

Лопатин В.Г., Лопатина Н.П.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

Учебное пособие



Лопатин В.Г., Лопатина Н.П.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

621.316-52(075.8)

Л 771

УДК 621.316.9 189(075.8)

Л 771

Измерительные трансформаторы тока в релейной защите: Лопатин В.Г., Лопатина Н.П. Учебное пособие.- Севастополь: СНУЯЭиП, 2011, - 47 с

В настоящем учебном пособии рассмотрены особенности применения измерительных трансформаторов тока в релейной защите. Изложены общий принцип действия, технические параметры трансформаторов тока, а также схемы соединения трансформаторов тока и реле, наиболее часто используемые в релейной защите.

В силу большой значимости первичных измерительных преобразователей (в частности, измерительных трансформаторов тока), применяемых в релейной защите, данное учебное пособие будет полезно студентам, изучающим дисциплины «Элементы релейной защиты и автоматики», «Основы релейной защиты», «Основы теории релейной защиты », «Эксплуатация релейной защиты».

Учебное пособие предназначено для студентов электротехнических специальностей очной и заочной форм обучения по специальностям 7.090601 «Электрические станции» и 7.090603 «Электротехнические системы электропотребления»

УДК 621.316.9 189(075.8)

Содержание

Введение.....	4
1 Основные сведения о трансформаторах тока.....	5
1.1 Назначение трансформаторов тока.....	5
1.2 Классификация трансформаторов тока.....	7
1.3 Принцип действия трансформатора тока.....	10
1.4 Погрешности в работе измерительного трансформатора тока.....	20
1.5 Основные параметры и характеристики измерительных трансформаторов тока.....	23
1.6 Требования, предъявляемые к точности работы измерительных трансформаторов тока.....	30
1.7 Выбор (проверка) трансформатора тока по кривым 10% - ой кратности.....	32
1.8 Схемы соединения обмоток трансформаторов тока и реле.....	35
1.9 Перечень контрольных вопросов.....	45
Список литературы.....	46

Введение

В настоящее время токовые цепи релейных защит (РЗ) питаются, как правило, от измерительных трансформаторов тока.

В схемах релейной защиты наиболее широко применяются двухобмоточные трансформаторы тока (ТТ) с ферромагнитными сердечниками, аналогичные трансформаторам тока, применяемым в схемах электрических измерений. Однако расчётный режим работы ТТ в схемах РЗ нередко существенно отличается от расчётного режима работы ТТ в схемах электрических измерений.

Во-первых, в схемах РЗ допускаются большие погрешности трансформаторов тока, чем в схемах измерений: допустимая токовая погрешность ТТ в расчётном режиме обычно не менее 10%, допустимая угловая погрешность ТТ в схемах РЗ не менее 7° , а во многих случаях вообще не нормируется.

Во-вторых, кратность первичного тока по отношению к номинальному у трансформаторов тока в схемах РЗ в расчётном режиме, как правило, значительно больше единицы, тогда как в схемах электрических измерений она обычно лежит в пределах $0,1 \div 1,2$.

В-третьих, ферромагнитный сердечник ТТ в схемах РЗ нередко оказывается сильно насыщенным и вследствие этого форма кривой вторичного тока оказывается искажённой.

В-четвёртых, иногда расчётным режимом работы ТТ в схемах РЗ является не установившийся, а переходный режим.

Всё это значительно усложняет анализ режимов работы трансформаторов тока в схемах РЗ.

Основные параметры релейной защиты, характеризующие её чувствительность, быстродействие, селективность, нередко в значительной степени зависят от свойств трансформаторов тока, применяемых в схемах защиты. Поэтому неудивителен интерес, проявляемый к трансформаторам тока со стороны специалистов, ведущих проектирование и эксплуатацию устройств РЗ. Все учебники по релейной защите и серьёзные монографии обязательно содержат главы, посвящённые трансформаторам тока.

В настоящем учебном пособии изложены общие принципы устройства и функционирования измерительных трансформаторов тока, основные технические параметры и погрешности в их работе; рассмотрены также некоторые схемы соединения обмоток ТТ и реле, используемые в схемах релейной защиты.

1. Основные сведения о трансформаторах тока

1.1 Назначение трансформаторов тока

Трансформатором тока (ТТ) называется трансформатор, в котором при нормальных условиях эксплуатации вторичный ток практически пропорционален первичному току и при правильном включении сдвинут относительно него по фазе на угол, близкий к нулю градусов.

Первичная обмотка $W1$ ТТ включается в цепь последовательно (в рассечку токопровода), а вторичная обмотка $W2$ замыкается на некоторую нагрузку (реле, измерительные приборы). По вторичной обмотке и по подключённой к ней нагрузке проходит вторичный ток I_2 , пропорциональный первичному.

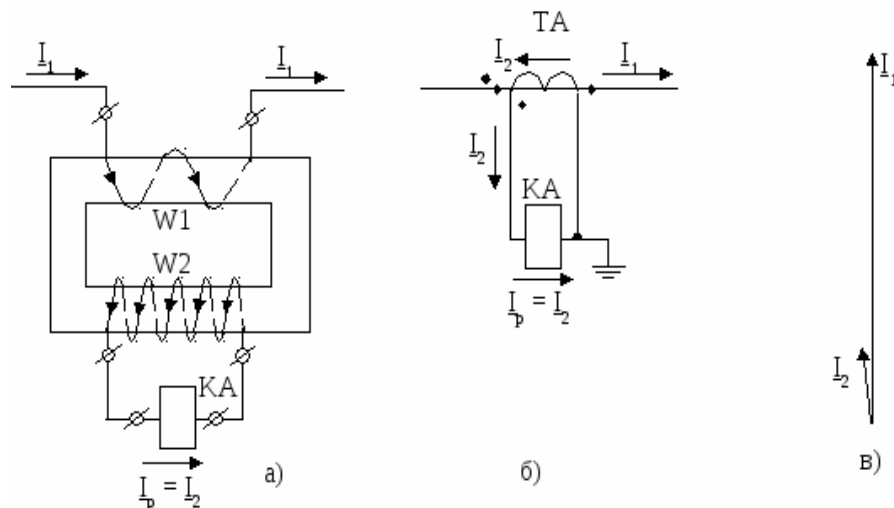


Рисунок 1.1 Схема включения ТТ, его условное обозначение на схемах и упрощённая векторная диаграмма токов (первичного и вторичного)

В трансформаторах тока, используемых в сетях с высоким классом напряжения, первичная обмотка изолирована от вторичной, а также от магнитопровода (от земли) на полное рабочее напряжение первичной цепи. Один конец вторичной обмотки в целях электробезопасности обычно заземляется (рисунок 1.1,б). Поэтому точка заземления имеет нулевой потенциал, а все остальные участки вторичной цепи имеют потенциал относительно земли близкий к нулю, но не равной нулю. Следует отметить, что наличие защитного заземления вторичной цепи не нарушает её работу, - весь вторичный ток I_2 проходит по обмотке реле (через входную цепь реле) KA и не ответвляется на землю.

Нормальным режимом работы ТТ является режим близкий к короткому замыканию ($KЗ$), т.е. суммарное сопротивление обмотки (-ок) реле,

соединительных проводов, контактных соединений должно быть близко к нулю. При $Z_n \rightarrow 0$ погрешности в работе ТТ оказываются наименьшими.

Трансформаторы тока по своему назначению разделяются на ТТ для электроизмерений и на ТТ для релейной защиты (РЗ). В некоторых случаях функции измерения и обслуживания устройств РЗ совмещаются в одном ТТ.

Трансформаторы тока для измерений предназначены для передачи информации о значении тока в контролируемой цепи измерительным приборам. Они (ТТ) устанавливаются в цепях с большими токами (сотни и тысячи ампер) и с высоким классом напряжения, т.е. в цепях, в которых невозможно непосредственное включение измерительного прибора.

Ко вторичной обмотке ТТ для измерений подключаются амперметры, токовые обмотки ваттметров, счётчиков и др. Таким образом, трансформаторы тока для измерений обеспечивают:

1) преобразование переменного тока любого значения в переменный ток, значение которого приемлемо для измерения с помощью стандартных измерительных приборов. Реальное значение тока в первичной цепи получают путём умножения показания амперметра на коэффициент трансформации трансформатора тока

$$I_1 = K_T \cdot I_A$$

2) изолирование измерительных приборов, к которым имеет доступ обслуживающий персонал, от цепей, находящихся под высоким напряжением.

Трансформаторы тока для релейной защиты предназначены для передачи информации о значении тока в первичной (защищаемой) цепи в устройства РЗ, где преобразованный трансформатором тока первичный ток сравнивается с уставкой по току срабатывания измерительного органа (токового реле КА). Соответственно этому ТТ для РЗ обеспечивают:

1) преобразование переменного тока в защищаемом элементе любого значения (тысячи и десятки тысяч ампер) в переменный ток, приемлемый по величине для функционирования устройств РЗ;

2) изолирование реле, к которым имеет доступ обслуживающий персонал, от цепей с высоким классом напряжения.

Применение ТТ в электроустановках высокого напряжения (ВН) является необходимым даже в тех случаях, когда уменьшение тока первичной цепи I_1 для измерительных приборов или реле не требуется. В этом случае ТТ

обеспечивает лишь гальваническую развязку низковольтной вторичной цепи от высоковольтной первичной цепи.

2. Классификация трансформаторов тока

Трансформаторы тока классифицируются:

1. По роду установки:

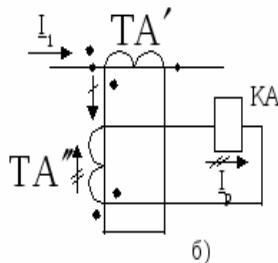
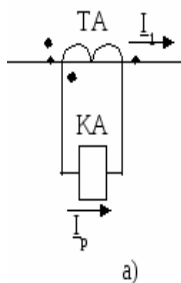
- ТТ, предназначенные для работы на открытом воздухе;
- ТТ, предназначенные для работы в закрытых помещениях;
- ТТ, предназначенные для встраивания во внутренние полости электроустановок, например, ТТ, встроенные во вводы трансформаторов;
- ТТ, предназначенные для специальных установок (шахты, суда, электровозы, электропечи и др.).

2. По числу коэффициентов трансформации:

- ТТ с одним коэффициентом трансформации;
- ТТ с несколькими коэффициентами трансформации, получаемыми изменением числа витков W_1 и W_2 .

3. По числу ступеней трансформации:

- ТТ одноступенчатые, рисунок 1.2,а);
- ТТ многоступенчатые (каскадные), рисунок 1.2,б).



4. По выполнению первичной обмотки:

- ТТ с одновитковой первичной обмоткой;
- ТТ с многовитковой первичной обмоткой.

Рисунок 1.2

Одновитковые ТТ имеют две разновидности:

- ТТ без собственной первичной обмотки;
- ТТ с собственной первичной обмоткой.

Одновитковые ТТ, не имеющие собственной первичной обмотки выполняются встроенными, шинными или разъёмными.

Встроенный ТТ (рисунок 1.3,а) представляет собой магнитопровод с намотанной на него вторичной обмоткой. Собственной первичной обмотки у этого ТТ нет. Её роль выполняет токоведущий стержень проходного

изолятора. Этот ТТ не имеет собственных изоляционных элементов между первичной и вторичной обмотками. Их роль выполняет изоляция проходного изолятора.

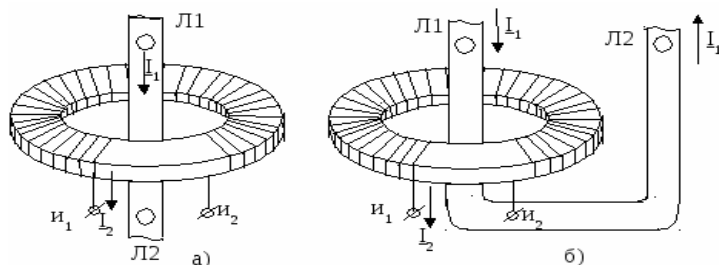
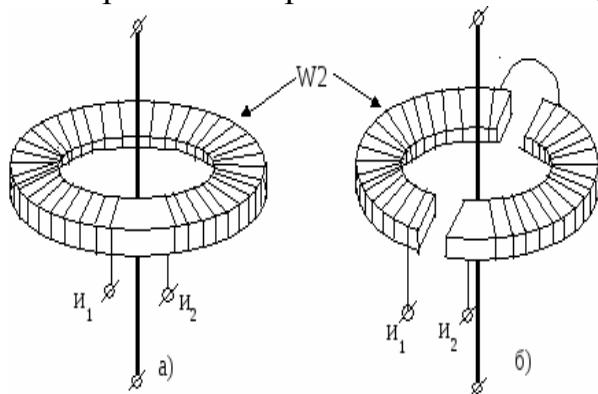


Рисунок 1.3

В шинном ТТ (рисунок 1.3,а) роль первичной обмотки выполняют одна или несколько шин распределительного устройства, которые пропускаются при монтаже сквозь внутреннюю полость проходного изолятора (последний на рисунке 1.3 не показан).

Разъёмный ТТ (рисунок 1.3,б) тоже не имеет собственной первичной обмотки. Его магнитопровод состоит из двух частей, стягиваемых болтами. При монтаже части магнитопровода смыкаются вокруг проходного изолятора, который также состоит из двух частей. Через внутреннюю полость проходного изолятора проходит токовод, который выполняет роль первичной обмотки.

Одновитковые ТТ, имеющие собственную первичную обмотку, выполняются со стержневой первичной обмоткой (рисунок 1.4,а) или с U-образной (рисунок 1.4,б).



Трансформатор тока (рисунок 1.4,а) имеет собственную первичную обмотку в виде стержня круглого или прямоугольного сечения, закреплённого в проходном изоляторе (последний на рисунке 1.4 не показан).

Рисунок 1.4

Многовитковые ТТ (рисунок 1.5) изготавливаются с катушечной первичной обмоткой, надеваемой на магнитопровод; с петлевой первичной обмоткой, состоящей из нескольких витков; со звеньевой первичной обмоткой.

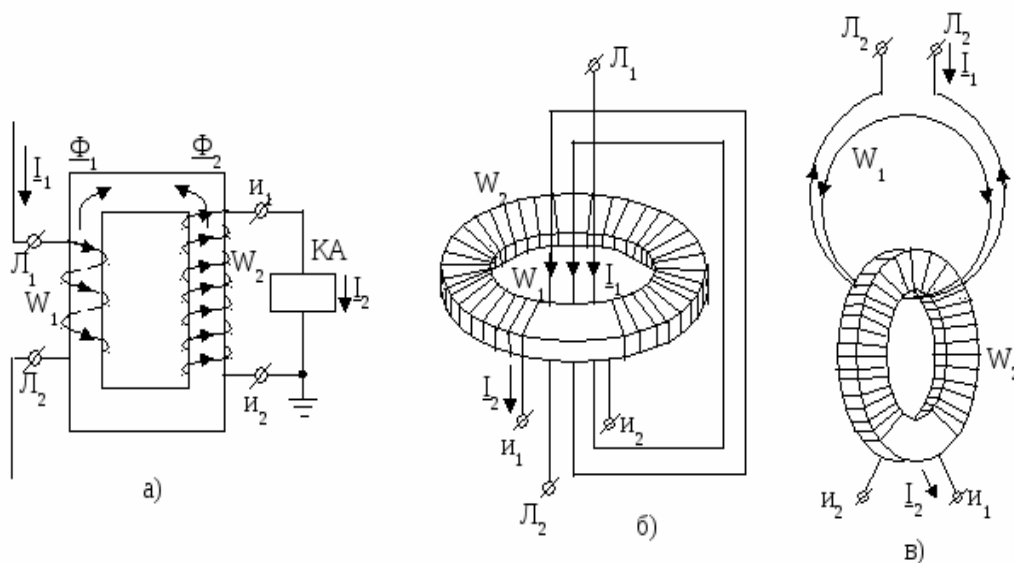


Рисунок 1.5 Многовитковые трансформаторы тока: а) с катушечной первичной обмоткой; б) с петлевой первичной обмоткой; в) со звеньевой первичной обмоткой

5. По роду изоляции между первичной и вторичной обмотками .

Трансформаторы тока изготавливаются:

- с твёрдой изоляцией (фарфор, литая твёрдая изоляция, прессованная изоляция и др.);
- с вязкой изоляцией (заливочные компаунды);
- с комбинированной (бумажно-масляная конденсаторного типа);
- с газообразной изоляцией (воздух, элегаз).

1.3 Принцип действия трансформатора тока

Известно, что трансформаторы тока дают возможность получать информацию о состоянии защищаемого объекта в виде различных сочетаний токов фаз, необходимых для работы РЗ. От достоверности этой информации зависит правильность действия РЗ. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к ТТ, является точность трансформации контролируемого первичного тока в защищаемом объекте, с погрешностями, не превышающими допустимых значений.

Устройство трансформатора тока поясняет рисунок 1.6.

В общем случае число витков вторичной обмотки W_2 больше (значительно) числа витков первичной обмотки; ток вторичный I_2 , как правило, меньше первичного I_1 .

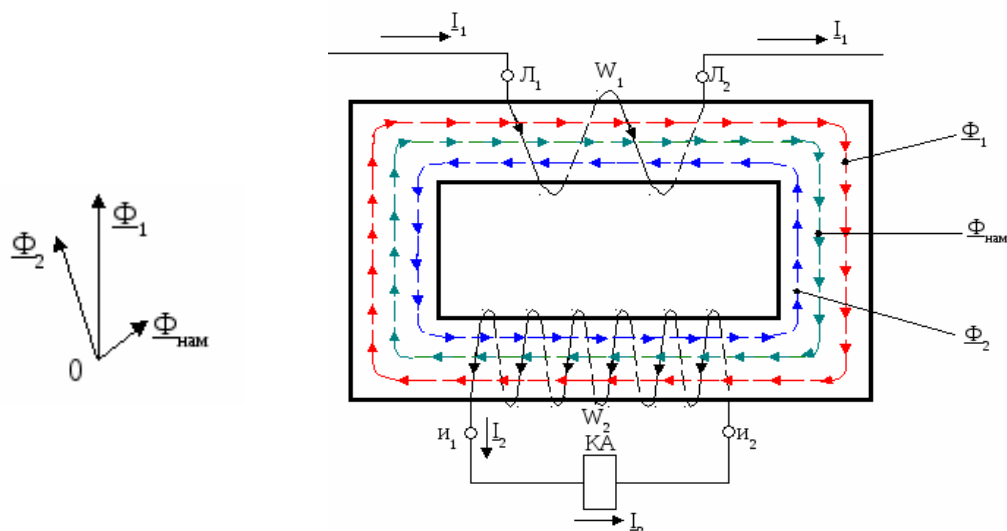


Рисунок 1.6 Общее устройство ТТ и его включение в первичную цепь

Поскольку первичная обмотка W_1 включена «в рассечку» в цепь измеряемого тока, то через неё проходит весь ток (рабочий первичный ток нормального режима или ток короткого замыкания). Этот ток является для ТТ «принудительным» и не зависит от состояния вторичной цепи (от сопротивления вторичной обмотки Z_2 и сопротивления подключённой нагрузки Z_H).

Первичный ток I_1 создаёт в сердечнике ТТ магнитный поток Φ_1

$$\Phi_1 = \frac{I_1 \cdot W_1}{R_\mu} \quad (1.1)$$

Поток Φ_1 , пересекая витки обмотки W_2 , индуцирует в ней ЭДС, под действием которой в замкнутой вторичной цепи протекает вторичный ток I_2 . Вторичный ток, в свою очередь, возбуждает в сердечнике магнитный поток Φ_2 , который направлен встречно потоку Φ_1 и уменьшает его. Другими словами, магнитный поток Φ_1 намагничивает сердечник, а поток Φ_2 , будучи в противофазе к потоку Φ_1 , размагничивает сердечник.

Результирующий магнитный поток в сердечнике ТТ определяется разностью потоков Φ_1 и Φ_2 и называется намагничивающим потоком $\Phi_{нам}$ (или Φ_0).

$$\Phi_{нам} = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (1.2)$$

Таким образом, первичный магнитный поток Φ_1 обеспечивает создание вторичного потока Φ_2 и намагничивающего $\Phi_{\text{нам}}$ (теория трёх потоков).

Выражение (1.2) можно записать иначе

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_{\text{нам}} \text{ или через МД } \mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_2 + \mathcal{F}_{\text{нам}} \text{ или} \quad (1.3)$$

$$I_1 \cdot W_1 = I_2 \cdot W_2 + I_{\text{нам}} \cdot W_1, \text{ где} \quad (1.4)$$

$I_{\text{нам}}$ – ток намагничивания, являющийся частью первичного тока; можно полагать, что он обеспечивает результирующий магнитный поток в сердечнике ТТ.

Поделим правую и левую части уравнения (1.4) на W_2

$$I_1 \cdot \frac{W_1}{W_2} = I_2 + I_{\text{нам}} \cdot \frac{W_1}{W_2} \text{ или} \quad (1.5)$$

$$\frac{I_1}{K_B} = I_2 + \frac{I_{\text{нам}}}{K_B}.$$

Здесь K_B – витковый коэффициент трансформации ТТ $K_B = \frac{W_2}{W_1}$.

Поскольку при значениях первичного тока, меньших или равных значениям номинальных токов $I_{1\text{ном}}$ трансформаторов тока, ток намагничивания $I_{\text{нам}}$ не превышает 3% от первичного тока I_1 , то приближённо можно считать $I_{\text{нам}} \approx 0$. Тогда

$$I_2 \approx \frac{I_1}{K_I}, \quad (1.6)$$

где K_I – номинальный коэффициент трансформации ТТ. Он равен отношению номинального первичного тока ТТ $I_{1\text{ном}}$ к номинальному вторичному току $I_{2\text{ном}}$

$$K_I = \frac{I_{1\text{ном}}}{I_{2\text{ном}}} \quad (1.7)$$

Примечание. Все трансформаторы тока, выпускаемые заводами-изготовителями, рассчитываются на ту или иную величину первичного тока, при которой: - трансформатор тока может работать сколь угодно долго, излишне не перегреваясь;

- ток намагничивания $I_{\text{нам}}$ не выходит за пределы $(2 \div 3)\%$ от первичного тока. Значения первичного и вторичного номинальных токов каждого конкретного

ТТ указываются в паспортах-формулярах и «выбиваются» на табличке, закреплённой на корпусе ТТ, в виде дроби. Например, 600/5 или 1000/1. Здесь 600 и 1000 – номинальные первичные токи трансформаторов тока; 5 и 1 – номинальные вторичные токи. Следовательно, первый ТТ имеет номинальный коэффициент трансформации $K_1 = 600/5 = 120$, второй ТТ - $K_1 = 1000/1 = 1000$.

Для правильного соединения вторичных обмоток трансформаторов тока между собой и правильного подключения к ним обмоток реле выводы обмоток ТТ обозначаются:

L_1 и L_2 – начало и конец первичной обмотки;

I_1 и I_2 – начало и конец вторичной обмотки .

При маркировке выводов ТТ за начало вторичной обмотки I_1 принимается тот её вывод, из которого вторичный ток I_2 выходит, если в этот момент в первичной обмотке ток проходит от начала L_1 к концу L_2 .

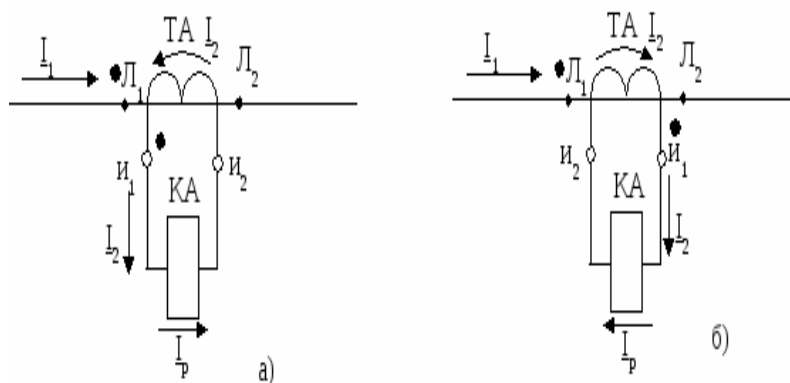


Рисунок 1.7 Маркировка выводов ТТ

На практике в устройствах РЗ применяются обе схемы включения трансформаторов тока с полярностями, указанными на рисунках 1.7,а) и 1.7,б).

Схема замещения трансформатора тока и векторная диаграмма

Известно, что в реальном трансформаторе тока не вся энергия, подаваемая первичной цепью (W_1) трансформатору тока, достигает вторичной цепи и, в частности, обмотки реле КА. Небольшая часть энергии первичного тока расходуется на преодоление сопротивления первичной обмотки Z_1 , на электромагнитное излучение токоведущими цепями ТТ. Значительная (но не большая) часть энергии первичного тока расходуется на создание потока намагничивания и перемагничивание сердечника.

Чтобы количественно оценить потери энергии в ТТ и сравнить значения токов: вторичного I_2 , проходящего по нагрузке (по обмотке реле), и

первичного приведённого $I'_1 = \frac{I_1}{K_B}$, реальный ТТ представляют схемой замещения (рисунок 1.8).

Из схемы замещения ТТ видно, что приведённый к виткам вторичной

обмотки первичный ток I'_1 , равный $\frac{I_1}{K_B}$, проходит по сопротивлению Z'_1 и в точке «а» разветвляется и протекает по двум параллельным цепям.

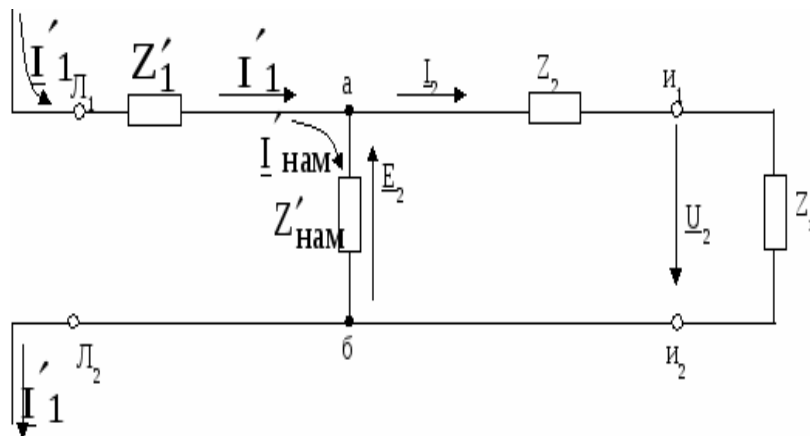


Рисунок 1.8 Схема замещения ТТ

Основная (большая) часть тока проходит через сопротивление вторичной обмотки Z_2 и через сопротивление нагрузки Z_n (реле, соединительные провода, измерительные приборы и др.) и представляет собой вторичный ток I_2 .

Другая (меньшая) часть приведённого первичного тока замыкается через сопротивление ветви намагничивания $Z'_{нам}$ и в реле не попадает. Поскольку из всех потерь мощности наибольшая часть приходится на создание магнитного потока $\Phi_{нам}$ в сердечнике ТТ и перемагничивание его, то участок цепи между точками «а» и «б» называется ветвью намагничивания, а ток, проходящей по ней – током намагничивания $I_{нам}$.

Таким образом, из схемы замещения видно, что во вторичную цепь поступает не весь трансформируемый первичный ток, а лишь часть его, т.е. процесс трансформации происходит с погрешностью.

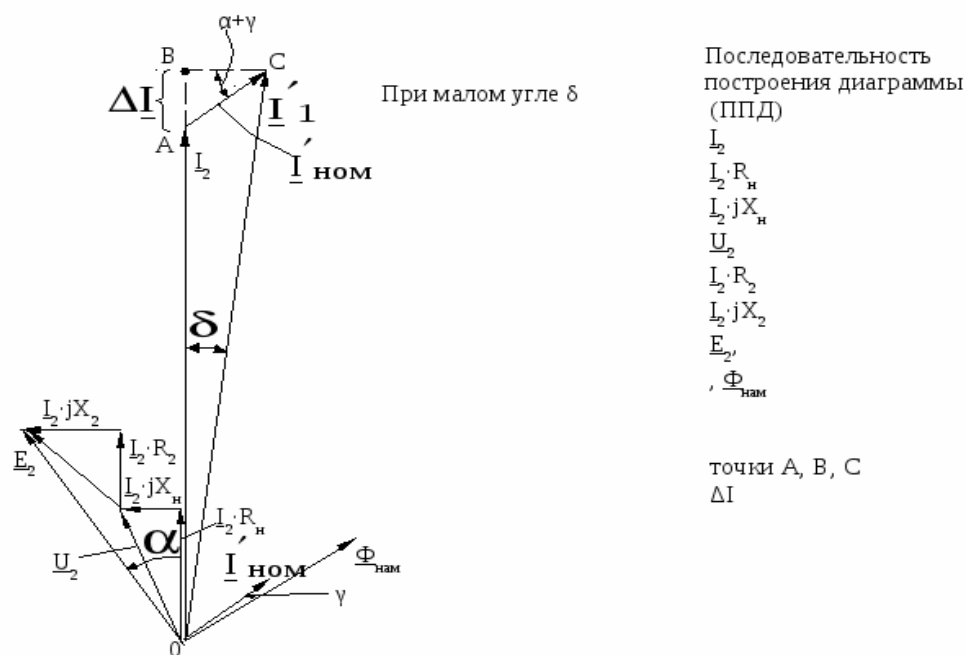


Рисунок 1.9 Векторная диаграмма ТТ

На рисунке 1.9 приведена векторная диаграмма трансформатора тока. При построении векторной диаграммы за исходный можно принять вектор вторичного тока \underline{I}_2 . Вектор напряжения \underline{U}_2 (рисунок 1.8) опережает вектор тока \underline{I}_2 на угол полного сопротивления нагрузки Z_n .

$$\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \cdot (R_n + jX_n) \quad (1.8)$$

ЭДС \underline{E}_2 , наводимая на вторичной обмотке, отличается от \underline{U}_2 за счёт падения напряжения на активном и реактивном сопротивлениях вторичной обмотки от тока \underline{I}_2 .

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 + \underline{I}_2 \cdot (R_2 + jX_2) \quad (1.9)$$

Абсолютное значение ЭДС E_2 определяется по выражению

$$E_2 = I_2 \cdot \sqrt{(R_2 + R_n)^2 + (X_2 + X_n)^2} \quad (1.10)$$

Вектор магнитного потока $\Phi_{\text{нам}}$ сдвинут относительно вектора ЭДС \underline{E}_2 на 90° в сторону отставания. Действующее значение ЭДС E_2 связано с магнитным потоком $\Phi_{\text{нам}}$ соотношением

$$E_2 = 4,44f \cdot W_2 \cdot \Phi_{\text{нам, max}} \quad (1.11)$$

Магнитный поток $\Phi_{\text{нам}}$ создаётся намагничивающей силой $\underline{F}_{\text{нам}}$, которая измеряется в амперах и равна

$$\underline{F}_{\text{нам}} = \underline{I}_{\text{нам}} \cdot W_1 \text{ или} \quad (1.12)$$

$$\underline{F}_{\text{нам}} = \underline{I}'_{\text{нам}} \cdot W_2, \text{ где} \quad (1.13)$$

$\underline{I}'_{\text{нам}}$ - приведённый ток намагничивания $\underline{I}_{\text{нам}}$ к виткам вторичной обмотки.

Ток намагничивания, создающий поток $\underline{\Phi}_{\text{нам}}$, опережает его на угол γ , величина которого зависит от активных потерь в стали сердечника. Этот угол мал и им нередко пренебрегают.

Приведённый первичный ток находится как геометрическая сумма векторов \underline{I}_2 и $\underline{I}'_{\text{нам}}$.

$$\underline{I}'_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}'_{\text{нам}}$$

Схема замещения ТТ и векторная диаграмма к ней наглядно показывают, что за счёт тока намагничивания, протекающего в схеме замещения ТТ по ветви намагничивания, вторичный ток \underline{I}_2 оказывается меньше первичного приведённого на величину ΔI и сдвинут относительно него по фазе на угол δ . По этой причине в работе ТТ возникают погрешности по току и по углу.

Из схемы замещения и векторной диаграммы следует, что ток намагничивания $\underline{I}'_{\text{нам}}$ тем больше, чем меньше сопротивление ветви намагничивания $Z_{\text{нам}}$ в схеме замещения. Ток намагничивания называют полной абсолютной погрешностью ТТ. В расчётах схем РЗ чаще пользуются полной относительной погрешностью ε

$$\varepsilon = \frac{I'_{\text{нам}}}{I'_1} \cdot 100\% \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{I_{\text{нам}}}{I_1} \cdot 100\% \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{I_{\text{нам}}}{I_1}$$

Полная относительная погрешность ε показывает какую долю первичного тока составляет ток намагничивания.

Следует особо подчеркнуть, что схема замещения ТТ и физические величины $\underline{I}_{\text{нам}}$, $\underline{F}_{\text{нам}}$ и $\underline{\Phi}_{\text{нам}}$ вводятся в рассмотрение принципа действия измерительного ТТ для того, чтобы количественно оценить: какая часть энергии первичного тока не достигает вторичной цепи или насколько меньше поток $\underline{\Phi}_2$, возбуждаемый током \underline{I}_2 , магнитного потока $\underline{\Phi}_1$ или, наконец, насколько вторичный ток \underline{I}_2 меньше первичного приведённого. Последнее необходимо знать для правильной оценки функционирования устройства РЗ.

Возвращаясь к схеме замещения ТТ, следует также отметить, что значение сопротивления ветви намагничивания $Z_{\text{нам}}$ зависит от ряда факторов:

- от конструкции трансформатора тока;
- от сорта стали сердечника;
- от величины сопротивления $Z_{\text{н}}$ подключённой нагрузки;
- от кратности первичного тока по отношению к номинальному первичному току конкретного ТТ.

Первые два фактора оказывают незначительное влияние на величину $Z_{\text{нам}}$; для каждого конкретного ТТ они практически неизменны, поэтому их можно свести к минимуму путём витковой коррекции.

Значение $Z_{\text{нам}}$ в схеме замещения ТТ в большей степени зависит от $Z_{\text{н}}$ и кратности первичного тока.

Из схемы замещения и векторной диаграммы ТТ следует, что чем меньше сопротивление нагрузки $Z_{\text{н}}$, т.е. чем ближе режим работы вторичной цепи к режиму КЗ, тем большая часть первичного приведённого тока ответвляется во вторичную цепь и тем меньше $I'_{\text{нам}}$, следовательно, тем больше $Z_{\text{нам}}$. В этом случае ТТ работает с меньшими погрешностями.

По мере увеличения $Z_{\text{н}}$ ток I'_1 , оставаясь неизменной величиной $I'_1 = \frac{I_1}{K_B}$, перераспределяется: вторичный ток I_2 уменьшается, а ток возрастает. Возрастание тока указывает на уменьшение сопротивления ветви намагничивания. Другими словами, увеличение $Z_{\text{н}}$ сопровождается уменьшением . И наоборот, уменьшение $Z_{\text{н}}$ влечёт увеличение . По этим причинам происходит перераспределение тока между вторичной цепью и ветвью намагничивания.

В пределе, когда $Z_{\text{н}} \rightarrow \infty$ (режим холостого хода (ХХ)), $I_2 \rightarrow 0$. При этом МДС $F_{\text{нам}}$ резко возрастает и она становится равной МДС первичной обмотки. Как следствие этого значительно возрастает магнитный поток $\Phi_{\text{нам}}$, который в этом случае по величине равен

$$\Phi_{\text{нам}} = \Phi_1 = \frac{I_1 \cdot W_1}{R_{\mu}}$$

При этом магнитопровод быстро насыщается, что влечёт за собой появление несинусоидальной ЭДС $e_2=f(t)$ на разомкнутой обмотке W_2 , мгновенные значения которой могут достигать тысяч вольт. Появление высокого

напряжения на концах разомкнутой вторичной обмотки опасно для обслуживающего персонала.

Кроме того, резко возросшая магнитная индукция в сердечнике приводит к появлению в стали магнитопровода чрезмерно больших вихревых токов, отчего сердечник и ТТ в целом быстро разогреваются, а температура ТТ может возрасти до сверхкритической. Последнее приводит к форсированному износу изоляционного материала ТТ.

На рисунке 1.10 показана зависимость тока намагничивания $I'_{\text{нам}}$ от величины сопротивления нагрузки $Z_{\text{н}}$.

Таким образом, нормальным режимом работы ТТ является режим близкий к КЗ вторичной цепи с малой $F_{\text{нам}}$. Режим ХХ для ТТ является аварийным и недопустимым.

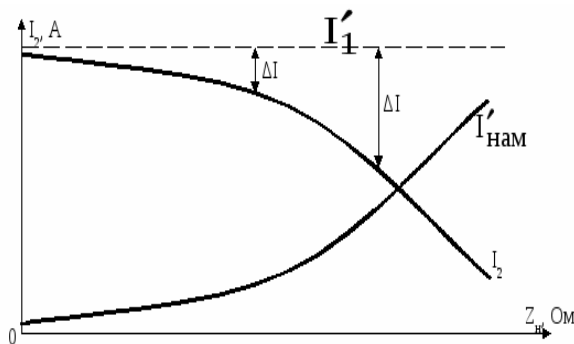


Рисунок 1.10 Характер изменения вторичного тока и тока намагничивания в схеме

замещения ТТ в зависимости от величины сопротивления нагрузки

На точность работы ТТ влияет не только величина сопротивления нагрузки $Z_{\text{н}}$, но и значение первичного тока. На рисунке 1.11 приведены кривые зависимости вторичного тока и тока намагничивания от кратности первичного тока I_1 по отношению к номинальному току ТТ $I_{1\text{ном}}$. Под

кратностью понимается отношение реального тока I_1 к $I_{1\text{ном}}$ ТТ, т.е. $K = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}$.

Из рисунка 1.11 следует, что при значениях первичного тока меньших номинального тока $I_{1\text{ном}}$, т.е. при $K \leq 1$ вторичный ток I_2 мало отличается от первичного приведённого тока I'_1 . Погрешность в работе ТТ менее 3% от . С увеличением кратности первичного тока трансформация последнего во вторичную цепь осуществляется с возрастающими погрешностями

(ΔI , $I'_{\text{нам}}$ и δ). Чем больше кратность первичного тока, тем больше погрешности в работе ТТ. Объясняется это нелинейностью характеристики намагничивания сердечника ТТ.

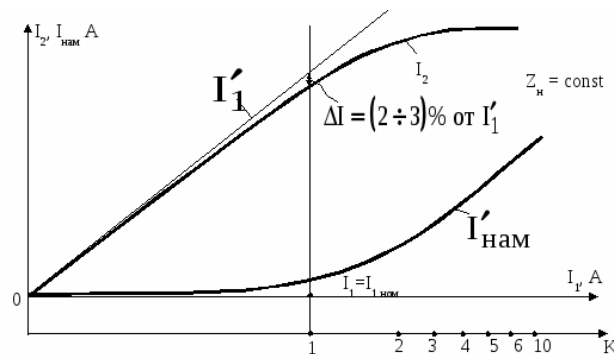


Рисунок 1.11 Зависимость вторичного тока и тока намагничивания от кратности

первичного тока

Общий вид характеристики намагничивания приведён на рисунке 1.12. На линейном участке характеристики (а - б) равным приращениям ΔF соответствуют равные приращения магнитной индукции ΔB .

В пределах нелинейного участка характеристики (б - в) тем же приращениям МДС ΔF соответствуют значительно меньшие приращения индукции.

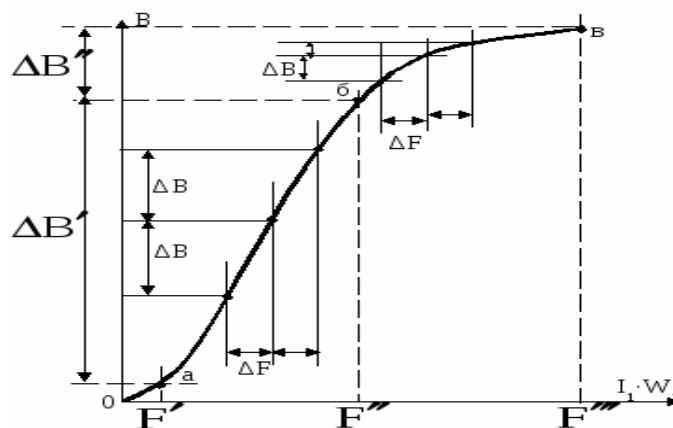


Рисунок 1.12 Характеристика намагничивания сердечника ТТ

Следовательно, при больших кратностях первичного тока:

- во-первых, нарушается синусоидальность вторичного тока, - в его составе появляются высшие гармоники (в первую очередь чётные);



- во-вторых, возрастают энергетические затраты на намагничивание и перемангничивание сердечника, что приводит к возрастанию тока намагничивания $I_{\text{нам}}$.

Общие выводы.

Условиями, определяющими погрешности в работе ТТ являются:

а) величина сопротивления нагрузки Z_n (сопротивление обмотки реле, входное сопротивление полупроводникового реле, сопротивления соединительных проводов и контактных переходов, сопротивления измерительных приборов);

б) отношение первичного ток

1.4 Погрешности в работе измерительного трансформатора тока

При рассмотрении работы устройств РЗ учитываются три вида погрешностей в работе ТТ:

1 – токовая абсолютная погрешность ΔI ; токовая

- токовая относительная погрешность f_i ; погрешность

2 - угловая погрешность δ (дельта);

3 - полная $I_{\text{нам}}$ и полная относительная ϵ погрешности.

1. Токовая абсолютная погрешность определяется величиной ΔI (отрезок АВ на векторной диаграмме ТТ). Она равна алгебраической разности

$$\Delta I = I'_1 - I_2 \quad (1.14)$$

Токовая абсолютная погрешность показывает, насколько реальный вторичный ток меньше расчётного I_2 расч, равного первичному приведённому току.

2. Токовая относительная погрешность выражается в процентах

$$f_i = \frac{\Delta I}{I'_1} \cdot 100\% = \frac{I'_1 - I_2}{I'_1} \cdot 100\% = \frac{K_d - K_v}{K_d} \cdot 100\% \quad (1.15)$$

где K_d – действительный коэффициент трансформации,

K_v – витковый коэффициент трансформации.

Иначе говоря, токовая относительная погрешность есть погрешность в коэффициенте трансформации.

3. Угловая погрешность характеризуется углом δ , показывающим, насколько вторичный ток I_2 сдвинут по фазе относительно тока I'_1 . Угловая погрешность измеряется в градусах.

Согласно векторной диаграмме ТТ (рисунок 1.9)

$$\sin \delta = \frac{BC}{CO} = \frac{I'_{\text{нам}} \cdot \cos(\alpha + \gamma)}{I'_1}, \quad \text{отсюда} \quad (1.16)$$

$$\delta = \arcsin \frac{I'_{\text{нам}} \cdot \cos(\alpha + \gamma)}{I'_1} \quad (1.17)$$

Принято считать, что угловая погрешность δ положительна, если ток I_2 опережает по фазе ток I'_1 .

Величина угловой погрешности зависит от значения тока

намагничивания $I'_{\text{нам}}$, следовательно, от соотношения сопротивлений $Z_{\text{н}}$ и $Z_{\text{нам}}$ (рисунки 1.13, а) и б), а также от характера полного сопротивления вторичной цепи (рисунки 1.13, в) и г).

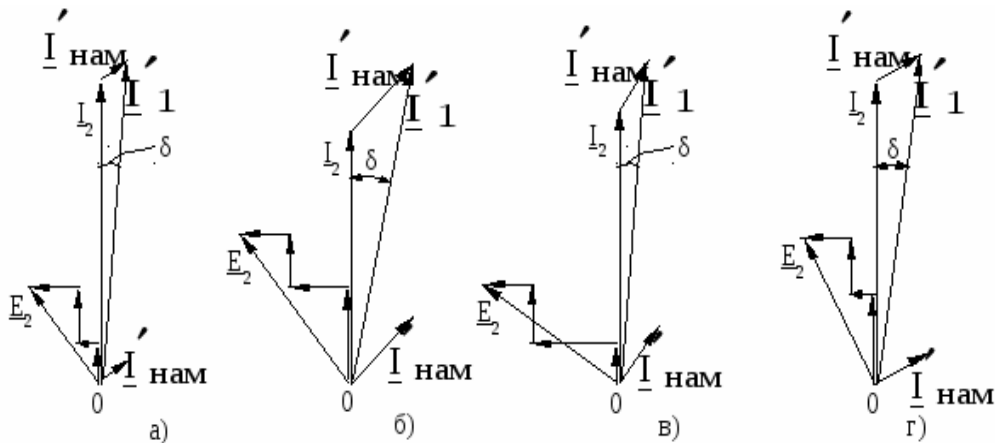


Рисунок 1.13, поясняющий зависимость угловой погрешности ТТ от величины $Z_{\text{н}}$

(рисунок а) и б) и от характера полного сопротивления $Z_{\text{н}}$ (рисунок в) -

$X_{\text{н}} > R_{\text{н}}$;

рисунок г) - $R_{\text{н}} > X_{\text{н}}$

4. Полная абсолютная погрешность определяется модулем вектора $|\underline{I}'_{\text{нам}}|$ (отрезок AC на векторной диаграмме), измеряется в амперах, (рисунок 1.9).

На практике в расчётах чаще пользуются полной относительной погрешностью ε в процентах или в долях от абсолютного значения первичного приведённого тока.

$$\varepsilon = \frac{|\underline{I}'_{\text{нам}}|}{|\underline{I}'_1|} \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{|\underline{I}'_{\text{нам}}|}{|\underline{I}'_1|} \cdot 100\% \quad (1.18) \quad \text{Так, например, пусть на рисунке 1.13, а)}$$

ток $|\underline{I}'_1|$ равен 4,3 А, ток намагничивания $|\underline{I}'_{\text{нам}}|$ равен 0,6 А. Тогда

$$\varepsilon = \frac{0,6\text{А}}{4,3\text{А}} = 0,14 \quad / \text{ или } 14\% /.$$

В том случае, если вторичный ток не синусоидален, что может быть при больших кратностях первичного тока, то ток намагничивания выражается как среднеквадратичное значение разности мгновенных величин: - реального

$$i'_1 \quad / i'_1 = \frac{i_1}{K_B} /,$$

тока i_2 и расчётного тока

$$I'_{\text{нам}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i'_1 - i_2)^2 \cdot dt}, \quad \text{или} \quad (1.19)$$

$$\varepsilon = \frac{100\%}{|\underline{I}'_1|} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i'_1 - i_2)^2 \cdot dt}. \quad (1.20)$$

Рассмотрение выражений (1.19) и (1.20) и анализ векторной диаграммы ТТ (рисунок 1.9) показывают:

1. все три разновидности погрешностей (f_i , δ , ε) в работе ТТ определяются наличием и величиной тока $\underline{I}_{\text{нам}}$;
2. полная погрешность ε учитывает наличие в токе I_2 и в токе высших гармоник (1.20), могущих присутствовать в них. Поэтому полную погрешность ε можно определять по векторной диаграмме, построенной для основной гармоники, только если пренебречь высшими гармониками.

1.5 Основные параметры и характеристики ТТ

1. Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ — действующее значение линейного напряжения, при котором предназначен работать ТТ. Оно указывается в паспортной таблице трансформатора тока, [кВ].

0,66; 6; 10; 15; 20; 24; 27; 35; 110; 220; 330; 500; 750; 1150 кВ.

2. Номинальный первичный ток $I_{1 \text{ ном}}$ — значение первичного тока, проходящего по обмотке W_1 , при котором предусмотрена продолжительная работа ТТ. При этом трансформатор тока излишне не перегревается и погрешности в его работе не превышают допустимых в режиме работы вторичной цепи близком к КЗ.

Для отечественных ТТ принята следующая шкала первичных номинальных токов, [А]:

1; 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 80; 100; 150; 200; 250; 300; 400; 500; 600; 750; 800; 1000; 1200; 2000; 3000; 4000; 6000; 8000; 10000; 12000; 14000; 16000; 18000; 20000; 25000; 28000; 32000; 35500; 40000.

Трансформаторы тока с $I_{1 \text{ ном}}$ 15; 75; 150; 600; 1200; 3000 и 6000 могут допускать несколько большие токи неограниченно длительное время, а именно: 16; 80; 160; 650; 1300; 3300; 6500 А.

3. Номинальный вторичный ток $I_{2 \text{ ном}}$ — значение вторичного тока

$I_{2 \text{ ном}}$ при токе первичном равном $I_{1 \text{ ном}}$.

Все трансформаторы тока изготавливаются

с вторичным номинальным током либо 5 А, либо 1 А.

Причём $I_{2 \text{ ном}} = 1$ А допускается только для трансфор

маторов тока с первичным номинальным током

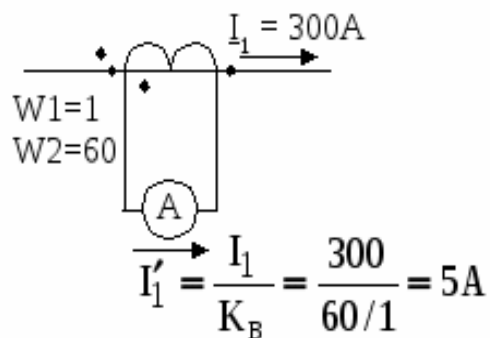
до 4000 А.

4. Коэффициент трансформации ТТ

К числу основных параметров ТТ как функционального преобразователя тока относится коэффициент трансформации.

Различают:

- витковый коэффициент трансформации K_v ;
- действительный коэффициент трансформации K_d ;
- номинальный коэффициент трансформации $K_n(K_I)$.



Витковый коэффициент трансформации равен отношению числа витков вторичной обмотки W_2 к числу витков первичной обмотки W_1 .

$$K_B = \frac{W_2}{W_1}$$

Если разделить реально протекающий по обмотке W_1 первичный ток на витковый коэффициент трансформации, то получим, так называемый, первичный приведённый ток (первичный ток, приведённый ко вторичной обмотке).

Этот ток ещё называют вторичным током идеального ТТ, т.е. такого трансформатора, в котором отсутствуют потери (преодоление вторичным током сопротивления вторичной цепи, излучение электромагнитной энергии, потери на гистерезис, потери на нагревание сердечника вихревыми токами).

Вторичный ток I_2 трансформатора тока всегда меньше первичного приведённого

$$I_2 < I'_1$$

Разница между значением первичного приведённого тока и вторичным током называется токовой погрешностью трансформатора тока. Следует отметить, что витковый коэффициент трансформации K_B для конкретного трансформатора тока является величиной постоянной. Поэтому первичный приведённый ток «жёстко привязан» коэффициентом K_B к реальному первичному току.

$$I_1$$

$$I'_1 = \frac{I_1}{K_B}$$

Разница между значением первичного приведённого тока и вторичным током называется токовой погрешностью трансформатора тока. Следует отметить, что витковый коэффициент трансформации K_B для конкретного трансформатора тока является величиной постоянной. Поэтому первичный

приведённый ток «жёстко привязан» коэффициентом K_B к реальному первичному току.

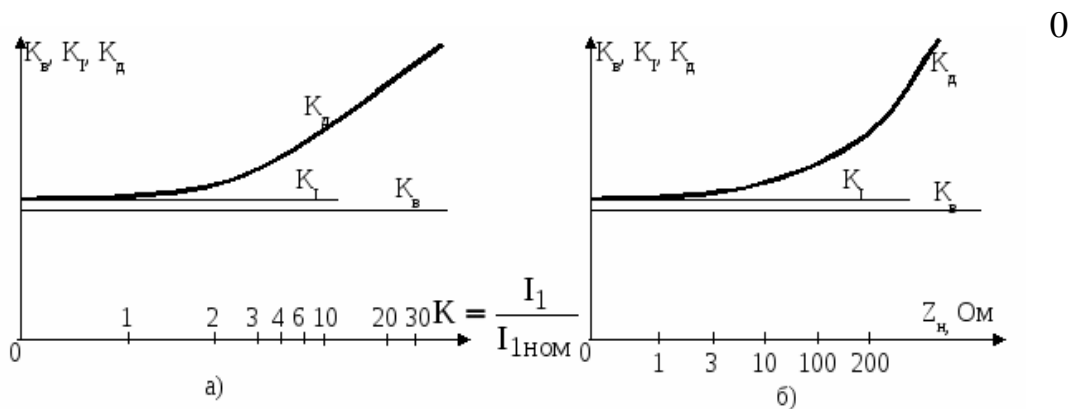


Рисунок 1.14 Характер изменения коэффициента K_d ТТ в зависимости от кратности первичного тока и сопротивления Z_n

Действительный коэффициент трансформации ТТ

K_d представляет собой отношение реального первичного тока I_1 к реальному вторичному току I_2 .

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

Действительный коэффициент трансформации не является величиной постоянной, а имеет большее или меньшее значение в зависимости от ряда факторов, - от величины сопротивления подключённой к ТТ нагрузки и кратности первичного тока. Когда по защищаемому элементу проходит ток в пределах от 0 и до $I_{1\text{ ном}}$ ТТ, то K_d по своему значению близок к K_B или к номинальному коэффициенту трансформации. С ростом первичного тока (с увеличением кратности) значение K_d возрастает (рисунок 1.14,а).

Номинальный коэффициент трансформации ТТ

На практике при расчётах токов срабатывания измерительных органов релейных защит пользуются номинальным коэффициентом трансформации, который представляет собой отношение первичного номинального тока ТТ к его вторичному номинальному току

$$K_I = \frac{I_{1\text{ ном}}}{I_{2\text{ ном}}}$$

Номинальный коэффициент трансформации указывается в паспортной документации каждого ТТ и на табличке, закреплённой на корпусе ТТ в виде дроби, например, 300/5; 4000/1; 8000/5 и др.

Ранее отмечалось, что реальное соотношение токов первичного и вторичного наиболее полно отображает действительный коэффициент трансформации K_d . Значение коэффициента K_d в большой степени зависит от кратности первичного тока и величины сопротивления Z_n

(рисунок 1.14). Однако, определить значение K_d и ввести его в расчётные формулы не представляется возможным.

Поэтому для того, чтобы убедиться в правильности и безотказности действия рассчитываемой РЗ на определённом этапе расчёта защиты выбранный ТТ

(с $K_I = \frac{I_{1\text{ном}}}{I_{2\text{ном}}}$) проверяют по отработанной и рекомендованной методике на значение погрешности в работе используемого ТТ в конкретных условиях. Если в результате проверки окажется, что выбранный для РЗ ТТ работает с погрешностью (ε), выходящей за допустимые пределы (10%), то принимается ряд мер, например:

- уменьшают Z_n (увеличивают сечение соединительных проводов (до $S_{\text{max}}=12\text{мм}^2$), укорачивают по возможности длину соединительных проводов, уменьшают количество контактных переходов, возможно выбирают другое токовое реле с меньшим сопротивлением); всё это позволяет уменьшить K_d (рисунок 1.14,б);

- выбирают другой трансформатор тока с несколько большим первичным номинальным током, например, вместо первоначально выбранного ТТ

с $K_I = \frac{600}{5}$ выбирают ТТ с $K_I = \frac{1000}{5}$; в этом случае уменьшается кратность

первичного тока ($K = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}$), следовательно, уменьшается коэффициент K_d (рисунок 1.14,а).

И первое мероприятие и второе приводят к уменьшению погрешностей в работе ТТ.

5. Стойкость ТТ к механическим и тепловым

воздействиям характеризуется током электродинамической стойкости $I_{\text{дин}}$ и током термической стойкости I_T .

Ток электродинамической стойкости $I_{\text{дин}}$ равен наибольшей амплитуде тока короткого замыкания за всё время его протекания, которую трансформатор тока выдерживает без повреждений, препятствующих его дальнейшей

исправной работе. Ток $I_{\text{дин}}$ характеризует способность ТТ противостоять механическим (электродинамическим) воздействиям тока КЗ. Наибольшие электродинамические воздействия на первичную обмотку ТТ бывают в начале переходного процесса, когда по обмотке $W1$ проходит ударный ток (рисунок 1,15).

Электродинамическая стойкость ТТ может характеризоваться также кратностью $K_{\text{дин}}$ представляющей собой отношение тока электродинамической стойкости $I_{\text{дин}}$ к амплитуде номинального первичного тока. Например, ТТ с $I_{1\text{ ном}} = 1000 \text{ А}$ имеет ток электродинамической стойкости $I_{\text{дин}} = 8450 \text{ А}$. Тогда кратность электродинамической стойкости

$$K_{\text{дин}} = \frac{I_{\text{дин}}}{1,41 \cdot I_{1\text{ ном}}} = \frac{8450}{1400} \approx 6$$

Ток термической стойкости I_T равен наибольшему действующему значению тока КЗ за промежуток времени, в течение которого ТТ выдерживает этот ток без нагрева токоведущих частей до температур, превышающих допустимые.

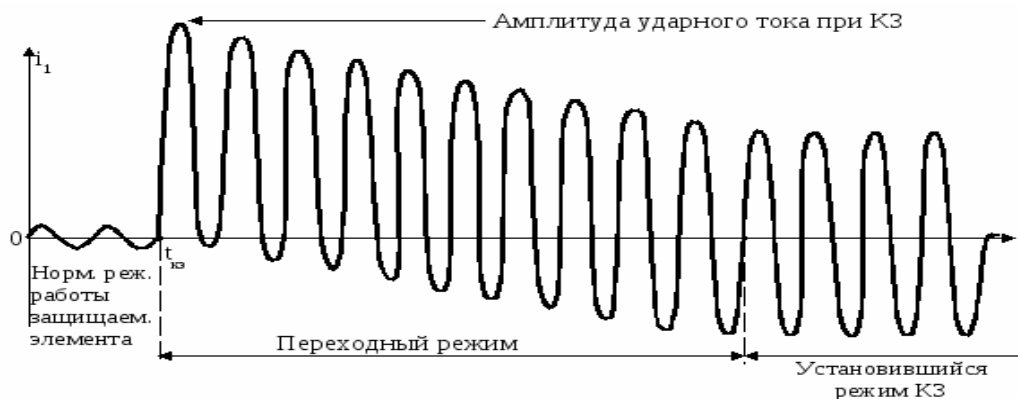


Рисунок 1.15 Кривая первичного тока, проходящего по обмотке $W1$ при КЗ в цепи защищаемого элемента

Термическая стойкость характеризует способность ТТ противостоять тепловым воздействиям тока КЗ. Для определения термического воздействия тока КЗ на трансформатор тока необходимо знать не только значение тока, проходящего через первичную обмотку, но и время его прохождения. Последнее зависит от характера защищаемой сети и вида применяемой РЗ и лежит в пределах от $0,3 \div 0,5$ секунды (для быстродействующих защит) до нескольких секунд (для сетей, в которых применены РЗ с выдержкой времени).

Термическая стойкость может характеризоваться кратностью K_T тока термической стойкости, которая представляет собой отношение тока термической стойкости к номинальному току ТТ

$$K_T = \frac{I_T}{I_{1\text{ном}}}$$

В соответствии с ГОСТ для отечественных ТТ установлены следующие токи термической стойкости:

- а) односекундный ток термической стойкости $I_{1Т}$ (или его кратность $K_{1Т}$) для ТТ с $U_{1\text{ном}} = 330$ кВ и выше;
- б) трёхсекундный ток термической стойкости $I_{3Т}$ (или его кратность $K_{3Т}$) для ТТ с $U_{1\text{ном}} = 110$ кВ; 150 кВ; 220 кВ;
- в) четырёхсекундный ток термической стойкости $I_{4Т}$ (или его кратность $K_{4Т}$ по отношению к номинальному первичному току) для ТТ с $U_{1\text{ном}}$ от 0,66 до 35 кВ.

Между токами электродинамической стойкости и термической должны быть следующие соотношения:

- а) для ТТ с $U_{1\text{ном}} \geq 330$ кВ

$$I_d \geq 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1Т};$$

- б) для ТТ с $U_{1\text{ном}} \geq 110$ кВ, 150 кВ, 220 кВ

$$I_d \geq 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3Т};$$

- в) для ТТ с $U_{1\text{ном}} \geq 35$ кВ

$$I_d \geq 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{4Т}.$$

Электродинамическая и термическая стойкости ТТ зависят от конструктивных особенностей трансформатора, от сечения токоведущих частей, от вида изоляционных материалов и их механической и электрической прочности, от эффективности системы охлаждения и др.

Температура токоведущих частей ТТ при прохождении по ним тока термической стойкости не должна превышать:

- 200°С для токоведущих частей из алюминия;
- 250°С для токоведущих частей из меди (латуни), соприкасающихся с органической изоляцией или маслом;
- 300°С для токоведущих частей из меди (сплавов), не соприкасающихся с органической изоляцией или маслом.

В таблице 1 приведены в качестве примера данные электродинамической и термической стойкости некоторых отечественных трансформаторов тока.

Таблица 1

Трансформатор тока	$I_{1, \text{ном}}$	Кратность	
		Электродин. $K_{\text{дин}}$	Термическая K_t
Проходной одновитковый: - нормальное исполнение - усиленное исполнение	до 600	160 ÷ 170	80
	1000	100 ÷ 110	80
	1500	60 ÷ 70	80
	до 600	150 ÷ 170	120 ÷ 140
	1000	100 ÷ 110	120 ÷ 140
Шинный ТТ	2000 ÷ 6000	250 ÷ 300	-
Проходной многовитковой - нормальное исполнение - усиленное исполнение	5 ÷ 300	45 ÷ 250	70 ÷ 80
	5 ÷ 300	90 ÷ 500	100 ÷ 125

6 Номинальная вторичная нагрузка ТТ $Z_{2н, \text{ном}}$

Вторичная нагрузка ТТ $Z_{2н}$ соответствует полному сопротивлению его внешней вторичной цепи (в Омах) с указанием коэффициента мощности $\cos\varphi_2 = 0,8$.

Вторичная нагрузка (т.е. реле, подключённое ко вторичной обмотке ТТ) может также характеризоваться полной мощностью (в В·А), потребляемой ею при данном коэффициенте мощности номинальном вторичном токе.

Вторичная нагрузка $Z_{2н}$ с косинусом φ_2 равном 0,8, при которой гарантируется установленный класс точности трансформатора тока называется номинальной вторичной нагрузкой трансформатора тока $Z_{2н, \text{ном}}$.

Для отечественных ТТ установлены следующие значения номинальной вторичной нагрузки $S_{2н, \text{ном}}$ при $\cos\varphi_2 = 0,8$:

2,5; 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 100 В·А.

Если потребляемая мощность реле S_p не превышает значения номинальной мощности ТТ $S_{2н, \text{ном}}$, то завод-изготовитель гарантирует установленный

класс точности ТТ (с учётом того, что первичный ток I_1 , проходящий по обмотке W_1 , не превышает $I_{1\text{ ном}}$).

Значение номинальной вторичной нагрузки $Z_{2\text{н, ном}}$ для конкретного ТТ определяется из выражения

$$Z_{2\text{н ном}} = \frac{S_{2\text{н ном}}}{I_{2\text{ ном}}^2}, \quad \text{где}$$

$S_{2\text{н ном}}$ – номинальная вторичная нагрузка ТТ в В·А, указывается в паспорте ТТ.

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

Например, ТТ типа Т – 0,66 ВЭ имеет $I_{1\text{ ном}} = 400 \text{ А}$;

$I_{2\text{ ном}} = 5 \text{ А}$;

$S_{2\text{н, ном}} = 5 \text{ В} \cdot \text{А}$.

Тогда

$$Z_{2\text{н ном}} = \frac{S_{2\text{н ном}}}{I_{2\text{ ном}}^2} = \frac{5 \text{ В} \cdot \text{А}}{25 \text{ А}^2} = 0,2 \text{ Ом}.$$

Если полное сопротивление вторичной цепи $Z_{2\text{н}}$ лежит в пределах от 0,00...Ом до 0,2 Ом, то заводом-изготовителем гарантируется установленный класс точности ТТ.

Трансформаторы тока с номинальным вторичным током 1А имеют много большее значение номинальной вторичной нагрузки $Z_{2\text{н ном}}$. Так ТТ с $K_I = \frac{300}{1}$, имеющий $= 5 \text{ В} \cdot \text{А}$, позволяет подключить к его вторичной обмотке нагрузку

$$Z_{2\text{н ном}} = \frac{S_{2\text{н ном}}}{I_{2\text{ ном}}^2} = \frac{5}{1} = 5 \text{ Ом}.$$

При этом полная относительная погрешность не превысит 10% (при кратности первичного тока до 1).

Трансформаторы тока с $I_{2\text{ ном}} = 1 \text{ А}$ применяются в устройствах релейной защиты в тех случаях, когда используемые в защите токовые реле имеют недопустимо большие сопротивления или когда в силу применяемой схемы соединения обмоток ТТ и реле трансформаторы тока оказываются перегруженными.

1.6 Требования , предъявляемые к точности работы измерительных трансформаторов тока

Трансформаторы тока, питающие РЗ, должны работать с определённой точностью в пределах возможных значений токов коротких замыканий, на которые РЗ должна реагировать. Эти токи могут значительно превышать номинальные первичные токи ТТ , и, следовательно, точная работа ТТ должна обеспечиваться при

$$I_1 \gg I_{1\text{ном}}.$$

На основании опыта эксплуатации ТТ и теоретического анализа их функционирования принято, что для обеспечения правильной работы устройств РЗ погрешность в значении вторичного тока не должна превышать 10%, а погрешность по углу не должна превышать 7°. Эти требования обеспечиваются, если полная погрешность ТТ $\varepsilon \leq 10\%$ или другими словами, если ток намагничивания ТТ не превышает 10% от .

Исходными величинами для оценки погрешности ТТ являются :

- расчётный первичный ток максимальный $I_{1\text{расч. max}}$, при котором РЗ должна устойчиво работать с требуемой точностью;
- сопротивление нагрузки Z_n . Нагрузка состоит из сопротивлений: реле ($Z_p = R_p + jX_p$), соединительных проводов ($R_{\text{пр}}$), переходных контактов ($R_{\text{пер}}$).

$$Z_n \approx Z_p + Z_{\text{пр}} + Z_{\text{пер}}.$$

Предельное значение первичного тока $I_{1\text{max}}$ и соответствующее ему допустимое сопротивление нагрузки $Z_{n\text{ доп}}$ из условия 10% погрешности ($\varepsilon \leq 10\%$) даётся заводом- изготовителем. Предельные значения $I_{1\text{ max}}$ обычно даются в виде кривых 10% - ой кратности первичного тока ТТ,

показывающих зависимость допустимой кратности $\frac{I_{1\text{max}}}{I_{1\text{ном}}}$ от величины сопротивления загрузки Z_n или показывающих зависимость допустимого сопротивления нагрузки $Z_{n\text{ доп}}$ от расчётной кратности первичного тока короткого замыкания. На рисунке 1.16 приведены кривые 10% - ой кратности трансформаторов тока (однотипных, с различными номинальными коэффициентами трансформации).

Из рисунка 1.16 следует, что при кратности, например, $K_{10} = 12$ трансформатор тока (400/5) будет работать с погрешностью $\varepsilon \leq 10\%$, если сопротивление вторичной цепи будет не более $Z'_{n\text{ доп}} = 0,9\text{ Ом}$, что соответствует положению точки А на кривой. Если сопротивление Z_n будет

больше $Z'_{н доп}$ (0,9 Ом), то данный трансформатор будет иметь полную относительную погрешность $\varepsilon > 10\%$.

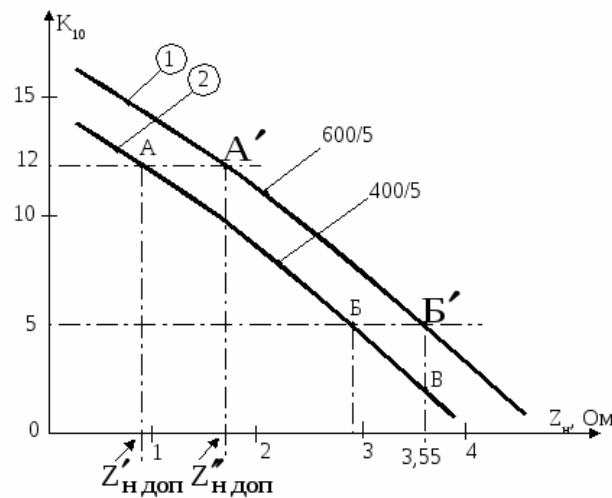


Рисунок 1.16

При той же кратности $K_{10} = 12$ трансформатор тока (600/5) допускает значение сопротивления Z_n до $Z''_{н доп} \approx 1,65 \text{ Ом}$, при этом он будет работать с $\varepsilon \leq 10\%$.

Рассмотрим ещё один пример. Пусть $Z_n = 3,55 \text{ Ом}$, что соответствует точкам В и В' на кривых 1 и 2. В этом случае ТТ (400/5) работает с $\varepsilon \leq 10\%$ лишь до кратности K_{10} равной 2,4. Второй ТТ (600/5) работает с той же погрешностью $\varepsilon \leq 10\%$ до кратности $K_{10} = 5$. Отсюда вывод: трансформаторы тока с большими коэффициентами трансформации позволяют применять реле с большим полным сопротивлением, при этом полная погрешность в работе ТТ может быть обеспечена на уровне до 10%.

Классы точности ТТ

Для промышленных установок изготавливаются ТТ следующих классов точности:

0,5; 1; 5Р; 10Р

Каждый класс точности характеризуется определённой погрешностью по току (f_i) и по углу (δ), установленной государственным стандартом.

Для РЗ изготавливаются ТТ классов 10 Р с полной относительной погрешностью $\varepsilon \leq 10\%$ и 5 Р (повышенной точности) с $\varepsilon \leq 5\%$.

1.7 Выбор (проверка) трансформатора тока

Все ТТ выбираются по номинальному напряжению $U_{1 \text{ ном}}$ и номинальному току $I_{1 \text{ ном}}$. Значение $I_{1 \text{ ном}}$ выбранного ТТ должно быть больше максимального рабочего тока нормального эксплуатационного режима работы защищаемого элемента. Так при максимальном рабочем токе в контролируемой цепи защищаемого элемента равном, например, 600 А следует выбрать ТТ с номинальным коэффициентом трансформации $K_I = 1000/5$. Следует иметь в виду, что применение трансформатора тока с большим K_I (2000/5, 3000/5) приведёт к уменьшению кратности первичного тока КЗ и, следовательно, к уменьшению погрешности ε . Однако с другой стороны чрезмерное увеличение K_I приводит к уменьшению вторичного тока, что в свою очередь требует применения более чувствительного токового реле. Известно, что более чувствительные токовые реле (с меньшим током срабатывания) имеют большее полное сопротивление, следовательно, применение реле с большим сопротивлением приведёт к возрастанию погрешности ε . Таким образом, при выборе ТТ по значению $I_{1 \text{ ном}}$ необходимо исходить из максимальных величин реального первичного тока нормального режима работы защищаемого элемента, а также учитывать характер и значение сопротивления нагрузки ТТ и схему соединения обмоток ТТ и реле.

Выбранные для устройства РЗ трансформаторы тока проверяются на электродинамическую и термическую стойкость. При этом учитываются амплитудное значение ударного тока и время протекания тока короткого замыкания через первичную обмотку ТТ.

Ранее отмечалось, что на определённом этапе расчёта РЗ производится проверка выбранных трансформаторов тока на величину их полной погрешности ε по предельным кривым 10%-ой кратности. При этом исходными данными являются:

- типы выбранных ТТ и их номинальные токи;

Необходимо для определения полного сопротивления вторичной цепи $Z_{\text{н, расч.}}$

- кривые 10%-ой кратности выбранных ТТ;

- характеристика реле, подключаемых ко вторичной обмотке ТТ, и их полное сопротивление;

- длина, сечение и материал соединительных проводов

- и число контактных переходов во вторичной цепи;

- схема соединения обмоток ТТ и реле в рассчитываемой РЗ;

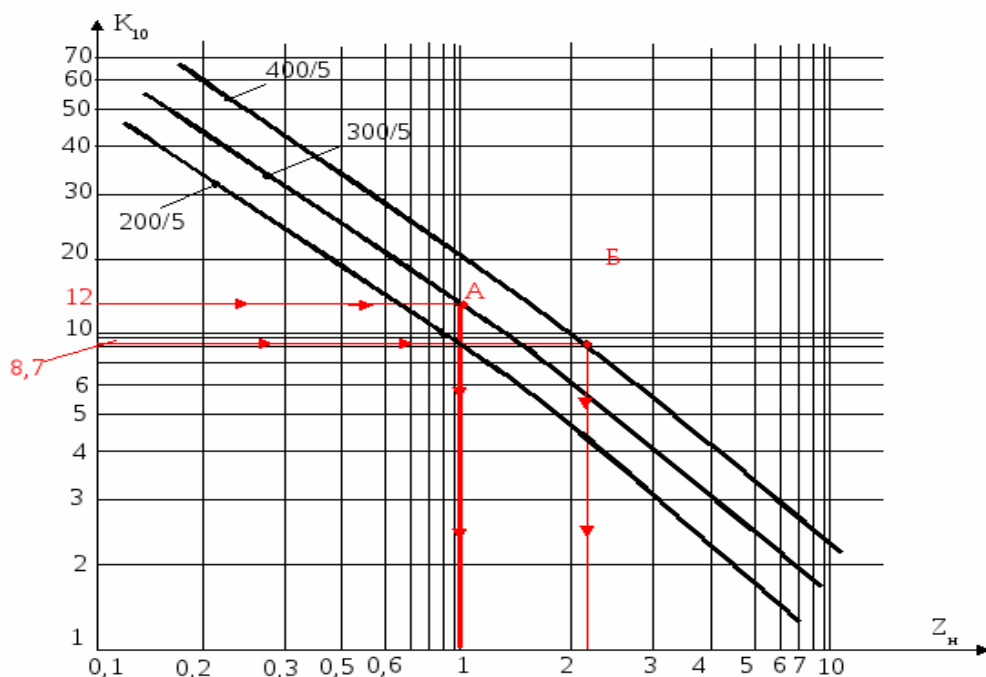


Рисунок 1.17 Кривые 10%-ой кратности первичного тока трансформатора тока

- особенности защищаемого элемента, а также расчетный максимальный первичный ток короткого замыкания.

Порядок использования кривых 10%-ой кратности рассмотрим на конкретном примере. Пусть имеем ТТ с номинальными токами $I_{1\text{ ном}}=300\text{ А}$, $I_{2\text{ ном}}= 5\text{ А}$. Пусть расчётный максимальный ток короткого замыкания оказался равным 3500 А, т.е. $I_{1\text{ расч. max}}= 3500\text{ А}$, а расчетная нагрузка

$$Z_{\text{н, расч.}} = 2\text{ Ом.}$$

На рисунке 1.17 приведены кривые предельной 10%-ой кратности выбранного ТТ.

Порядок проверки

1. Определим кратность первичного тока короткого замыкания

$$K = \frac{I_{1\text{ расч. max}}}{I_{1\text{ ном}}} = \frac{3500}{300} \approx 12$$

2. Войдём в таблицу (рисунок 1.17) с полученным значением кратности $K = 12$ и определим допустимую нагрузку $Z_{\text{н, доп}} = 1,0\text{ Ом}$. При имеющейся расчётной нагрузке $Z_{\text{н, расч.}}$ равной 2 Ом, полная погрешность трансформатора тока будет более 10%, что может привести к нечёткой работе РЗ.

3. Для уменьшения полной относительной погрешности необходимо: либо уменьшить сопротивление подключённой нагрузки Z_n до величины $Z_n \leq 1,0$ Ом, либо выбрать другой ТТ, например, с номинальным коэффициентом трансформации 400/5. Тогда

$$K_{10} = \frac{3500}{400} = 8,7.$$

Войдём в таблицу с кратностью $K_{10} = 8,7$ и по кривой для ТТ 400/5 определим $Z_{n, \text{доп}} (\approx 2,2 \text{ Ом})$.

Таким образом, зная кратность первичного тока короткого замыкания, можно по кривым 10%-ой кратности для данного типа ТТ определить допустимую нагрузку $Z_{n, \text{доп}}$, при которой погрешность в работе ТТ не будет превышать 10% от первичного приведённого тока.

Можно решать обратную задачу: зная заданную величину Z_n , по кривым 10%-ой кратности можно определить допустимую кратность первичного тока $K_{10, \text{доп}}$ и подобрать ТТ с необходимыми номинальными параметрами.

Пусть $Z_n = 2 \text{ Ом}$. Тогда допустимые кратности первичного тока составят: а) для ТТ 200/5 $K_{10, \text{доп}} \approx 4,7$; б) для ТТ 300/5 $K_{10, \text{доп}} \approx 6$; в) для ТТ 400/5 $K_{10, \text{доп}} \approx 10$.

Определим кратности первичного тока КЗ для рассматриваемых трансформаторов тока:

$$1) \text{ ТТ}_{200/5} \quad K = \frac{3500}{200} \approx 17$$

$$2) \text{ ТТ}_{300/5} \quad K = \frac{3500}{300} \approx 11,9$$

$$3) \text{ ТТ}_{400/5} \quad K = \frac{3500}{400} \approx 8,7.$$

Приведённый расчёт показывает, что трансформаторы тока с K_I равном 200/5 и 300/5 не обеспечивают необходимой точности трансформации.

Трансформатор тока с $I_{1 \text{ ном}} = 400 \text{ А}$ будет работать с погрешностью $\varepsilon < 10\%$ при $Z_n = 2 \text{ Ом}$.

1.8 Схемы соединения обмоток тт и реле

Для подключения реле к трансформаторам тока обмотки последних соединяются в различные схемы. Наиболее распространённые схемы соединения обмоток ТТ и реле приведены на рисунке 1.18.

На рисунке 1.18,а приведена основная схема соединения в полную звезду, которая применяется для включения защиты от всех видов многофазных и однофазных КЗ.

На рисунке 1.18,б приведена схема соединения обмоток ТТ и реле в неполную звезду с реле в обратном проводе. Схема используется, главным образом, для включения защиты от междуфазных КЗ в сетях с изолированной нейтралью.

На рисунке 1.18,в приведена схема соединения трансформаторов тока в треугольник, а реле – в звезду. Эта схема находит широкое применение в дифференциальных защитах силовых трансформаторов.

На рисунке 1.18,г приведена схема соединения обмоток ТТ и реле на разность токов двух фаз; используется как и схема 1.18,б для включения защит от междуфазных КЗ.

На рисунке 1.18,д приведена схема соединения обмоток ТТ и реле на сумму токов трёх фаз, которая является фильтром токов нулевой последовательности (НП). Схема используется для включения защит от однофазных КЗ.

На рисунке 1.18,е приведена схема последовательного соединения двух одинаковых ТТ, установленных на одной фазе. При таком соединении двух ТТ нагрузка, подключённая к ним Z_n , распределяется между обоими ТТ поровну, т.е. нагрузка, приходящаяся на каждый трансформатор, уменьшается в два раза. Происходит это потому, что ток в цепи остаётся

неизменным и равным $I_2 = \frac{I_1}{K_1}$, а напряжение, приходящееся на каждый трансформатор, составляет $\frac{I_2 \cdot Z_n}{2}$. Тогда сопротивление нагрузки, приходящееся на каждую вторичную обмотку трансформаторов тока, составит

$$Z_{n, \text{расч}} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{I_2 \cdot Z_n}{2} \cdot \frac{1}{I_2} = \frac{Z_n}{2},$$

здесь $Z_{n, \text{расч}}$ - сопротивление нагрузки, приходящееся на один ТТ.

Данная схема может применяться в тех случаях, когда ТТ нагружен недопустимо большим сопротивлением, приводящим к погрешностям в работе ТТ свыше 10% и когда исчерпаны все возможности уменьшить Z_n .

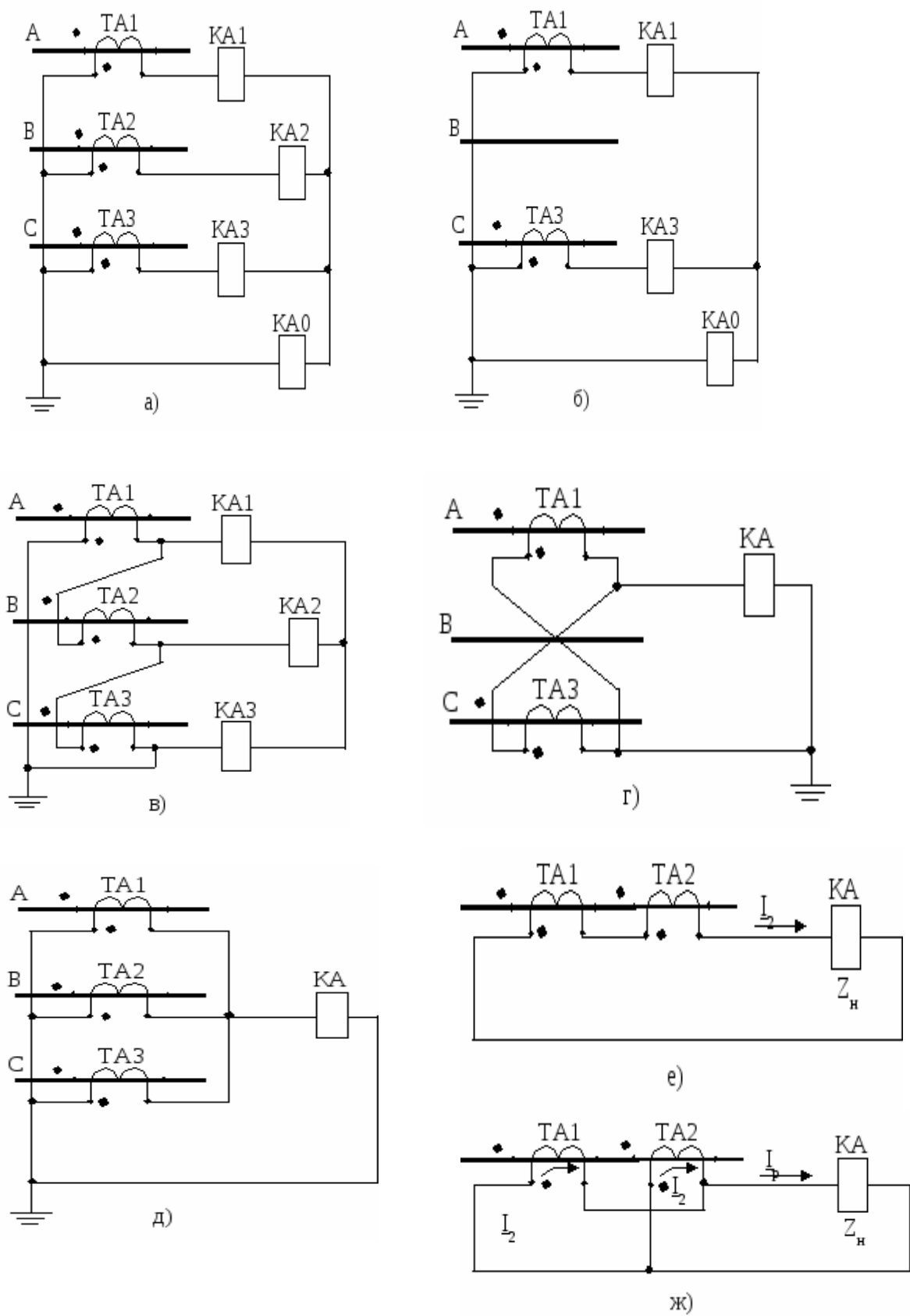


Рисунок 1.18 Схемы соединения обмоток ТТ и реле

На рисунке 1.18,ж приведена схема параллельного соединения двух одинаковых трансформаторов тока, установленных на одной фазе. Общий коэффициент трансформации этой схемы в два раза меньше коэффициента трансформации одного ТТ. Схема может использоваться в тех случаях, когда необходимо получить нестандартный коэффициент трансформации. Разновидностью данной схемы является схема соединения вторичных обмоток трансформаторов тока в дифференциальной защите силового трансформатора с расщеплённой вторичной обмоткой (рисунок 1.19).

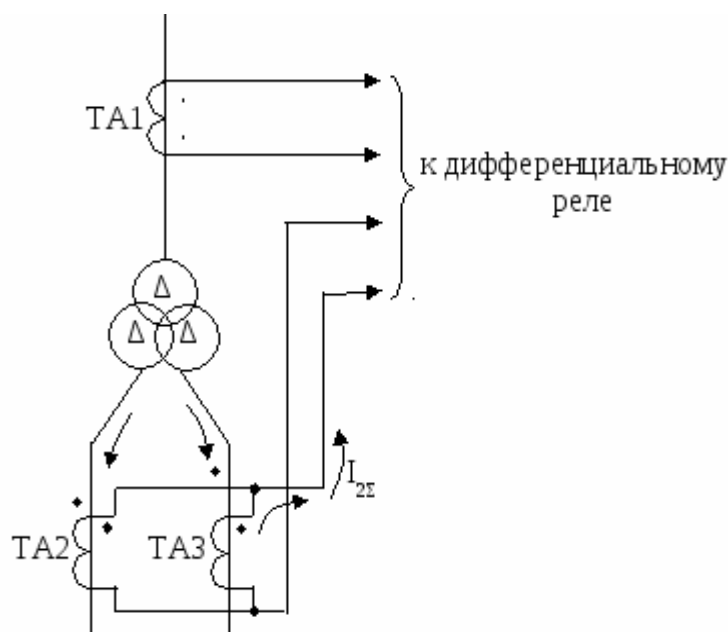


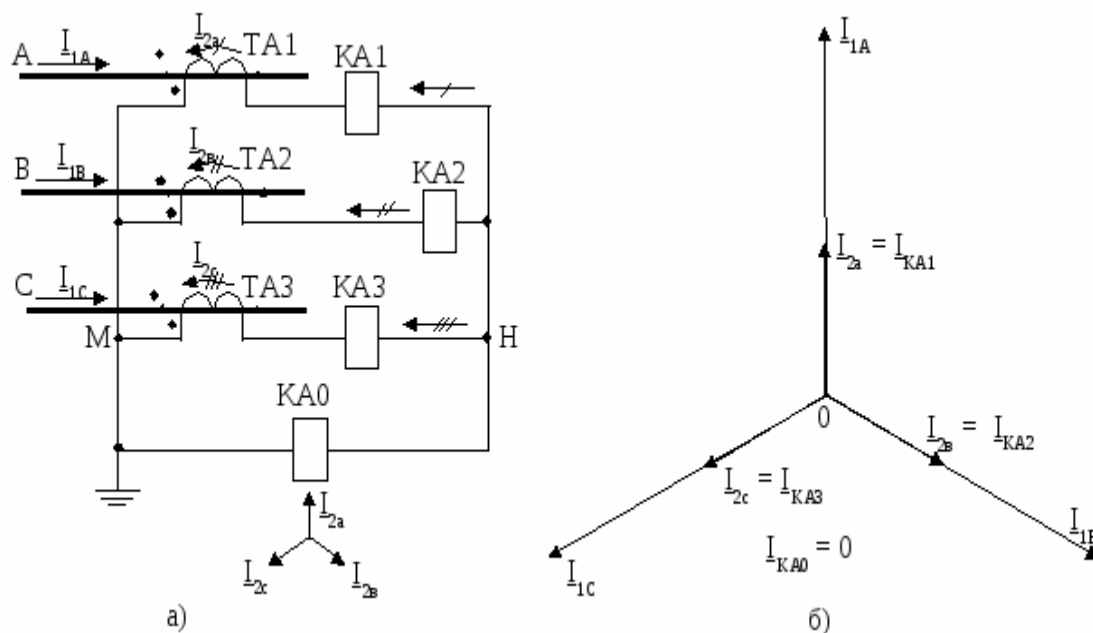
Рисунок 1.19 Схема включения трансформаторов тока в дифференциальной защите силового трансформатора с расщеплённой обмоткой

Рассмотрим работу приведённых выше схем в симметричном нагрузочном режиме работы защищаемого объекта и в режиме трёхфазного (симметричного) КЗ.

А. Схема соединения обмоток ТТ и реле в полную звезду с реле в нулевом проводе

Указанная схема соединения приведена на рисунке 1.20,а. Примем условно положительные направления первичных токов I_{1A}, I_{1B}, I_{1C} как указано на рисунке 1.20. Тогда при принятом включении обмоток ТТ (начала вторичных обмоток ТТ собраны в одну «нулевую» точку) вторичные токи I_{2a}, I_{2b}, I_{2c} протекают «навстречу» первичным.

Рисунок 1.20. Токовая характеристика



схеме соединения ТТ и реле в полную звезду

В симметричном режиме, когда первичные токи равны между собой по модулю и сдвинуты по фазе на 120° , вторичные токи также равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на 120° . Кроме того в симметричном режиме вторичные токи трансформаторов тока не выходят за пределы схемы ограниченные точками М и Н, т.е. вторичные токи I_{2a}, I_{2b}, I_{2c} перераспределяются между реле КА1, КА2 и КА3, не заходя в обмотку реле КА0. При этом ток I_{KA} , проходящий по обмотке реле КА равен вторичному току ТТ, т.е.

$$I_{KA1} = I_{2a}; I_{KA2} = I_{2b}; I_{KA3} = I_{2c}.$$

Можно рассуждать и несколько иначе. Вторичный ток фазы А I_{2a} проходит по контуру: начало вторичной обмотки ТА1, реле КА0, реле КА1, конец вторичной обмотки ТА1. Аналогично проходят вторичные токи фаз В и С, - через свои токовые реле. При этом из схемы видно, что токи, проходящие по обмоткам реле КА1, КА2, и КА3, равны «своим» фазным вторичным токам. По обмотке реле КА0 проходит ток, равный геометрической сумме фазных токов. Как известно, для случая симметричной трёхвекторной системы (I_{2a}, I_{2b}, I_{2c}) геометрическая сумма трёх векторов равна нулю. Следовательно, ток в реле КА0 отсутствует.

$$I_{KA0} = I_{2a} + I_{2b} + I_{2c} = 0.$$

При расчёте токов срабатывания измерительных органов (токовых и других реле) устройств РЗ необходимо знать количественное соотношение между вторичным током $I_{2ф}$, проходящим по вторичной обмотке ТТ, и током, проходящим по обмотке реле I_{KA} . Это соотношение оценивается

коэффициентом схемы K_{cx} , который показывает, во сколько раз ток в обмотке реле больше вторичного тока ТТ, т.е.

$$K_{cx} = \frac{I_{KA1}}{I_{2a}} \text{ или } K_{cx} = \frac{I_{KA2}}{I_{2b}} \text{ и т.д.}$$

В рассматриваемой схеме соединения (Y/Y) коэффициент схемы равен единице

$$K_{cx} = \frac{I_{KA}}{I_{2\phi}} = 1.$$

Ниже мы увидим, что в иных схемах соединения трансформаторов тока и реле коэффициент схемы может отличаться от единицы.

Б. Схема соединения обмоток ТТ и реле в неполную звезду с реле в обратном проводе

В схеме неполной звезды с реле в обратном проводе (рисунок 1.21) по обмоткам реле КА1 и КА3, включённым в фазы а и с, проходят вторичные токи фаз I_{2a} и I_{2c}

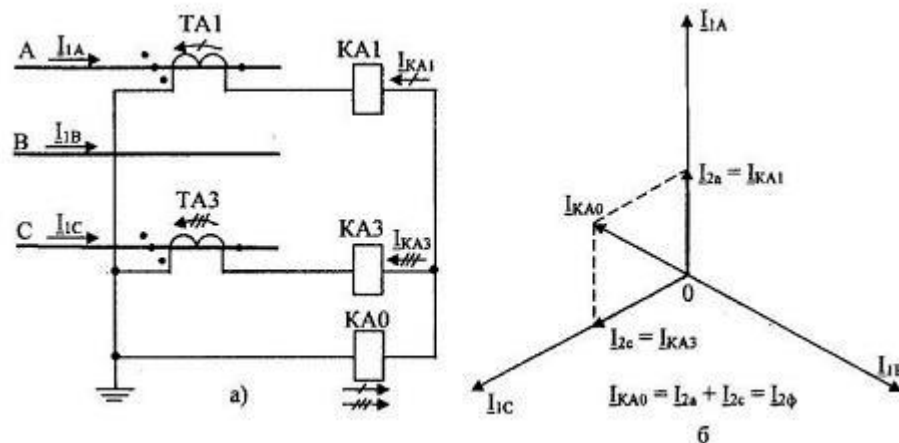


Рисунок 1.21 Токпрохождение в схеме соединения ТТ и реле в неполную звезду

По реле КА0 проходит ток I_{KA0} , равный геометрической сумме фазных токов $I_{KA0} = I_{2a} + I_{2c}$, и равный по модулю фазному току.

$$K_{cx} = \frac{I_{KA}}{I_{2\phi}} = 1.$$

В. Схема соединения обмоток ТТ в треугольник и реле - в звезду.

Схема соединения обмоток трансформаторов тока в треугольник, а обмоток реле в звезду (рисунок 1.22) применяется в дифференциальных защитах силовых трансформаторов с соединением обмоток Δ/Y или Y/Δ .

Рисунок 1.22 Токопрохождение в схеме соединения обмоток ТТ и реле Δ/Y

В рассматриваемой схеме через обмотки каждого реле проходят вторичные токи двух ТТ. Результирующий ток в каждом реле равен геометрической разности фазных токов

$$\underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{2a} - \underline{I}_{2b}; \underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{2b} - \underline{I}_{2c}; \underline{I}_{KA3} = \underline{I}_{2c} - \underline{I}_{2a}.$$

Из векторной диаграммы следует, что ток, проходящий по обмотке реле опережает на угол $= 30^\circ$ «свой» первичный ток. Из векторной диаграммы следует также, что ток в обмотке реле в $\sqrt{3}$ раз больше вторичного фазного

$$I_{KA1} = \sqrt{3} \cdot I_{2a}; I_{KA2} = \sqrt{3} \cdot I_{2b}; I_{KA3} = \sqrt{3} \cdot I_{2c}.$$

Следовательно, коэффициент схемы

$$K_{cx} = \frac{I_p}{I_\phi} = \frac{I_{KA}}{I_{2\phi}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{2\phi}}{I_{2\phi}} = \sqrt{3}.$$

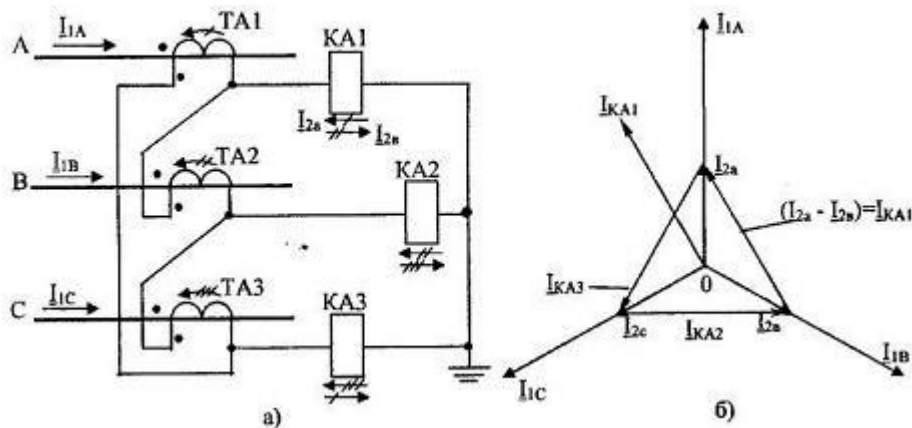


Рисунок 1.22 Токопрохождение в схеме соединения обмоток ТТ и реле Δ/Y

Г. Схема соединения обмоток ТТ и реле на разность токов двух фаз

$$I_p = \sqrt{3} \cdot I_{2c} \cdot e^{j30^\circ} = \sqrt{3} \cdot I_{2a} \cdot e^{j150^\circ}$$

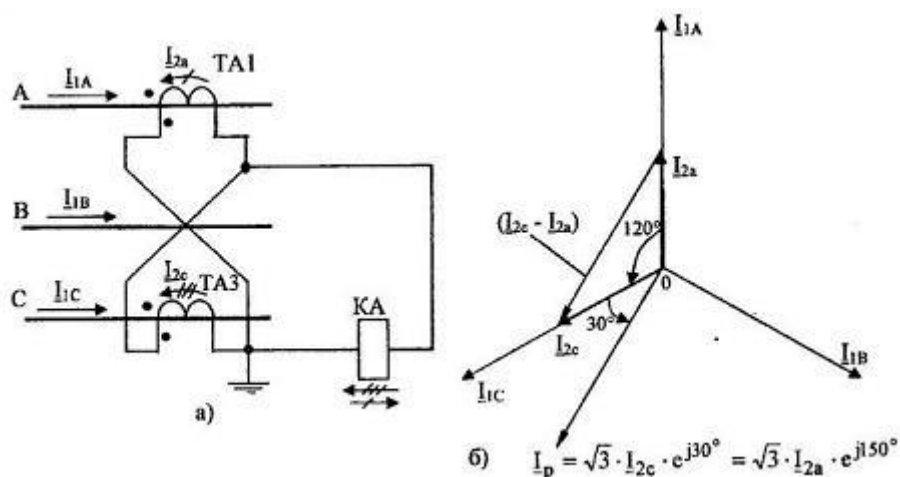


Рисунок 1.23 Схема соединения обмоток ТТ и реле на разность вторичных токов двух фаз

По обмотке реле проходит ток I_p , равный геометрической разности фазных вторичных токов

$$I_p = I_{2c} - I_{2a}$$

В нормальном режиме работы защищаемого элемента, а также при трёхфазном симметричном КЗ коэффициент схемы

$$K_{cx} = \frac{I_p}{I_{2ф}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\phi}}{I_{\phi}} = \sqrt{3}.$$

В случае однофазного КЗ, например, фазы А по обмотке реле проходит ток I_p равный вторичному току короткого замыкания, т.е.

$I_p = I_{2ак}$; при этом ток I_{2c} пренебрегают, т.к. он много меньше вторичного тока повреждённой фазы, т.е. $I_{2c} \ll I_{2ак}$. В этом случае коэффициент схемы

$$K_{cx} = \frac{I_p}{I_{2ак}} = 1.$$

В случае двухфазного короткого замыкания (рисунок 1.24) по обмотке реле проходит ток I_p в два раза больше фазного.

При двухфазном КЗ ($K^{(2)}$) первичные токи короткого замыкания в фазах А и С противофазные (рисунок 1.24,б). Вторичные токи $I_{2ак}$ и $I_{2ск}$ также сдвинуты по фазе на 180° . При этом ток в обмотке реле оказывается в два раза больше

фазного.

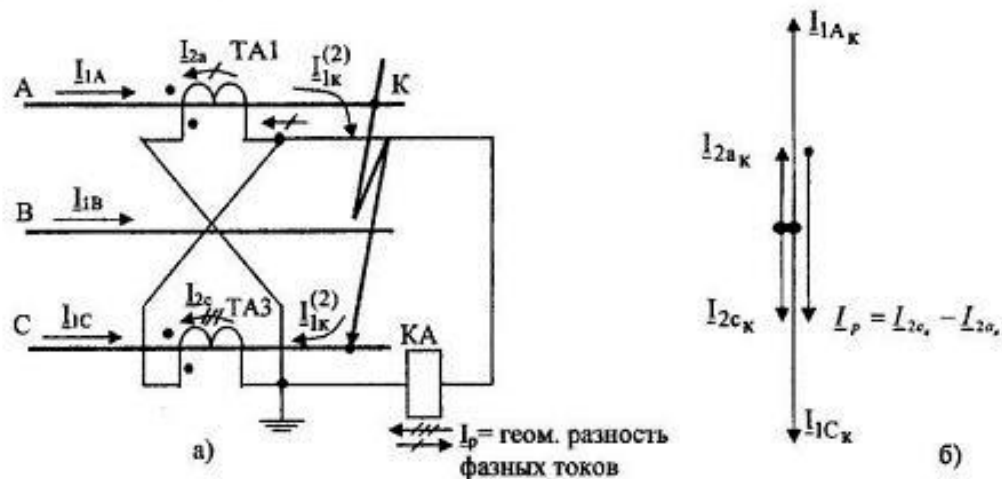


Рис. 1.24. Токопрохождение в схеме соединения обмоток ТТ и реле на разность токов двух фаз при К⁽²⁾

Анализируя токопрохождение в схеме включения на разность вторичных токов двух фаз можно рассуждать несколько иначе.

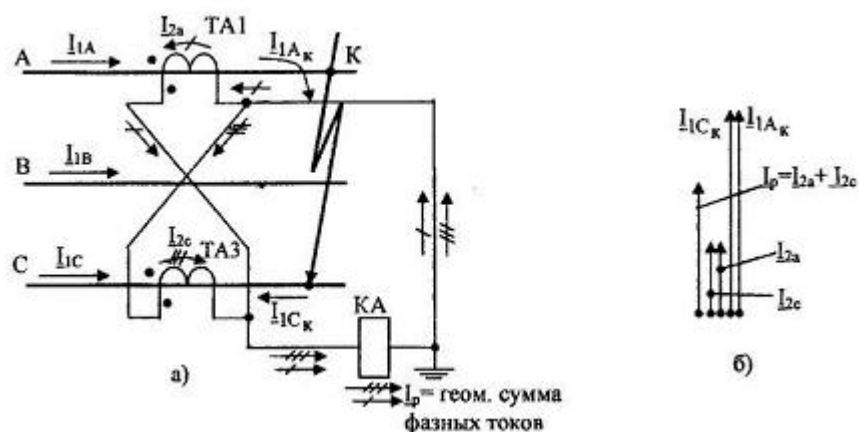


Рисунок 1.25

Следует отметить, что на рисунке 1.25 реальный ток КЗ I_{1A_K} совпадает по направлению с условно положительным I_{1A} . В фазе С реальный первичный ток I_{1C_K} противофазен условно положительному I_{1C} . Учитывая последнее, построим векторную диаграмму первичных и вторичных токов.

При указанной полярности включения ТА1 и ТА2 определим направление фазных вторичных токов I_{2a} и I_{2c} , ориентируясь на реальные первичные токи.

Первичный ток I_{1A_K} входит в зажим Л1, следовательно, вторичный ток I_{2a} выходит из зажима и1, как показано на рисунке 1.25. Первичный ток I_{1C_K} входит в зажим Л2, следовательно, вторичный ток I_{2c} выходит из зажима и2. В результате по обмотке реле КА проходят два синфазных и

одинаковых по величине тока I_{2a} и I_{2c} . Результирующий ток в обмотке реле равен геометрической сумме синфазных токов.

В случае двухфазного КЗ коэффициент схемы

$$K_{cx}^{(2)} = \frac{I_p}{I_{2ф}} = \frac{2I_{\phi}}{I_{\phi}} = 2$$

В качестве вывода следует отметить, что в схеме включения обмоток ТТ и реле на разность вторичных токов двух фаз коэффициент схемы зависит от вида КЗ:

- однофазное КЗ фазы А или фазы С $K_{cx} = 1$
- двухфазное КЗ фаз А, В или В, С $K_{cx} = 1$
- трёхфазное КЗ $K_{cx} = \sqrt{3}$
- двухфазное КЗ фаз А и С $K_{cx} = 2$.

Рассмотрим токопрохождение в схеме соединения ТТ и реле на разность токов двух фаз, если изменена полярность включения вторичной обмотки одного из двух ТТ (режим симметричный).

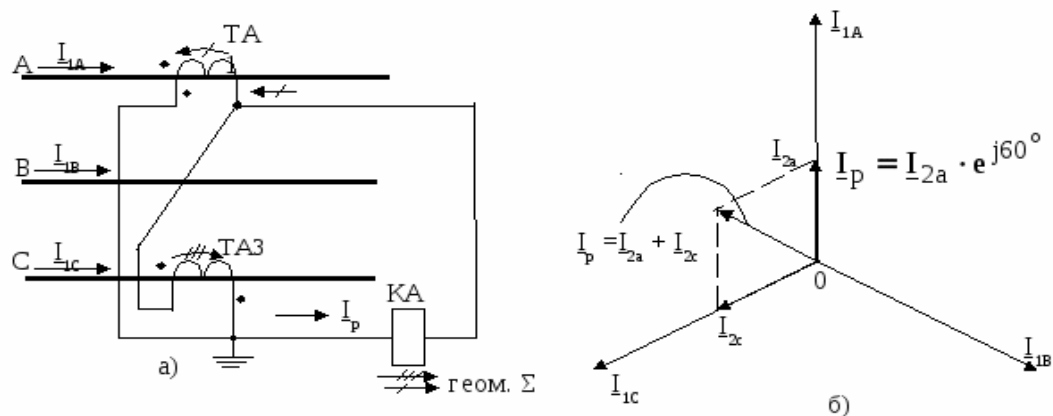


Рисунок 1.26 Токопрохождение в схеме соединения ТТ и реле на разность вторичных токов двух фаз, когда вторичная обмотка одного ТТ «вывернута»

Д. Схема соединения обмоток ТТ и реле на сумму трёх вторичных фазных токов (ФТНП)

Схема соединения обмоток ТТ и реле на сумму вторичных фазных токов приведена на рисунке 1.27. Данная схема представляет собой фильтр токов нулевой последовательности (НП) и используется в токовых фильтровых защитах, реагирующих на токи нулевой последовательности, в сетях с большими токами замыкания на землю. В состав схемы входят три одинаковых ТТ и одно токовое реле.

Известно, что любую систему трёх векторов (векторов полных токов $\underline{I}_{2a}, \underline{I}_{2b}, \underline{I}_{2c}$) можно представить в виде суммы симметричных систем ПП, ОП и НП. Токи прямой и обратной последовательности представляют собой симметричные трёхвекторные системы, они не выходят из схемы соединения обмоток ТТ за точки М и Н. Токи нулевой последовательности представляют собой три коллинеарных вектора $\underline{I}_{0a}, \underline{I}_{0b}, \underline{I}_{0c}$. Все три тока НП замыкаются через обмотку реле.

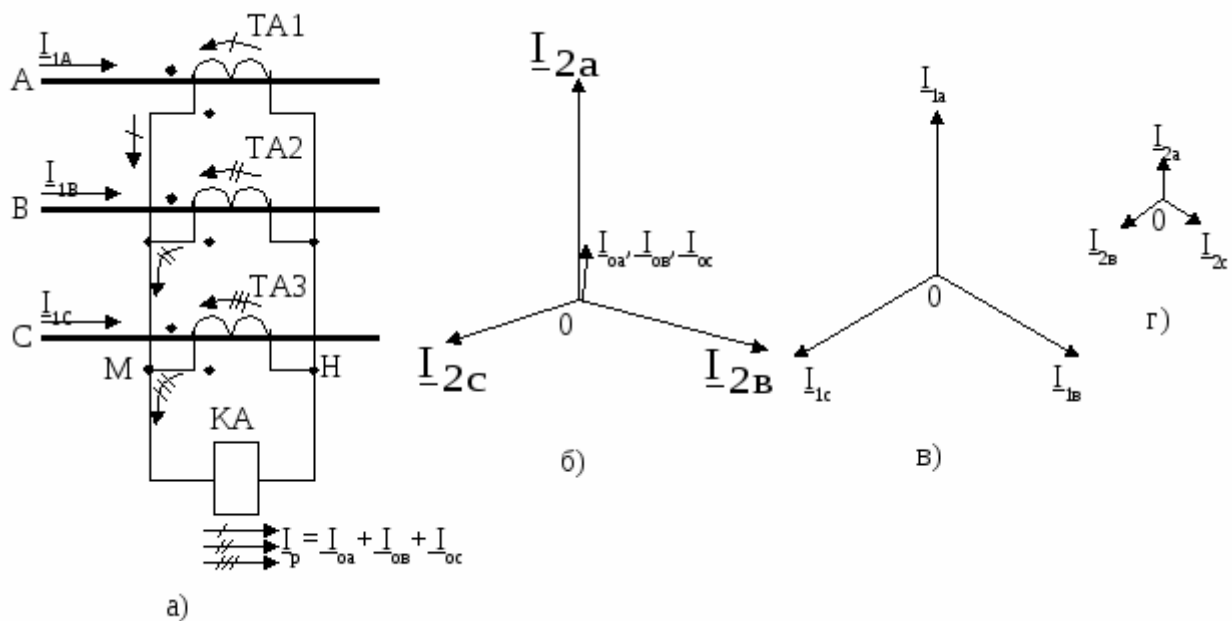


Рисунок 1.27 Схема фильтра токов нулевой последовательности

Результирующий ток в реле

$$\underline{I}_p = \underline{I}_{0a} + \underline{I}_{0b} + \underline{I}_{0c}.$$

Поскольку модули фазных токов НП равны между собой, то можно записать

$$\underline{I}_p = 3\underline{I}_{0ф}.$$

Сумма токов прямой последовательности, обратной последовательности в реле равна нулю.

7. Перечень контрольных вопросов

1. Каково назначение первичных измерительных преобразователей тока (напряжения)?
2. Устройство измерительного ТТ, включение его в цепь защищаемого элемента, маркировка выводов.
3. Общий принцип действия измерительного ТТ.
4. Схема замещения и векторная диаграмма ТТ.
5. Какова причина возникновения токовой погрешности измерительного трансформатора тока?
6. Чем определяется величина тока намагничивания измерительного ТТ?
7. Какова зависимость вторичного тока и тока намагничивания ТТ от кратности первичного тока и сопротивления нагрузки?
8. Дать пояснение токовой абсолютной и относительной погрешности, угловой и полной абсолютной и относительной погрешности в работе измерительного ТТ.
9. Перечислить и пояснить основные параметры измерительных ТТ.
10. Каковы требования, предъявляемые к ТТ, используемым в устройствах РЗ и А? Назвать классы точности измерительных ТТ.
11. Каков порядок выбора и проверки ТТ по кривым зависимости 10%-ой кратности первичного тока от сопротивления нагрузки Z_n (по кривым предельной кратности K_{10})?
12. Перечислить схемы соединения обмоток ТТ и реле. (Привести схемы соединения). Пояснить работу фильтра токов нулевой последовательности.
13. Пояснить работу схем соединения обмоток ТТ и реле Y/Y и Δ/Y (токопрохождение в схемах, векторные диаграммы, коэффициенты схем) в симметричном режиме.
14. Пояснить работу схемы соединения ТТ и реле в неполную звезду и схемы соединения на разность вторичных токов двух фаз (токопрохождение, векторные диаграммы, коэффициенты схем) в симметричном режиме.
15. В каких случаях используется последовательное и параллельное соединение вторичных обмоток двух ТТ, включённых в одну фазу?

Литература

1. Федосеев А.М. «Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей» - М. Энергоатомиздат – 1984г.
2. Андреев В.А. «Релейная защита и автоматика систем электроснабжения» - М. Высшая школа, 1991г.
3. Беркович М.А. и др. «Основы техники релейной защиты» - М. Энергоатомиздат, - 1984г.
4. Чернобровов Н.В., Семёнов В.А. «Релейная защита энергетических систем» -М. Энергоатомиздат, - 1998г.
5. Афанасьев В.В. «Трансформатора тока» -Л. Энергия, - 1980г.
6. Казанский В.Е. «Трансформаторы тока в системах релейной защиты», - М. Энергия -1978г.