном}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (R_2 + R_{\text{н.ном}}), \quad \text{(A.20)}$$

где $K_{\text{п.р.ном}} = K_{\text{п.р}}(t_{\text{реш}})$ – значения коэффициента переходного режима;

$K_{\text{п.ном}} = \dfrac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}}$ – номинальное значение кратности периодической составляющей тока КЗ в переходном режиме.

При выборе ТТ класса P по условию переходного режима КЗ допустимо считать, что

$$U_{\text{нас.ном}} \approx U_{\text{н.ном}}, \quad \text{(A.21)}$$

тогда фактическое предельное вторичное напряжение равно

$$U_{\text{нас.факт}} \approx \frac{K_{\text{п.р}}(t_{\text{реш}})}{(1 - K_r)} \cdot \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (z_2 + z_{\text{н.факт}}). \quad \text{(A.22)}$$

где z_2 – сопротивления вторичной обмотки ТТ.

Значение сопротивления вторичной обмотки может варьироваться в зависимости от конструкции ТТ, однако реальный диапазон значений будет составлять от 20 до 80 % от номинальной нагрузки.

Требуемое номинальное сопротивление нагрузки ($z_{\text{н.ном}}$) принимается равным ближайшему к $z_{\text{н.факт}}$ значению (в сторону увеличения) из ряда рекомендуемых значений [21, 22].

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

С помощью приближенного значения фактического предельного вторичного напряжения ($U_{\text{нас.факт}}$), полученного по выражению (А.22), определяется значение требуемой предельной кратности:

$$K_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{нас.факт}}}{I_{2.\text{ном}}(z_2 + z_{\text{н.ном}})}. \qquad (А.23)$$

Часто экономически целесообразно задать небольшую номинальную нагрузку и высокий коэффициент предельной кратности, вместо того, чтобы поступать наоборот [3]. Однако, в общем случае рекомендуется дать возможность производителю оптимизировать отношение между активным сопротивлением обмотки ТТ и площадью поперечного сечения сердечника. По указанной причине достаточно задать значения $I_{1.\text{ном}}$, $I_{2.\text{ном}}$, $I_{\text{КЗ}}$, $z_{\text{н.факт}}$, $U_{\text{нас.факт}}$, а оптимальное соотношение между номинальной нагрузкой и номинальной предельной кратности определяется производителем из следующего неравенством:

$$U_{\text{нас.факт}} \le \frac{K_{\text{п.р}}(t_{\text{реш}})}{(1-K_r)} \cdot \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{1.\text{ном}}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (z_2 + z_{\text{н.факт}}) \approx K_{\text{ном}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (z_2 + z_{\text{н.ном}}). \qquad (А.24)$$

Значение коэффициента переходного режима ($K_{\text{п.р}}$) для ТТ класса Р согласно [1] можно определить или с помощью полного выражения

$$K_{\text{п.р}}(t) = \sin\alpha \cdot \cos\delta \cdot e^{-\frac{t}{T_p}} + \cos\alpha \cdot \cos\delta \cdot \omega \cdot T_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}}\right) - \\ - \sin(\omega \cdot t + \alpha + \delta) + \cos\alpha \cdot \sin\delta, \qquad (А.25)$$

или с помощью упрощённого

$$K_{\text{п.р}}(t) = \omega T_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}}\right) + 1, \qquad (А.26)$$

где δ – начальная фаза периодической составляющей первичного тока в момент возникновения КЗ;

α – угол ветви вторичного тока ТТ.

Использование упрощённого выражения (А.26) при малых значениях времени принятия решения (меньше 10 мс) приводит к существенному завышению коэффициента переходного режима ТТ класса Р (в несколько раз). Применение выражения (А.25) сопряжено с большим количеством расчетов для определения наихудшего значения угла включения. Поэтому при значениях $t_{\text{реш}}$ меньше 10 мс для определения значения коэффициента переходного режима ТТ класса Р рекомендуется использовать универсальные характеристики, приведённые в Приложении А ГОСТ Р 58669-2019 [1].

В цикле неуспешного АПВ (О – В – О) переходный процесс в ТТ класса Р при возникновении КЗ и его отключении по существу совпадает с переходным процессом при включении на КЗ в цикле В – О. Перед включением на второе КЗ магнитная индукция в сердечнике за

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

время бестоковой паузы снижается до предельной остаточной магнитной индукции. В наиболее тяжёлом случае включения на второе КЗ направление перемагничивания сердечника ТТ класса Р совпадает со знаком остаточной индукции. Это позволяет распространить результаты расчёта времени до насыщения ТТ класса Р с учётом предельной остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака в цикле В – О на второе КЗ в цикле АПВ.

Значение коэффициента переходного режима ($K_{\text{п.р}}$) для ТТ класса PR согласно [22] можно определить или с помощью полного выражения:

$$K_{\text{п.р}}(t) = \frac{\omega \cdot T_p \cdot T_s}{T_p - T_s}\left(e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}}\right) + \frac{\omega \cdot T_s}{1+(\omega \cdot T_s)^2} \cdot \left[e^{-\frac{t}{T_s}} - \sqrt{1+(\omega \cdot T_s)^2}\,\sin\left(\omega \cdot t + arctg\frac{1}{\omega \cdot T_s}\right)\right], \quad \text{(A.27)}$$

или с помощью упрощенного

$$K_{\text{п.р}}(t) = \frac{\omega \cdot T_p \cdot T_s}{T_p - T_s}\left(e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}}\right) + 1\,. \quad \text{(A.28)}$$

При определении значения $K_{\text{п.р}}$ в режиме АПВ для ТТ класса PR возможны два подхода:

1. ТТ не насыщается во время первого КЗ в цикле АПВ. Тогда коэффициент переходного режима равен:

$$K_{\text{п.р.АПВ}} = K_{\text{п.р}}(t_{\text{кз1}}) \cdot e^{-\frac{t_{\text{бт}} + t_{\text{реш}}}{T_s}} + K_{\text{п.р}}(t_{\text{реш}})\,, \quad \text{(A.29)}$$

где $t_{\text{кз1}}$ – длительность первого КЗ в цикле АПВ;

$t_{\text{бт}}$ – длительность бестоковой паузы в цикле АПВ.

2. Если ТТ насыщается во время первого КЗ в цикле АПВ (т.е. $t_{\text{нас}} < t_{\text{кз1}}$), то изменение потокосцепления после момента времени $t_{\text{нас}}$ описать с помощью аналитического выражение на основе метода ПХН невозможно. Указанное объясняется тем, что рабочая точка выходит за пределы линейного участка характеристики намагничивания ТТ. В данном случае расчёт значения коэффициента переходного режима должен выполняться с помощью упрощённой математической модели ТТ. Алгоритм указанного расчета подробно рассмотрен в [23].

Как указано выше, параметры ТТ класса PR не нормируются в переходных режимах КЗ, поэтому значение постоянная времени вторичного контура (T_s) для них определяется исходя из требований мгновенной погрешности для ТТ класса TPY.

