

Министерство топлива и энергетики Российской Федерации  
**ПЕТЕРБУРГСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**  
повышения квалификации руководящих работников  
и специалистов (ПЭИпк)

Кафедра релейной защиты  
и автоматики энергосистем

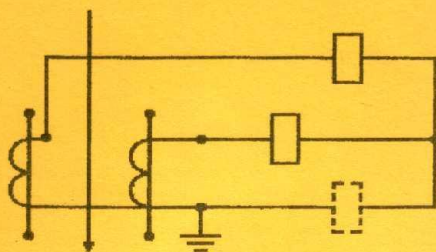
М. А. ШАБАД

**ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА**  
**в схемах релейной защиты**

часть первая

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И РАСЧЕТНАЯ ПРОВЕРКИ

Конспект лекций



Санкт-Петербург

1995

## Предисловие

Трансформатор тока — один из наиболее распространенных видов электрических трансформаторов-устройств, преобразующих или изменяющих параметры электрической энергии ("Transformo" на латинском языке означает "преобразую").

Измерительные трансформаторы тока (ТТ) своей первичной обмоткой включаются последовательно в измеряемую (защищаемую) цепь электроустановки, например, в линию электропередачи. Вторичная обмотка ТТ замыкается на измерительные приборы (амперметры, счетчики электрической энергии) и аппараты релейной защиты практически всех типов.

От исправности и точности работы ТТ зависит не только правильный повседневный учет электроэнергии, отпускаемой потребителям, но и бесперебойность электрообеспечения потребителей и сохранность самой электроустановки, особенно при коротких замыканиях (КЗ).

Точность ТТ характеризуется их полной погрешностью в передаче значения тока и угловой погрешностью в передаче фазы измеряемого тока. Требования к точности различны для ТТ, питающих измерительные приборы, и для ТТ, питающих аппаратуру релейной защиты.

Точная работа ТТ, используемых для релейной защиты, необходима для правильного функционирования большинства типов релейной защиты: максимальных токовых защит и токовых направленных защит, дистанционных и дифференциальных защит и т.п. Лишь в относительно редких случаях применяется релейная защита, не требующая измерительных ТТ (например, защита минимального напряжения).

В Правилах устройства электроустановок (ПУЭ) [Л.1] приведены четкие требования к точности ТТ, которые были разработаны и начали применяться в конце 1970-х годов. Однако в официальной "Инструкции по проверке трансформаторов тока" [Л.2] методика определения пригодности ТТ по их погрешностям отсутствует, о чем и указано в предисловии этой Инструкции.

Требования к ТТ, изложенные в Правилах [Л.1], базируются на работах института "Энергосетьпроект" (Москва и Нижний Новгород), которые обобщены в книге, написанной основными соавторами этих работ [Л.3]. Однако, как указывают авторы книги, в ней рассматриваются в первую очередь вопросы проектирования релейной защиты, когда необходимо рассчитать допустимое сопротивление нагрузки на ТТ, чтобы обеспечить правильное функционирование релейной защиты. Но при наладочных работах и при дальнейшем обслуживании электроустановки персонал имеет дело с уже смонтированной аппаратурой и вторичными цепями, которые, как правило, соответствуют проекту. Во исполнение Инструкции [Л.2] этот персонал измеряет сопротивление уже проложенных соединительных кабелей и релейной аппаратуры, снимает вольтамперные характеристики уже установленных ТТ. Остается лишь определить ожидаемые значения погрешности ТТ при коротких замыканиях и сравнить полученные результаты расчета с требованиями Правил [Л.1]. Однако методика

Трансформаторы тока в схемах релейной защиты.  
Часть первая. Экспериментальная и расчетная проверки.

## Конспект лекций

Одобен и рекомендован к опубликованию Ученым Советом  
Института. Протокол № 1 от 18 октября 1995 г.

В первой части приведены общие сведения о трансформаторах тока (ТТ), используемых в схемах релейной защиты, рассмотрены объем и методы их экспериментальной проверки при наладке и обслуживании устройств релейной защиты, а также методы и примеры расчетной проверки пригодности ТТ по их погрешностям.

Во второй части рассматриваются особенности расчетной проверки ТТ, используемых для релейной защиты на переменном оперативном токе с реле прямого действия и в схемах с дешунтированием электромагнитов управления.

Научный редактор А.М.Александров.

Издание Петербургского энергетического института повышения  
квалификации руководящих работников и специалистов  
Минтопэнерго РФ  
1995

расчета погрешностей ТТ на основании результатов их экспериментальной проверки не приведена ни в [Л.2], ни в [Л.3,4]. А без такого расчета нельзя гарантировать надежное функционирование релейной защиты при коротких замыканиях на защищаемой электроустановке и на смежных элементах электрической сети.

Методика расчета погрешностей ТТ по экспериментальным данным приведена в [Л.5]. Однако за 10 лет со дня выхода последнего, 3-го издания, эта книга, как и работа [Л.3], превратилась в библиографическую редкость. Наряду с этим уже появились и новые реле и новые информационные материалы.

По этим причинам кафедра РЗА приняла решение об издании данного конспекта лекций, читаемых автором в ПЭИПК. В этой работе последовательно рассматриваются современные требования к точности ТТ, объем и методы экспериментальной проверки ТТ и их цепей, а также методы и примеры расчетов погрешностей ТТ, используемых для устройств релейной защиты разных типов.

Конспект лекций в связи с небольшим объемом не может претендовать на полноту изложения всех вопросов теории, конструкции и использования ТТ, и является лишь дополнением к фундаментальным работам [Л.3,4 и др.].

В заключение следует отметить, что расчетное определение погрешностей ТТ в одинаковой степени важно и необходимо как при использовании традиционных электромеханических и статических аналоговых реле, так и при использовании новой аппаратуры - цифровых реле и терминалов защиты, в особенности при применении цифровых токовых защит с обратозависимыми времятоковыми характеристиками. Это объясняется тем, что в настоящее время абсолютное большинство устройств релейной защиты, в том числе и цифровые защиты, получают основную информацию от традиционных электромагнитных ТТ, изучению которых и должен помочь предлагаемый конспект лекций.

## §1. Общие сведения о трансформаторах тока, используемых в схемах релейной защиты.

### Первичные измерительные преобразователи тока.

Электромагнитный трансформатор тока является одной из разновидностей первичных преобразователей тока наряду с трансреакторами, магнитными датчиками и оптикоэлектронными преобразователями. В настоящее время именно электромагнитные ТТ с замкнутым магнитопроводом имеют наибольшее распространение.

Появление первых ТТ относится к началу нашего века, когда потребовалась быстродействующая и селективная защита от коротких замыканий электроустановок напряжением выше 1 кВ. Вместо первичных реле тока, обмотка которых включается непосредственно в цепь защищаемого элемента (рис.1,а) стали широко использоваться вторичные токовые реле, значительно более точные и менее громоздкие, чем первичные. Обмотка (катушка) вторичного реле тока включается в цепь защищаемого элемента через ТТ (рис. 1,б), и благодаря этому она изолирована от первичного напряжения защищаемого элемента.

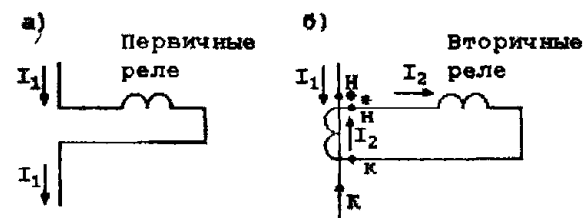


Рис.1. Схема включения обмоток первичных (а) и вторичных (б) реле в цепь защищаемого элемента.

**Принцип действия ТТ.** Первичная обмотка ТТ ( $w_1$ ) включается в цепь защищаемого элемента последовательно (рис.2). Вторичная обмотка ( $w_2$ ) замкнута на сопротивление  $Z_H$ , состоящее из сопротивлений реле, измерительных приборов, соединительных проводов (кабелей), проложенных между ТТ и аппаратами защиты.

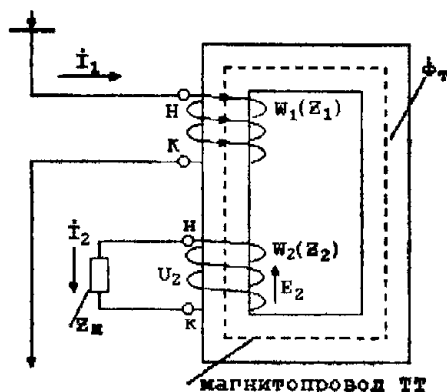


Рис.2. Схема ТТ, иллюстрирующая принцип трансформации (преобразования) первичного тока  $\dot{I}_1$  во вторичный  $\dot{I}_2$ .

Первичный ток  $\dot{I}_1$  и вторичный ток  $\dot{I}_2$ , индуцированные во вторичной обмотке  $W_2$ , создают намагничивающие силы (н.с.), которые вызывают магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , замыкающиеся по стальному магнитопроводу (раньше называли сердечник). Н.с., равные  $\dot{I}_1 \cdot W_1$  и  $\dot{I}_2 \cdot W_2$ , и создаваемые ими магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  геометрически складываются, создавая результирующий поток ТТ  $\Phi_T$ :

$$\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_2 \cdot W_2 = \dot{I}_{\text{нам}} \cdot W_1, \quad (1)$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_T, \quad (2)$$

где  $\Phi_T$  — рабочий магнитный поток, пронизывающий обе обмотки ТТ и наводящий во вторичной обмотке э.д.с.  $\dot{E}_2$ , которая создает в замкнутой цепи вторичной обмотки ток  $\dot{I}_2$  (вторичный).

