

4 ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

4.1 ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА

Трансформаторы тока (ТТ) служат для разделения (изоляции) первичных и вторичных цепей, а так же для приведения величины тока к уровню удобному для измерения (стандартный номинальный ток вторичной обмотки 1 А или 5 А).

Устройство и схема включения ТТ показаны на рис. 4.1. ТТ состоит из стального сердечника C и двух обмоток: первичной (с числом витков w_1) и вторичной (с числом витков w_2). Часто ТТ изготавливаются с двумя и более сердечниками. В таких конструкциях первичная обмотка является общей для всех сердечников (рис. 4.1, б). Первичная обмотка, выполняемая толстым проводом, имеет несколько витков и включается последовательно в цепь того элемента, в котором производится измерение тока, или защита которого осуществляется. К вторичной обмотке, выполняемой проводом меньшего сечения и имеющей большое число витков, подключаются последовательно соединенные реле и приборы.

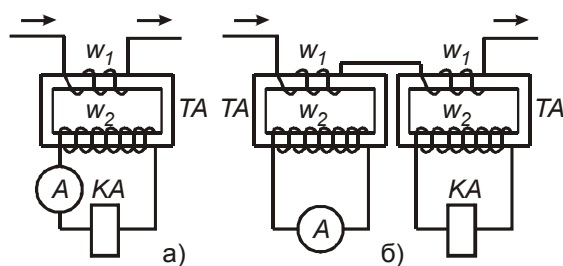


Рис. 4.1 Устройство и схема включения трансформаторов тока; а – с одним сердечником; б – с двумя сердечниками

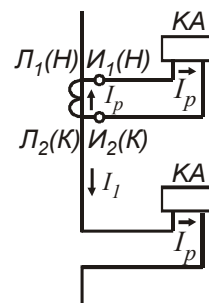


Рис. 4.2 Маркировка (обозначение) выводов обмоток трансформаторов тока.

Ток, проходящий по первичной обмотке ТТ, называется первичным и обозначается I_1 , а ток во вторичной обмотке называется вторичным и обозначается I_2 . Ток I_1 создает в сердечнике ТТ магнитный поток Φ_1 , который, пересекая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней вторичный ток I_2 , также создающий в сердечнике магнитный поток Φ_2 , но направленный противоположно магнитному потоку Φ_1 . Результирующий магнитный поток в сердечнике равен разности:

$$\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (4.1)$$

Магнитный поток зависит не только от значения создающего его тока, но и от количества витков обмотки, по которой этот ток проходит. Произведение тока на число витков $F = Iw$ называется **магнитодвижущей силой** и выражается в ампервитках (А•вит.). Поэтому, выражение (4.1) можно заменить выражением:

$$F_0 = F_1 - F_2 \quad (4.2)$$

или

$$I_0 w_1 = I_1 w_1 - I_2 w_2 \quad (4.3)$$

где:

I_0 — ток намагничивания, являющийся частью первичного тока, обеспечивает результирующий магнитный поток в сердечнике (в дальнейшем обозначается $I_{нам}$);

w_1, w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток.

Разделив все члены выражения на w_2 , получим:

$$I_{нам} \cdot (w_1/w_2) = I_1 (w_1/w_2) - I_2 \quad \text{или} \quad I_1 (w_1/w_2) = I_2 + I_{нам} (w_1/w_2) \quad (4.4)$$

Поскольку при значениях первичного тока, близких к номинальному, ток намагничивания не превышает 0,5—3% номинального тока, то в этих условиях можно с некоторым приближением считать $I_{нам} = 0$. Тогда из выражения (4.4) следует:

$$I_1 / I_2 = w_2 / w_1$$

Отношение витков $w_2/w_1 = K_I$ называется коэффициентом трансформации ТТ.

$$\frac{I_1}{I_2} = K_I \quad (4.5)$$

Согласно действующему стандарту, отношение номинального первичного тока к номинальному вторичному току называется номинальным коэффициентом трансформации. Номиналь-

ные коэффициенты трансформации указываются на щитках ТТ, а также на схемах в виде дроби, в числителе которой – номинальный первичный ток, а в знаменателе – номинальный вторичный ток, например: 600/5 А или 1000/1 А. Определение вторичного тока по известному первичному и, наоборот, производится по номинальным коэффициентам трансформации в соответствии с формулами:

$$I_2 = I_1 / K_I; I_1 = I_2 K_I \quad (4.6)$$

Для правильного соединения ТТ между собой и правильного подключения к ним реле направления мощности, ваттметров и счетчиков, выводы обмоток ТТ обозначаются (маркируются) заводами-изготовителями следующим образом: начало первичной обмотки – L_1 , начало вторичной обмотки – u_1 конец первичной обмотки – L_2 , конец вторичной обмотки – u_2 . При монтаже ТТ они обычно располагаются так, чтобы начала первичных обмоток L_1 были обращены в сторону шин, а концы L_2 – в сторону защищаемого оборудования.

При маркировке обмоток ТТ за начало вторичной обмотки $H(u_1)$ принимается тот ее вывод, из которого ток выходит, если в этот момент в первичной обмотке ток проходит от начала $H(L_1)$ к концу $K(L_2)$, как показано на рис. 4.2. При включении реле KA по этому правилу, ток в реле, как показано на рис. 4.2, при включении его через ТТ сохраняет то же направление, что и при включении непосредственно в первичную цепь.

В нормальном режиме трансформаторы тока, вторичная обмотка которых замкнута на малое сопротивление токовых обмоток приборов и реле, работают в режиме близком к короткому замыканию.

Из условий безопасности персонала при пробое изоляции между первичной и вторичной обмотками, вторичные обмотки трансформаторов тока должны быть обязательно заземлены. Заземление вторичных цепей трансформаторов тока выполняется в одной точке и, как правило, на ближайшей к ним клеммой сборки.

Погрешности трансформаторов тока. Коэффициент трансформации ТТ так же, как у ТН, не является строго постоянной величиной и из-за погрешностей может отличаться от номинального значения. Погрешности ТТ зависят главным образом от кратности первичного тока по отношению к номинальному току первичной обмотки и от нагрузки, подключенной к вторичной обмотке. При увеличении сопротивления нагрузки или тока выше определенных значений погрешность возрастает и ТТ переходит в другой класс точности.

Для измерительных приборов погрешность относится к зоне нагрузочных токов $0,2 - 1,2 I_{ном}$. Эта погрешность именуется классом точности и может быть равна 0,2; 0,5; 1,0; 3,0 %.

Требования к работе ТТ, питающих защиту, существенно отличаются от требований к ТТ, питающим измерительные приборы. Если ТТ, питающие измерительные приборы, должны работать точно в пределах своего класса при токах нагрузки, близких к их номинальному току, то ТТ, питающие релейную защиту, должны работать с достаточной точностью при прохождении токов КЗ, значительно превышающих номинальный ток ТТ. Для целей защиты выпускаются трансформаторы тока класса Р или Д (для дифференциальных защит) в которых не нормируется погрешность при малых (нагрузочных) токах. В настоящее время выпускаются трансформаторы тока классов 10Р и 5Р, погрешность которых нормируется во всем диапазоне токов.

Правила устройства электроустановок требуют, чтобы ТТ, предназначенные для питания релейной защиты, имели погрешность, как правило, не более 10%. Большая погрешность допускается в отдельных случаях, когда это не приводит к неправильным действиям релейной защиты. Погрешности возникают вследствие того, что действительный процесс трансформации в ТТ происходит с затратой мощности, которая расходуется на создание в сердечнике магнитного потока, перемагничивание стали сердечника (гистерезис), потери от вихревых токов, нагрев обмоток.

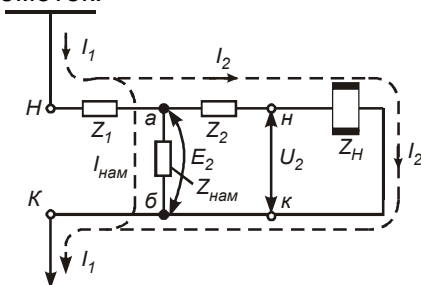


Рис. 4.3 Схема замещения трансформатора тока.

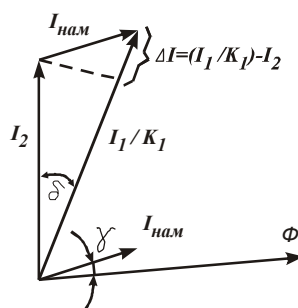


Рис. 4.4 Упрощенная векторная диаграмма трансформатора тока.

Процесс трансформации тока хорошо иллюстрируется схемой замещения ТТ, приведенной на рис. 4.3. На этой схеме Z_1 и Z_2 – сопротивления первичной и вторичной обмоток, а $Z_{\text{нам}}$ – сопротивление ветви намагничивания, которое характеризует указанные выше потери мощности.

Из схемы замещения видно, что первичный ток I_1 входящий в начало первичной обмотки H , проходит по ее сопротивлению Z_1 и в точке a разветвляется по двум параллельным ветвям. Основная часть тока, являющаяся вторичным током I_2 , замыкается через сопротивление вторичной обмотки Z_2 и сопротивление нагрузки Z_H , состоящее из сопротивлений реле, приборов и соединительных проводов. Другая часть первичного тока $I_{\text{нам}}$ замыкается через сопротивление ветви намагничивания и, следовательно, в реле, подключенное к вторичной обмотке ТТ, не попадает. Поскольку из всех затрат мощности наибольшая часть приходится на создание магнитного потока в сердечнике, то ветвь между точками a и b схемы замещения ТТ называется ветвью намагничивания и весь ток $I_{\text{нам}}$, проходящий по этой ветви, – током намагничивания.

Таким образом, схема замещения показывает, что во вторичную обмотку ТТ поступает не весь трансформированный первичный ток, равный I_1/K_I , а его часть, и что, следовательно, процесс трансформации происходит с погрешностями.

При размыкании цепи вторичной обмотки ТТ, он превращается в повышающий трансформатор, резко возрастает ток намагничивания: $I_1 = I_{\text{нам}}$ (рис 4.3) и, при достаточном уровне тока, индукция в сердечнике достигает насыщения. Вследствие насыщения сердечника ТТ, при синусоидальном первичном токе, магнитный поток в сердечнике будет иметь не синусоидальную, а трапециoidalную форму. Поэтому, ЭДС во вторичной обмотке, пропорциональная скорости изменения магнитного потока, в моменты перехода его через нулевые значения будет очень велика, и может превышать 1000 В, что опасно не только для обслуживающего персонала, но и для межвитковой изоляции трансформаторов тока (возможно межвитковое замыкание). Кроме появления опасного напряжения на разомкнутой вторичной обмотке, может иметь место повышенный нагрев стального сердечника из-за больших потерь в стали (так называемый «пожар стали»). Это не только может привести к повреждению изоляции, но и к увеличению погрешностей трансформаторов тока вследствие остаточного намагничивания сердечника. При межвитковом замыкании вторичной обмотки ТТ резко возрастает ток намагничивания, а ток на его выходе резко уменьшается (или полностью отсутствует). Диагностировать витковое замыкание ТТ можно сравнив его характеристику намагничивания (зависимость напряжения на вторичной обмотке от проходящего по ней тока) с характеристикой исправного ТТ (характеристика значительно понижается).

На рис. 4.4 приведена упрощенная векторная диаграмма ТТ из которой видно, что вектор вторичного тока I_2 меньше значения первичного тока, деленного на коэффициент трансформации K_I на величину ΔI и сдвинут относительно него на угол δ . Таким образом, соотношение значений первичного и вторичного токов в действительности имеет вид:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_1 - \dot{I}_{\text{нам}}}{K_I} \quad (4.7)$$

Различают следующие виды погрешностей ТТ. Токовая погрешность, или погрешность в коэффициенте трансформации, определяется как арифметическая разность первичного тока, поделенного на номинальный коэффициент трансформации I_1/K_I , и измеренного (действительного) вторичного тока \dot{I}_2 (отрезок ΔI на диаграмме рис. 4.4):

$$\Delta I = \frac{I_1}{K_I} - I_2 \quad (4.8)$$

Токовая погрешность, %,

$$f = \frac{\Delta I}{I_1 K_I} 100 \quad (4.9)$$

Угловая погрешность определяется как угол δ сдвига вектора вторичного тока I_2 относительно вектора первичного тока I_1 (см. рис. 4.4) и считается положительной, когда I_2 опережает I_1 .

Полная погрешность (ε) определяется как выраженное в процентах отношение действующего значения разности мгновенных значений первичного и вторичного токов к действующему значению первичного тока.

При синусоидальных первичном и вторичном токах: $\varepsilon = I_{\text{нам}}$. Из рассмотренного следует, что причиной возникновения погрешностей у трансформаторов тока является прохождение тока намагничивания, т. е. того самого тока, который создает в сердечнике ТТ рабочий магнитный поток, обеспечивающий трансформацию первичного тока во вторичную обмотку. Чем меньше ток намагничивания, тем меньше погрешности ТТ.

Как видно из схемы замещения (рис. 4.3), ток намагничивания зависит от ЭДС E_2 и сопротивления ветви намагничивания $Z_{\text{нам}}$.

Электродвижущая сила E_2 может быть определена как падение напряжения от тока I_2 в сопротивлении вторичной обмотки Z_2 и сопротивлении нагрузки $Z_{\text{н}}$ т. е.:

$$E_2 = I_2(Z_2 + Z_{\text{н}}) \quad (4.10)$$

Сопротивление ветви намагничивания $Z_{\text{нам}}$ зависит от конструкции трансформаторов тока и качества стали, из которой выполнен сердечник. Это сопротивление не является постоянным, а зависит от характеристики намагничивания стали. При насыщении стали сердечника ТТ, $Z_{\text{нам}}$ резко уменьшается, что приводит к возрастанию $I_{\text{нам}}$ и как следствие этого к возрастанию погрешностей ТТ.

Таким образом, условиями, определяющими погрешности трансформаторов тока, являются: отношение, т. е. кратность, первичного тока, проходящего через ТТ, к его номинальному току и нагрузка, подключенная к его вторичной обмотке.

Для увеличения допустимой вторичной нагрузки применяют трансформаторы тока с номинальным током вторичной обмотки 1 А, вместо 5 А. Одноамперные трансформаторы тока могут нести нагрузку в 25 раз больше, чем пятиамперные, имеющие такие же конструктивные параметры и тот же номинальный ток первичной обмотки. Конечно, потребляемая мощность аппаратуры при этом остается прежней, и ее сопротивление также увеличивается в 25 раз, однако получается существенный выигрыш за счет возможности применять длинные кабели с жилами небольшого сечения. По этой причине, трансформаторы тока со вторичными токами 1 А нашли применение, в основном, на мощных подстанциях сверхвысокого напряжения, где требуется прокладывать длинные кабели. В сетях напряжением 6-35 кВ, как правило, применяются 5-ти амперные трансформаторы тока, которые упрощают конструкцию за счет того что требуется наматывать в 5 раз меньшее количество витков. Одноамперные трансформаторы тока нашли применение также в ячейках фирмы «Таврида – Электрик», где переход на вторичный ток 1 А в сочетании с малым потреблением современных релейных защит позволил выполнить малогабаритные трансформаторы тока, которые только и можно разместить в выпускаемых ею малогабаритных ячейках.

Схемы соединения трансформаторов тока

Для подключения реле и измерительных приборов вторичные обмотки ТТ соединяются в различные схемы. Наиболее распространенные схемы приведены на рис. 4.5.

На рис. 4.5, а дана основная схема соединения в звезду, которая применяется для включения защиты от всех видов однофазных и междуфазных КЗ; на рис. 4.5, б – схема соединения в неполную звезду, используемая главным образом для включения защиты от междуфазных КЗ в сетях с изолированными нулевыми точками; на рис. 4.5, в – схема соединения в треугольник, используемая для получения разности фазных токов (например, для включения дифференциальной защиты трансформаторов); на рис. 4.5, г – схема соединения на разность токов двух фаз. Эта схема используется для включения защиты от междуфазных КЗ, так же как схема на рис. 4.5, б на рис. 4.5, д – схема соединения на сумму токов всех трех фаз (фильтр токов нулевой последовательности), используемая для включения защиты от однофазных КЗ и замыканий на землю.

На рис. 4.5, е дана схема последовательного соединения двух трансформаторов тока, установленных на одной фазе. При таком соединении нагрузка, подключенная к ним, распределяется поровну, т. е. на каждом из них уменьшается в 2 раза. Происходит это потому, что ток в

цепи, равный $I_2 = \frac{I_1}{K_I}$, остается неизменным, а напряжение, приходящееся на каждый ТТ, составляет половину общего.

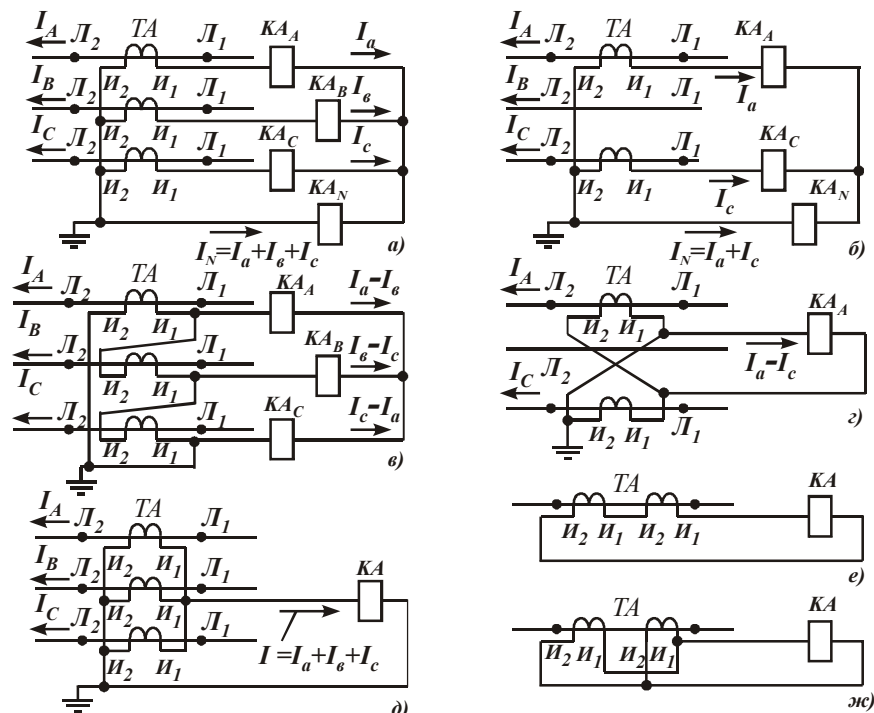


Рис. 4.5 Схемы соединения вторичных обмоток трансформаторов тока

Рассмотренная схема применяется при использовании маломощных ТТ (например, встроенных во вводы выключателей и трансформаторов).

На рис. 4.5, ж дана схема параллельного соединения двух ТТ, установленных на одной фазе. Коэффициент трансформации этой схемы в 2 раза меньше коэффициента трансформации одного ТТ.

Схема параллельного соединения используется для получения нестандартных коэффициентов трансформации. Например, для получения коэффициента трансформации 37,5/5 А соединяют параллельно два стандартных ТТ с коэффициентом трансформации 75/5 А.

Выбор трансформаторов тока

Исходные данные. Все трансформаторы тока выбираются, как и другие аппараты, по номинальному току и напряжению установки и проверяются на термическую и электродинамическую стойкость при КЗ. Кроме того, ТТ, используемые в цепях релейной защиты, проверяются на значение погрешности, которая, как указывалось выше, не должна превышать 10% по току и 7° по углу. Для проверки по этому условию в информационных материалах заводов – поставщиков ТТ и в другой справочной литературе даются характеристики и параметры ТТ:

1) *кривые зависимости 10 %-ной кратности m от сопротивления нагрузки Z_K , подключенной к вторичной обмотке ТТ.* Десятипроцентной кратностью m называется отношение, т. е. кратность, первичного тока, проходящего через ТТ, к его номинальному току, при которой токовая погрешность ТТ составляет 10% при заданной нагрузке Z_H . Угловая погрешность при этом достигает 7° (рис. 4.4).

Таким образом, зная кратность первичного тока, проходящего через ТТ, можно по кривым 10%-ной кратности для данного типа ТТ определить допустимую нагрузку $Z_{H, доп.}$, при которой погрешность ТТ не будет превышать 10%. И, наоборот, зная действительное значение нагрузки, которая подключена (или должна быть подключена) к вторичной обмотке ТТ Z_H , можно по кривым 10%-ной кратности определить допустимую кратность первичного тока $m_{доп.}$ при которой токовая погрешность ТТ также не будет превышать 10%.

2) *кривые зависимости предельной кратности K_{10} от сопротивления нагрузки Z_H , подключенной к вторичной обмотке* (для трансформаторов тока, выпущенных в соответствии с ГОСТ 7746-78 *Е). Согласно указанному ГОСТ предельной кратностью K_{10} называется наибольшее отношение, т. е. наибольшая кратность, первичного тока, проходящего через ТТ, к его номинальному току, при которой полная погрешность ТТ (ϵ) при заданной вторичной нагрузке не превышает 10%. При этом гарантируемая предельная кратность при номинальной вторичной нагрузке $Z_{H, ном.}$ называется номинальной предельной кратностью.

Аналогично рассмотренному выше, можно, пользуясь кривыми предельной кратности, определить либо допустимую нагрузку по известной кратности первичного тока, либо допустимую

кратность первичного тока по известной нагрузке, при которых полная погрешность ТТ не будет превышать 10%.

3) *типовые кривые намагничивания*, представляющие собой зависимость максимальных значений индукции (**B**) в сердечнике от действующих значений напряженности магнитного поля **H** при средней длине магнитного пути; определенном сечении сердечника; (номинальном значении магнитодвижущей силы (A)).

$$B_{max} = \frac{E_2}{4,44 f \omega_2 S} \quad (4.11)$$

Напряженность магнитного поля (A/см) выражается формулой:

$$H = \frac{I_{нам} \omega_2}{l} \quad (4.12)$$

где: $I_{нам}$ - намагничивающий ток, A;

l - средняя длина магнитного пути, см.

Таким образом, эта характеристика является характеристикой железа, из которого сделан ТТ, а для конкретного трансформатора тока она пересчитывается в вольт-амперную с учетом числа витков и геометрических размеров сердечника.

Определив **B** по указанной формуле, по кривой намагничивания определяют **H**, ток намагничивания $I_{нам}$ а затем вторичный ток ТТ:

$$I_2 = \frac{I_1}{K_I} - I_{нам} \quad (4.13)$$

Следует иметь в виду, что ГОСТом допускается 20% отклонение характеристик от типовой. Поэтому рассчитанную характеристику нужно понизить по напряжению на 20%.

Действительные характеристики намагничивания (называются ниже вольт-амперными), представляющие собой зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки ТТ U_2 от проходящего по этой обмотке тока намагничивания, т.е. $U_2 = f(I_{нам})$. Пользуясь действительными характеристиками намагничивания, можно также определить $I_{нам}$ и I_2 и оценить допустимость полученной погрешности. Эта характеристика снимается непосредственно на используемом трансформаторе тока.

Нагрузка вторичной обмотки трансформаторов тока. Нагрузка вторичной обмотки ТТ складывается из последовательно включенных сопротивлений: реле, приборов, жил контрольного кабеля, переходного сопротивления в месте контактных соединений:

$$Z_H = Z_p + Z_{пр} + Z_{каб} + Z_{пер} \quad (4.14)$$

где

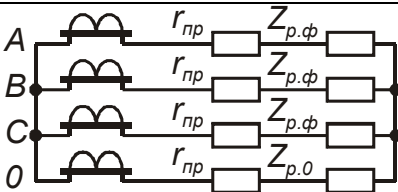
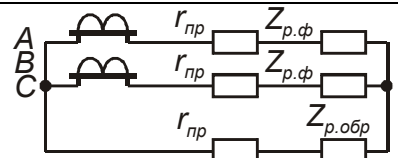
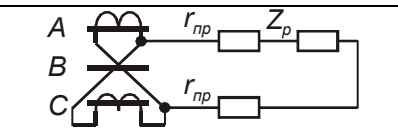
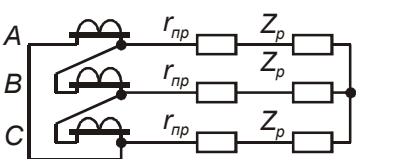
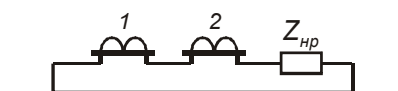
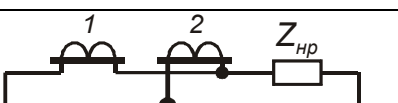
$Z_p, Z_{пр}, Z_{каб}, Z_{пер}$ – сопротивления реле, приборов, кабеля переходных контактов соответственно.

Для упрощения расчетов производится арифметическое а не геометрическое сложение полных и активных сопротивлений. Нагрузка вторичной обмотки ТТ зависит также от схемы их соединения и вида КЗ. Поэтому нагрузка должна определяться для наиболее загруженного ТТ с учетом схемы соединения и для такого вида КЗ, при котором получаются наихудшие результаты.

Расчетные формулы для наиболее распространенных схем соединения вторичных обмоток ТТ и при различных видах КЗ приведены в табл. 4.1.

Определение допустимой нагрузки на трансформаторы тока

Допустимая нагрузка на ТТ определяется, исходя из следующих требований: обеспечения точности измерительных органов релейной защиты при КЗ в расчетных точках электрической сети (полная погрешность ТТ ε не должна превышать 10 %) для токовых защит при токе уставки, для дифзащиты – в конце зоны действия; для предотвращения отказа срабатывания защиты при наибольших значениях тока КЗ – нормируется для электромеханических защит при КЗ в зоне установки защиты.

	Схема соединения трансформаторов тока и реле.	Вид короткого замыкания	Формулы для определения нагрузки на зажимах вторичных обмоток
1	 <p>Полная звезда</p>	Трехфазное и двухфазное	$Z_{н\cdot расч} = r_{пр} + Z_{р} + r_{пер}$
		Однофазное	$Z_{н\cdot расч} = 2r_{пр} + Z_{р.ф} + Z_{р.0} + r_{пер}$
2	 <p>Неполная звезда</p>	Трехфазное	$Z_{н\cdot расч} = \sqrt{3}r_{пр} + Z_{р.ф} + Z_{р.обр} + r_{пер}$
		Двухфазное АВ или ВС	$Z_{н\cdot расч} = 2r_{пр} + Z_{р.ф} + Z_{р.обр} + r_{пер}$
		Двухфазное за трансформатором Y/Δ-11	$Z_{н\cdot расч} = 3r_{пр} + Z_{р.ф} + Z_{р.обр} + r_{пер}$
3	 <p>Разность токов фаз А-С</p>	Трехфазное	$Z_{н\cdot расч} = \sqrt{3}(2r_{пр} + Z_{р}) + r_{пер}$
		Двухфазное АС	$Z_{н\cdot расч} = 4r_{пр} + 2Z_{р.} + r_{пер}$
		Двухфазное АВ или ВС	$Z_{н\cdot расч} = 2r_{пр} + Z_{р.} + r_{пер}$
4	 <p>Треугольник</p>	Трехфазное или двухфазное, трехфазное за трансформатором Y/Δ-11	$Z_{н\cdot расч} = 3r_{пр} + 3Z_{р.} + r_{пер}$
		Однофазное	$Z_{н\cdot расч} = 2r_{пр} + 2Z_{р.} + r_{пер}$
5	 <p>Последовательное соединение вторичных обмоток трансформаторов тока</p>		$Z'_{н\cdot расч} = 0.5 Z_{н\cdot расч}$ Где $Z_{н\cdot расч} = 2r_{пр} + Z_{р.} + r_{пер}$ При одинаковых характеристиках трансформаторов тока 1 и 2
6	 <p>Параллельное соединение вторичных обмоток трансформаторов тока</p>		$Z'_{н\cdot расч} = 2 Z_{н\cdot расч}$ Где $Z_{н\cdot расч} = 2r_{пр} + Z_{р.} + r_{пер}$ При одинаковых характеристиках трансформаторов тока 1 и 2

Примечания: 1. В формулы по пп. 1–4 должно подставляться наибольшее значение (для наиболее загруженной фазы).

2. Величина $r_{пер}$ во всех случаях принимается равна 0.1 Ом.

Проверка трансформаторов тока по действительным характеристикам намагничивания производится в следующем порядке:

1) Определяется фактическая нагрузка Z_n подключенная к вторичной обмотке с учетом формул, приведенных в таблице 4.1;

- 2) определяется расчетный первичный и вторичный токи КЗ которые равны максимальному току КЗ в конце защищаемой зоны (для токовых отсечек ток КЗ равен уставке отсечки);
- 3) Определяется расчетный ток намагничивания, равный $I_{2\text{нам.расч.}} = 0,1I_{2\text{КЗ рас.}}$
- 4) Строится наиболее низкая характеристика намагничивания проверяемых ТТ $U_2 = f(I_{\text{нам}})$ и по этой характеристике и полученному выше току намагничивания определяется соответствующее ему значение напряжения U_2 ;
- 5) Определяется допустимое сопротивление нагрузки, при котором погрешность ТТ не будет превышать 10 % по значению и 7° по углу, по формуле.

$$Z_{H1\text{ доп}} = \frac{U_2 - I_{2\text{рас}} Z_1}{0,9I_{2\text{рас}}} \quad (4.15)$$

Для того чтобы погрешность трансформатора тока не превышала допустимых 10%, рассчитанная в п. 1) нагрузка на его вторичную обмотку не должна превышать значения Z_H определенного в п. 5).

Пример: Пусть требуется определить погрешности ТТ типа ТПФ–1 3, 200/5 при одинаковой нагрузке на его вторичные обмотки $Z_H = 1$ Ом. Сопротивление вторичной обмотки $Z_2 = 0,3$ Ом для обмотки класса 1 и $Z_2 = 0,4$ Ом для обмотки класса 3. Расчетный первичный ток $I_{\text{рас}} = 2000$ А.

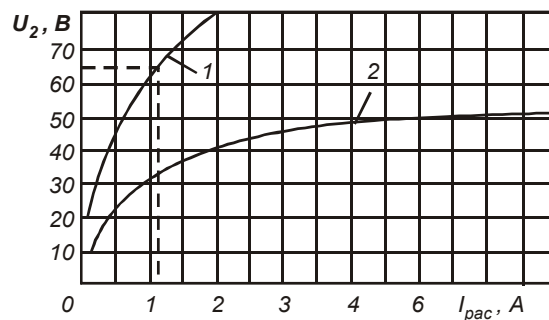


Рис. 4.6 Характеристика намагничивания трансформатора тока типа ТПФ-1/3,200/5 А:

- 1 – сердечник класса 1;
2 – сердечник класса 3.

1. Определяется расчетный вторичный ток:

$$I_{2\text{рас}} = \frac{I_{1\text{рас}}}{K_I} = \frac{2000}{200/5} = 50 \text{ А}$$

2. Строятся характеристики намагничивания обоих сердечников ТТ (рис. 4.6).
3. Определяются ЭДС вторичных обмоток по формуле

$$E_2 = I_{2\text{рас}} (Z_2 + Z_H) \quad (4.16)$$

Для сердечника класса 1 – $E_2 = 50 (0,3 + 1) = 65$ В.

Для сердечника класса 3 – $E_2 = 50 (0,4 + 1) = 70$ В.

4. Принимая $E_2 = U_2$ поскольку значения их отличаются незначительно, по характеристикам намагничивания, приведенным на рис. 4.6, определяют ток намагничивания.

Для сердечника класса 1 ток намагничивания при напряжении 65 В составляет $I_{\text{нам}} = 1,1$ А. Таким образом, во вторичной обмотке будет проходить не 50, а $50 - 1,1 = 48,9$ А.

и погрешность ТТ составит: $f = \frac{1,1}{50} \cdot 100 = 2,2 \%$.

Расчетная ЭДС сердечника класса 3 составляет 70 В. Однако из характеристики намагничивания этого сердечника видно, что начиная с тока намагничивания, равного примерно 5,5 А, происходит его насыщение, вследствие чего напряжение на вторичной обмотке остается неизменным и равным примерно 51 В. Поэтому вторичный ток будет равным:

$$I_2 = \frac{51}{0,4 + 1} = 36,5 \text{ А},$$

при этом погрешность сердечника класса 3 составит:

$$f = \frac{50 - 36,5}{50} \cdot 100 = 27 \%.$$

Распределение токов при двухфазном КЗ за трансформатором со схемой Y/Δ

Особым случаем по характеру токораспределения являются двухфазные КЗ за трансформаторами с соединением обмоток Y/Δ или Δ/Y.

Токораспределение на стороне звезды трансформатора с соединением обмоток Y/Δ (рис. 4.7, а) при КЗ на стороне треугольника. Для простоты принимается, что коэффициент трансформации трансформатора $k_T = 1$. При этом отношение линейных токов обмоток с соединением Y/Δ равно 1, а токов в фазах

$$I_Y / I_\Delta = w_\Delta / w_Y = \sqrt{3} \quad (4.17)$$

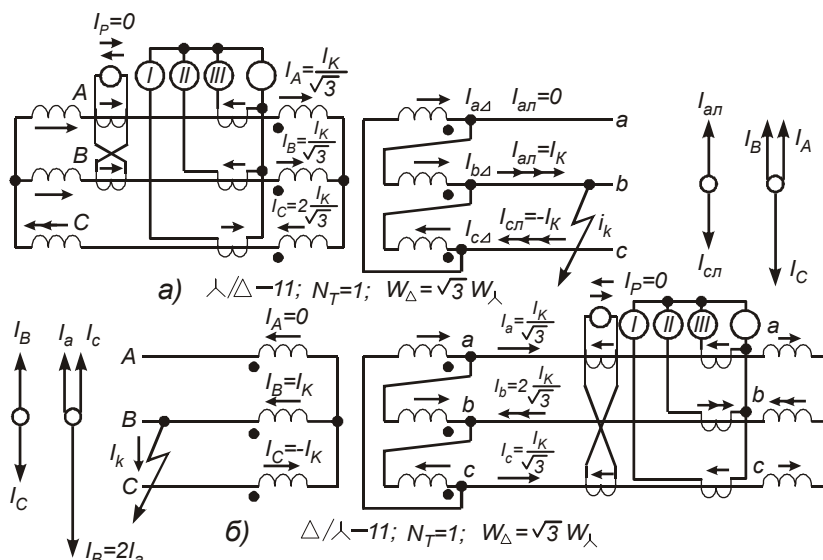


Рис. 4.7 Токораспределение и векторные диаграммы токов при двухфазных КЗ за трансформаторами с соединением обмоток: а – Y/Δ; б – Δ/Y

При двухфазном КЗ на стороне треугольника, например между фазами *b* и *c* (рис. 4.7, а), ток в неповрежденной фазе $I_a = 0$, а токи в поврежденных фазах *b* и *c* равны току КЗ, т. е.

$$I_c = -I_b = I_k \quad (4.18)$$

Как видно из рис. 4.7, а, в треугольнике ток I_k делится на две части: одна замыкается по обмотке фазы *c* и другая – по последовательно включенным обмоткам фаз *b* и *a*. Поскольку сопротивление второй цепи в 2 раза больше, чем первой, ток в обмотке фазы *c* равен $2/3 I_k$, а в обмотках *a* и *b* – $1/3 I_k$.

Токи на стороне звезды соответствуют токам в обмотках одноименных фаз треугольника и превышают их с учетом (4.18) в $\sqrt{3}$ раз:

$$I_A = I_{a\Delta} \sqrt{3} = I_k \cdot \sqrt{3}/3 = I_k / \sqrt{3} \quad (4.19)$$

$$I_B = I_{b\Delta} \sqrt{3} = I_k / \sqrt{3} \quad (4.20)$$

$$I_C = I_{c\Delta} \sqrt{3} = I_k \cdot 2/\sqrt{3} \quad (4.21)$$

При КЗ между фазами *ab* и *ca* картина распределения токов будет аналогичной. Таким образом, при двухфазном КЗ на стороне треугольника трансформатора, токи на стороне звезды появляются во всех трех фазах. В двух фазах они равны и одинаково направлены. В третьей фазе ток противоположен первым двум и равен их сумме, т.е. в 2 раза больше каждого из них.

Токораспределение на стороне треугольника при двухфазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток Δ/Y (рис. 4.7, б).

Распределение и соотношение токов на стороне треугольника получается аналогично предыдущему случаю на стороне звезды. Анализ условий работы максимальных токовых РЗ (МТЗ), подключенных к ТТ, соединенным по разным схемам, при КЗ за трансформатором Y/Δ (или Δ/Y) показывает:

1) в схеме полной звезды (рис. 3.19, б) в одной фазе схемы появляется ток $(2/\sqrt{3}) \cdot (I_k / K_I)$ а в двух других $(1/\sqrt{3}) \cdot (I_k / K_I)$, сумма токов в нулевом проводе равна нулю. Реле I, II, III действуют, но два из них имеют в 2 раза меньшую чувствительность, чем третье (где K_I - коэффициент трансформации ТТ);

2) в схеме неполной звезды ток проходит по обеим фазам и обратному проводу, в последнем он равен геометрической сумме токов указанных фаз, или току фазы, отсутствующей в схеме.

Если ТТ окажутся на фазах с меньшими первичными токами: $(1/\sqrt{3}) \cdot (I_k / K_I)$, то в таком случае чувствительность защиты будет в 2 раза хуже, чем в схеме полной звезды. Для устранения этого недостатка следует использовать реле в обратном проводе, где проходит сумма токов фаз, равная току КЗ в третьей фазе:

$$I_{0.I} = \frac{I_k}{\sqrt{3}K_I} + \frac{I_k}{\sqrt{3}K_I} = \frac{2I_k}{\sqrt{3}K_I} \quad (4.22)$$

3) в схеме с включением одного реле на разность токов двух фаз ток в реле в случае, показанном на рис. 4.7, а, б, будет отсутствовать;

4) в схеме соединения трех трансформаторов тока в треугольник и трех реле в звезду (на рисунке не показано), восстанавливается распределение токов – в 2 фазах **BC** и **CA** течет ток I_k а в третьем реле ток отсутствует.

4.2 ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Как и трансформаторы тока, трансформаторы напряжения выполняют две функции: служат для разделения (изоляции) первичных и вторичных цепей, а так же, для приведения величины напряжения к уровню удобному для измерения (стандартное номинальное напряжение вторичной обмотки: 100/57 В). ТН работают в режиме близком к холостому ходу.

Трансформатор напряжения (ТН) по принципу действия и конструктивному выполнению аналогичен силовому трансформатору. Как показано на рис. 4.8, трансформатор напряжения **TV** состоит из стального сердечника (магнитопровода) **C**, собранного из тонких пластин трансформаторной стали, и двух обмоток – первичной и вторичной, изолированных друг от друга и от сердечника.

Первичная обмотка w_1 имеющая большое число витков (несколько тысяч) тонкого провода, включается непосредственно в сеть высокого напряжения, а к вторичной обмотке w_2 имеющей меньшее количество витков (несколько сотен), подключаются параллельно реле и измерительные приборы. Под воздействием напряжения сети по первичной обмотке проходит ток, создающий в сердечнике переменный магнитный поток Φ , который, пересекая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней ЭДС E , которая при разомкнутой вторичной обмотке (холостой ход ТН) равна напряжению на ее зажимах U_{2x} .

Напряжение U_{2x} во столько раз меньше первичного напряжения U_1 , во сколько раз число витков вторичной обмотки w_2 меньше числа витков первичной обмотки w_1 .

$$\frac{U_1}{U_{2x}} = \frac{w_1}{w_2} \quad (4.23)$$

Отношение чисел витков обмоток называется коэффициентом трансформации и обозначается

$$K_U = w_1 / w_2 \quad (4.24)$$

Введя такое обозначение, можно написать:

$$\frac{U_1}{U_{2x}} = K_U \quad (4.25)$$

Если ко вторичной обмотке ТН подключена нагрузка в виде реле и приборов, то напряжение на ее зажимах U_2 будет меньше ЭДС на величину падения напряжения в сопротивлении вторичной обмотки. Однако поскольку это падение напряжения невелико, оно не учитывается и пересчет первичного напряжения на вторичное производится по формулам:

$$U_1 = U_2 K_U; \quad (4.26)$$

$$U_2 = \frac{U_1}{K_U}. \quad (4.27)$$

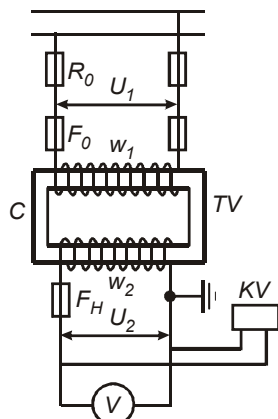


Рис. 4.8. Устройство и схема включения трансформатора напряжения

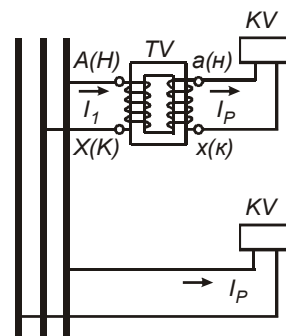


Рис. 4.9. Маркировка (обозначение) выводов обмоток трансформатора напряжения

Для правильного соединения между собой вторичных обмоток ТН и правильного подключения к ним реле направления мощности, ваттметров и счетчиков заводы-изготовители обозначают (маркируют) выводные зажимы обмоток определенным образом: начало первичной обмотки – **A**, конец – **X**; начало основной вторичной обмотки – **a**, конец – **x**; начало дополнительной вторичной обмотки – **a₀**, конец – **x₀**.

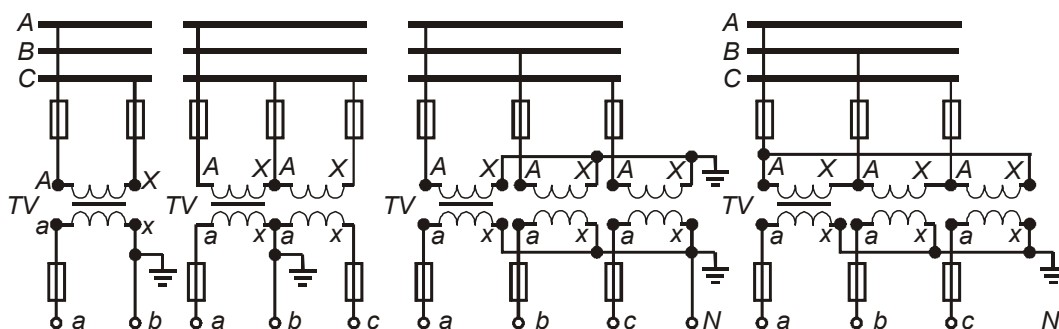


Рис. 4.10. Схемы соединения обмоток однофазных трансформаторов напряжения с одной вторичной обмоткой

На рис. 4.10 и 4.11 приведены основные схемы соединения обмоток однофазных ТН.

На рис. 4.10, а дана схема включения одного ТН на междуфазное напряжение. Эта схема применяется, когда для защиты или измерений достаточно одного междуфазного напряжения.

На рис. 4.10, б приведена схема соединения двух ТН в открытый треугольник, или в неполную звезду. Эта схема, получившая широкое распространение, применяется, когда для защиты или измерений нужно иметь два или три междуфазных напряжения.

На рис. 4.10, в приведена схема соединения трех ТН в звезду. Эта схема также получила широкое распространение и применяется, когда для защиты или измерений нужны фазные напряжения, или же фазные и междуфазные напряжения одновременно.

На рис. 4.10, г приведена схема соединения трех ТН треугольник – звезда. Эта схема обеспечивает повышенное напряжение на вторичной стороне, равное ~ 173 В. Такая схема, в частности, используется для питания электромагнитных корректоров напряжения устройств автоматического регулирования возбуждения генераторов.

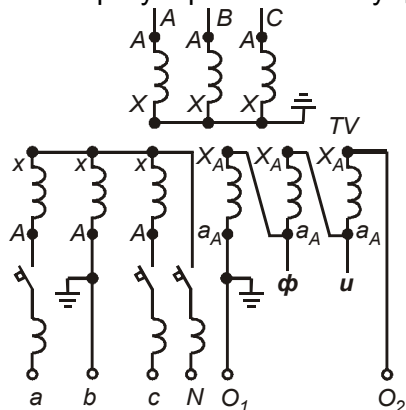


Рис. 4.11. Схема соединения обмоток трансформатора напряжения с двумя вторичными обмотками

На рис. 4.11 представлена схема соединения трансформаторов напряжения, имеющих две вторичные обмотки. Первичные и вторичные основные обмотки соединены в звезду, т.е. так же как в рассмотренной выше схеме на рис. 4.10, в. Дополнительные вторичные обмотки соединены в схему разомкнутого треугольника (на сумму фазных напряжений). Такое соединение применяется для получения напряжения нулевой последовательности, необходимого для включения реле напряжения и реле направления мощности защиты от однофазных КЗ в сети с заземленными нулевыми точками трансформаторов, и для сигнализации при однофазных замыканиях на землю в сети с изолированными нулевыми точками трансформаторов. Как известно, сумма трех фазных напряжений в нормальном режиме, а также при двух-трехфазных КЗ равна нулю. Поэтому, в указанных условиях напряжение между точками $O_1—O_2$ на рис. 4.11 равно нулю (практически между этими точками имеется небольшое напряжение: 0,5–2 В, которое называется напряжением небаланса). При однофазном КЗ в сети с заземленными нулевыми точками трансформаторов (сети 110 кВ и выше) фазное напряжение поврежденной фазы становится равным нулю, а геометрическая сумма фазных напряжений двух неповрежденных фаз оказывается равной фазному напряжению.

В сети с изолированными нулевыми точками трансформаторов (сети 35 кВ и ниже) при однофазных замыканиях на землю напряжения неповрежденных фаз относительно земли становятся равными междуфазному напряжению, а их геометрическая сумма оказывается равной утроенному фазному напряжению. Для того чтобы в последнем случае напряжение на реле не превосходило номинального значения, равного 100 В, у ТН, предназначенных для сетей, работающих с изолированными нулевыми точками трансформаторов, вторичные дополнительные обмотки, соединяемые в схему разомкнутого треугольника, имеют увеличенные в 3 раза коэффициент трансформации, например 6000/100/3 В.

Напряжение нулевой последовательности может быть также получено от специальных обмоток трехфазных ТН. В конструкции, показанной на рис. 4.12, специальные обмотки расположены на крайних стержнях пятистержневого сердечника и соединены между собой последовательно. В нормальном режиме, а также при двух- и трех фазных КЗ, когда сумма фазных напряжений равна нулю, магнитный поток в крайних стержнях отсутствует, и поэтому напряжении на специальных обмотках нет. При однофазных КЗ или замыканиях на землю сумма фазных напряжений не равна нулю. Поэтому магнитный поток замыкается по крайним стержням и индуцирует напряжение на специальных обмотках. В другой конструкции, показанной на рис. 4.13, имеются дополнительные вторичные обмотки, расположенные на основных стержнях и соединенные в схему разомкнутого треугольника.

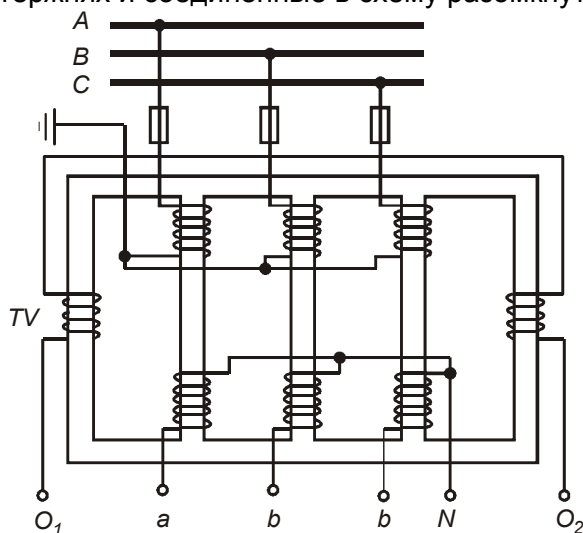


Рис. 4.12 Схема соединений обмоток трехфазного трансформатора напряжения с дополнительной обмоткой, расположенной на крайних стержнях.

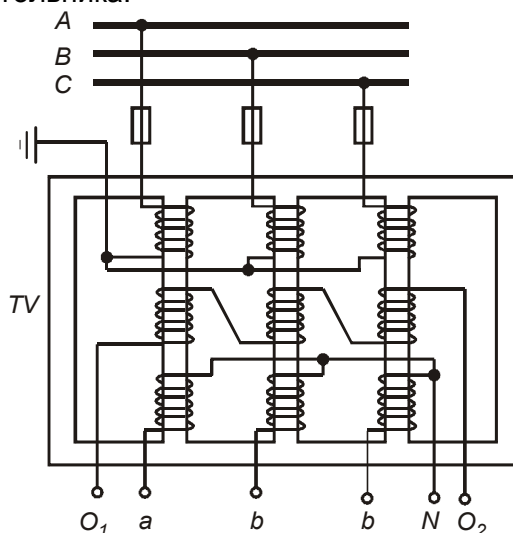


Рис. 4.13 Схема соединений обмоток трехфазного пятистержневого трансформатора напряжения с дополнительной обмоткой, расположенной на основных стержнях.

При включении первичных обмоток ТН на фазные напряжения они соединяются в звезду, нулевая точка которой обязательно соединяется с землей (заземляется), как показано на рис. 4.10, в; 4.11 – 4.13. Заземление первичных обмоток необходимо для того, чтобы при однофазных КЗ или замыканиях на землю в сети, где установлен ТН, реле и приборы, включенные на его вторичную обмотку, правильно измеряли напряжение фаз относительно земли. Вторичные обмотки ТН подлежат обязательному заземлению независимо от схемы их соеди-

нений. Это заземление является защитным, обеспечивающим безопасность персонала при попадании высокого напряжения во вторичные цепи. Обычно заземляется нулевая точка звезды (рис. 4.10, в и г) или один из фазных проводов – как правило, фазы «В» – для удобства проверки правильности включения электросчетчиков (рис. 4.10, а и б, 4.11). В проводах, соединяющих точку заземления с обмотками ТН, не должно быть коммутационных и защитных аппаратов (рубильников) переключателей, автоматических выключателей, предохранителей и т. д.). Сечение заземляющего провода должно быть не менее 4 мм^2 (по меди).

Ниже приведены принципиальные схемы включения цепей напряжения к трансформаторам напряжения типа ЗХЗНОЛ – 6(10) и НАМИТ - 6(10) – 2. Для защиты трансформаторов напряжения со стороны ВН обычно используются высоковольтные предохранители (например, ПКТ-10, ПКТ-35). Для защиты вторичных обмоток трансформаторов напряжения от перегрузок и КЗ применяются автоматические выключатели с отсечкой $3,5I_n$.

В схемах указаны меры, которые предпринимаются для защиты сети от самопроизвольного смещения нейтрали при феррорезонансе трансформатора напряжения. Феррорезонанс возникает в случае, когда емкость, какой либо фазы в сети компенсируется индуктивностью трансформатора напряжения, в этой фазе напряжение меняет знак и напряжение нейтрали приобретает величину $3U_\phi$. Такое явление может произойти при малой емкости сети – подаче напряжения на холостые шины, или в случае, если общая длина подключенных кабелей меньше 3 км, а воздушных линий меньше 60 км.

Резисторы **R1-R8** 200 Ом, 75 Вт, включаемые на разомкнутый треугольник, предназначены для защиты от самопроизвольных смещений нейтрали при феррорезонансе ТН. В сети, где такая опасность отсутствует, резисторы устанавливать не требуется.

Для защиты от феррорезонансных перенапряжений в схемах с трансформаторами НТМИ или ЗХЗНОЛ применяется включение резисторов общим сопротивлением 25 Ом на обмотку $3U_0$. Однако включение такой нагрузки приводит к перегрузке дополнительной обмотки ТН при замыканиях на землю, и такой режим может существовать ограниченное время: до 8 часов для НТМИ-10.

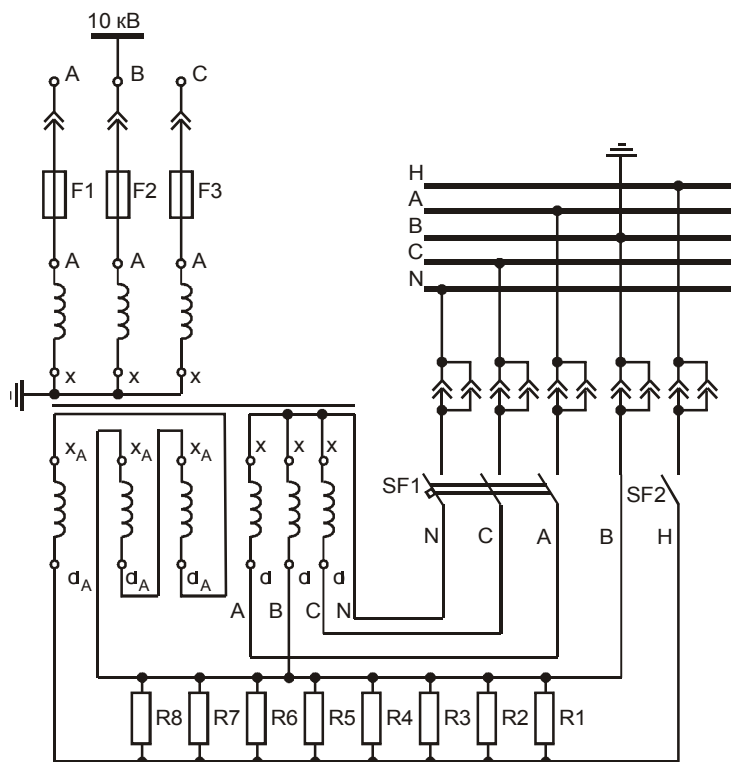


Рис. 4.14. Схема включения однофазных трансформаторов напряжения типа ЗХЗНОЛ-6(10)

Примечание.

1. Необходимость установки резисторов R1-R8 в цепях ТН типа ЗХЗНОЛ-10 для защиты от перенапряжения при самопроизвольных смещениях нейтрали уточняется при эксплуатации.

Трансформаторы напряжения типа **НАМИ-10**, благодаря антирезонансным свойствам, обусловленным особенностью конструкции, имеют повышенную (по сравнению с НТМИ-10) надежность и устойчивость к перемежающимся дуговым замыканиям на землю. Для обеспечения своей устойчивости они не требуют применения каких-либо дополнительных мер со стороны потребителя, а включение резисторов 25 Ом на обмотку $3U_0$ запрещено заводом-изготовителем.

Недавно ОАО ЭК «Хмельницоблэнерго» начат выпуск принципиально новых, не имеющих аналогов на Украине и за границей, трехфазных трансформаторов напряжения **НТМ(и)**, пред-

назначенных для использования в сети 6-35кВ с изолированной нейтралью (на смену НТМИ, ЗНОМ, НАМИ). В трансформаторе НТМ(i) обмотки соединены по схеме «открытый треугольник/треугольник» (Δ/ρ с резистивным формирователем фазных напряжений сети), чем устраняется основная причина повреждений ТН при любых видах замыканий на землю. Для контроля изоляции сети в НТМ(i) использован блок с трехфазным резистивным делителем, включенным между фазами сети и землей. НТМ(i) обеспечивают повышение достоверности учета электроэнергии как в нормальном режиме, так и при длительных однофазных замыканиях на землю. Контроль замыкания на землю имеет чувствительность на уровне 10% от U_{ϕ} . АО «Самарский трансформатор» разработан специальный антирезонансный трансформатор **НАМИТ-6(10)-2**. В этом трансформаторе на общем магнитопроводе намотаны дополнительные первичная и вторичная обмотки нулевой последовательности (ТНП). Первичная обмотка включается между нейтралью ТН и землей. Вторичная дополнительная обмотка выводится отдельно. При замыкании выводов вторичной дополнительной обмотки, первичная работает в короткозамкнутом режиме, и не влияет на процессы в сети. Схема антирезонансного включения трансформатора напряжения НАМИТ – 6(10) –2 представлена на рис.4.15. При появлении феррорезонанса дополнительная вторичная обмотка должна быть раскорочена, и ее индуктивность выводит сеть из состояния феррорезонанса. Операция раскорачивания производится либо с помощью ключа, либо специальной схемой автоматики, см. рис. 4.16. Время работы в таком режиме не ограничено.