Максимальное значение мгновенной погрешности ($\hat{\varepsilon}$) для ТТ класса TPY согласно [21] определяется с помощью следующего выражения:

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$$\hat{\varepsilon} = \frac{K_{\text{п.р.ном}}}{\omega \cdot T_s} \cdot 100\% , \qquad (A.30)$$

тогда постоянная времени вторичного контура должна удовлетворять следующему неравенству:

$$T_s \geq \frac{K_{\text{п.р}}}{\omega \cdot 0{,}1} . \qquad (A.31)$$

Таким образом, постоянная времени вторичного контура определяется итерационным способом с помощью выражений (А.28) (или (А.29) для режима АПВ) и (А.31) в следующей последовательности:

1. Исходя из требований к угловой погрешности для ТТ класса TPY (±60 мин) задаётся начальное приближение

$$T_s = \frac{1}{\omega \cdot tg(\delta)} = \frac{1}{314 \cdot tg(1^{\circ})} \approx 0{,}182 \text{ с.}$$

2. По выражению (А.28) (или (А.29) для режима АПВ) рассчитывают значение $K_{\text{п.р}}(t_{\text{реш}})$ (или $K_{\text{п.р.АПВ}}$ для режима АПВ).
3. Проверяют выполнение условия (А.31).
4. Если условие не выполняется, то значение T_s увеличивают на 5%.
5. Пункты 2 – 4 повторяют пока условие (А.31) будет выполняться.

Подход к формированию задания производителю ТТ во много схож с методикой выбора из каталога существующих ТТ.

Примеры формирования задания производителю ТТ приведены в следующих разделах: для ТТ класса P – 3.7; для ТТ класса PR – 6.7.

Приближённые методы расчёта токов насыщенных ТТ. Как правило, работники проектных и эксплуатационных организаций не имеют возможности моделирования переходных процессов в группах ТТ и проведения испытаний УРЗ в реальном масштабе времени с помощью симуляторов, то в методиках проверки и выбора ТТ используются универсальные характеристики ТТ с прямоугольной характеристикой намагничивания (ПХН) для переходного режима КЗ, приведённые в Приложении Б:

– относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока ТТ (Приложение Б, рис. Б.1);

– угловая погрешность ТТ по первой гармонике в переходном режиме (Приложение Б, рис. Б.2);

– относительное действующее значение первой гармоники намагничивающего тока ТТ в переходном режиме (Приложение Б, рис. Б.3).

Кроме того, так как в терминалах защит, в основном, используется выделение первой гармоники подводимых токов с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) методом

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

скользящего окна, то в Приложении Б на рис. Б.4 приведены зависимости действующего значения первой гармоники, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ с момента начала КЗ до момента насыщения. Указанные характеристики являются функциями времени и позволяют оценить динамику поведения токовых и дифференциальных отсечек микропроцессорных устройств защиты в переходных режимах, в первую очередь, возможность срабатывания или отказа в срабатывании, задержку в срабатывании защиты или её неселективное действие.

Значения вторичных и намагничивающих токов ТТ, полученные с помощью универсальных характеристик ТТ ПХН, позволяют оценить поведение защит в наихудших, предельно возможных условиях. Поэтому при проверках условий срабатывания УРЗ по разработанным методикам значения коэффициентов отстройки допускается принимать равным единице ($K_{отс}$ = 1). Следует отметить, что обоснованное использование ПХН – аппроксимации характеристик намагничивания ТТ класса Р допускается при условии выполнения критерия применимости ПХН [1]. При необходимости результаты расчётов могут быть уточнены с помощью ЭВМ или путем использования симуляторов переходных режимов, например, RTDS.

Обеспечение правильного функционирования быстродействующих УРЗ в переходных режимах. Особое внимание в данном документе уделено обеспечению быстродействия УРЗ в переходных режимах близких КЗ в зоне действия с насыщением ТТ. Теоретические исследования, моделирование с помощью ЭВМ и испытания на симуляторе RTDS показали, что в таких режимах времена срабатывания ДЗШ и ДЗО не превышают паспортных значений. Успешно функционируют токовые отсечки ДЗЛ и резервных защит линий электропередачи. Без замедлений срабатывают при близких КЗ первые ступени ДЗ от междуфазных КЗ и КЗ на землю. С использованием новых алгоритмических решений, повышающих устойчивость функционирования защит, правильно работают дифференциальные отсечки сосредоточенных объектов: силовых трансформаторов, автотрансформаторов, их ошиновок на стороне НН и шунтирующих реакторов. Соответствующие обоснования и ссылки приведены в тексте Методических указаний.

При удалённых КЗ в зоне действия может иметь место некоторое замедление первых ступеней ДЗ защищаемых линий электропередачи. Но в этом случае срабатывают ДЗ противоположных концов линий и ускоренное отключение их может быть достигнуто путём передачи отключающих импульсов.

ООО НПП «ЭКРА» постоянно проводит работы по дальнейшему повышению быстродействия токовых отсечек дифференциальных защит силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов. Например, с целью обеспечения селективности дифференциальных защит ошиновок стороны НН силовых трансформаторов и автотрансформаторов при КЗ вне зоны действия могут использоваться следующие решения:

- алгоритм «детектор насыщения ТТ»;
- быстродействующий элемент дифференциальных и токовых отсечек с временем

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

принятия решения, не превышающим 3,4 мс.

К числу основных требований к быстродействующим устройствам РЗ при насыщении ТТ в переходных режимах относится также отсутствие неселективных срабатываний при КЗ вне зоны действия. Данное требование при близких КЗ вне зоны действия («за спиной» защиты) с подключением объекта защиты на сумму токов ТТ выполняется с помощью сравнения направления векторов первой гармоники вторичных токов ТТ. ДЗ, подключённые к ТТ в цепях линий не срабатывают при насыщении ТТ благодаря органам направления и выходу значений сопротивлений за границу характеристик срабатывания, что подтверждено исследованиями и испытаниями на симуляторе RTDS.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.
УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ И УГЛОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПЕРВОЙ ГАРМОНИКИ

