

Лабораторная работа №1

ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА (ТТ)

Цель работы: получить практические навыки, по испытанию трансформаторов тока используя методы применяемые в эксплуатации. На основании экспериментальных данных оценить техническое состояние трансформатора тока. Освоить методику определения погрешностей ТТ по паспортным и экспериментальным данным.

Программа работы:

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, необходимым для выполнения работы.
2. Осмотреть трансформатор тока и измерить сопротивление изоляции.
3. Проверить правильность разметки зажимов двумя методами.
4. Определить коэффициент трансформации трансформатора тока.
5. Снять вольтамперную характеристику ТТ
6. Провести расчетную проверку ТТ на 10%, погрешность по паспортным данным и кривой налаживания.

Выполнение работы

1. Для выполнения работы по испытанию трансформаторов тока используются следующие приборы и оборудование:

- 1) Трансформатор тока типа ТВК 10 УХЛЗ, который подвергается испытаниям;
- 2) Регулятор напряжения типа ЛАТр;
- 3) Понижающий трансформатор ОСО-0,25-73 220/ШВ;
- 4) Мегомметр типа ЭСО 202/2;
- 5) Миллиамперметр типа Н 42300;
- 6) Комбинированный прибор типа Ц4313;
- 7) Два амперметра типа Э 59;
- 8) Лабораторный трансформатор тока типа УУТ-5.

При оформлении отчета следует привести паспортные данные испытуемого трансформатора тока и приборов, используемых в работе.

2. Пункт 2 программы следует выполнять в следующей последовательности:

1) Осмотреть трансформатор тока и убедиться в том, что вторичная обмотка №1, служащая для подключения измерительных приборов, замкнута накоротко.

2) Измерить с помощью линейки магнитопровод ТТ, на котором расположена вторичная обмотка №2, служащая для подключения устройств защиты.

3) С помощью мегаомметра измерить сопротивление изоляции между первичной и вторичной обмотками, а также между обмотками и корпусом. Измерения проводить при выходном напряжении мегаомметра 1000В.

Перед измерением мегаомметр следует подвергнуть контрольной проверке, которая заключается в том, что проверяют показания по шкале при разомкнутых и короткозамкнутых выходных зажимах мегаомметра. Отсчет по шкале мегаомметра следует производить при устойчивом положении стрелки прибора.

В отчете привести эскиз магнитопровода с указанием размеров, а также данные измерений сопротивления изоляции.

3. Проверка правильности заводской маркировки выводов трансформатора тока производится по схеме рис. 1. В качестве источника постоянного тока можно использовать внутреннюю батарею комбинированного прибора Ц4313. Следует проследить, чтобы к выводам L_1 и L_2 трансформатора тока батарея и миллиамперметр были присоединены однополярными зажимами (прибор включается на измерении сопротивлений с множителем $\Omega \times 1$, а выводу * прибора соответствует положительный вывод источника питания). При правильной

заводской маркировке стрелка миллиамперметра при замыкании цепи будет отклоняться вправо, а при размыкании влево от нулевого положения.

Проверка правильности заводской маркировки выводов трансформатора тока методом одного амперметра производится по схеме рис. 2. В качестве добавочного сопротивления в этой схеме используется ползунковый реостат с номинальным током 5А. Собрав схему Рис. 2 следует подать входное напряжение и с помощью ЛАТр создать ток в схеме примерно равный 4А (перед включением схемы под напряжение выходное напряжение ЛАТр должно быть равным нулю). Не изменяя регулировки ЛАТр снять напряжение со схемы, отключить вторичную обмотку от амперметра и закоротить ее выводы u_1 и u_2 . Подать напряжение на схему. Если показания амперметра увеличатся по сравнению с предыдущими измерениями, то разметка зажимов правильная. Результаты опытов по определению правильности маркировки обмоток трансформатора тока представить в отчете. (Метод одного амперметра применяется при проверке правильности маркировки зажимов трансформаторов тока со сравнительно небольшим коэффициентом трансформации.)

4. Проверка коэффициента трансформации трансформатора тока типа ТВК 10 УХЛЗ производится по схеме рис.3. Для расширения пределов измерения амперметра РА2 он включается через измерительный трансформатор тока типа УТТ-5. При этом используется первичная обмотка УТТ-5 с током 50 А. После сборки схемы Рис. 3 следует проверить положение ручки ЛАТр, она должна соответствовать выходному напряжению ЛАТр равному нулю (крайнее левое положение). Включив схему под напряжение, следует снять 3-4 показания амперметров до тока равного 5А, во вторичной обмотке испытуемого трансформатора, включительно. Вычислить среднее значение коэффициента

трансформации $n_{ТТ}$ Данные измерений представить в отчете в виде таблицы (составляется самостоятельно).

5. Вольтамперную характеристику ТТ получают используя схему Рис. 4. Амперметр РА должен иметь предел измерений 5А. В качестве вольтметра используется комбинированный прибор типа Ц 4313 с пределом измерения 150 В. Прежде чем снимать ВАХ следует размагнитить сердечник магнитопровода трансформатора тока. Для этого на схему подается напряжение, и производят два-три плавных подъема и снижения до нуля напряжения на обмотке ТТ (амперметр при этом не должен зашкаливать).

После того как магнитопровод будет размагничен, изменяют напряжение на обмотке ТТ от 0 до такого его значения, при котором ток через вторичную обмотку ТТ не станет равным 5А, и записывают в таблицу значения напряжения и тока в обмотке.