Магнитный поток  $\Phi_T$  создается н.с.  $\dot{I}_{\text{нам}} \cdot W_1$ , иначе говоря, током намагничивания  $\dot{I}_{\text{нам}}$ , который является частью первичного тока  $\dot{I}_1$ . Именно наличие тока намагничивания  $\dot{I}_{\text{нам}}$  обеспечивает трансформацию  $\dot{I}_1$  в  $\dot{I}_2$ .

Однако ток намагничивания является частью первичного тока и, таким образом, не весь первичный ток трансформируется во вторичный, а лишь его часть:

$$\dot{I}_2 = - \left( \frac{\dot{I}_1}{n_B} - \frac{\dot{I}_{\text{нам}}}{n_B} \right), \quad (3)$$

где  $n_B = \frac{W_2}{W_1}$  — витковый коэффициент трансформации ТТ.

В нормальном режиме при рабочих токах значение тока намагничивания невелико ( $0,5 + 3\%$ ) и поэтому витковый коэффициент может считаться равным коэффициенту трансформации ТТ:

$$n_T = \frac{I_1}{I_2}. \quad (4)$$

При расчетных значениях тока короткого замыкания, если ток намагничивания ТТ не превышает 10% первичного тока, также может использоваться выражение (4), например, для вычисления вторичного тока (тока в реле):

$$I_2 = \frac{I_1}{n_T}. \quad (4a)$$

Однако при больших значениях тока намагничивания выражениями (4) и (4a) нельзя пользоваться без учета  $I_{\text{нам}}$ , который и определяет полную погрешность ТТ, т.е. точность его работы в таких аварийных режимах, когда должна действовать релейная защита.

Коэффициент трансформации является одним из основных параметров ТТ, он указывается на паспортной табличке ТТ и проверяется при наладке релейной защиты. Значения номинальных токов  $I_1$  и  $I_2$  должны соответствовать ГОСТ 7746-78 "Трансформаторы тока". В России и странах СНГ значения  $I_2$  могут быть либо 5А, либо 1А. Значения  $I_1$  также стандартизованы: 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600А и т.д.

**Виды погрешностей ТТ и их влияние на работу устройств релейной защиты.** У ТТ имеются три вида погрешностей: токовая, полная и угловая, значения которых тесно связаны друг с другом и зависят от степени насыщения магнитопровода ТТ. Чем больше насыщение магнитопровода, а это зависит, например, от значения первичного тока  $I_1$ , тем меньше сопротивление так называемой "ветви намагничивания" ( $Z'_{\text{нам}}$ ), тем больше значение тока в этой ветви ( $I'_{\text{нам}}$ ) и тем меньший ток попадает в реле ( $I_2$ ). Наглядное представление об этом процессе дает схема замещения ТТ (рис.3).

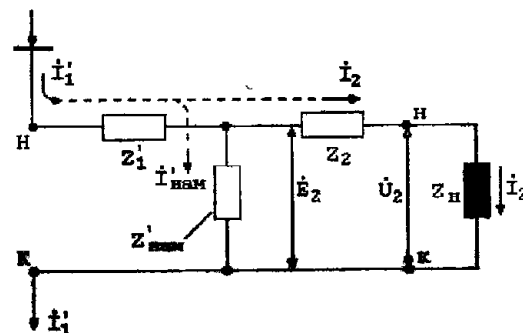


Рис.3. Схема замещения ТТ.

Здесь магнитная связь между обмотками ТТ условно заменена электрической и все первичные величины приведены ко вторичной стороне ТТ через коэффициент трансформации ТТ:

$I_1' = \frac{I_1}{n_T}$ ;  $I_{\text{нам}}' = \frac{I_{\text{нам}}}{n_T}$ . Приведенные значения сопротивления первичной обмотки ТТ  $Z_1' = Z_1 \cdot n_T^2$ , а ветви намагничивания  $Z_{\text{нам}}' = Z_{\text{нам}} \cdot n_T^2$ .

Из схемы замещения (рис.3) хорошо видно, что рост значения  $I_{\text{нам}}$  может произойти не только при глубоком насыщении магнитопровода, но и по другой причине: при непредусмотренном увеличении сопротивления нагрузки  $Z_H$ . При этом не только уменьшается значение тока  $I_2$ , но и искажается форма кривой этого тока, которая в нормальных условиях является, как известно, синусоидальной. При сильном искажении формы тока  $I_2$  может произойти отказ защиты из-за ненадежного замыкания контактов некоторых реле: ЭТ-520, ИМЕ, РВМ, РТ-40. Расчетная проверка надежности работы этих реле будет рассмотрена далее (§3).

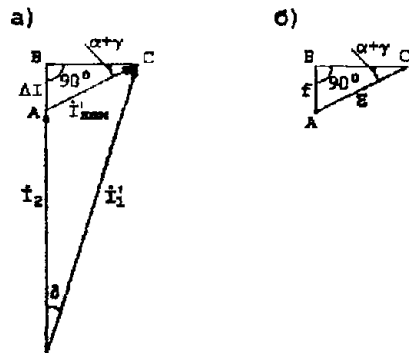


Рис. 4 Векторная диаграмма ТТ (а) и "треугольник погрешностей ТТ" (б).

На основании схемы замещения ТТ строится его векторная диаграмма [Л.3,4]. На рис.4,а приведен лишь конечный результат этого построения.

Величина  $\Delta I$ , равная арифметической разности между  $I_1$  и  $I_2$ , называется токовой погрешностью, обозначается буквой  $f$  (иногда  $f_1$ ), выражается чаще всего в процентах и вычисляется по формуле:

$$f\% = \frac{I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100. \quad (5)$$

Токвая погрешность является отрицательной величиной.

Угол  $\delta$ , показывающий насколько действительный ток  $I_2$  сдвинут относительно "идеального" тока  $I_1$ , рассчитанного по формуле (4а), определяет угловую погрешность ТТ и указывается в градусах. Если токовая погрешность  $f$  не более 10%, то угловая погрешность не более 10 градусов. Однако при глубоком насыщении магнитопровода ТТ в случаях близких КЗ угловая погрешность может достигнуть больших значений и вызвать неправильное срабатывание направленных реле, реагирующих на ток, напряжение и угол между этими величинами. Поэтому в таких схемах защиты не допускается работа ТТ с  $\delta > 45$  градусов, что соответствует  $f > 50\%$  [Л.3].

Абсолютное значение вектора тока намагничивания  $I_{\text{нам}}$ , равного геометрической разности вектора приведенного первичного тока  $I_1'$  и вектора действительного вторичного тока  $I_2$  называется полной погрешностью ТТ, обозначается греческой буквой  $\epsilon$ , выражается чаще всего в процентах и вычисляется по формуле:

$$\epsilon = \frac{I_{\text{нам}}}{I_1'} \cdot 100, \quad (6)$$

где  $I_{\text{нам}}$  и  $I_1'$  — действующие значения тока намагничивания и приведенного первичного тока.

Это выражение справедливо для синусоидального вторичного тока. Для несинусоидального значения имеется более сложное выражение [Л.4], но очевидно, что полная погрешность ТТ соответствует току намагничивания ТТ.

Рассмотрим соотношение  $f$  и  $\epsilon$  (рис.4,б). Из векторной диаграммы (рис.4,а) видно, что при  $\delta > 0$  всегда  $\epsilon > f$ , т.к.  $\epsilon$  представлен гипотенузой,  $f$  — катетом, а гипотенуза всегда больше катета. Из прямоугольного треугольника ABC видно, что  $\Delta I = I_{\text{нам}} \cdot \sin(\alpha + \gamma)$ , и практически при  $\alpha + \gamma \approx 55 + 65^\circ$  (для реальных соотношений  $x$  и  $r$  в  $Z_H$  и в  $Z_2$ ):

$$\Delta I \approx (0,8 + 0,9) \cdot I_{\text{нам}}, \text{ и, следовательно, } f \approx (0,8 + 0,9) \cdot \epsilon.$$

Для чего это важно знать? Дело в том, что с 30-х до 70-х годов при проектировании рассчитывали сечение соединительных проводов исходя из того, чтобы  $f \leq 10\%$ . И это было неправильно в отношении всех дифференциальных защит, ток небаланса которых определяется в первую очередь током  $I_{\text{нам}}$ , а следовательно полной погрешностью  $\epsilon$ .

С конца 1970-х годов для ТТ установлено требование  $\epsilon \leq 10\%$ , независимо от типа подключенной защиты [Л.1]. Проверка ТТ на 10%-ную полную погрешность рассматривается далее (§3).

Опасность замыкания вторичной обмотки ТТ. Из рассмотренного видно, что ток намагничивания ТТ в нормальных условиях очень мал (меньше 10%), т.к. мы заранее подбираем допустимое значение  $Z_H$ , исходя из условия работы ТТ с малыми погрешностями. При таком

относительно небольшом значении  $Z_H$  невелико значение  $U_2$  и  $E_2$  (рис.3) Но при случайном размыкании вторичной обмотки  $I_1 \approx I_{\text{ном}}$ ! При этом поток  $\Phi_T$  резко возрастает, обуславливая сильный нагрев магнитопровода (сердечника) за счет повышенных потерь в стали, вплоть до пожара! При этом мгновенные значения э.д.с.  $E_2$  могут оказаться очень большими, опасными для изоляции ТТ и для жизни обслуживающего персонала, даже при нормальных рабочих токах защищаемого элемента.

Поэтому размыкание вторичной обмотки трансформатора тока недопустимо!