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

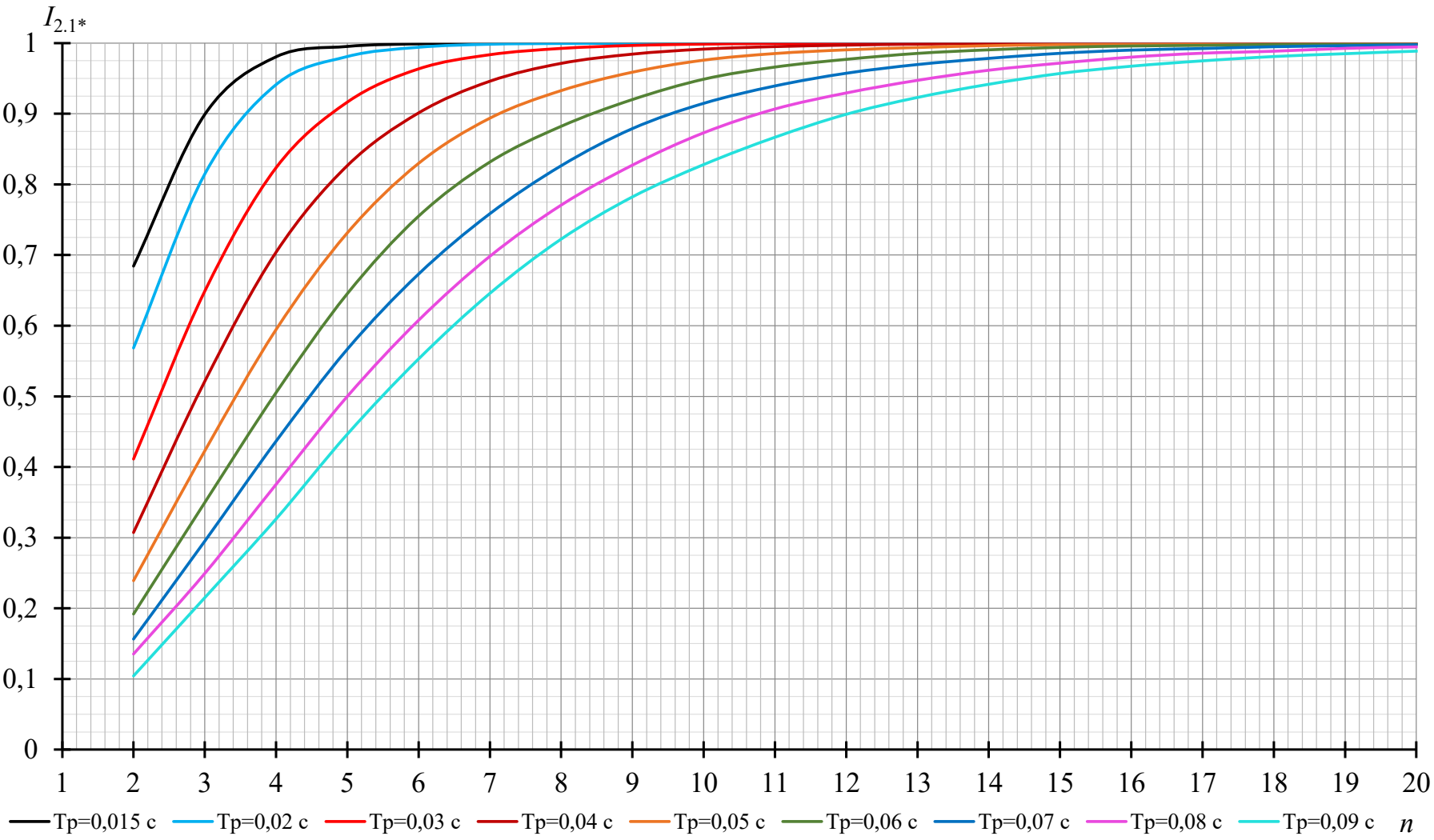


Рисунок Б.1 – Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока одиночного ТТ с ПХН

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

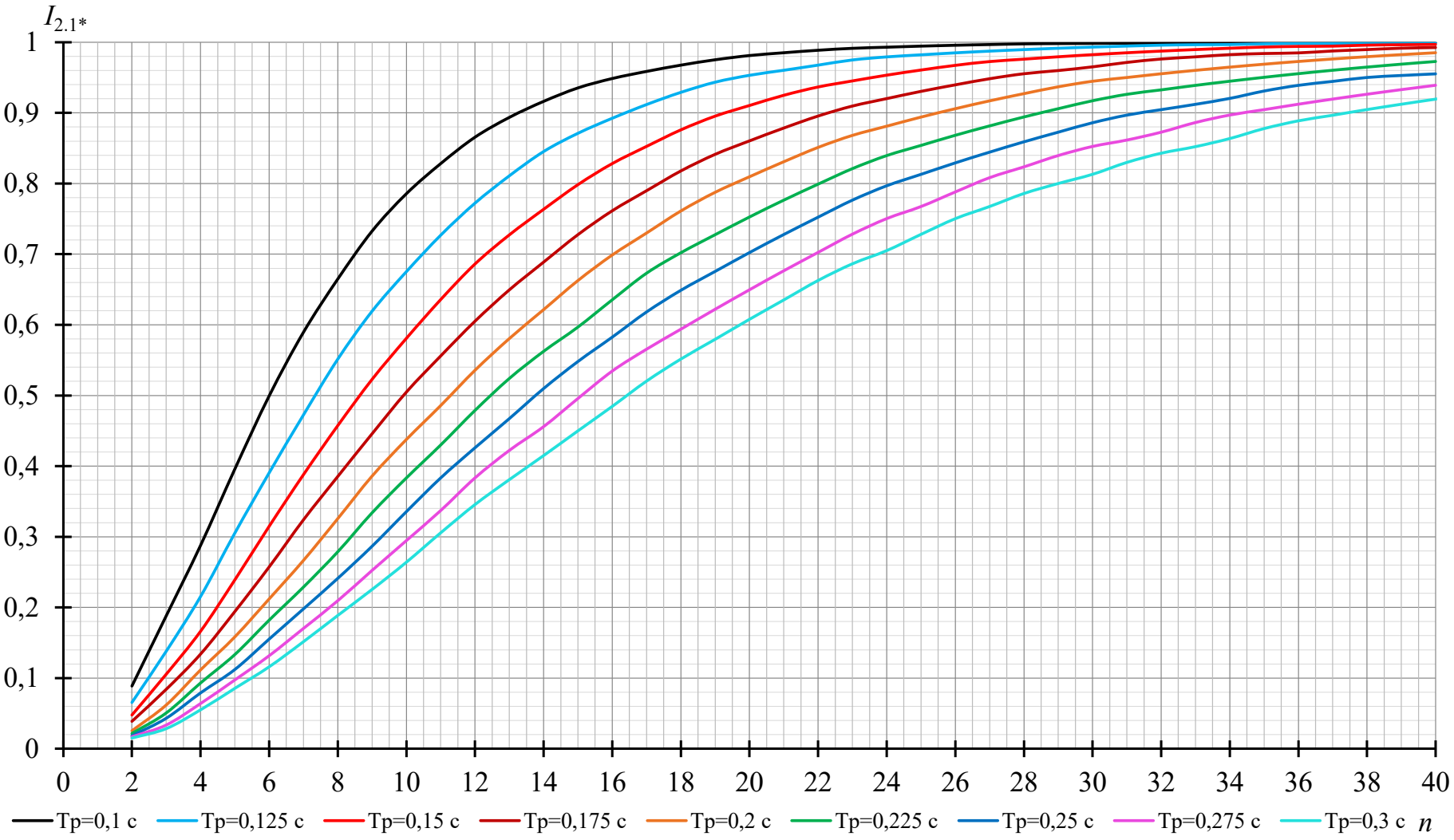


Рисунок Б.1 (Продолжение)