Для получения характеристики следует произвести 6-8 измерений. На миллиметровой бумаге построить полученную вольтамперную характеристику $U_2 = f(I_{\text{нам}})$ и на том же графике привести типовую кривую намагничивания.

В отчете привести оценку технического состояния трансформатора тока на основе экспериментальных данных пунктов 2, 3, 4, 5 программы.

6. При проверке трансформатора тока на 10% погрешность по паспортным данным, определяют допустимую кратность вторичного тока по известным значениям полного сопротивления Z_2 вторичной обмотки ТТ и фактическому значению сопротивления нагрузки $Z_{\text{н. факт.}}$.

Величины $Z_{\text{н. факт.}}$ и $I_{\text{1расч.}}$ задаются преподавателем.

Схемы испытаний трансформаторов тока (ТТ)

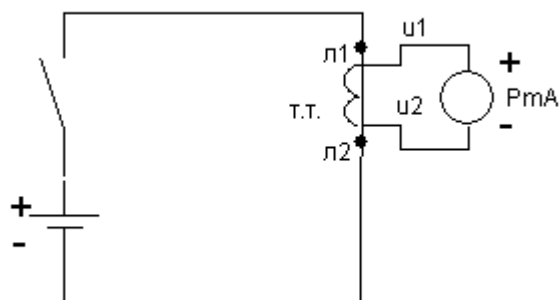


Рис. 1. Схема испытаний ТТ при проверке полярности выводов (метод постоянного тока).

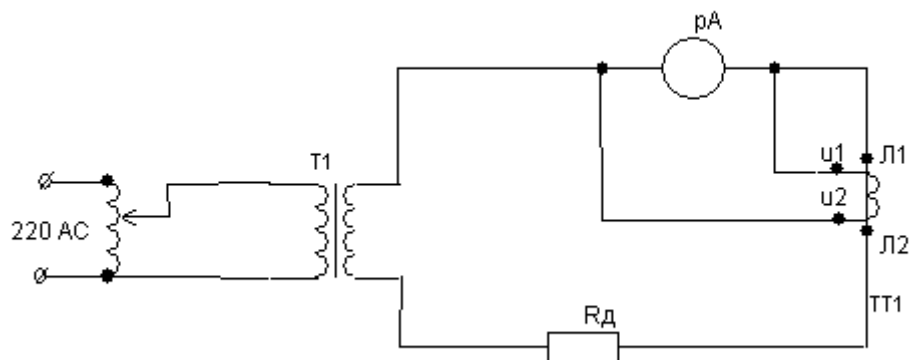


Рис. 2. Схема испытаний ТТ при проверке полярности выводов от источника тока (метод одного амперметра).

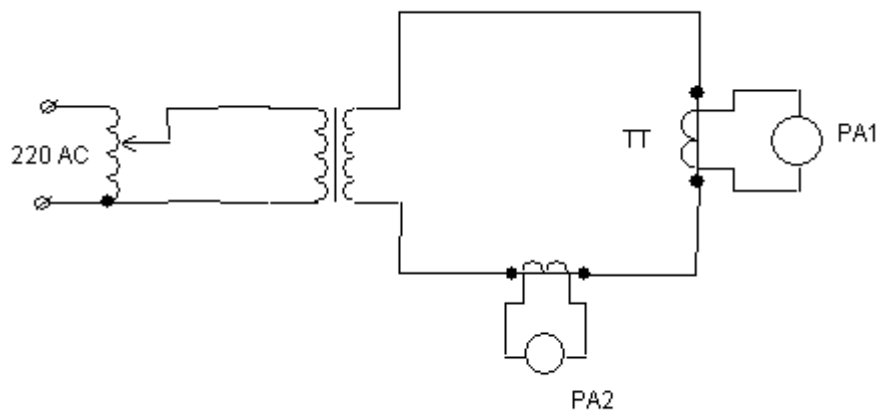


Рис. 3. Схема испытаний ТТ при проверке коэффициента трансформации.

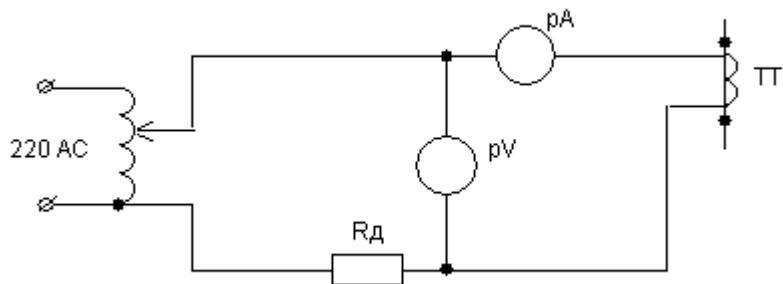


Рис. 4. Схема испытаний ТТ при снятии характеристики намагничивания от источника напряжения.

Паспортные данные трансформатора тока типа ТВК 10 УХЛЗ используемого в лабораторной работе.