**О других типах первичных преобразователей тока.** Трансреактор (ТР) преобразовывает первичный ток в пропорциональную ему вторичную э.д.с. Стальной сердечник трансреактора всегда имеет зазор (у ТТ, как правило, замкнутый стальной сердечник), а режим работы близок к х.х. (у ТТ - близок к КЗ).

Основной недостаток ТТ и ТР - громоздкая конструкция из-за необходимости обеспечения изоляции первичной обмотки относительно сердечника (магнитопровода) с размещенной на нем вторичной обмоткой. И чем выше номинальное напряжение электроустановки, тем больше проявляется этот недостаток.

Для того, чтобы избавиться от этого недостатка разработаны и разрабатываются другие виды первичных измерительных преобразователей тока. Наиболее перспективными считаются оптикоэлектронные преобразователи. Находясь непосредственно в первичной цепи, они преобразуют первичный ток в световой сигнал, который затем передается по оптоволоконному кабелю к месту установки защитной аппаратуры и здесь снова преобразуется в электрический сигнал. В этом конспекте они не рассматриваются.

**Схемы соединения ТТ.** В трехфазных электрических сетях переменного тока всех классов напряжения ТТ для питания устройств релейной защиты устанавливаются в двух или в трех фазах. Как правило, в сетях 6 и 10 кВ с малыми токами замыкания на землю - в двух фазах (А и С), в сетях 35 кВ и обязательно в сетях 110 кВ и выше - в трех фазах. Последнее относится и к сетям напряжением до 1000 В, если они работают с глухозаземленной нейтралью. Соответственно применяются схемы соединения двух ТТ в "неполную звезду" и трех ТТ - в "полную звезду" (схемы приведены в [3,4,5], а также в Приложении). Редко используется схема включения двух ТТ на разность токов двух фаз (однорелейная схема токовой отсечки практически применяется лишь для защиты электродвигателей небольшой мощности).

Для дифференциальных защит трансформаторов с электромеханическими и статическими реле (РНТ, ДЗТ, РСТ) используется схема включения трех ТТ в "треугольник". При выполнении дифференциальных защит трансформаторов с помощью современных цифровых реле (например, серии SPACOM) вместо соединения ТТ в "треугольник" применяется схема "звезда". Это является одним из достоинств цифровой техники, так как позволяет существенно уменьшить

сопротивление вторичной нагрузки ТТ  $Z_H$ , что хорошо видно из сравнения формул для определения  $Z_H$ , приведенных в Приложении.

#### Контрольные вопросы.

1. В чем опасность размыкания вторичной цепи ТТ на работающем элементе электроустановки?
2. Что представляет собой полная погрешность ТТ?
3. По каким причинам могут возрастать погрешности ТТ?
4. Каково соотношение между полной и токовой погрешностями?
5. Опишите схемы соединения ТТ.

## §2. Объем и методы экспериментальной проверки трансформаторов тока.

Вопросы этого раздела излагаются в соответствии с "Инструкцией по проверке ТТ, используемых в схемах релейной защиты" [Л.2].

**Объем проверки ТТ.** При первом включении электроустановки ТТ и их вторичные цепи проверяют в следующем объеме и в такой последовательности:

- а) подбор документации и ознакомление с ней;
- б) внешний осмотр ТТ и их цепей;
- в) предварительная проверка схемы прозвонкой;
- г) проверка сопротивления изоляции и электрической прочности изоляции вторичных обмоток ТТ и их вторичных цепей;
- д) определение однополярных выводов первичной и вторичной обмоток ТТ;
- е) снятие вольт-амперных характеристик (ВАХ);
- ж) проверка установленных коэффициентов трансформации ( $n_T$ );
- з) определение сопротивления вторичной нагрузки ТТ ( $Z_H$ );

и) проверка полной схемы соединений вторичных обмоток ТТ и цепей релейной защиты;

к) проверка расчетом пригодности ТТ при работе в данных условиях;

л) оформление результатов проверки (заполнение паспорта-протокола, форму которого см. в Приложении).

При плановых проверках выполняются п.п. а, б, г, е, л (в зависимости от вида технического обслуживания).

В случае разборки вторичных цепей ТТ дополнительно проверяется правильность их последующей сборки (пункт и).

После замены ТТ проверка производится в объеме п.п. б, г, д, е, ж, и, к, л.

При изменениях вторичной нагрузки производится проверка по п.п. з, к, л.

а. **Подготовка документации.** Перед проверкой ТТ необходимо подготовить принципиальные и монтажные схемы защиты проверяемого элемента электроустановки, а также типовые бланки паспорта - протокола и рабочую тетрадь для записи результатов проверки. Рекомендуется произвести предварительное расчетное определение погрешностей ТТ по данным проекта, но с учетом конкретных расчетных условий на день проверки.

б. **Внешний осмотр ТТ и их цепей.** Обращается особое внимание на надежность защиты выводов вторичных обмоток и цепей от попадания масла и влаги, а также от механических повреждений. В КРУ с выкатными тележками проверяется надежность работы штепсельных разъемов и переключателей во вторичных цепях. В устройствах с испытательными блоками (БИ) проверяется надежность работы блоков. Проверка производится подачей тока  $5 \div 10$  А от постороннего источника с замером этого тока прибором типа ВАФ-85 при разных положениях тележки КРУ или деталей БИ.

У ТТ типа ТФН, ТФНК и т.п. необходимо вскрывать отделение внутри цоколя, где помещаются выводы вторичных обмоток, и вводы в кабельные коробки.

Место заземления вторичных обмоток ТТ должно быть доступно без снятия высокого напряжения.

Проверяется правильность маркировки вторичных цепей, которая должна соответствовать следующему требованию: провод вторичной цепи, присоединенный к выводу вторичной обмотки ТТ одинаковой полярности с выводом первичной обмотки, присоединенным к шинам, маркируется по названию этой фазы (независимо от схемы соединения ТТ).

в, г. **Предварительная проверка схемы прозвонкой и проверка состояния изоляции** производится в соответствии с Типовой инструкцией по организации производства работ в устройствах релейной защиты и электроавтоматики электростанций и подстанций, издание Минэнерго - ОРГРЭС, 1991 г.

д. **Определение однополярных выводов** первичной и вторичной обмоток реле. Принципиальная схема для определения однополярных выводов обмоток ТТ приведена на рис.5

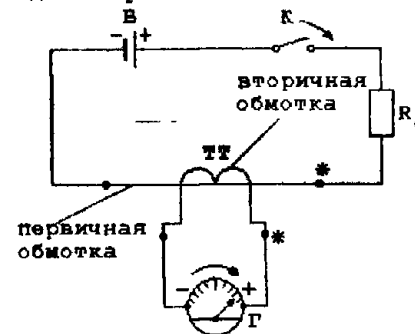


Рис.5 Схема для определения однополярных выводов первичной и вторичной обмоток ТТ.

В схеме используется аккумуляторная батарея (В) на 4,5 В или 6 В с обозначенной полярностью выводов. Выключатель (К) может быть любого типа. Добавочное сопротивление (резистор  $R_d$ ) подбирается с целью ограничения тока до значения, безопасного для батареи В.

Измерительный прибор (Г) магнитоэлектрический миллиамперметр (шкала  $5 \div 10$  мА) или вольтметр (шкала  $1,5 \div 3,0$  В) с обозначенной полярностью выводов и с нулем в середине шкалы.

Включается прибор Г таким образом, чтобы при замыкании первичной цепи выключателем К стрелка прибора отклонилась вправо. В этом случае однополярными являются выводы первичной и вторичной обмоток, присоединенные к плюсу батареи В и к плюсу прибора Г.

При размыкании первичной цепи стрелка прибора Г отклоняется влево. Однополярные зажимы на рис.5 отмечены "звездочкой".

При определении однополярных выводов ТТ, встроенных во вводы выключателя или во вводы силового трансформатора схема проверки собирается по рис.6, а, б. Следует обратить внимание на то, что у приборов Г, подключенных к разным группам ТТ, стрелки отклоняются в противоположные стороны. Это происходит из-за разных направлений постоянного тока от батареи В через эти группы ТТ при замыкании выключателя К.

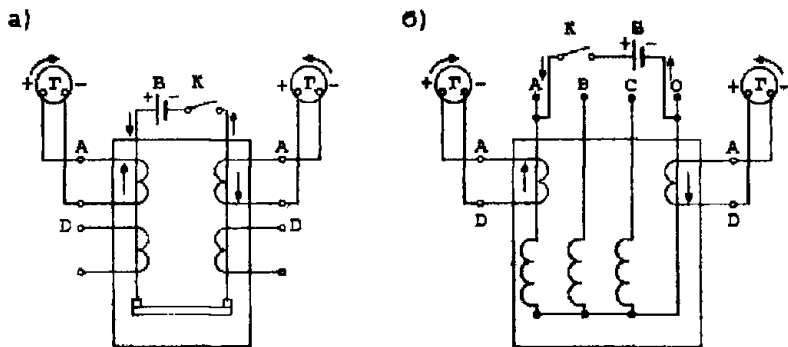


Рис.6 Схемы для определения однополярных выводов ТТ, встроенных во вводы выключателя (а) и силового трансформатора (б).

**ВНИМАНИЕ!** При определении однополярных выводов ТТ возможно кратковременное появление высокого напряжения на зажимах прибора Г (рис.5 и 6). Поэтому во время этой проверки все другие работы во вторичных цепях этих ТТ следует прекратить, а работающие должны избегать прикосновения к токоведущим частям вторичных цепей и прибора.

**е. Снятие вольтамперных характеристик.** ВАХ представляет зависимость напряжения на вторичной обмотке ТТ ( $U_2$  на рис.3) от тока намагничивания ( $I_{\text{нам}}$ ) при разомкнутой цепи вторичной обмотки.