Редакция от 13.09.2021

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

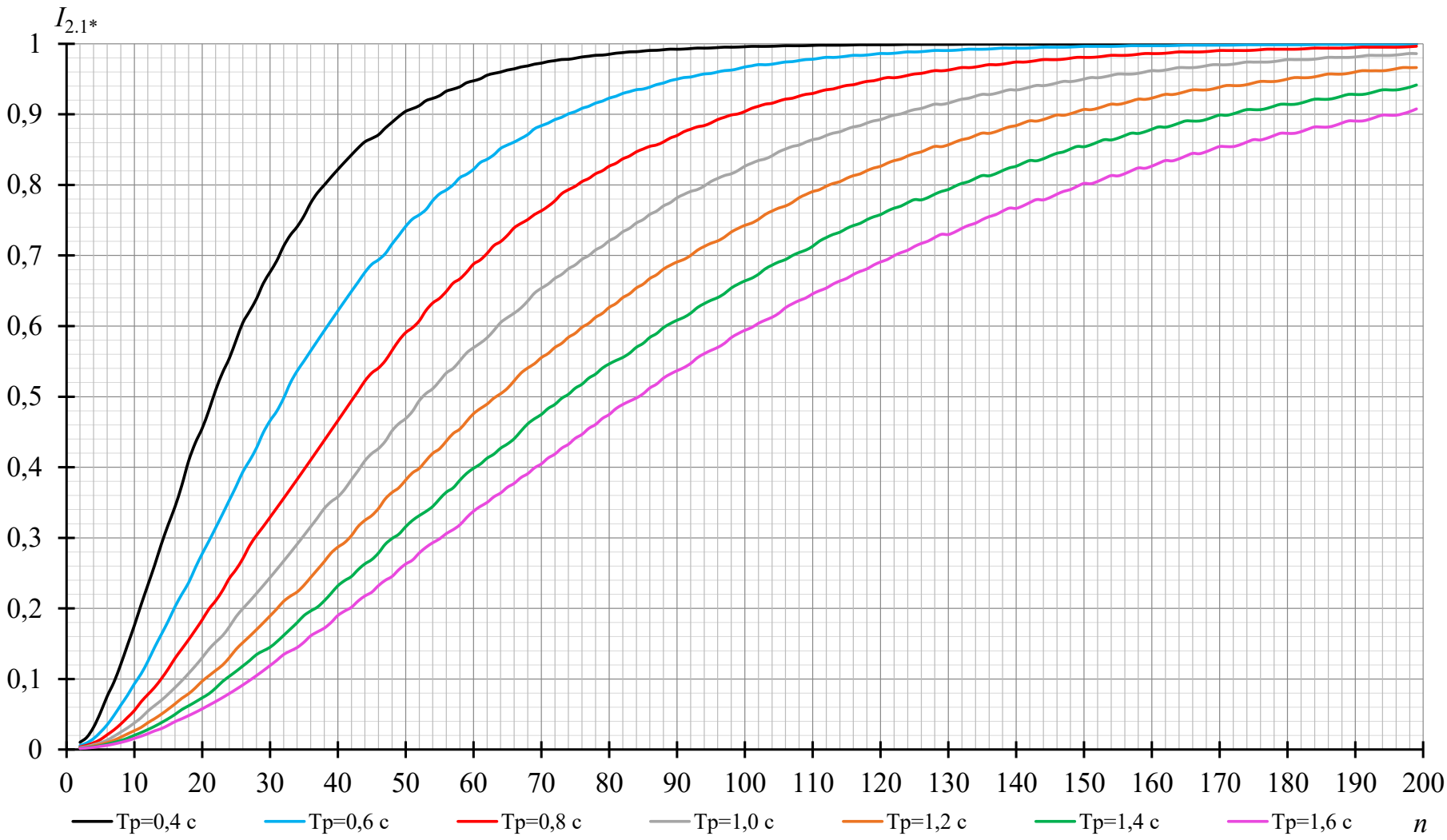


Рисунок Б.1 (Окончание)

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

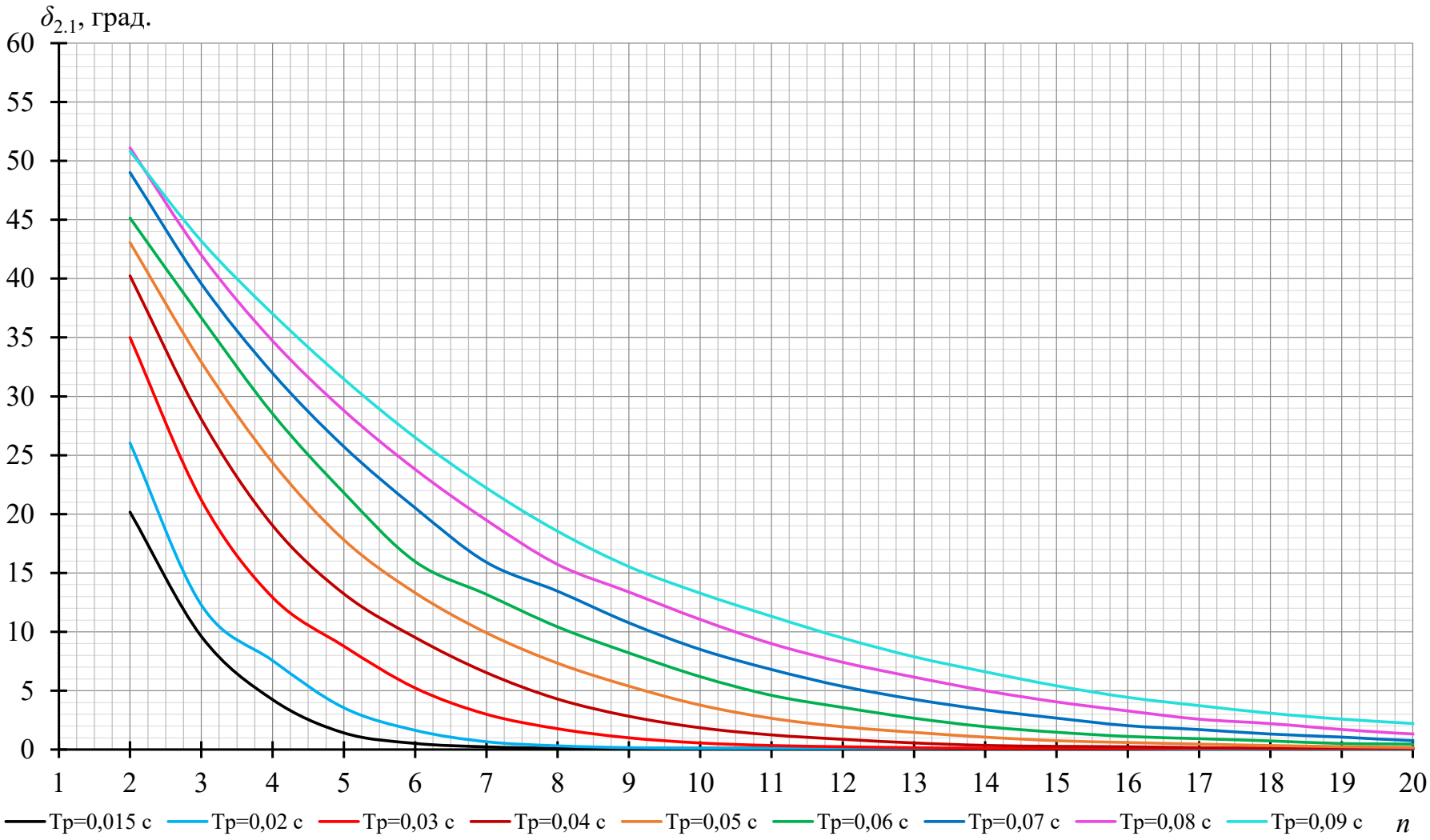


Рисунок Б.2 – Угловая погрешность первой гармоники вторичного тока одиночного ТТ с ПХН