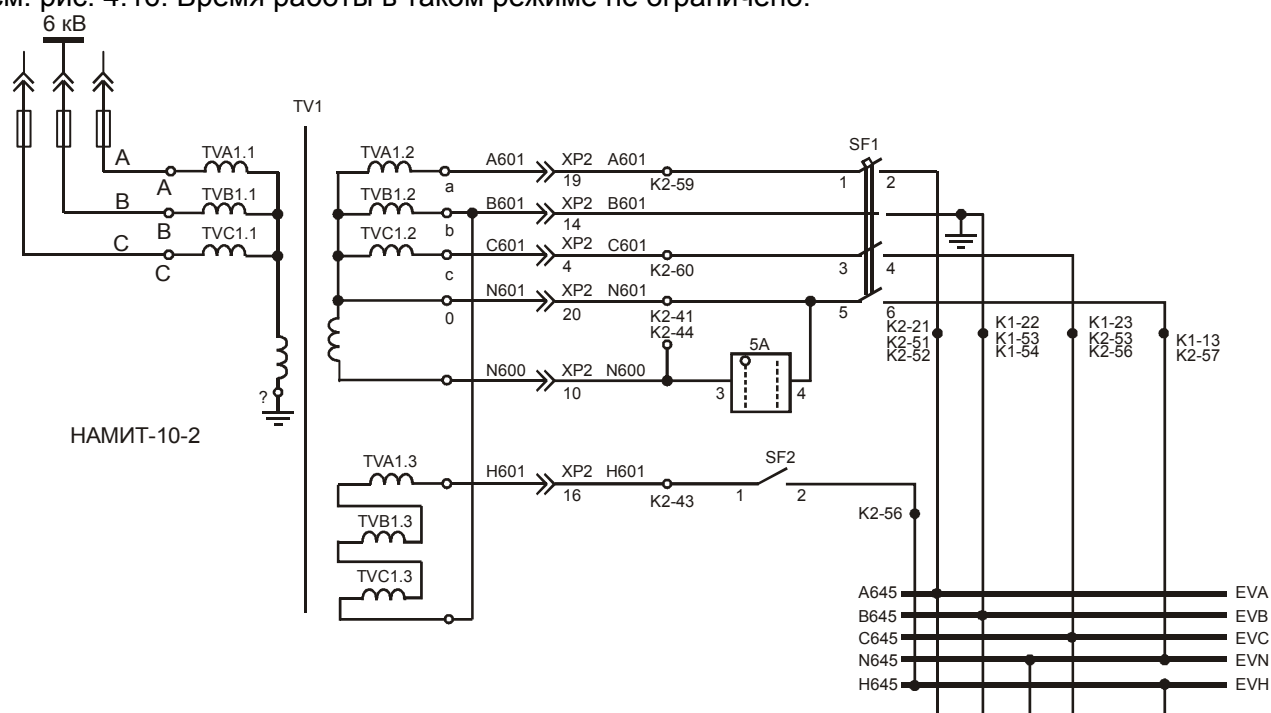


Рис. 4.15 Схема включения трехфазного антирезонансного трансформатора напряжения НАМИТ – 6(10) –2.

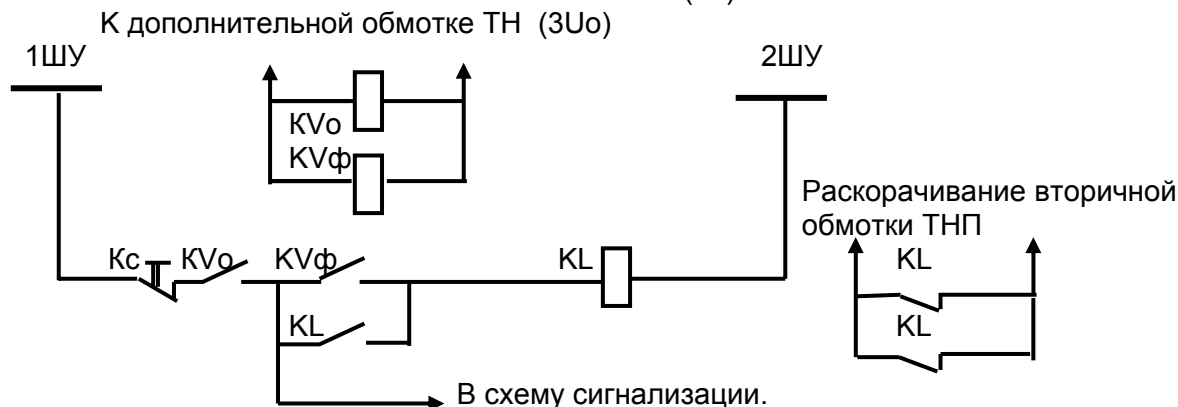


Рис. 4.16 Схема автоматического раскорачивания антирезонансной обмотки ТН типа НАМИТ –2

KVo – НЛ-6А; $U_{ср.} = 31 - 32$ В.

KVф – НЛ-6А; $U_{ср.} = 135 - 140$ В.

KL – промежуточное реле например РП-23 или РП-25.

Kс – кнопка съема сигнала.

В сетях, где опасность феррорезонанса отсутствует, вторичная антирезонансная обмотка закорачивается ключом SA. К выводам K2-61 и K2-64 может быть подключена схема автоматического включения антирезонансной обмотки см. рис. 4.16.

В качестве обоих реле (рис. 4.16, KVo и KVф) может быть использовано одно устройство УЗА10.В2 с уставками 30 и 130 В на ее двух ступенях.

В нормальном режиме напряжение $3U_0$ отсутствует, контакты реле KVo и KVф разомкнуты, вторичная (антиферрорезонансная) обмотка ТНП закорочена контактами реле KL. При появлении феррорезонанса срабатывают оба реле, KVo и KVф, промежуточное реле KL раскорачивает вторичную обмотку ТНП. Схема удерживается при наличии напряжения $3U_0$ на дополнительной обмотке ТН и возвращается в исходное положение при отсутствии напряжения $3U_0$. Схема может быть возвращена вручную нажатием кнопки Кс, если режим феррорезонанса отсутствует.

Балансная схема Фильтра $3U_0$

Фильтр напряжения нулевой последовательности ($3U_0$) может быть выполнен двумя способами: по напряжению - при наличии трансформатора напряжения с отдельной обмоткой разомкнутого треугольника, или по схеме фильтра напряжения нулевой последовательности, встроенного в реле, и предназначенного для подключения к звезде напряжений, при отсутствии такой обмотки. Такая схема используется, например, в ячейках фирмы «Таврида-электрик». Схема балансного фильтра показана на рис.4.17.

Три резистора одинаковой величины подключаются соответственно к фазам **а**, **в**, **с** напряжения обмотки ТН соединенной в звезду, ко вторым концам резисторов, соединенным вместе и выводу нейтрали ТН подключается реле напряжения. На реле выделяется напряжение U_0 .

Для сигнализации замыкания на землю выполняются уставки:

$$3U_0(U_{0cp}) = 15\text{ В}; \quad t_{cz} = 5,4 \text{ сек}$$

Схема работает неправильно при перегорании предохранителей на стороне ВН (или НН, если они там имеются).

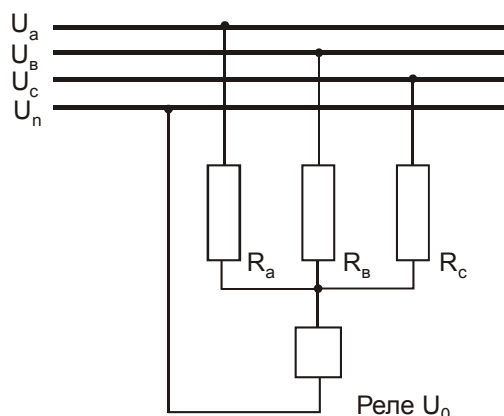


Рис. 4.17 Схема фильтра напряжения нулевой последовательности

Погрешности трансформаторов напряжения

Точность работы трансформаторов напряжения оценивается погрешностями:

- 1) погрешность в напряжении (или в коэффициенте трансформации), под которой понимается отклонение действительного коэффициента трансформации от номинального;
- 2) погрешность по углу, под которой понимается угол сдвига вторичного напряжения относительно первичного.

В зависимости от предельно допустимых погрешностей, ТН подразделяются на классы точности. Один и тот же ТН в зависимости от нагрузки, подключенной к его вторичной обмотке, может работать с различным классом точности. Поэтому, в каталогах и паспортах на ТН указываются два значения мощности: номинальная мощность в вольт-амперах, при которой ТН может работать в гарантированном классе точности, и предельная мощность, с которой ТН может работать с допустимым нагревом обмоток. Предельная мощность ТН в несколько раз превышает номинальную. Так, у ТН типа НОМ-6 с коэффициентом трансформации 6000/100 для класса точности 1% номинальная мощность составляет 50 ВА, а предельная – 300 ВА. Кроме рассмотренных выше основных погрешностей, возникающих при трансформации первичного напряжения на вторичную сторону, на работу релейной защиты и точность измерений влияют так же дополнительные погрешности от падения напряжения в кабелях от ТН до места установки панелей защиты или измерений. Поэтому, согласно требованиям ПУЭ, сечение жил кабелей должно выбираться так, чтобы падение напряжения в указанных цепях не превышало: 3 % – для релейной защиты; 2 % -для фиксирующих измерительных приборов; 1,5 %

– для щитовых измерительных приборов; 0,25–0,5 % – для счетчиков. Следует заметить, что заземленные точки обмоток ТН, соединенных в звезду и разомкнутый треугольник, должны выводиться разными жилами. Потери напряжения определяются по известным сопротивлениям жил контрольных кабелей и значениям проходящих по ним токов нагрузки:

$$\Delta U = k_1 I_1 R_1 + k_2 I_2 R_2 + \dots + k_n I_n R_n \quad (4.28)$$

где

k_1, k_2, k_n – коэффициенты для пересчета фазного падения напряжения на междуфазное (при питании нагрузки по трем фазам $k = \sqrt{3}$, а при питании по двум жилам нагрузки, включенной на междуфазное напряжение, $k = 2$).