Снятие ВАХ необходимо для двух целей:

- оценки исправности ТТ как аппарата (отсутствие витковых замыканий во вторичной обмотке);
- расчета полной погрешности ТТ ( $\varepsilon$ ).

Рекомендуемая схема для снятия ВАХ приведена на рис.7. Регулировку напряжения следует осуществлять автотрансформатором типа ЛАТР (лабораторный автотрансформатор).

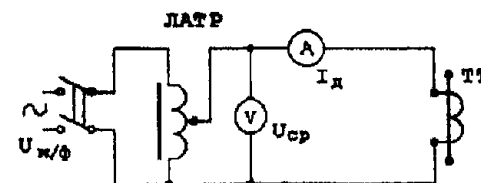


Рис.7 Схема для снятия ВАХ трансформаторов тока.

Рекомендуемые приборы: вольтметр типа Ц-4312, измеряющий среднее значение напряжения, и амперметр-электромагнитный или электродинамический, измеряющий действующее значение тока, в том числе можно использовать переносный измерительный прибор ВАФ-85.

При выполнении этих рекомендаций снятые ВАХ оказываются наиболее реалистичными [Л.2].

При снятии ВАХ ТТ должны быть полностью отсоединены от схемы защиты, а защитные заземления вторичных обмоток ТТ-сняты.

Желательно снять ВАХ до насыщения магнитопровода (сердечника) ТТ, т.е. до "перегиба" ВАХ, или, по крайней мере, до значения  $I_{\text{нам}} = 0,1 I_{2\text{расч}}$ , где  $I_{2\text{расч}}$  - вторичное значение тока КЗ, при котором должна обеспечиваться точная работа ТТ, т.е. полная погрешность не должна превышать 10%. Однако при снятии ВАХ нельзя подавать напряжение выше гарантированного заводом-изготовителем (чаще всего 1 000 В).

Для встроенных ТТ рекомендуется снимать ВАХ перед их установкой и повторно после установки на место (но до заливки масла в трансформатор или выключатель), чтобы убедиться в отсутствии повреждений обмотки, полученных во время установки ТТ.

В случаях использования двух последовательно включенных вторичных обмоток сердечников ТТ (например, у ТВТ-110, ТВТ-35, а также у ТЛМ, ТВЛМ, ТПЦ-"Р" и "0,5") необходимо снять ВАХ для каждой из обмоток, а затем суммарную - для двух обмоток, включенных последовательно.

По данным измерений ВАХ сразу же должна быть построена на миллиметровой бумаге. Оценка исправности ТТ производится сопоставлением построенной ВАХ с ВАХ других ТТ того же типа, класса и коэффициента трансформации, а также с ВАХ ТТ других фаз данного присоединения.

При наличии виткового замыкания во вторичной обмотке ТТ (наиболее распространенная неисправность) ВАХ резко снижается по сравнению с ВАХ исправных ТТ и при этом резко уменьшается угол наклона ВАХ к горизонтальной оси. Такие ТТ должны заменяться исправными.

**ж. Проверка коэффициента трансформации ( $n_T$ ).** Рекомендуется совмещать эту проверку с проверкой полной схемы соединения вторичных обмоток ТТ и их цепей (см. далее).

**з. Определение сопротивления вторичной нагрузки ТТ ( $Z_H$ ).** Определение фактического значения  $Z_H$  производится

от постороннего источника питания по схемам рис.8. Здесь же приведены формулы для вычисления значений  $Z_H$  для каждой из фаз, а также для "петли" фаза - нулевой провод (рис.8,а) и "петли" фаза - обратный провод (рис.8,б). Эти значения  $Z_H$  используются при расчетной проверке ТТ по их погрешностям (см. далее §3).

Схема измерений	Измеренные значения	Формулы для вычисления сопротивления нагрузки $Z_H$ , Ом
	$I, A$ $U_{ab}, B$ $U_{bc}, B$ $U_{ca}, B$ $I, A$ $U_{a0}, B$ $U_{b0}, B$ $U_{c0}, B$	$Z_A = \frac{U_{ab} - U_{bc} + U_{ca}}{2 \cdot I}$ $Z_B = \frac{U_{bc} - U_{ca} + U_{ab}}{2 \cdot I}$ $Z_C = \frac{U_{ca} - U_{ab} + U_{bc}}{2 \cdot I}$ $Z_{a0} = \frac{U_{a0}}{I}$ $Z_{b0} = \frac{U_{b0}}{I}$ $Z_{c0} = \frac{U_{c0}}{I}$
	$I, A$ $U_{ac}, B$ $U_{c0}, B$ $U_{a0}, B$	$Z_A = \frac{U_{ac} - U_{c0} + U_{a0}}{2 \cdot I}$ $Z_C = \frac{U_{c0} - U_{a0} + U_{ac}}{2 \cdot I}$ $Z_0 = \frac{U_{a0} - U_{ac} + U_{c0}}{2 \cdot I}$ $Z_{ac} = \frac{U_{ac}}{I}$ $Z_{a0} = \frac{U_{a0}}{I}$ $Z_{c0} = \frac{U_{c0}}{I}$

Рис.8 Схемы и расчетные формулы для определения фактических значений сопротивления нагрузки ТТ ( $Z_H$ ) для трехфазной (а) и двухфазной (б) схем релейной защиты.

Ток  $I$  от постороннего источника (рис.8) подается равным номинальному вторичному току ТТ, т.е. 5 А или 1 А. Исключение составляют схемы максимальных токовых защит с дисковыми реле РТ-80 (ИТ-80) и реле прямого действия РТВ, для которых  $Z_H$  измеряется при токе на 20% больше, чем

ток срабатывания этих реле, т.к. после срабатывания реле их сопротивление возрастает.

и. Проверка полной схемы соединений вторичных обмоток ТТ и цепей релейной защиты. Для ТТ, питающих простые защиты, не проверяемые под нагрузкой (максимальные токовые защиты), проверка полной схемы производится первичным током от постороннего источника (нагрузочного устройства).

Для ТТ, питающих защиты, обязательно проверяемые под нагрузкой (дифференциальные, направленные, фильтровые и т.п.), проверка полной схемы может выполняться первичным током нагрузки. Однако в ряде случаев (главным образом при отсутствии тока нагрузки защищаемого элемента) и для этих схем проверка должна производиться от постороннего источника вместе с проверкой правильности включения указанных запит (фазировкой).

Способ проверки от постороннего источника питания (нагрузочного устройства) состоит в следующем: первичные обмотки ТТ соединяются временными перемычками и в них подается ток от нагрузочного устройства. Прибором типа ВАФ-85 производятся измерения токов во всех вторичных цепях ТТ, которые должны быть при этом уже полностью собраны. Перемычки (одна или несколько) устанавливаются таким образом, чтобы при правильно выполненной схеме ни в одном из проводов вторичных цепей ток не равнялся бы нулю. Схема для этой проверки собирается в зависимости от схемы соединения ТТ. На рис.9 в качестве примера приведена схема проверки цепей двухфазной токовой защиты при соединении ТТ в "неполную звезду". Схема проверки правильности соединения ТТ в "полную звезду", "треугольник" и др. приведены в [Л.2].

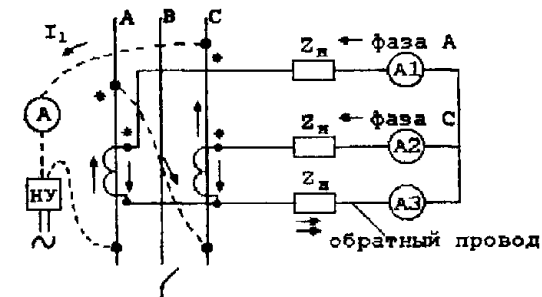


Рис.9. Проверка полной схемы соединений вторичных обмоток ТТ и цепей защиты от постороннего источника.

В начале проверки рекомендуется подать небольшой первичный ток  $I_1$  для того, чтобы не вызвать опасных перенапряжений во вторичных цепях в том случае, если одна из вторичных обмоток ТТ окажется ошибочно разомкнутой (об опасности такого режима сказано ранее в §1). Например,

при  $n_T=100/5$  подадим  $I_1=2A$ . При правильно собранной схеме (рис.9) вторичные токи в фазах А и С будут равны

$I_2 = \frac{I_1}{n_T}$ , т.е. 0,1 А, а в обратном проводе - сумме этих токов, т.е. 0,2 А.

Возможные ошибки в схеме легко определяются по значениям измеренных токов  $I_2$ . Например, при ошибочном изменении полярности одного из ТТ ток  $I_2$  в обратном проводе будет равен нулю. После включения защищаемой электроустановки под нагрузку следует еще раз проверить правильность схемы соединений ТТ и защиты путем измерения вторичных рабочих токов. Для схемы двухфазной токовой защиты (рис.9) ток  $I_2$  в обратном проводе будет теперь равен по значению токам  $I_2$  в фазах А и С, поскольку в реальных трехфазных сетях векторы токов в фазах А и С сдвинуты на 120 градусов и их геометрическая сумма имеет такое же значение, как и у слагаемых величин. Но при ошибочном изменении полярности одного из ТТ в обратном проводе будет проходить ток в  $\sqrt{3}$  раз больший, чем в фазных проводах.

В Инструкции [Л.2] рассмотрены все возможные ошибки в различных схемах соединения ТТ: изменена полярность одного из ТТ, закорочена вторичная обмотка, разорвана одна из вторичных цепей защиты.

В ПЭИпк имеется учебно-тренировочная компьютерная программа, в которой рассматриваются все возможные ошибки в различных схемах соединения ТТ.

к. Проверка расчетом пригодности ТТ - рассматривается в следующем параграфе.