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

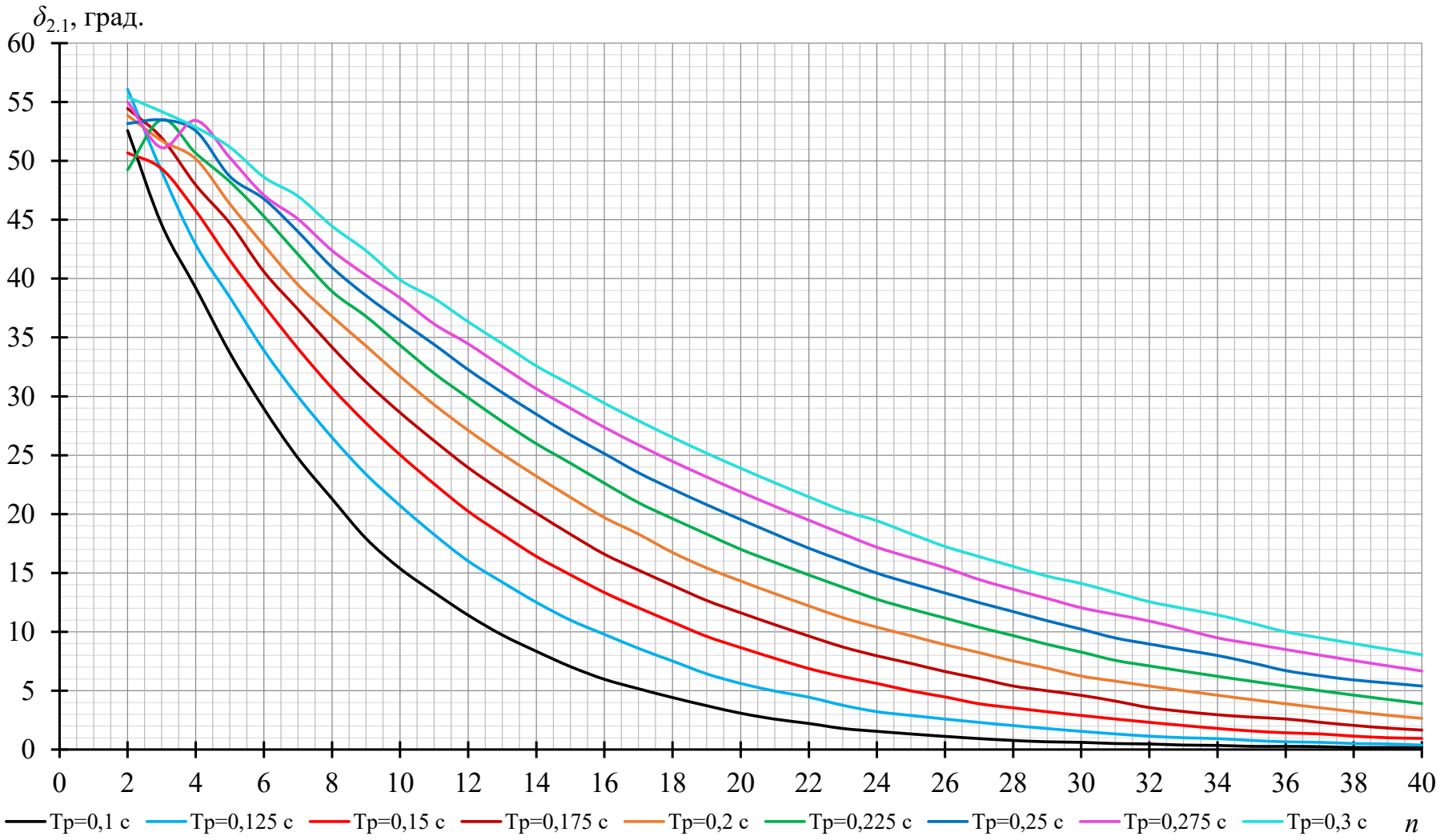


Рисунок Б.2 (Продолжение)