Номинальное напряжение, кВ	10
Номинальная частота, Гц	50
Номинальный первичный ток, А	50
Номинальный вторичный ток, А	5
Номинальный класс точности вторичных обмоток	
- обмотка №1 для измерений	0,5
- обмотка №2 для защиты	10 P
Номинальная вторичная нагрузка с коэффициентом мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$, В·А (Ом)	
Обмотки №1 для измерений	10 (0,4)
Обмотки №2 для защиты	15 (0,6)
Номинальная предельная кратность вторичной обмотки для защиты	15
Ток намагничивания, А не более	6
Число витков вторичной обмотки	119
Полное сопротивление вторичной обмотки Ом	0,22

Перечень основных условных обозначений

I_1 – первичный ток трансформатора тока;

I_2 – вторичный ток трансформатора тока;

$I_{1Н}$ – номинальный первичный ток;

$I_{2Н}$ – номинальный вторичный ток ;

$I_{1расч.}$ – расчетное значение первичного тока, при котором должна быть обеспечена работа ТТ с соблюдением ПУЭ (для правильного функционирования релейной защиты);

$I_{2 расч.}$ – расчетное значение вторичного тока;

$I_{нам.}$ – ток намагничивания ТТ;

$K_{10} = \frac{I_{1 расч.}}{I_{1ном.}}$ – предельная кратность, при которой гарантируется полная

погрешность $E = 10\%$;

$K_{ном}$ – номинальная предельная кратность, при которой допускается сопротивление нагрузки Z_n ;

$Z_{ном}$ – номинальное сопротивление нагрузки;

Z_2 – сопротивление вторичной обмотки ТТ;

W_2 – число витков вторичной обмотки;

W_1 – число витков первичной обмотки;

E_2 – э.д.с. вторичной обмотки;

U_2 – напряжение на зажимах вторичной обмотки;

n_T – коэффициент трансформации;

δ – угловая погрешность ТТ;

$f\%$ - погрешность по току ТТ;

$\varepsilon\%$ - полная погрешность ТТ;

I_1' – первичный ток, приведенный ко вторичной обмотке, $I_1' = \frac{I_1}{n_T}$

$I_{нам}^1$ – ток намагничивания, приведенный к вторичной обмотке,
$$I_{нам}^1 = \frac{I_{нам}}{n_T} .$$

Общие сведения о трансформаторах тока, используемых в схемах релейной защиты

Измерительные приборы, аппараты релейной защиты и автоматики включают через измерительные трансформаторы тока. Они являются наиболее распространенной разновидностью первичных преобразователей тока и позволяют:

1) Отделить первичные цепи защищаемых элементов от вторичных цепей измерения и контроля, что обеспечивает безопасность измерений и удобство обслуживания приборов и реле;

2) Стандартизовать приборы и реле, рассчитывая их обмотки на определенный ток (номинальный вторичный ток трансформаторов тока обычно равен 5А);

3) Защитить от протекания токов к.з. непосредственно по последовательно включенным обмоткам измерительных приборов и реле.

4) Существенно снизить сечение и стоимость контрольных кабелей и проводок.

5) Устанавливать приборы и реле на значительном расстоянии от первичных цепей, в которых производятся измерения.

Принцип действия ТТ

Трансформатор тока состоит из замкнутого магнитопровода на котором расположены первичная w_1 и вторичная w_2 обмотки. Первичная обмотка последовательно включается в контролируемую цепь и обтекается током I_1 . Ко вторичной обмотке подключаются измерительные приборы и реле. Токовые обмотки измерительных приборов и реле включаются между собой, последовательно по ним протекает вторичный ток I_2 .

Для трансформаторов тока характерным является то, что число витков вторичной обмотки w_2 больше числа витков первичной обмотки w_1 , а значение первичного тока I_1 , не зависит от нагрузки во вторичной цепи и определяется только параметрами и нагрузкой первичной цепи. Соответственно и магнитный поток первичной цепи Φ_1 , создаваемый током I_1 , остается постоянным при изменениях во вторичной цепи. Сопротивление нагрузки вторичной цепи (токовые обмотки реле, приборов, соединительных проводов) невелико и поэтому трансформатор тока работает в режиме, близком к короткому замыканию.

Следует отметить, что под нагрузкой трансформаторов тока обычно понимают или полное сопротивление Z_H его внешней вторичной цепи (Ом), равное сумме сопротивлений всех последовательно соединенных обмоток приборов, и других элементов, а также соединительных проводов и контактов, или мощность (В·А), потребляемую нагрузкой $S_H = I_2^2 \cdot Z_H$.

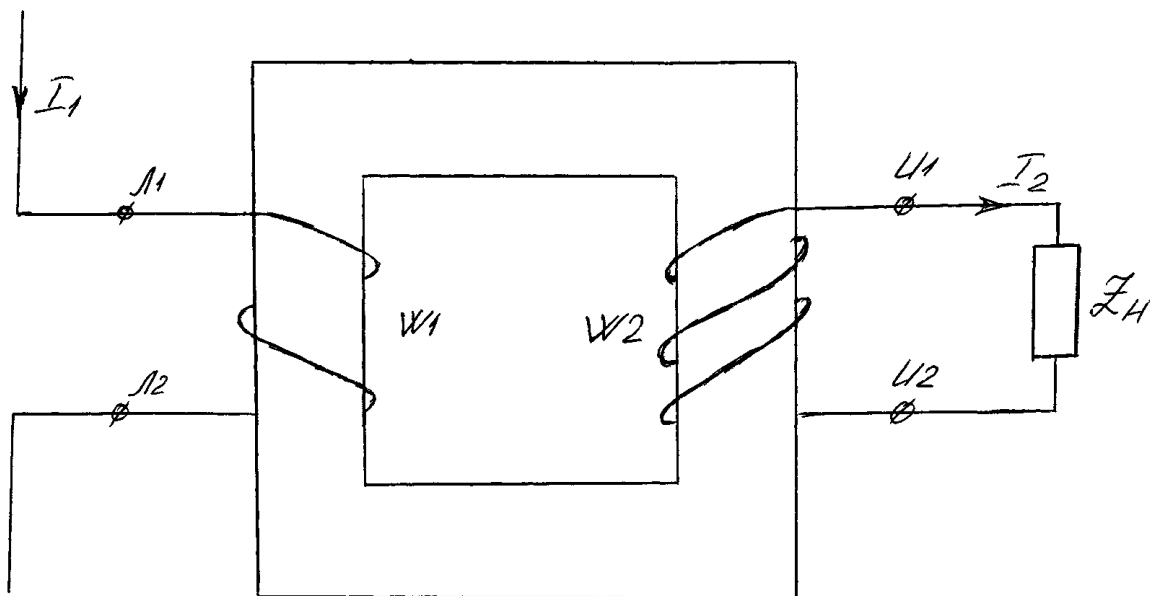


Рис. 5. Схема включения трансформатора тока.

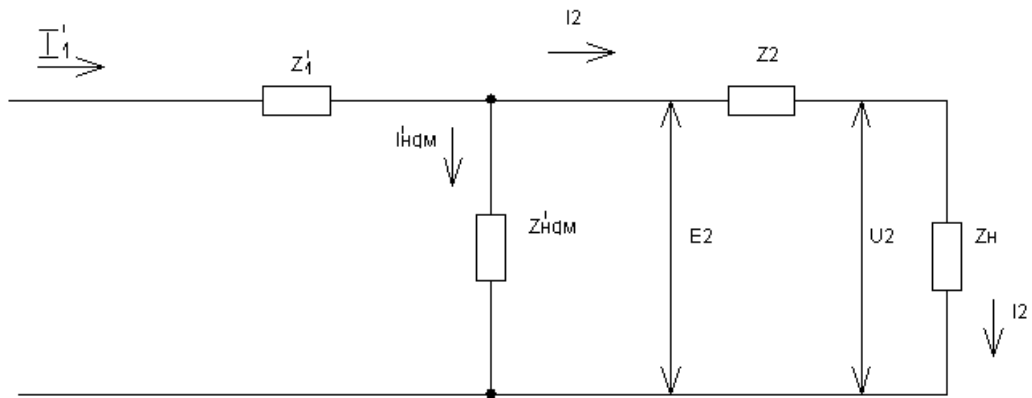


Рис. 6. Схема замещения трансформатора тока.

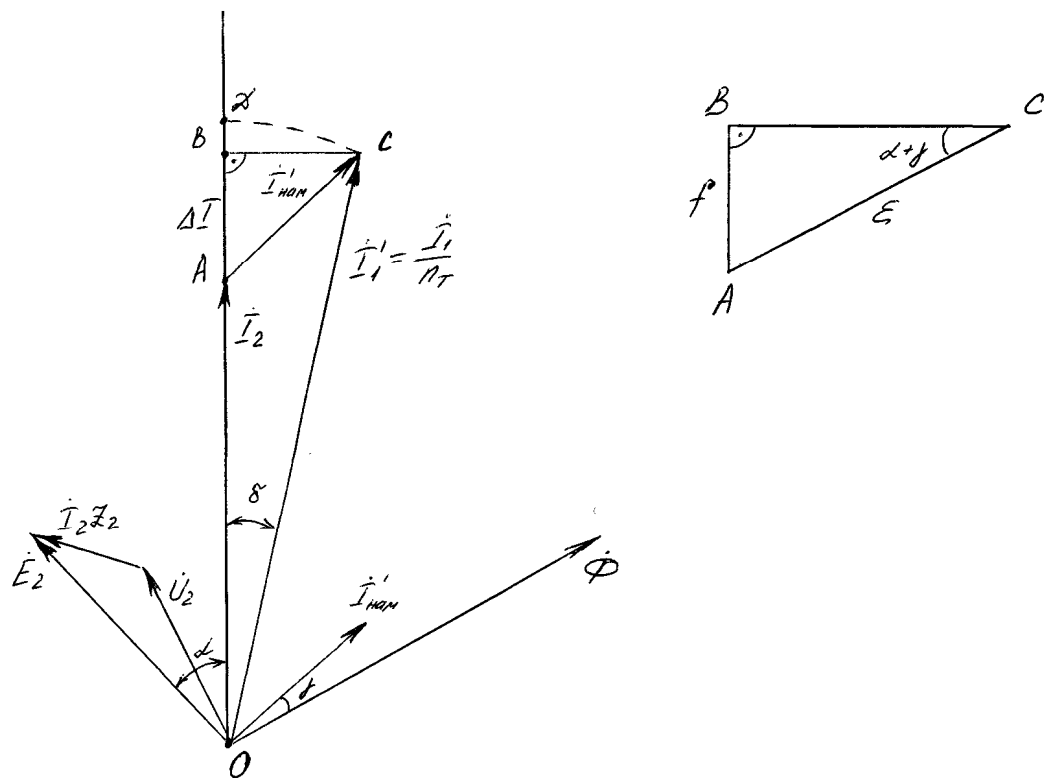


Рис. 7. Векторная диаграмма и «треугольник погрешностей» трансформатора тока.

Работа трансформатора тока характеризуется уравнением намагничивающих сил, согласно которому намагничивающие силы (н.с.) первичной $I_1 w_1$ и вторичной $I_2 w_2$ обмоток и создаваемые ими магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 геометрически складываются, создавая результирующий поток Φ_T в трансформаторе тока.

$$\begin{aligned} I_1 w_1 + I_2 w_2 &= I_{\text{нам}} w_1 \\ \Phi_1 + \Phi_2 &= \Phi_T \end{aligned}$$

Рабочий магнитный поток Φ_T пронизывает обе обмотки ТТ и наводит во вторичной обмотке электродвижущую силу (э.д.с.) E_2 , которая создает в замкнутой цепи вторичной обмотки ток I_2 .

Магнитный поток Φ_T создается намагничивающей силой $I_{\text{нам}} w_1$, иначе говоря, током намагничивания $I_{\text{нам}}$, который является частью первичного тока I_1 . Таким образом, во вторичный ток трансформируется лишь часть первичного тока $I_2 = -\left(\frac{I_1}{n_\epsilon} - \frac{I_{\text{нам}}}{n_\epsilon}\right)$,

где $n_\epsilon = \frac{w_2}{w_1}$ - витковый коэффициент трансформации трансформатора тока.

В нормальном режиме при рабочих токах значение намагничивающего тока $I_{\text{нам}}$ невелико (0,5-3%) и поэтому коэффициент трансформации трансформатора тока можно определять как отношение первичного тока ко вторичному и он приблизительно равен витковому коэффициенту

$$n_T = \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1}$$

При расчетах релейной защиты, если ток намагничивания не превышает 10% первичного тока, коэффициент трансформации ТТ

принимают равным $n_T = \frac{I_{1\text{ном}}}{I_{2\text{ном}}}$ и через него вычисляют вторичные токи

(токи в реле)

$$I_2 = \frac{I_1}{n_T}$$

Погрешности трансформаторов тока

У трансформаторов тока различают три вида погрешностей: токовую, полную и угловую. Погрешности ТТ зависят от степени насыщения магнитопровода и тесно связаны друг с другом.

Наглядное представление о таком процессе дает схема замещения ТТ. В схеме замещения магнитная связь между обмотками заменяется электрической, а все первичные величины приведены к значениям вторичной стороны трансформатора тока через коэффициент трансформации

$$I_1' = \frac{I_1}{n_T} \quad I_{нам}^1 = \frac{I_{нам}}{n_T} .$$

Приведенные сопротивления первичной обмотки ТТ

$$Z_1' = \frac{Z_1}{n_T^2} \text{ и ветви намагничивания } Z_{нам}^1 = \frac{Z_{нам}}{n_T^2}$$

Чем больше значение первичного тока I_1 тем больше насыщение магнитопровода и тем меньше сопротивление ветви намагничивания $Z_{нам}^1$.

Вследствие этого тем больше будет ток в этой ветви $I_{нам}^1$ и тем меньший ток I_2 попадает в нагрузку.

Из схемы замещения видно, что рост намагничивающего тока может произойти не только при глубоком насыщении магнитопровода, но и при непредусмотренном увеличении сопротивления нагрузки Z_n . При этом происходит не только уменьшение тока I_2 , но и искажается форма кривой этого тока.

На основе схемы замещения строится векторная диаграмма трансформатора тока.

При построении векторной диаграммы за исходный принят вектор вторичного тока I_2 .

Вектор напряжения U_2 на диаграмме опережает вектор вторичного тока I_2 на угол полного сопротивления вторичной нагрузки Z_H .

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 z_H$$

Электродвижущая сила вторичной обмотки отличается от U_2 за счет падения напряжения в сопротивлении вторичной обмотки от тока \dot{I}_2 .

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 z_H$$

Вектор \dot{E}_2 опережает I_2 на угол α .

Вектор магнитного потока трансформатора Φ_T отстает от вектора наведенной им э.д.с. на 90° . Намагничивающий ток трансформатора тока $\dot{I}_{нам}$, создающий поток Φ_T , опережает последний на угол γ , обусловленный потерями в стали магнитопровода. Вектор приведенного первичного тока I_1^1 на диаграмме получен как сумма векторов вторичного тока I_2 и тока намагничивания $I_{ном}^1$

$$I_1' = I_2 + I_{нам}'$$

Величина ΔI , равная арифметической разности между $I_1' = \frac{I_1}{n_T}$ и I_2 называется токовой погрешностью, (отрезок АД по векторной диаграмме) обозначается буквой f и вычисляется по формуле

$$f = \frac{I_2 - I_1'}{I_1'} \cdot 100, \% \quad \text{где}$$

$$I_1' = \frac{I_1}{n_T} \quad \text{отсюда} \quad f = \frac{n_T I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100$$

Под угловой погрешностью понимается угол δ между векторами токов I_2 и I_1' . Угловая погрешность δ показывает, насколько

действительный ток I_2 сдвинут относительно «идеального тока» рассчитанного по формуле

$$I_2 = \frac{I_1}{n_T}$$

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 ε , выражается в процентах и вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \frac{|I_{\text{нам}}|}{|I_1'|} \cdot 100, \%,$$

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

Из векторной диаграммы трансформатора тока видно, что при $\delta > 0$ всегда $\varepsilon > f$. Следует отметить, что при $\varepsilon < 10\%$ токовая погрешность $f < 9\%$, а угловая $\beta < 7^\circ$, что является допустимым для нормальной работы большинства защит.

Классы точности ТТ

Измерительные трансформаторы тока выпускаются пяти классов точности: 0,2; 0,5; 1; 3; 10. Указанные цифры представляют собой токовую погрешность в процентах от номинального тока при нагрузке первичных обмоток током 100÷120% для первых трех классов и 50÷120% для двух последних. Для трансформаторов тока классов точности 0,2; 0,5 и 1 нормируется также и угловая погрешность.

Трансформаторы тока класса 0,2 используют для лабораторных измерений, класса 0,5 для включения счетчиков электроэнергии и проведения коммерческих расчетов, класса 1 и 3 для подключения других

измерительных приборов и реле, класса 10 для питания токовых реле и оперативных цепей релейных защит.

Большинство трансформаторов тока выполняют с двумя сердечниками, на каждом из которых размещают свою вторичную обмотку. Первичная обмотка у них общая. Трансформаторы тока с двумя вторичными обмотками могут иметь как одинаковые, так и разные классы точности.

При разных классах точности, к обмотке с более высоким классом присоединяют измерительные приборы (обмотки для измерений), а к другой - реле защиты (обмотка для защиты).

Шкала номинальных токов первичных обмоток трансформаторов тока $I_{н1}$: 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 80; 100; 150; 250; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 1000 А и более.

Опасность размыкания вторичной обмотки ТТ

В нормальных условиях намагничивающий ток трансформатора тока мал (меньше 10%), так как он заранее подбирается таким по допустимому значению сопротивления нагрузки z_n исходя из условия работы ТТ с малыми погрешностями.

При случайном размыкании вторичной обмотки первичный ток I_1 является током намагничивания и магнитный поток трансформатора Φ_T резко возрастает. В результате повышения потерь в стали магнитопровода (сердечника ТТ) происходит его сильный нагрев вплоть до пожара. При этом мгновенные значение, наведенное потоком Φ_T 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 при эксплуатации запрещается разрывать вторичную цепь работающего трансформатора тока, тем более что это может совпасть с режимом к.з. первичной цепи. Перед отключением какого-либо прибора от

трансформатора тока необходимо предварительно замкнуть накоротко его вторичную обмотку и после этого отключить прибор или реле.

Некоторые методы экспериментальной и расчетной проверки трансформаторов тока

Измерения сопротивления изоляции

Согласно ПТЭЭП сопротивления изоляции первичных обмоток трансформаторов тока напряжением выше 1000 В производится мегаомметром на напряжение 2500 В. Величина сопротивления изоляции не нормируется. Она обычно составляет несколько тысяч МОм при сухой, исправной изоляции.

Сопротивление изоляции вторичных обмоток измеряют мегаомметром на напряжение 1000В. Величина сопротивления изоляции обмоток также не нормируется, но должно быть не ниже 1 Мом вместе с подсоединенными к ним цепями. Сопротивление изоляции каждой обмотки измеряется по отношению к корпусу и остальным обмоткам.

Обозначение выводов

При изготовлении трансформаторов тока выводы их первичной и вторичной обмоток условно обозначаются (маркируются) так, чтобы при помощи этих обозначений можно было определять направления вторичного тока по направлению первичного.

Вывод первичной обмотки могут обозначаться производно: один из них принимается за начало и обозначается буквой L_1 , а второй за конец обмотки и обозначается буквой L_2 . Маркировка выводов – вторичной обмотки выполняется по следующему правилу.

При прохождении тока в первичной обмотке от начала L_1 к концу L_2 за начало вторичной обмотки u_1 принимается тот ее вывод, из которого в этот момент ток вытекает в цепь нагрузки. Соответственно второй вывод вторичной обмотки принимается за конец обмотки и обозначается буквой u_2 .

При таком обозначении выводов обмоток трансформатора тока ток в обмотке реле подключенном ко вторичной обмотке трансформатора тока, имеет такое же направление, как и в случае включения реле непосредственно в первичную цепь.

В условиях эксплуатации одноименные выводы обмоток определяют экспериментально. Для этой цели первичную обмотку замыкают на батарею постоянного тока и в момент замыкания первичной цепи наблюдают отклонение стрелки гальванометра, присоединенного к зажимам вторичной обмотки. При этом используется тот факт, что притекание к одноименному выводу одного контура тока, возрастающего по величине, вызывает повышение потенциала на одноименном выводе другого контура.

Характеристики намагничивания и вольтамперные характеристики трансформатора тока.

В общем случае характеристика намагничивания (кривая намагничивания) представляет собой геометрическое место вершин петель гистерезиса и является зависимостью индукции B от напряженности H (или н.с. $F = Iw$). Так как индукция пропорциональна электродвижущей силе E , а намагничивающая сила F пропорциональна току I , то для трансформатора тока используют более удобную для практических целей зависимость $E_2 = f(I_{\text{нам}})$. Характеристики такого вида приводятся в справочной литературе. Эти характеристики являются типовыми, и строятся на основании усредненных результатов специальных испытаний, трансформаторной стали на заводах изготовителях.

Представленная в виде таблицы типовая характеристика намагничивания выражает зависимость э.д.с. E' , наведенной в одном витке при сечении магнитопровода 1 см^2 , от намагничивающей силы F на 1 см магнитного пути, выражаемом в удельных ампер-витках (ав/см). Величина E' для удобства пользователя выражена в мВ/см² на виток.

Типовая характеристика намагничивания трансформаторной стали магнитопровода трансформатора тока ТВК – 10

E' mB	8	16	25	30	32	33	34	35
F ав/см	0,25	0,5	1,25	2,5	5	7,5	10	12,5

Для построения типовой характеристики намагничивания, необходимо зная размеры магнитопровода и число витков вторичной обмотки, определить э.д.с. E_2 в вольтах и ток намагничивания $I_{\text{нам}}^1$ в амперах, используя выражение

$$E_2 = \frac{E^1 \cdot S \cdot W}{1000}$$

$$I_{\text{нам}}^1 = F \frac{L}{W}, \text{ где}$$

S – сечение магнитопровода ТТ, см²;

L – средняя длина пути магнитного потока в магнитопроводе, см;

W – число витков вторичной обмотки.

В практике эксплуатации релейной защиты используются вольтамперные характеристики представляющие зависимость напряжения на вторичной обмотке ТТ (U_2) от тока намагничивания ($I_{\text{нам}}$). $U_2 = f(I_{\text{нам}})$. Эта характеристика снимается при подаче регулируемого синусоидального напряжения на зажимы вторичной обмотки при разомкнутой первичной обмотке. Так как при этом U_2 больше E_2 за счет падения напряжения в сопротивлении Z_2 от тока намагничивания $I_{\text{нам}}$ вольтамперная характеристика располагается выше характеристики намагничивания. Характеристика намагничивания может быть построена по нескольким

точкам вольтамперной характеристики. При этом величина E_2 для каждого значения $I_{ном}^1$ определяется по выражению

$$E_2 = U_2 - I_{нам} Z_2$$

Для упрощения эта величина берется арифметической, что дает запас при расчетах погрешностей трансформаторов тока.

При снятии ВАХ напряжения следует регулировать автотрансформатором типа ЛАТр. Рекомендуемые приборы вольтметр типа Ц4313, измеряющий среднее напряжение и амперметр – электромагнитный или электродинамический, позволяющий измерять действующее значение тока. Желательно снять ВАХ до насыщения магнитопровода ТТ, т.е. до перегиба ВАХ, или, по крайней мере, до значения $I_{нам} = 0,1 I_2_{расч.}$, где $I_2_{расч.}$ – вторичный ток к.з., при котором должна обеспечиваться точная работа ТТ. При снятии ВАХ нельзя подавать напряжение выше гарантированного заводом-изготовителем (чаще всего 1000 В).

Вольтамперная характеристика строится на миллиметровой бумаге. Исправность трансформатора тока оценивается сопоставлением построенной ВАХ с типовой характеристикой намагничивания или с ВАХ других ТТ того же типа, класса и коэффициента трансформации.

При наличии виткового замыкания во вторичной обмотке Т.Т, ВАХ резко снижается по сравнению с ВАХ исправного трансформатора тока и при этом резко уменьшается угол наклона ВАХ и горизонтальной оси.

Наличие вольтамперных характеристик позволяет решить вопрос о возможности совместного использования ТТ в схемах дифференциальной токовой защиты. Чем ближе совпадают вольтамперные характеристики, тем меньше токи небаланса дифференциальной защиты.

Снятие ВАХ позволяют произвести расчет полной погрешности ϵ трансформатора тока. С этой точки зрения их использования предпочтительнее по сравнению с типовыми характеристиками

намагничивания, поскольку за счет не идентичности стали магнитопровода Т.Т, возможно отклонение фактической характеристики от типовой до 20%.

Проверка ТТ по кривым предельной кратности (кривые 10% погрешности ТТ).

На основании опыта эксплуатации и теоретического анализа для большинства защит допускается погрешность Т.Т, по току не более 10% и по углу до 7% при максимальном значении тока короткого замыкания.

Как уже было показано (см. векторную диаграмму ТТ) это условие выполняет если полная погрешность $\varepsilon \leq 10\%$. Условно 10% полной погрешности трансформатора тока соответствует его работа с током намагничивания равным 10% величины первичного тока, при этом трансформатор тока работает у точки перегиба характеристики намагничивания, т.е. достигает насыщения.

Очевидно, что работа трансформатора в этой точке кривой намагничивания зависит как от величины первичного тока I_1 , так и от величины сопротивления нагрузки Z_H (см. схему замещения), поэтому для оценки пригодности трансформаторов тока для релейной защиты в конкретных условиях применяются кривые 10% погрешностей, или в соответствии с современной терминологией – кривые предельных кратностей.

Кривая предельной кратности представляет собой зависимости кратности первичного тока K_{10} от величины сопротивления внешней

вторичной нагрузки
$$K_{10} = \frac{I_{1расч.}}{I_{1ном.}} = f(Z_H)$$

где $I_{1расч.}$ - ток к.з. при котором правильно должна функционировать защита в соответствии с ПУЭ;

$I_{1ном.}$ - первичный номинальный ток.

Любая точка на кривой предельной кратности соответствует работе трансформатора тока с 10% полной погрешностью. Кривые предельной кратности строятся для конкретных типов трансформаторов тока и приводятся в справочной литературе.

По кривой предельной кратности, соответствующей типу, классу вторичной обмотки и коэффициенту трансформации ТТ, находится значение сопротивления нагрузки Z_H , при котором погрешность трансформатора $\varepsilon = 10\%$. По величине Z_H в зависимости от схемы соединения ТТ и реле выбирается сечение соединительных проводов между трансформаторами тока и реле.

При использовании кривых предельной кратности необходимо иметь в виду, что они обычно строятся по типовым характеристикам намагничивания, которые могут иметь отличие от фактических, что особенно важно учитывать при работе трансформатора тока в области насыщения магнитопровода (кратность первичного тока 4-5 и выше).

Проверка трансформатора по паспортным данным

В паспортных данных трансформатора тока указываются номинальная кратность тока $K_{ном}$, при которой допускается сопротивление нагрузки Z_H с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,8$ и к тому же обеспечивается полная погрешность $\varepsilon \leq 10\%$.

Если известны фактическое расчетное сопротивление нагрузки $Z_{H, факт. расч.}$ (например, из проекта) и полное сопротивление Z_2 вторичной обмотки Т.Т, (из паспорта или справочной литературы) можно определить допустимую кратность $K_{10 доп}$, при которой полная погрешность не превышает 10%.

$$K_{10 доп} = K_{ном} \cdot \frac{Z_2 + Z_{ном}}{Z_2 + Z_{H, факт. расч.}},$$
 а затем сравнить ее с предельной кратностью $K_{10} = \frac{I_{1 расч.}}{I_{ном}}$ для данной электроустановки.

Это выражение можно использовать также при составлении задания на наладку релейной защиты. Для известных параметров трансформатора тока и значения расчетного тока к.з. $I_{1 \text{ расч.}}$ фактическая нагрузка ТТ не должна превышать значения определяемого по выражению.

$$Z_{\text{н.факт.расч.}} \leq \frac{K_{\text{ном}} \cdot (Z_2 + Z_{\text{ном}})}{K_{10}} - Z_2$$

Проверка трансформатора тока по вольтамперной характеристике

Для определения тока намагничивания $I_{\text{нам}}$ и затем полной погрешности ε , необходимо определить на вторичной обмотке ТТ напряжение U_2 при расчетных условиях:

$$U_{2 \text{ расч.}} = I_{2 \text{ расч.}} \cdot (Z_2 + Z_{\text{н.факт.расч.}}), \quad \text{где}$$

$$I_{2 \text{ расч.}} = \frac{I_{1 \text{ расч.}}}{n_T}$$

По значению $U_{2 \text{ расч.}}$ по ВАХ определяется ток намагничивания ТТ, далее вычисляется полная погрешность трансформатора тока в процентах:

$$\varepsilon = \frac{I_{\text{нам}}}{I_{2 \text{ расч.}}} \cdot 100, \%$$

Значение ε должно быть не более 10% (оно может быть использовано для выбора уставок дифференциальных защит).

Пользуясь данной методикой можно в задании на наладку защиты указать контрольную точку, ниже которой ВАХ не должна проходить. Эта точка выбирается из условия $\varepsilon = 10\%$, чему соответствует значение $I_{\text{нам}} = 0,1 I_{2 \text{ расч.}}$. Искомая точка будет находиться на пересечении абсциссы $I_{\text{нам}}$ и ординаты U_2 . Задание координат контрольной точки не отменяет необходимости снятия всех точек ВАХ и изображения ее в паспорте протоколе в соответствии с инструкцией по проверке трансформаторов тока.

Контрольные вопросы

- 1) Какие требования предъявляются к трансформаторам тока в устройствах релейной защиты?
- 2) Назовите величины, входящие в паспортные данные трансформатора тока.
- 3) По каким признакам судят о пригодности трансформатора тока?
- 4) Почему нельзя размыкать вторичные цепи трансформатора тока, находящегося в работе?
- 5) Что такое коэффициент трансформации трансформатора тока?
- 6) Какие виды погрешностей регламентируются для ТТ?
- 7) Как производится маркировка выводов ТТ?
- 8) Что такое кривая намагничивания ТТ?
- 9) Что такое ВАХ ТТ и как ее получить?
- 10) Что называется предельной кратностью K_{10} и номинальной предельной кратностью $K_{10 \text{ ном}}$ трансформатора тока?
- 11) Что такое ток намагничивания трансформатора тока?
- 12) С какой целью снимаются ВАХ трансформатора тока?
- 13) Что такое кривые предельной кратности и как ими пользоваться?
- 14) Что такое расчетный ток короткого замыкания?
- 15) В чем заключается проверка погрешности ТТ по паспортным данным?
- 16) В чем заключается проверка погрешности ТТ по фактической ВАХ?

Литература

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) – М. Энергосервис, 2002.
2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП) – С-Петербург, 2003.
3. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в системах релейной защиты, РД 153-34.1.-35.301 - 2002.
4. Справочник по релейной защите – М – Л. Госэнергоиздат. 1963.

5. Мабад М.А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. Конспект лекций. – Санкт – Петербург, ПЭНк, 2002.
6. Чернобровов Н.В. Релейная защита – М-Л. «Энергия» 1966.
7. Практикум по электроснабжению сельского хозяйства. Под редакцией Будзко И.А. – М. Колос. 1982.
8. Будзко И.А., Зуль Н.М. Электроснабжение сельского хозяйства – М. Агропромиздат. 1990.
9. Будзко И.А., Лещинская Т.Б., Сукманов В.Н. Электроснабжение сельского хозяйства. М. Колос. 2000.