#### Контрольные вопросы.

1. Для какой цели и каким образом определяются однополярные выводы ТТ?
2. При каком виде проверки ТТ особенно необходимо выполнять меры безопасности?
3. Каким методом определяется исправность вторичной обмотки ТТ?
4. Для чего и каким образом определяются значения вторичной нагрузки ТТ ( $Z_n$ )?
5. Каковы будут значения токов в фазных проводах (А и С) и обратном проводе схемы (рис. 9) при следующих ошибках: обрыв обратного провода, обрыв фазного провода (А или С), закорочена вторичная обмотка одного из ТТ?

### §3. Расчетная проверка пригодности трансформаторов тока по их погрешностям.

В Предисловии отмечалось, что в официальной Инструкции по поверке ТТ [Л.2] отсутствуют указания по расчетной проверке пригодности ТТ по их погрешностям.

Приведенные далее сведения о расчетной проверке пригодности ТТ по их погрешностям полностью соответствуют действующим Правилам [Л.1]. Рассмотренные методы расчетного определения погрешностей ТТ описаны в [Л. 3,4,5] и в течение многих лет используются в практической работе в службах релейной защиты в нашей стране и за рубежом.

**Виды и способы расчетной проверки ТТ.** В соответствии с Правилами [Л.1] все ТТ, используемые для релейной защиты, должны обеспечивать:

- точную работу измерительных органов защиты в конкретных расчетных условиях, для чего полная погрешность трансформаторов тока не должна превышать 10% при  $I_{расч}$ ;
- надежную (без вибрации) работу контактов измерительных органов защиты при максимальном токе КЗ  $I_{к\max}$ , когда могут быть повышенные погрешности трансформаторов тока и искажение формы кривой вторичного тока;
- отсутствие опасных перенапряжений во вторичных цепях трансформаторов тока при том же максимальном токе КЗ.

Таким образом расчетная проверка трансформаторов тока состоит из расчетных проверок на 10%-ную погрешность и надежность работы реле, а также расчетного определения напряжения во вторичных цепях (рис.10).

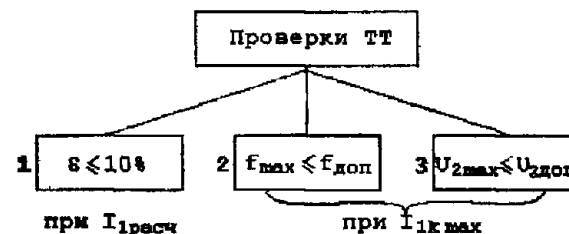


Рис.10 Необходимые виды расчетных проверок ТТ, используемых для релейной защиты.

**Способы расчетной проверки ТТ на 10%-ную полную погрешность** (условие  $\epsilon \leq 10\%$ ). Рассмотрим четыре способа этой проверки (рис.11):

- по кривым предельной кратности (КПК)  $K_{10} = f(z_n)$ , где  $z_n$  - сопротивление нагрузки ТТ, при которой  $\epsilon = 10\%$ ; используется при проектных работах или при проверке

проекта перед наладочными работами, когда еще нет действительных ВАХ устанавливаемых ТТ;

- по паспортным данным ТТ: по номинальному значению  $Z_n$  при номинальной кратности тока  $K_{ном}$  (может обозначаться  $m_n$  или  $\rho_n$ ); используется при проверке проекта до снятия ВАХ;

- по действительным ВАХ, снятым у ТТ в соответствии с Инструкцией по проверке ТТ (см. выше, §2); это основной способ определения полной погрешности ТТ перед включением электроустановки под напряжение и нагрузку;

- по типовой кривой намагничивания (КН) электро-технической стали, используемой для изготовления ТТ,  $B_{max} = f(H)$ ; этот способ в СССР был использован для построения КПК; используется при проектных работах в случаях отсутствия КПК или при необходимости вычисления значения  $\varepsilon$  (по КПК можно определить лишь соответствие или несоответствие ТТ условию  $\varepsilon \leq 10\%$ ).

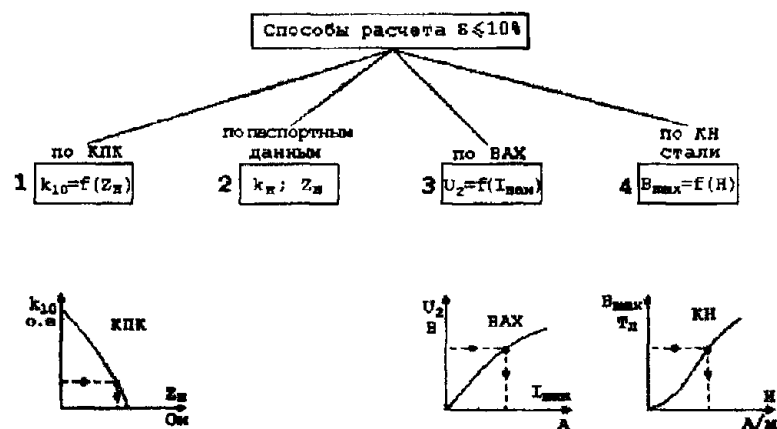


Рис.11 Способы расчетной проверки ТТ на 10%-ную полную погрешность.

**Определение расчетного тока  $I_{расч}$ .** Прежде чем приступить к рассмотрению каждого из четырех способов расчетной проверки ТТ на 10%-ную полную погрешность (рис.11), необходимо дать определение  $I_{расч}$ . Это безусловно ток короткого замыкания, при котором должна быть обеспечена работа ТТ с  $\varepsilon \leq 10\%$  для правильного функционирования релейной защиты. Однако значения  $I_{расч}$  различны для разных типов защиты:

- для токовой отсечки и максимальной токовой защиты с независимой характеристикой  $I_{расч} = 1,1 \cdot I_{сз}$ , поскольку для этих защит точная работа трансформаторов тока требуется лишь при токе срабатывания защиты ( $I_{сз}$ ); коэффициент

1,1 учитывает увеличение кратности первичного тока по сравнению с кратностью вторичного тока из-за 10%-ной погрешности трансформаторов тока;

- для максимальной токовой защиты с зависимой времятоковой характеристикой  $t_s = f(I_k)$   $I_{расч} = I_{согл}$ , где  $I_{согл}$  соответствует первичному току КЗ, при котором производится согласование по времени последующей и предыдущей защит и определяется ступень селективности  $\Delta t$ ; в практике эксплуатации электромеханических реле для создания некоторого запаса принимают  $I_{согл}$  равным току, при котором начинается установившаяся (независимая) часть характеристики; для современных цифровых реле, у которых практически нет такой части характеристики, принимают  $I_{расч} = I_{kmax}$ , если последующая защита имеет зависимую характеристику или  $I_{расч} = I_{сз.а.посл}$ , т.е. равным такому значению тока КЗ, при котором приходит в действие последующая защита с независимой времятоковой характеристикой;

- для продольных дифференциальных защит (трансформаторов, генераторов, шин, линий)  $I_{расч}$  принимается равным наибольшему значению тока при внешнем КЗ, т.е. КЗ вне зоны действия дифференциальной защиты;

- для дистанционной направленной (токовой направленной) защиты линий с односторонним питанием  $I_{расч}$  принимается равным наибольшему значению тока КЗ в конце первой зоны защиты (в конце линии); для линий с двухсторонним питанием следует дополнительно определить ток по линии при КЗ на шинах той подстанции, где установлена рассматриваемая защита (КЗ "за спиной"); в качестве  $I_{расч}$  выбирается больший из этих токов КЗ.

**Расчетная проверка ТТ по условию  $\varepsilon \leq 10\%$  по кривым предельной кратности (КПК).** Кривые КПК для большинства отечественных ТТ приведены в [Л.3], а КПК для новых типов ТТ можно запросить в "Энергосетьпроект" (г.Нижний Новгород).

Для определения по КПК допустимого значения  $Z_n$ , при котором  $\varepsilon = 10\%$ , необходимо вычислить для конкретного расчетного тока значение  $k_{10}$  - предельной кратности, величины, введенной ГОСТ 7746-78 с 1980 г.:

$$k_{10} = \frac{I_{расч}}{I_{ном}} \quad (7)$$

где  $I_{ном}$  - первичный номинальный ток ТТ.

По КПК, соответствующей типу, классу вторичной обмотки и коэффициенту трансформации ТТ, находится значение  $Z_n$  (рис.11). В зависимости от схемы соединения ТТ и реле, и от вида защищаемой электроустановки проектировщик выбирает сечение соединительных проводов (кабелей) между ТТ и реле.

**Расчетная проверка ТТ на 10%-ную погрешность по паспортным данным ТТ.** На табличке ТТ или в паспорте, а

также в [Л.3] указывается номинальное значение кратности тока  $K_N$  ( $m_N$  или  $n_N$ ), при котором допускается сопротивление нагрузки равное  $Z_N$  и обеспечивается при этом  $\varepsilon \leq 10\%$  (или  $f \leq 10\%$  у старых типов ТТ, причем выполнение условия  $f \leq 10\%$  вполне достаточно для максимальных токовых и дистанционных защит). Если известны фактическое расчетное значение  $Z_{н.факт.расч}$  (например, из проекта) и полное сопротивление вторичной обмотки ТТ  $z_2$  (из паспорта или [Л.3]), можно определить допустимое значение  $k_{10доп}$ , а затем сравнить его со значением  $k_{10}$ , полученным по выражению (7) для данной электроустановки. Допустимое значение кратности определяется по выражению:

$$k_{10доп} = K_N \frac{z_2 + Z_N}{z_2 + Z_{н.факт.расч}}, \quad (8)$$

**Пример расчета.** Для ТТ типа ТПН-10, обмотка класса Р,  $n_T=100/5$ , известны  $K_N=13$ ;  $Z_N=0,6$  Ом;  $z_2=0,22$  Ом [Л.3]. Для проверяемой защиты известны  $Z_{н.факт.расч} = 0,31$  Ом и  $I_{1расч} = I_{1нх} = 1800$  А.

По выражению (7) для этих конкретных условий:

$$k_{10} = \frac{1800}{100} = 18.$$

По выражению (8) допустимая кратность равна:

$$k_{10доп} = 13 \cdot \frac{(0,22 + 0,6)}{(0,22 + 0,31)} = 20.$$

Поскольку  $k_{10доп} > k_{10}$ , то можно считать, что погрешность ТТ не будет превышать допустимое значение 10%.

Выражение (8) можно использовать также при составлении задания на наладку релейной защиты. При известных параметрах ТТ и значении  $I_{1расч}$  фактическая нагрузка ТТ не должна превышать следующего значения:

$$Z_{н.факт.расч} \leq \frac{k_{ном} \cdot (z_2 + Z_{ном})}{k_{10}} - z_2. \quad (8a)$$

Для условий этого примера:

$$Z_{н.факт.расч} \leq \frac{13 \cdot (0,22 + 0,6)}{18} - 0,22 \leq 0,37 \text{ Ом}$$

**Расчетная проверка ТТ по условию  $\varepsilon \leq 10\%$  по фактической ВАХ.** Для определения значения тока намагничивания  $I_{нам}$  и затем полной погрешности ТТ  $\varepsilon$  необходимо определить на вторичной обмотке ТТ напряжение  $U_2$  (рис.3) при расчетных условиях по выражению:

$$U_{2расч} = I_{2расч} \cdot (z_2 + Z_{н.факт.расч}), \quad (9)$$

$$\text{где } I_{2расч} = I_{1расч} / n_T. \quad (10)$$

Значение  $Z_{н.факт.расч}$  вычисляется по значениям  $Z_{н.факт.}$ , полученным в результате экспериментальной проверки ТТ (см. §2). Для конкретной схемы соединения ТТ вычисляется наибольшее значение  $Z_{н.факт.расч}$  в зависимости от вида КЗ. Например, для схемы "неполная звезда" наибольшее значение

$Z_N$  оказывается при двухфазном КЗ на защищаемой линии между фазами А и В, В и С, если ТТ установлены на фазах А и С. Для схемы "полная звезда" наибольшее  $Z_N$  соответствует однофазному КЗ в сетях с глухозаземленной нейтралью.

Формулы для определения  $Z_{н.факт.расч}$  для разных схем соединения ТТ при разных видах КЗ приведены в [Л.5] и в Приложении к этой работе.

По значению  $U_{2расч}$  по ВАХ определяется значение тока намагничивания для каждого ТТ (рис.11). Далее вычисляется значение полной погрешности ТТ в процентах по выражению:

$$\varepsilon = \frac{I_{нам}}{I_{2расч}} \cdot 100. \quad (11)$$

Значение  $\varepsilon$  должно быть не более 10%. Наряду с этим полученное значение  $\varepsilon < 10\%$  может использоваться при выборе уставок дифференциальных защит.

Рассмотренный способ определения  $\varepsilon$  по ВАХ следует считать наиболее достоверным (при том, что ВАХ сняты в соответствии с Инструкцией [Л.2], о чем сказано выше, в §2). Результаты расчетного определения  $\varepsilon$  должны быть занесены в "Паспорт-протокол ТТ". В [Л.2] приведена рекомендуемая форма этого важного документа, но, к сожалению, без указаний о необходимости расчета погрешностей ТТ (рис.10).

Пользуясь этой методикой, можно в задании на наладку защиты задать контрольную точку ВАХ, ниже которой ВАХ не должна проходить. Эта точка выбирается из условия  $\varepsilon = 10\%$ , чему соответствует значение  $I_{нам} = 0,1 I_{2расч}$ . Искомая точка будет находиться на пересечении абсциссы  $I_{нам}$  и ординаты  $U_2$ , вычисленной по выражению (9).

Для ТТ из предыдущего примера контрольная точка ВАХ определяется значениями

$$I_{нам} = 0,1 \cdot \frac{1800}{20} = 9 \text{ А} \quad \text{и} \quad U_{2расч} \geq 90 \cdot (0,22 + 0,31) \geq 48 \text{ В}$$

Задание координат контрольной точки не отменяет необходимости снятия всех точек ВАХ и изображения ее в Паспорте-протоколе, как требует Инструкция [Л.2].

Для уменьшения погрешностей ТТ весьма часто практикуется последовательное включение двух вторичных обмоток ТТ. "Суммарная" ВАХ располагается значительно выше, чем ВАХ одной из обмоток. Каждая ордината  $U_2$  "суммарной" ВАХ представляет собой сумму ординат ВАХ двух обмоток ТТ. Следовательно, при данном значении  $U_{2расч}$  ток намагничивания  $I_{нам}$  и полная погрешность  $\varepsilon$  могут оказаться значительно меньшими, чем при использовании одной из обмоток ТТ, несмотря на то, что в выражении (9) в этом случае следует учесть  $2z_2$  или сумму  $z_2 \text{ 1тт} + z_2 \text{ 2тт}$ .

Для уменьшения погрешности  $\varepsilon$  могут потребоваться и другие мероприятия: уменьшение сопротивления вторичной нагрузки  $Z_{н.факт.расч}$  и даже замена трансформаторов тока.

**Расчет полной погрешности ТТ по типовой кривой намагничивания (КН) электротехнической стали и парамет-**

рам конкретного ТТ. Этот способ используется у нас относительно редко. Необходимые данные для расчета:

- типовая кривая намагничивания стали, из которой выполняются магнитопроводы ТТ  $B_{\max} = f(H)$ , где  $B_{\max}$  - максимальная индукция (в теслах) в магнитопроводе ТТ,  $H$  - действующее значение напряженности поля (в амперах на метр) в магнитопроводе ТТ;

- параметры ТТ:  $Q$  - сечение магнитопровода в метрах в квадрате;  $w_2$  - действительное число витков во вторичной обмотке;  $L_{cp}$  - средняя длина магнитной силовой линии (длина пути) в магнитопроводе, в метрах.

Вычисление тока намагничивания производится следующим образом:

- определяется значение  $B_{\max}$  по выражению:

$$B_{\max} = \frac{U_{2расч}}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot Q}, \quad (12)$$

где  $U_{2расч}$  определяется по выражению (9), а значение частоты  $f = 50$  Гц;

- по кривой намагничивания находится значение  $H$ , соответствующее вычисленному значению  $B_{\max}$  (рис.11); при этом для запаса принимается  $KH$  наилучшего из допустимых сортов электротехнической стали;

- определяется в амперах действующее значение  $I_{нам}$ , приведенное к вторичной стороне ТТ, по выражению:

$$I_{нам} = \frac{H \cdot L_{cp}}{w_2}. \quad (13)$$

Полная погрешность ТТ  $\varepsilon$  в процентах определяется по выражению (11).

Параметры ТТ приведены в [Л.3] и Справочниках.

**Проверка ТТ по второму условию:**  $f_{\max} \leq f_{доп}$  при максимальном значении тока КЗ  $I_{кз \max}$  (рис.10). Порядок определения максимального значения токовой погрешности  $f_{\max}$  следующий:

- вычисляется максимальная кратность тока КЗ по отношению к первичному номинальному току ТТ по выражению:

$$k_{\max} = \frac{I_{кз \max}}{I_{ном}}; \quad (14)$$

- определяется максимальное значение коэффициента  $A$ :

$$A_{\max} = \frac{k_{\max}}{k_{10доп}}, \quad (15)$$

где  $k_{10доп}$  - допустимая кратность тока КЗ, соответствующая  $\varepsilon = 10\%$  при  $Z_{н.факт.расч}$ ; может быть определена расчетом по выражению (8) или графически по соответствующей кривой предельной кратности по значению  $Z_{н.факт.расч}$  (рис.12а);

- определяется  $f_{\max}$  по зависимости  $A = \psi(f)$ , которая приведена на рис.12,б.

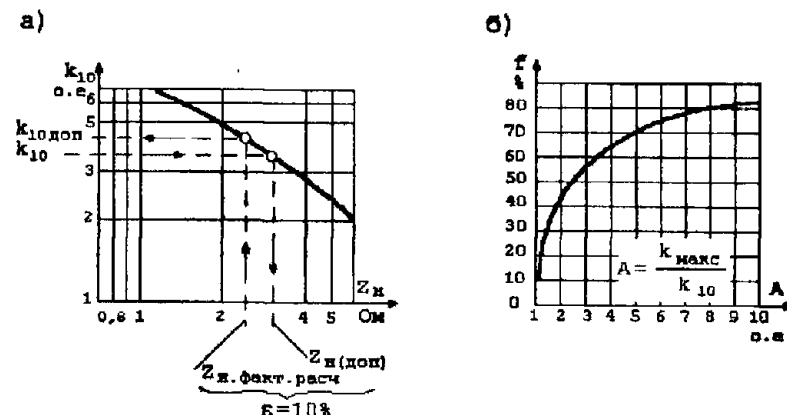


Рис. 12. Кривая предельных кратностей одного из типов ТТ (а) и зависимость  $A = \psi(f)$  из [Л.3], общая для всех типов отечественных ТТ (б).

- сравнивается полученное значение  $f_{\max}$  с допустимым значением  $f_{доп}$ , при котором обеспечивается надежное замыкание контактов электромеханических реле (ЭТ-520, РТ-40, ИМБ, РБМ), а также правильная ориентация направленных реле всех типов и заданная времятоковая характеристика дисковых индукционных реле (ИТ-80, РТ-80).

На основании результатов исследований различных типов реле [Л.3,6 и др.] можно ориентироваться на следующие значения  $f_{доп}$  в процентах:

Реле тока ЭТ-520.....	13
РТ-40 (выпуска до 1969 г.)....	40
РТ-40 (модернизированные).....	50
РТ-80 (ИТ-80).....	50
Статические реле РСТ.....	80
Реле сопротивления всех типов .....	50
Реле направления мощности:	
ИМБ и РБМ (до 1970 г.).....	10
РБМ-171,172 (после 1970 г.)....	30
РБМ-177,178 (после 1970 г.)....	20
Статические реле РМ.....	50

Для правильной ориентации статических реле направления мощности и различных реле сопротивления (дистанционных) главным условием является ограничение угловой погрешности ТТ  $\varepsilon$ , которая при  $f = 50\%$  соответствует  $45^\circ$  [Л.3].

Если выполнено условие  $f_{\max} \leq f_{доп}$ , то обеспечивается надежное функционирование проверяемых типов реле при максимальных значениях токов КЗ. В Руководящих материалах РАО "ЕЭС России", как и бывшего Минэнерго, указано, что такая проверка должна производиться не только перед включением новой электроустановки, но и в тех случаях,

когда предполагается увеличение значения тока КЗ, в течение всего периода эксплуатации.

Что делать, если в результате расчета оказалось  $f_{\max} > f_{\text{доп}}$ ? Следует рассмотреть несколько возможных мероприятий:

- замена существующих реле на такие, у которых выше значение  $f_{\text{доп}}$ , например, заменить реле РБМ-178(7) на реле РМ-12; также не следует оставлять в эксплуатации токовые защиты с реле ЗТ-520, а заменять их современными цифровыми токовыми защитами, например, серии SPAC-800, выпускаемыми СП "АВБ Реле Чебоксары" и т.п.

- уменьшение погрешности  $f_{\max}$ , что можно осуществить либо уменьшением значения  $z_{\text{н.факт.расч}}$ , либо уменьшением  $k_{\max}$  путем увеличения коэффициента трансформации ТТ и, следовательно,  $I_{\text{ном.ТТ}}$ , либо путем последовательного включения двух вторичных обмоток ТТ; каждое из этих мероприятий даст снижение  $f_{\max}$  на какое-то количество процентов, и эти проценты можно сложить (арифметически); рассмотренная методика и зависимость  $A = \psi(f)$  на рис.12,б позволяют легко произвести эти расчеты.

**Последовательное включение двух вторичных обмоток ТТ.** Если предполагается включить две обмотки одного класса, эффективность этого мероприятия оценивается следующим образом:

- по соответствующей кривой предельной кратности (рис.12,а) определяется  $k_{10\text{доп}}$  для  $0,5z_{\text{н.факт.расч}}$ , считая что фактическая нагрузка распределится между обмотками как бы поровну;

- по новому, большему значению  $k_{10\text{доп}}$  определяется коэффициент  $A_{\max}$  по выражению (15), который может оказаться значительно меньшим, чем в случае использования только одной обмотки этого ТТ;

- для меньшего значения  $A_{\max}$  определяется по рис.12,б новое, меньшее значение  $f_{\max}$ .

Если предполагается включить последовательно две вторичные обмотки разных классов (например, "Р" и "0,5"), то необходимо для определения нового значения  $k_{10\text{доп}}$  построить суммарную кривую предельных кратностей [Л.5]. Эта кривая ляжет правее КИК для класса "Р" и, следовательно, при том же значении  $z_{\text{н.факт.расч}}$  получим большее  $k_{10\text{доп}}$ .

Если предполагается использовать для последовательного включения две обмотки уже имеющихся ТТ, то необходимо снять суммарную ВАХ (§2). Суммарная ВАХ проходит значительно выше, чем ВАХ одной из обмоток ТТ. И несмотря на то, что в выражение (9) вместо  $z_2$  необходимо ввести  $2z_2$  или сумму  $z_2$  каждой из обмоток, значение  $I_{\text{ном}}$  и, следовательно,  $\epsilon$  будет существенно меньше, чем при использовании одной из обмоток ТТ.

**Проверка ТТ по третьему условию:**  $U_{2\max} \leq U_{2\text{доп}}$ .

Значение  $U_{2\max}$  на зажимах вторичной обмотки ТТ определяется по выражению:

$$U_{2\max} = \frac{I_{\text{к.мах}}}{n_{\text{т}}} \cdot z_{\text{н.факт.расч}}, \quad (16)$$

где  $I_{\text{к.мах}}$  - действующее значение периодической составляющей тока КЗ (влияние апериодической составляющей этого тока путем введения увеличивающих коэффициентов с 1980-х годов не учитывается).

Значение  $U_{2\text{доп}}$  по Правилам [Л.1] равно испытательному напряжению 1000 В, которое должно прикладываться к вторичным цепям защиты в течение 1 мин при частоте 50 Гц.

Практически для ТТ с  $I_{2\text{ном}} = 5$  А это условие всегда выполняется. Исключения могут быть при расчетной проверке цепей дифференциальных защит трансформаторов, выполненных на переменном оперативном токе, в режиме после дешунтирования электромагнита управления коммутационным аппаратом.

Для ТТ с  $I_{2\text{ном}} = 1$  А в сетях выше 110 кВ с невыполнением этого условия пришлось столкнуться в 1980-х годах, когда на эти ТТ включались шкафы и панели с электромеханическими реле, а также в других случаях.

В связи с этим "Атомэнергопроект" Минэнерго СССР было выпущено Информационное сообщение N 31-Э от 12.12.84, в котором даются рекомендации по переносу защитного заземления ТТ в другую точку вторичных цепей по сравнению с заземлением по типовым схемам. Это относится к схемам соединения ТТ "полная звезда" и "треугольник", но не относится к схеме "неполная звезда". Перенос точки заземления от места установки ТТ позволяет существенно уменьшить расчетное значение  $U_{2\max}$ , но делается это лишь в случаях невыполнения условия  $U_{2\max} \leq U_{2\text{доп}}$ .

Использование статических аналоговых реле и комплектов устройств защиты и, особенно, цифровых терминалов существенно снижает нагрузку на ТТ, т.к. эти устройства имеют значительно меньшее потребление мощности от ТТ.

**Особенности расчетной проверки ТТ, используемых для релейной защиты на переменном оперативном токе.**

Большинство схем релейной защиты на переменном оперативном токе выполнены либо с электромеханическими реле прямого действия типа РТВ (реле тока с обратозависимой времятоковой характеристикой), либо с так называемыми дешунтируемыми реле типов РТ-85, РТ-95 (дисковые реле тока с обратозависимой времятоковой характеристикой) или типа РП-341 (промежуточное выходное реле максимальной токовой защиты с независимой времятоковой характеристикой).

Дешунтирующие реле имеют усиленные переключающие контакты, которые в нормальном режиме работы электроустановки шунтируют электромагнит управления (ЗУ) коммутационного аппарата (выключателя или короткозамыкателя), а после срабатывания защиты переключаются и дешунтируют этот электромагнит. После дешунтирования ЗУ подключается к ТТ, значительно увеличивая при этом сопротивление его вторичной нагрузки  $z_{\text{н}}$ , в 3-5 раз и более, что может вызвать повышение полной (и токовой) погрешности выше 10% и вплоть до 50-70%. Задачами расчетной проверки ТТ в таких случаях являются: вычисление значения повышенной

токовой погрешности  $f > 10\%$  и определение невозможности возврата дешунтирующих реле (из-за уменьшения значения вторичного тока  $I_{2k}$  после дешунтирования ЭУ), а также определение надежности срабатывания дешунтированного ЭУ.

Подобная задача ставится и при расчетной проверке ТТ, питающих защиту с реле прямого действия РТМ и РТВ, которые сами выполняют функции ЭУ. Для таких ТТ допускается токовая погрешность  $f > 10\%$  при условии, что при этом будет обеспечено надежное срабатывание реле защиты с необходимыми значениями коэффициентов чувствительности. Методика и примеры расчетной проверки ТТ для различных схем релейной защиты линий и трансформаторов напряжением от 6 до 110 кВ, выполненных на переменном оперативном токе, рассматриваются во второй части этого конспекта лекций.

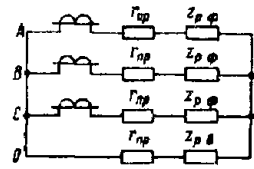
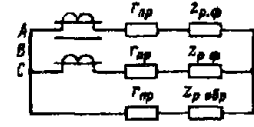
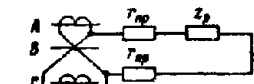
### Контрольные вопросы

1. Каким образом и для каких целей снимается вольт-амперная характеристика (ВАХ) трансформаторов тока, используемых для релейной защиты?
2. Требования к ТТ, питающим релейную защиту, в части их погрешностей.
3. Методы расчетной проверки ТТ на 10%-ную полную погрешность.
4. Расчетные проверки ТТ при максимальных значениях тока КЗ.
5. Способы уменьшения полной (и токовой) погрешностей ТТ.
6. Особые требования к ТТ, питающим релейную защиту на переменном оперативном токе.

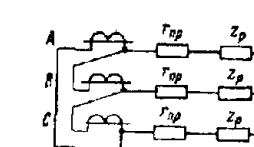
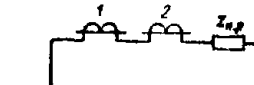
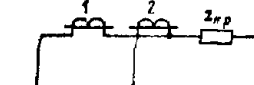
### Литература

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). - 6-е изд. - М. Энергоатомиздат, 1985.
2. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты. - 2-е изд. - М. Энергия, 1977.
3. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. - М. Энергия, 1980.
4. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита. - М. Энергоатомиздат, 1992.
5. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. - 3-е изд. - М. Энергоатомиздат, 1985.
6. Гельфанд Я.С. Релейная защита распределительных сетей. - 2-е изд. - М. Энергоатомиздат, 1987.
7. Шабад М.А. Выбор характеристик и уставок цифровых токовых защит серии SPACOM. - изд. ПЭИЛК, 1995.
8. Реле защиты/ В.С.Алексеев, Г.П.Варганов, Б.И.Панфилов, Р.З.Розенблом. - М. Энергия, 1976.
9. Голубев М.Л. Реле прямого действия. - М. Энергия, 1966.
10. Шабад М.А. Проверка чувствительности защит на переменном оперативном токе с учетом погрешности трансформаторов тока. - Энергетик, 1984, N1 и N2.
11. Справочник по наладке электрооборудования электростанций и подстанций", под ред. Мусаэяна Э.С. - М. Энергоатомиздат, 1984.

Расчетные формулы для определения вторичной нагрузки трансформаторов тока

№ пп.	Схема соединения трансформаторов тока и вторичной нагрузки	Вид к. з.	Вторичная расчетная нагрузка трансформаторов тока (на фазу) $z_{н. расч}$
1	 <p>Полная звезда</p>	Трехфазное и двухфазное	$z_{н. расч} = r_{пр} + z_p + r_{пер}$
		Однофазное	$z_{н. расч} = 2r_{пр} + z_p + r_{пер}$
2	 <p>Неполная звезда</p>	Трехфазное	$z_{н. расч} \approx \sqrt{3}r_{пр} + z_p + z_{обр} + r_{пер}$
		Двухфазное АВ или ВС	$z_{н. расч} = 2r_{пр} + z_p + z_{обр} + r_{пер}$
		Двухфазное за трансформатором $\nabla/\Delta-11$	$z_{н. расч} = 3r_{пр} + z_p + 2z_{обр} + r_{пер}$
3	 <p>На разность токов двух фаз А и С</p>	Трехфазное	$z_{н. расч} = \sqrt{3}(2r_{пр} + z_p) + r_{пер}$
		Двухфазное АС	$z_{н. расч} = 4r_{пр} + 2z_p + r_{пер}$
		Двухфазное АВ или ВС	$z_{н. расч} = 2r_{пр} + z_p + r_{пер}$

Приложение 1

№ пп.	Схема соединения трансформаторов тока и вторичной нагрузки	Вид к. з.	Вторичная расчетная нагрузка трансформаторов тока (на фазу) $z_{н. расч}$
4	 <p>Треугольник</p>	Трехфазное и двухфазное: двухфазное за трансформатором $\nabla/\Delta-11$	$z_{н. расч} = 3r_{пр} + 3z_p + r_{пер}$
		Однофазное	$z_{н. расч} = 2r_{пр} + 2z_p + r_{пер}$
5	 <p>Последовательное соединение вторичных обмоток трансформаторов тока</p>	—	$z'_{н. расч} = 0,5z_{н. расч}$ где $z_{н. расч}$ — нагрузка, рассчитанная по формулам пп. 1—4. 1, 2 — трансформаторы тока одного и того же класса точности
6	 <p>Параллельное соединение вторичных обмоток трансформаторов тока</p>	—	$z'_{н. расч} = 2z_{н. расч1}$ где $z_{н. расч}$ — нагрузка, рассчитанная по формулам пп. 1—4. 1, 2 — трансформаторы тока одного и того же класса точности

Примечание. Во всех случаях принимается переходное сопротивление на контактах  $r_{пер} = 0,1 \text{ Ом}$ .

## Рекомендуемый паспорт-протокол

(Энергосистема)	(Электростанция — сетевой район, подстанция)
	(Защищаемый объект)
	(Место установки)

Паспорт-протокол  
трансформаторов тока

I. Паспортные данные


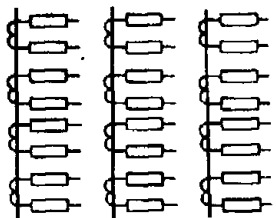
Тип трансформаторов тока \_\_\_\_\_

Коэффициент трансформации \_\_\_\_\_

Год выпуска \_\_\_\_\_

Обозначение обмотки	Класс точности	Номинальный режим нагрузки		Номинальная предельная кратность $K_{\text{ном}}$
		Ом	В·А	

Схема соединений и полярность трансформаторов тока	Маркировка	Загрузка трансформаторов тока
--	------------	-------------------------------

Фаза		Маркировка
Сторона		
Полярность		
Обозначение обмоток		Маркировка

Показать полную схему соединения с заземлениями. В прямоугольниках указать полярность и обозначение выводов вторичных обмоток.

Показать полностью схему загрузки. В прямоугольниках указать обозначение загрузки. Например. РТ, А, ВУ-25 и т. п.

## Основные кабели

№ п.п.	Наименование	Маркировка	Марка	Сечение, мм²	Длина, м	Сопротивление жилы, Ом
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						

## Соединительные муфты

№ п.п.	Обозначение кабеля	Расстояние по длине кабеля от трансформатора тока до муфты
1		
2		
3		
4		

Дата \_\_\_\_\_ Составил \_\_\_\_\_ Проверил \_\_\_\_\_

## 1. Внешний осмотр

Элементы схемы	Состояние
Выводы	
Сборки выводов	
Заземления	
Уплотнения	
Кабельные разделки	
Кабели и соединительные муфты	

3. Проверка сопротивления изоляции трансформаторов тока и их цепей по элементам мегомметром на \_\_\_\_\_ В

	Обозначение трансформаторов тока	
	Сопротивление изоляции между обмотками, МОм	
	Сопротивление изоляции на землю, МОм	
	Обозначение кабеля	
	Сопротивление изоляции на землю, МОм	
	Минимальное сопротивление изоляции между жилами, МОм	
	Сопротивление изоляции на землю в полной схеме, МОм	

6. Снятие характеристики намагничивания  $U_2=f(I'_{\text{нам}})$ [illegible]

A blank coordinate system with a vertical axis labeled  $U_2$  and a horizontal axis labeled  $I'$ .

Способ и схема проверки \_\_\_\_\_

## 7. Проверка коэффициента трансформации первичным током

A

Фазы	Вторичный ток _____ А при отведениях вторичной обмотки								Установленный коэффициент трансформации
A									
B									
C									
A-B									
B-C									
C-A									
A-0									
B-0									
C-0									

## 8. Проверка схемы соединения трансформаторов тока вторичным током

Фаза	Номер трансформатора тока	$I_{\text{пер}}', \text{ А}$	$I_{\text{втор}}', \text{ А}$	Схема соединения трансформаторов тока	Номер трансформатора тока	$I_{\text{пер}}', \text{ А}$	$I_{\text{втор}}', \text{ А}$	Схема соединения трансформаторов тока	Номер трансформатора тока	$I_{\text{пер}}', \text{ А}$	$I_{\text{втор}}', \text{ А}$	Схема соединения трансформаторов тока
A												
B												
C												
0												

## 9. Измерение нагрузок вторичных обмоток трансформаторов тока при различных значениях тока

Сочетание фаз	Величины нагрузок вторичных обмоток при токе								
	... А			... А			... А		
	U, В	z, Ом	$z, \frac{\text{Ом}}{\text{фаза}}$	U, В	z, Ом	$z, \frac{\text{Ом}}{\text{фаза}}$	U, В	z, Ом	$z, \frac{\text{Ом}}{\text{фаза}}$
A-B									
B-C									
C-A									
A-0									
B-0									
C-0									

## 10. Дополнительные проверки

Начальник МС РЗАИ \_\_\_\_\_

Проверку производил \_\_\_\_\_

## III. Результаты эксплуатационных проверок

Дата	Наименование и объем проверки. Выявленные отклонение характеристик. Обнаруженные дефекты	Сопротивление изоляции токовых цепей на землю				Подписи	
		обмотки I	обмотки II	обмотки III	обмотки IV	проверяющего	контролирующего

## Изменение схемы соединений и нагрузки трансформаторов тока

Дата	Произведенные изменения	Подписи	
		проверяющего	начальника МС РЗАИ

## СОДЕРЖАНИЕ

## Часть первая

Предисловие.....	3
1. Общие сведения о трансформаторах тока, используемых в схемах релейной защиты....	5
2. Объем и методы экспериментальной проверки трансформаторов тока.....	12
3. Расчетная проверка пригодности трансформаторов тока по их погрешностям..	19
Литература.....	29
Приложения:	
Расчетные формулы для определения вторичной нагрузки трансформаторов тока..	30
Паспорт-протокол.....	32

## Часть вторая

4. Релейная защита на переменном оперативном токе и роль трансформаторов тока в обеспечении ее надежной работы.
  5. Расчеты для схем релейной защиты с дешунтированием ЭУ коммутационных аппаратов (ОК и ВК).
  6. Расчетная проверка трансформаторов тока в схемах защиты на реле прямого действия.
- Литература.

М.А.Шабад  
Трансформаторы тока в схемах релейной защиты  
Конспект лекций  
Научный редактор А.М.Александров

Ризограф, объем п.л. 1,6, тираж 1000 экз.  
Заказ № 9 Цена договорная  
ПЗИПК, 199034, Санкт-Петербург, ВО, 10-я линия, 3

Перепечатка запрещена