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

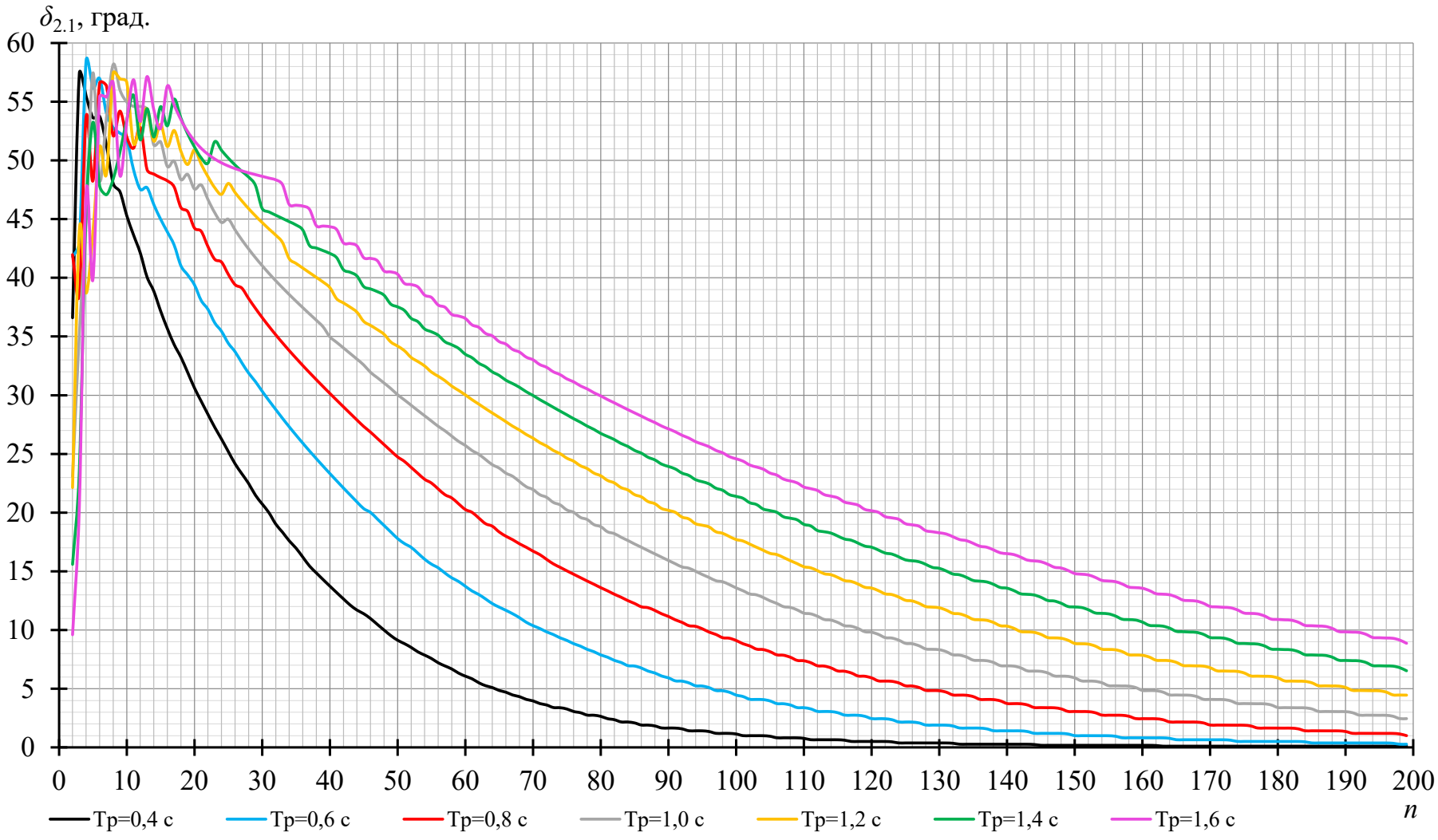


Рисунок Б.2 (Окончание)

Редакция от 13.09.2021

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

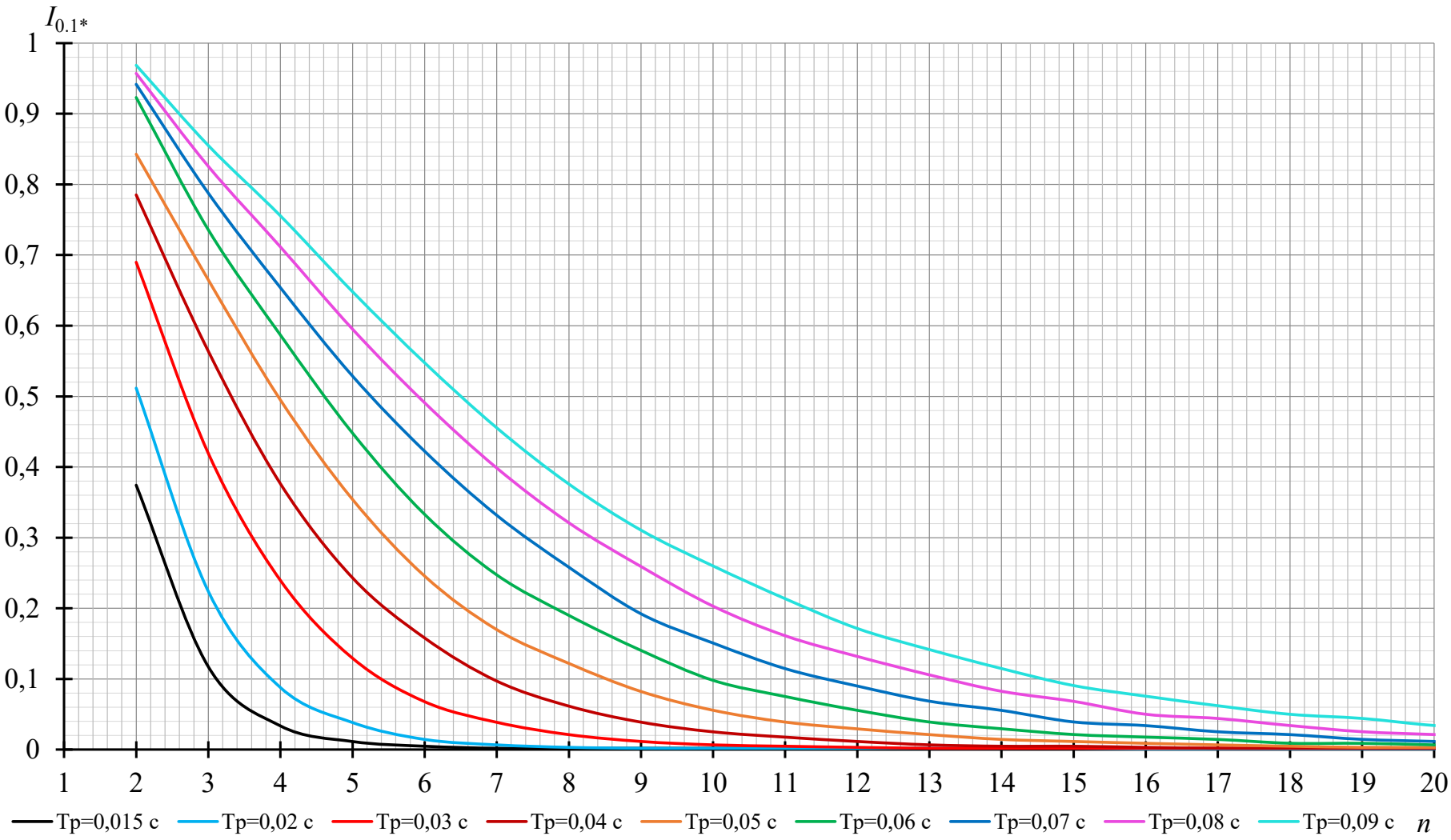


Рисунок Б.3 – Относительное действующее значение первой гармоники намагничивающего тока одиночного ТТ с ПХН

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

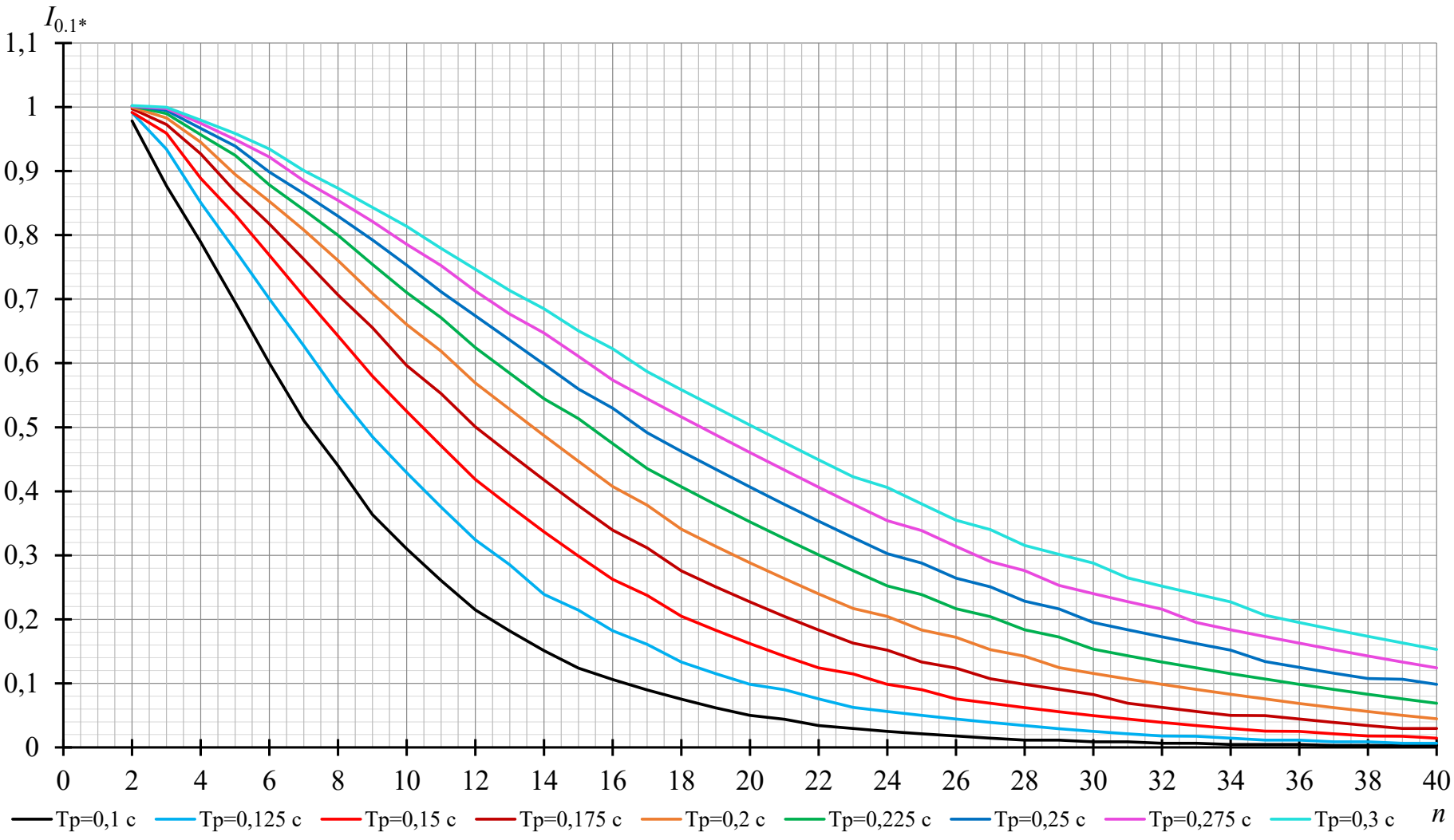


Рисунок Б.3 (Продолжение)

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

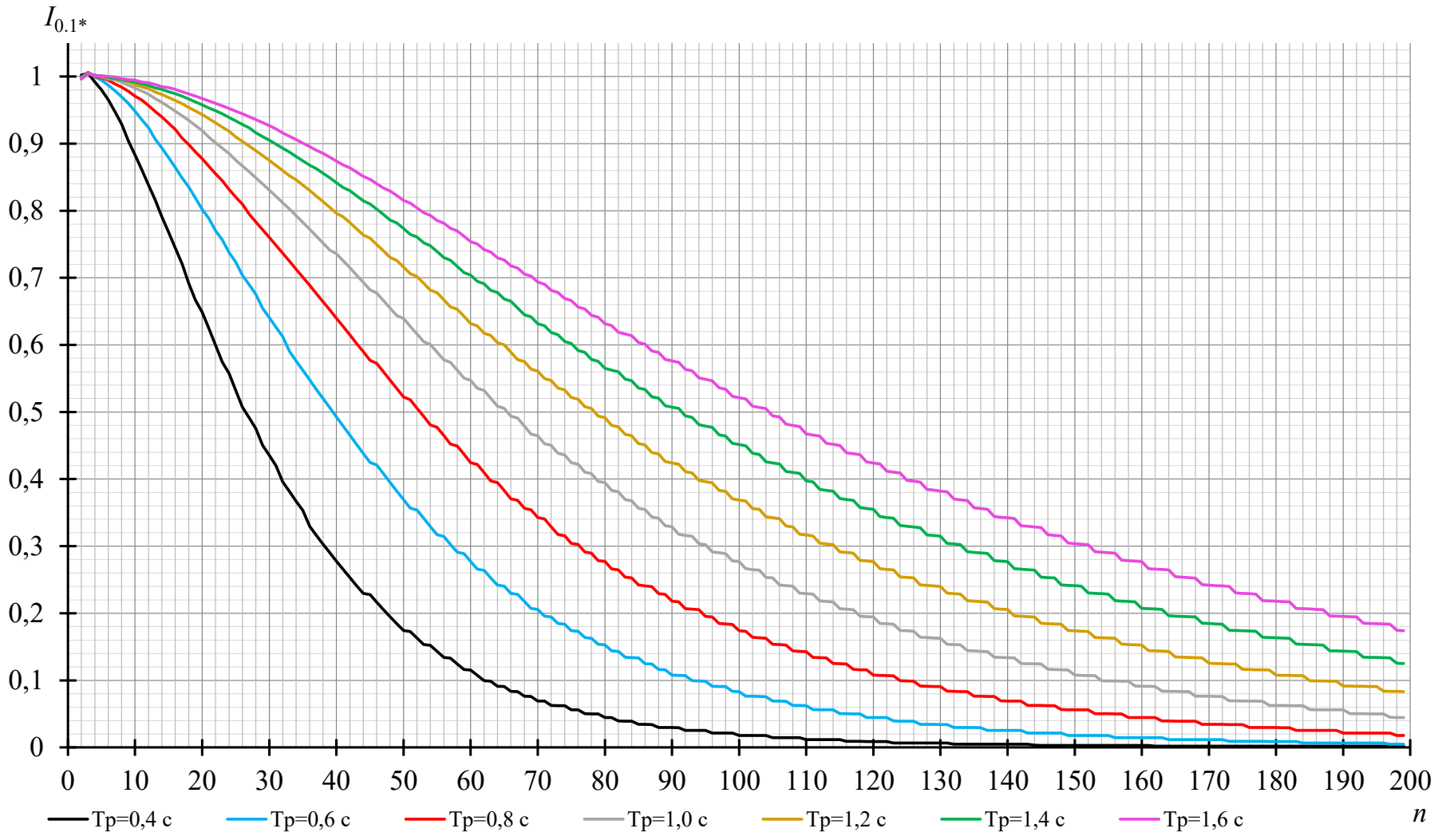


Рисунок Б.3 (Окончание)

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

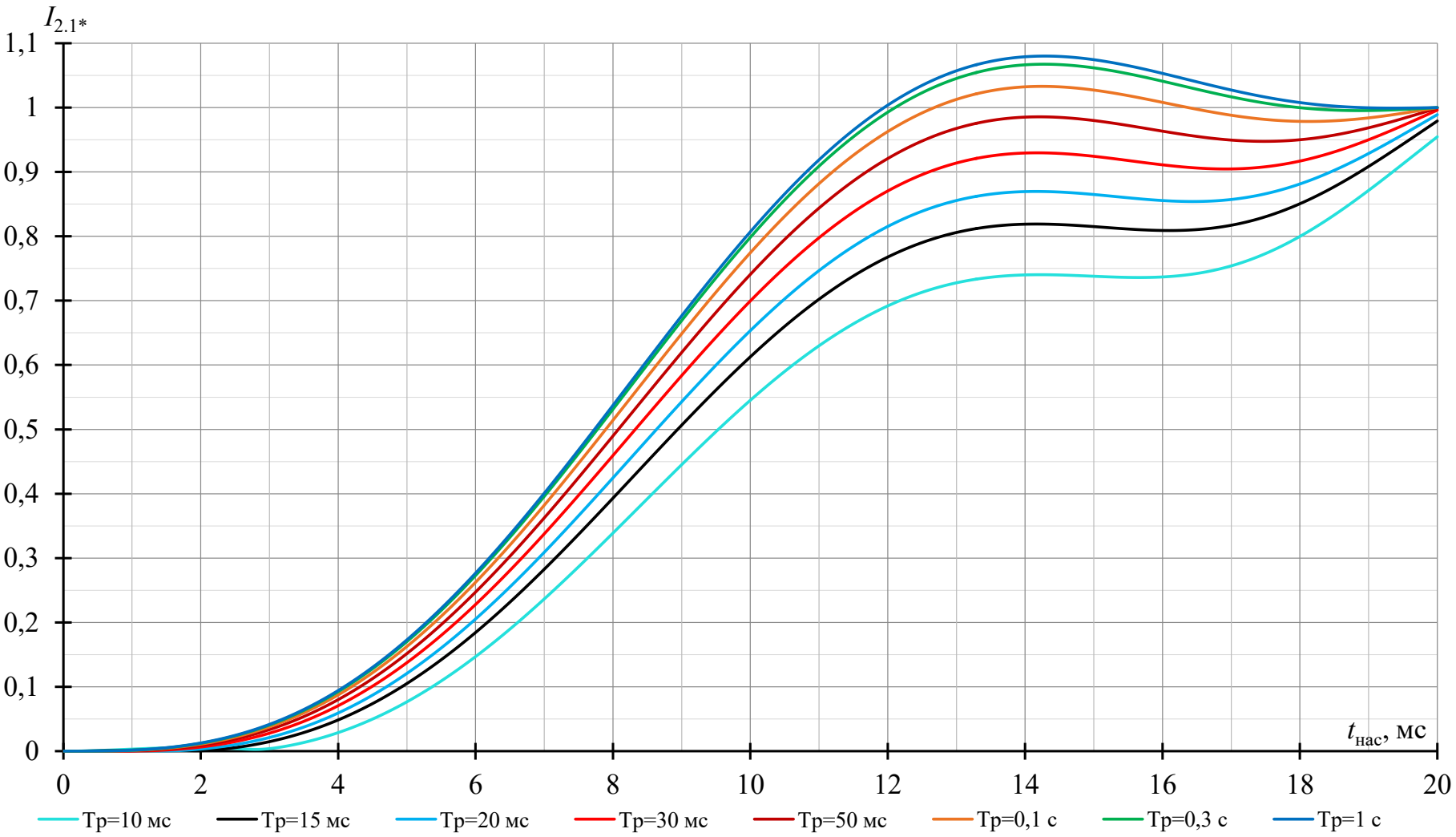


Рисунок Б.4 – Относительное действующее значение первой гармоники, содержащейся в импульсе вторичного тока ТТ

Редакция от 13.09.2021

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

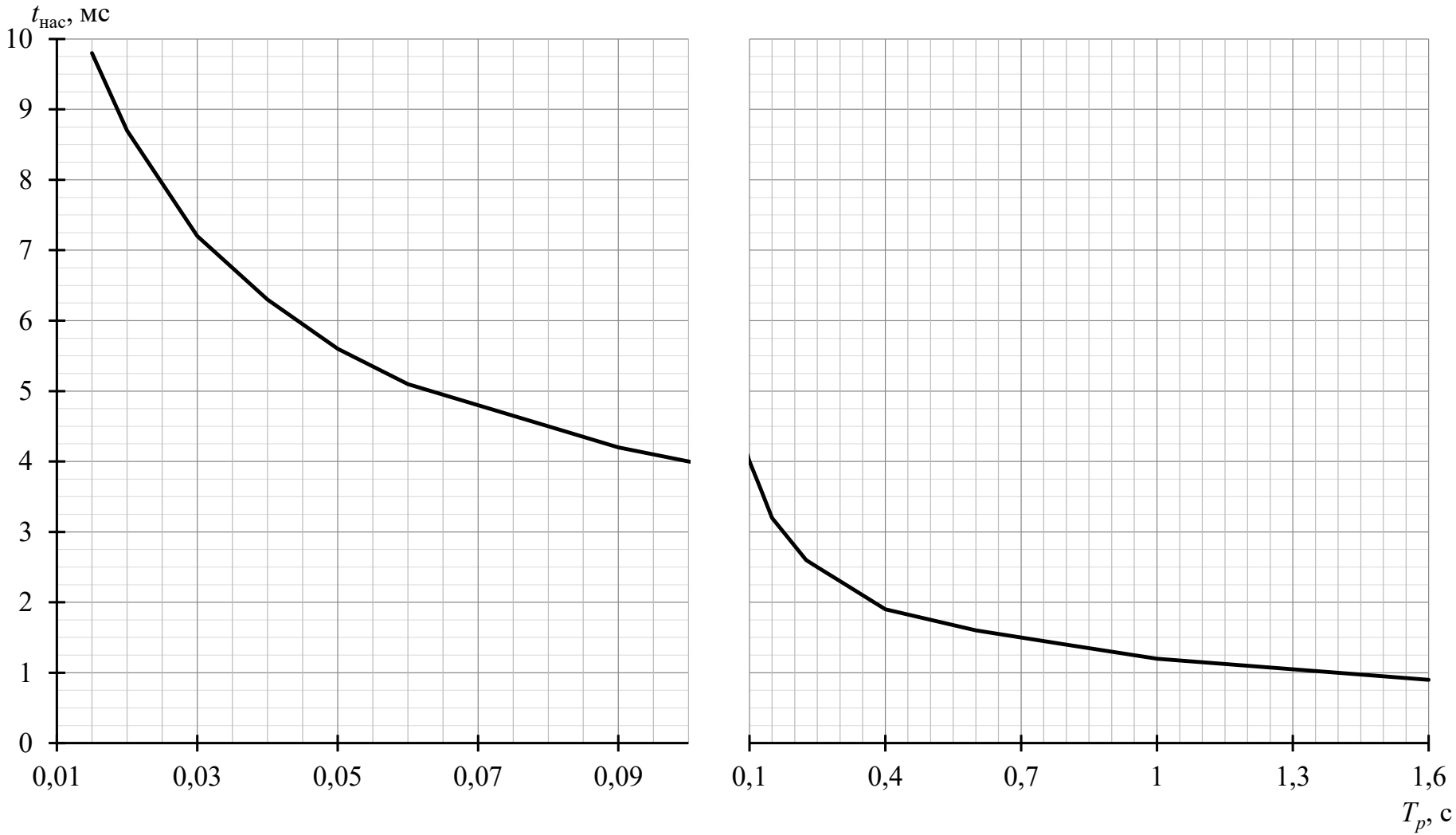


Рисунок Б.5 – Моменты насыщения одиночного ТТ с ПХН на втором периоде переходного режима

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру