

Релейная защита и автоматика систем электроснабжения

Лекция №__

Трансформаторы тока.

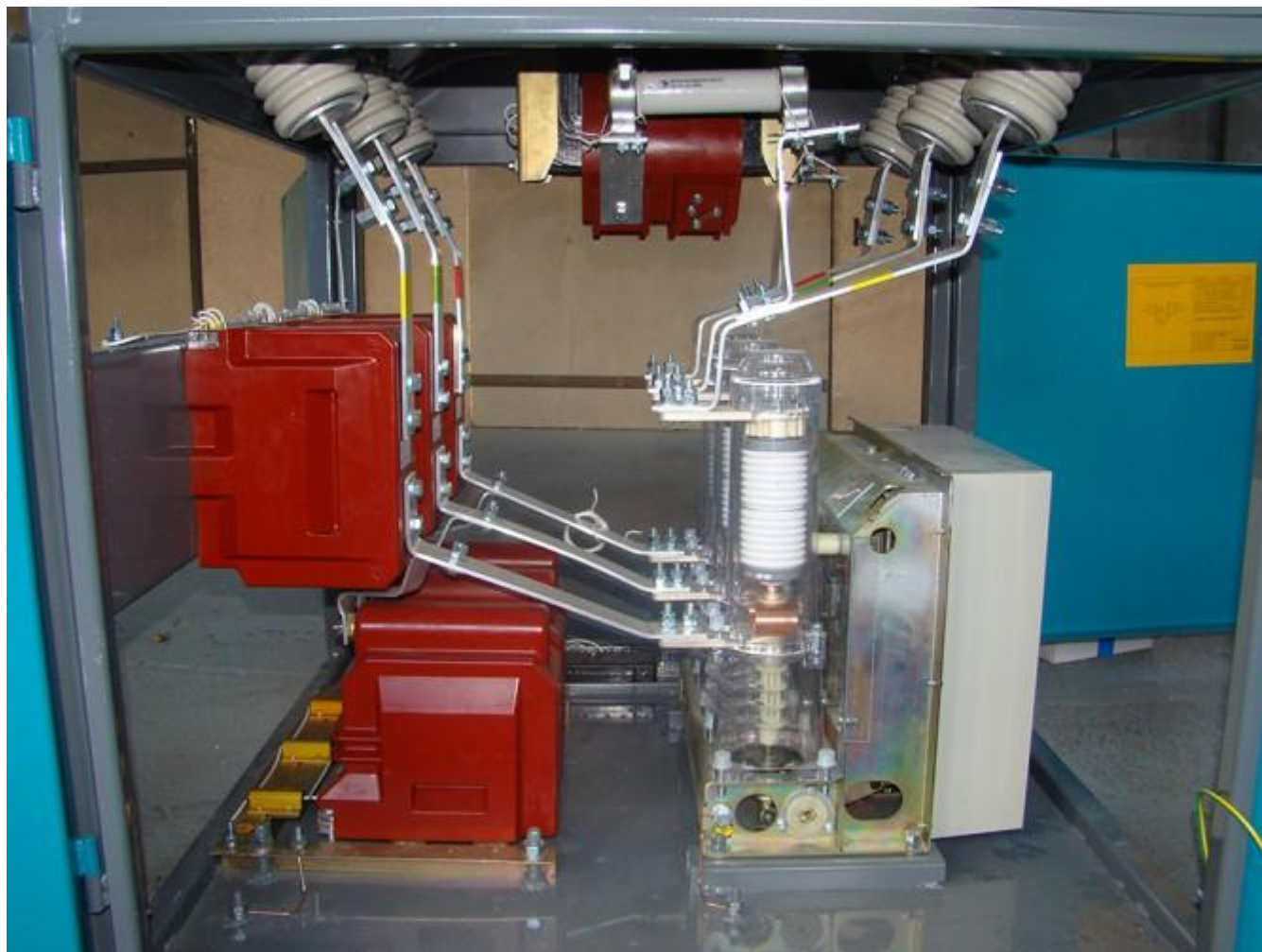
Составил: Кузнецов Д. Б.



Элегазовые трансформаторы тока ТГОФ-110



Трансформаторы тока 35 кВ

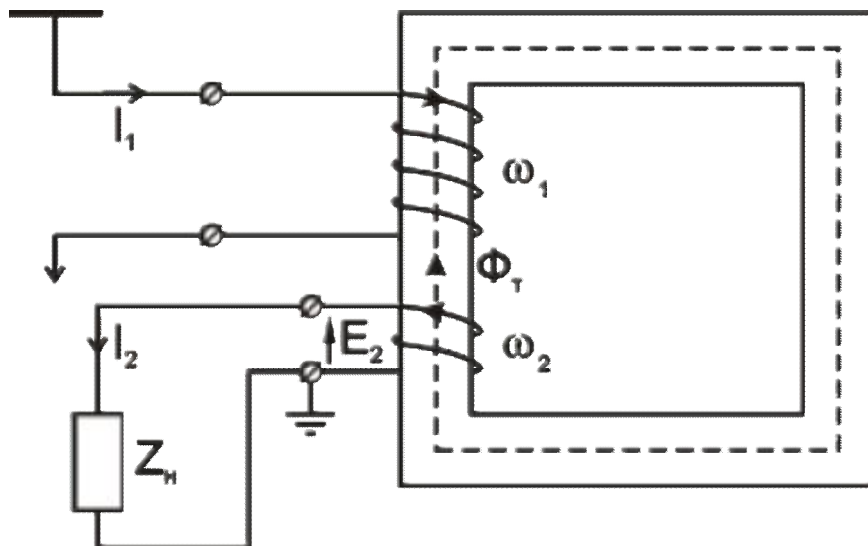


Трансформаторы тока 10 кВ

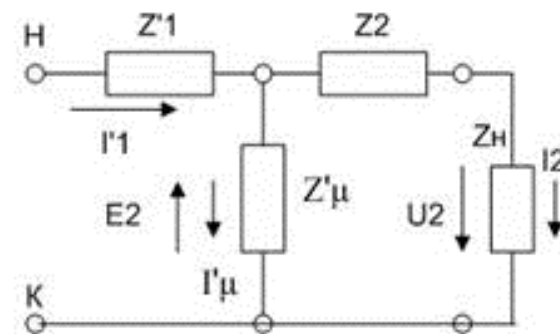
Трансформатор тока - элемент релейной защиты, электромагнитный измерительный

преобразователь тока который питает цепи защиты и автоматики током и выполняет роль датчика, который передает информацию к измерительным органам. Этот аппарат преобразовывает ток первичной цепи в стандартные токи 1 или 5 ампер. Нормальный режим работы трансформатора тока - режим короткого замыкания.

Принцип действия трансформатора тока не отличается от принципа действия обычного силового трансформатора. Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно в измеряемую цепь и независимо от того как включена вторичная обмотка весь ток нагрузки или ток короткого замыкания проходит через эту цепь. Вторичная обмотка замыкается на различные, последовательно включенные, реле и измерительные приборы.



Принцип действия трансформатора тока



Эквивалентная схема

Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно в силовую цепь. Вторичная обмотка замыкается на сопротивление нагрузки Z_H – последовательно включенные реле и приборы.

Ток I_1 , протекая по обмотке, создаёт магнитный поток $\Phi_1 = I_1 W_1$, под воздействием этого потока во вторичной обмотке наводится ЭДС E_2 . По обмотке протекает ток I_2 .

Если не учитывать потерь то:

$$I_1 \omega_1 = -I_2 \omega_2 \Rightarrow I_2 = -I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{I_1}{n_v},$$

где $n_v = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ – витковый коэффициент трансформации.

В заводских материалах на трансформаторы тока указывают номинальный коэффициент

трансформации $n_t = \frac{I_{1ном}}{I_{2ном}}$. Если не учитывать потери, то $n_v = n_t$.

В действительности же I_2 отличается от расчетного значения. Часть тока I_1 тратится на создание намагничивающего потока:

$$I_2 = - \frac{(I_1 - I_{\text{нам}})}{n_{\text{в}}} = (-I_1 + I_{\text{нам}}) \frac{\omega_1}{\omega_2},$$

$$\underbrace{I_2 \omega_2}_{\Phi_2} = - \underbrace{I_1 \omega_1}_{-\Phi_1} + \underbrace{I_{\text{нам}} \omega_1}_{\Phi_{\text{н}}}.$$

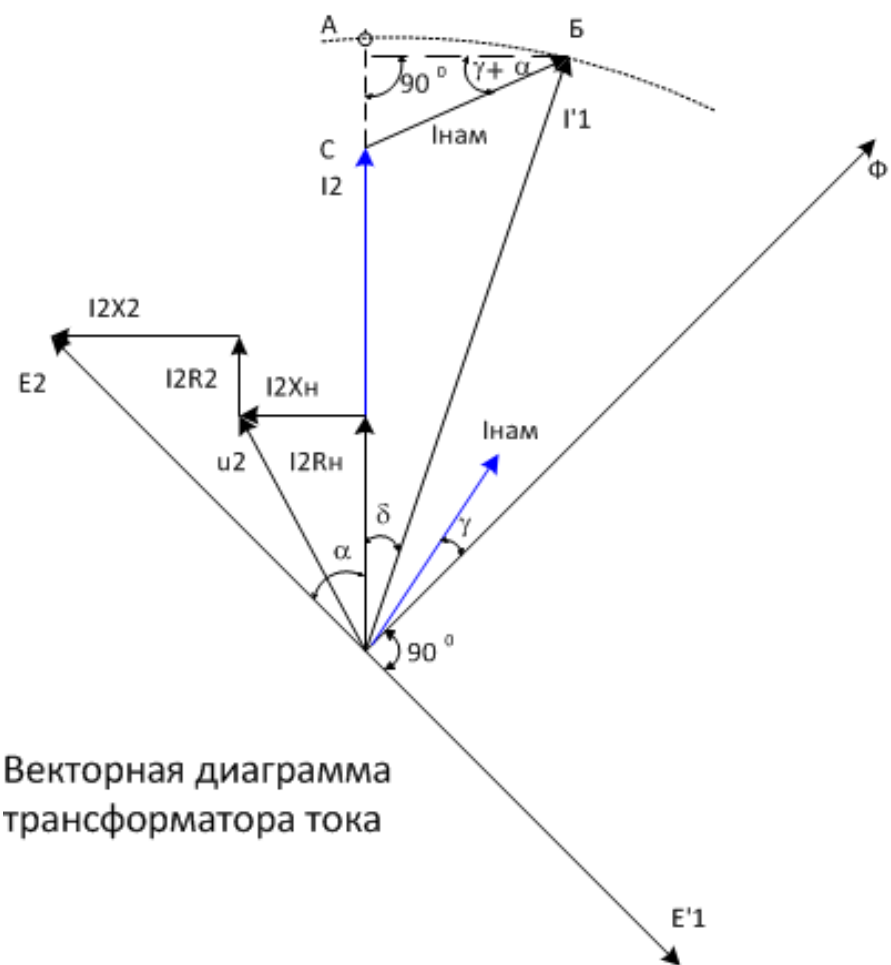
Если разомкнуть вторичную обмотку, магнитный поток в магнитопроводе резко возрастет. Магнитопровод быстро расплавится. Кроме того на вторичной разомкнутой обмотке появиться высокое напряжение, достигающие десятков киловольт. Вторичная обмотка обязательно должна быть заземлена – если произойдет пробой изоляции, то при заземленной вторичной обмотке получится короткое замыкание, защитная аппаратура отключит поврежденный трансформатор, заземление вторичной обмотке делается прежде всего для обеспечения техники безопасности.

Причиной погрешностей в работе трансформаторов тока является *ток намагничивания*. Чрезмерно большие погрешности могут вызвать неправильные действия релейной защиты, поэтому стараются уменьшить ток намагничивания.

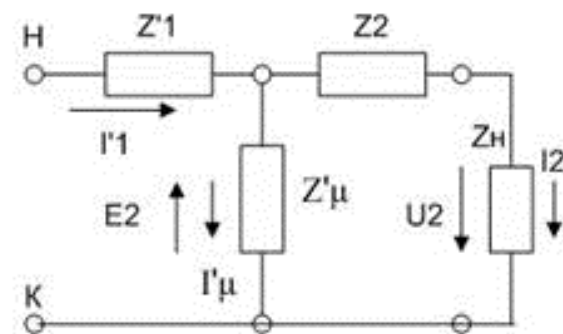
Векторная диаграмма построена на основе схемы замещения трансформатора тока в которой в соответствии со схемой замещения *все величины первичной стороны приведены к виткам вторичной обмотки*. Из векторной диаграммы видно, что вторичный ток отличается от приведённого первичного по

абсолютному значению на *токовую погрешность* $dI = I'_1 - I_2$, а по фазе на *угол дельта*. Это отличие обусловлено наличием тока намагничивания ***I_{нам}*** создающего магнитный поток намагничивания в сердечнике ТТ. Чем больше ток ответвляется в сопротивление ***Z'_m***, тем погрешность трансформатора тока больше.

Величина АС называется погрешностью по току и равна арифметической разнице ***I'₁ - I₂***. Угловой погрешностью является угол дельта и показывает на сколько действительный ток сдвинут по фазе от расчетного тока.



Векторная диаграмма
трансформатора тока



Параметры, влияющие на уменьшение намагничивающего тока

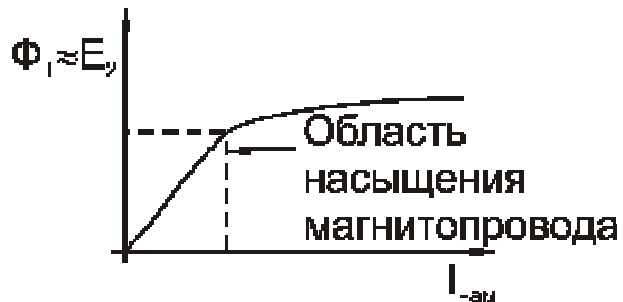
Ток **$I_{\text{нам}}$** состоит из активной и реактивной составляющих.

$I_{\text{а.нам}}$ – обусловлена активными потерями на гистерезис и от вихревых токов в магнитопроводе трансформатора тока.

$I_{\text{р.нам}}$ – создает магнитный поток, который индуцирует во вторичной обмотке ЭДС E_2 .

Для уменьшения **$I_{\text{а.нам}}$** магнитопровод выполняется из шихтованной стали.

При насыщении **$I_{\text{нам}}$** возрастает значительно быстрее, чем поток **Φ_m** , что вызывает резкое увеличение погрешностей. (см. рис. – характеристика намагничивания трансформатора тока.)



Для ограничения погрешностей нужно уменьшить **Φ_m** :

$$\Phi_r \approx E_2 = I_2(Z_2 + Z_n).$$

Этого можно добиться, либо снизив ток I_2 за счет подбора соответствующего коэффициента трансформации (повысить n для снижения кратности максимального первичного тока $K_{\text{макс}} = \frac{I_{\text{макс}}}{I_{\text{ном}}}$), либо уменьшив сопротивление нагрузки вторичной обмотки Z_n .

Требования к точности трансформаторов тока, питающих релейную защиту

Погрешность трансформаторов тока по току (ΔI) не должна превышать 10%, а по углу (δ) – 7°.

Эти требования обеспечиваются, если $I_{\text{ном}} \leq 0,1 I_1$.

Для каждого типа трансформаторов тока имеются определённые значения $K_{\text{макс}}$ и Z_n , при которых погрешность ϵ будет равна 10%. Поэтому исходными величинами для оценки погрешности являются $I_{\text{макс}}$ и Z_n :

$$Z_n = Z_p + Z_n, \quad (2.4)$$

где Z_n – сопротивление проводов,

Z_p – сопротивление реле.

Для упрощения в расчетах сопротивления суммируются арифметически.

Предельные значения $K_{I_{\max}}$ и Z_n из условия 10% погрешности дают заводы, изготавливающие трансформаторы тока.

Класс точности

Класс	Погрешность ¹	
	по току, %	по углу, '
0,5	$\pm 0,5$	± 40
1	± 1	± 80
3	± 3	Не нормируется
P	Не нормируется	

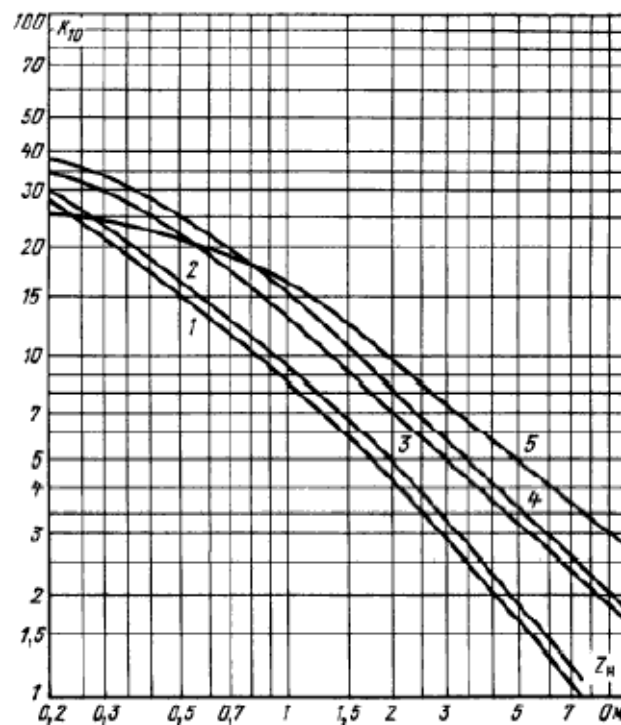
При диапазоне первичных токов $0,1 \leq I_1 \leq 1,2$ от номинального.

Выпускаются трансформаторы тока следующих классов точности: 0,5;1;3;10 (для подключения к ним измерительных приборов) и P (для релейной защиты).

Номинальная нагрузка – максимальная нагрузка, при которой погрешность равна значению, установленному для данного класса – $S_{н.ном}(BA)$ при $I_{2ном}=5A$ или $1A$ и $\cos\varphi=0,8$:

Кривые предельной кратности – $K_{10}=f(Z_{ном})$ – приводятся в заводской документации (Рис.).

Имеются и другие характеристики, например зависимость $I_2=f(I_1)$



Кривые предельной кратности трансформаторов тока ТПЛ-10К: 1-5/5-50/5, 2-100/5-400/5, 3-800/5, 4-1000/5, 5-1500/5.

Выбор трансформаторов тока и допустимой вторичной нагрузки

Исходя из тока нагрузки, его рабочего напряжения и вида защиты, выбирают тип трансформатора тока и его номинальный коэффициент трансформации.

Порядок выбора трансформатора тока следующий:

- а) определяют максимальный рабочий ток защищаемого элемента;
- б) по максимальному рабочему току и номинальному напряжению защищаемого элемента выбирают трансформатор тока с соответствующим первичным номинальным током $I_{1 \text{ ном}}$
- в) определяют расчетный первичный ток $I_{1 \text{ расч}}$, исходя из следующих соображений:

- для токовых отсечек и максимальных токовых защит с независимой выдержкой времени

$$I_{1 \text{ расч}} = 1,1 * I_{сз}$$

- для максимальных токовых защит с ограниченно зависимой выдержкой времени

$$I_{1 \text{ расч}} = 1,1 * I_{кз \text{ вн.мах}}^{(3)}$$

- для токовых направленных защит ,

$$I_{1 \text{ расч}} = 1,1 * I_{кз \text{ вн.мах}}^{(3)}$$

- г) определяют предельную кратность $K(10)$.

$$K_{10} = \frac{I_{1\text{расч}}}{I_{1\text{ном}}}$$

д) по соответствующим кривым предельной кратности для выбранного трансформатора тока находят допустимое значение вторичной нагрузки $Z_{\text{н.доп}}$.

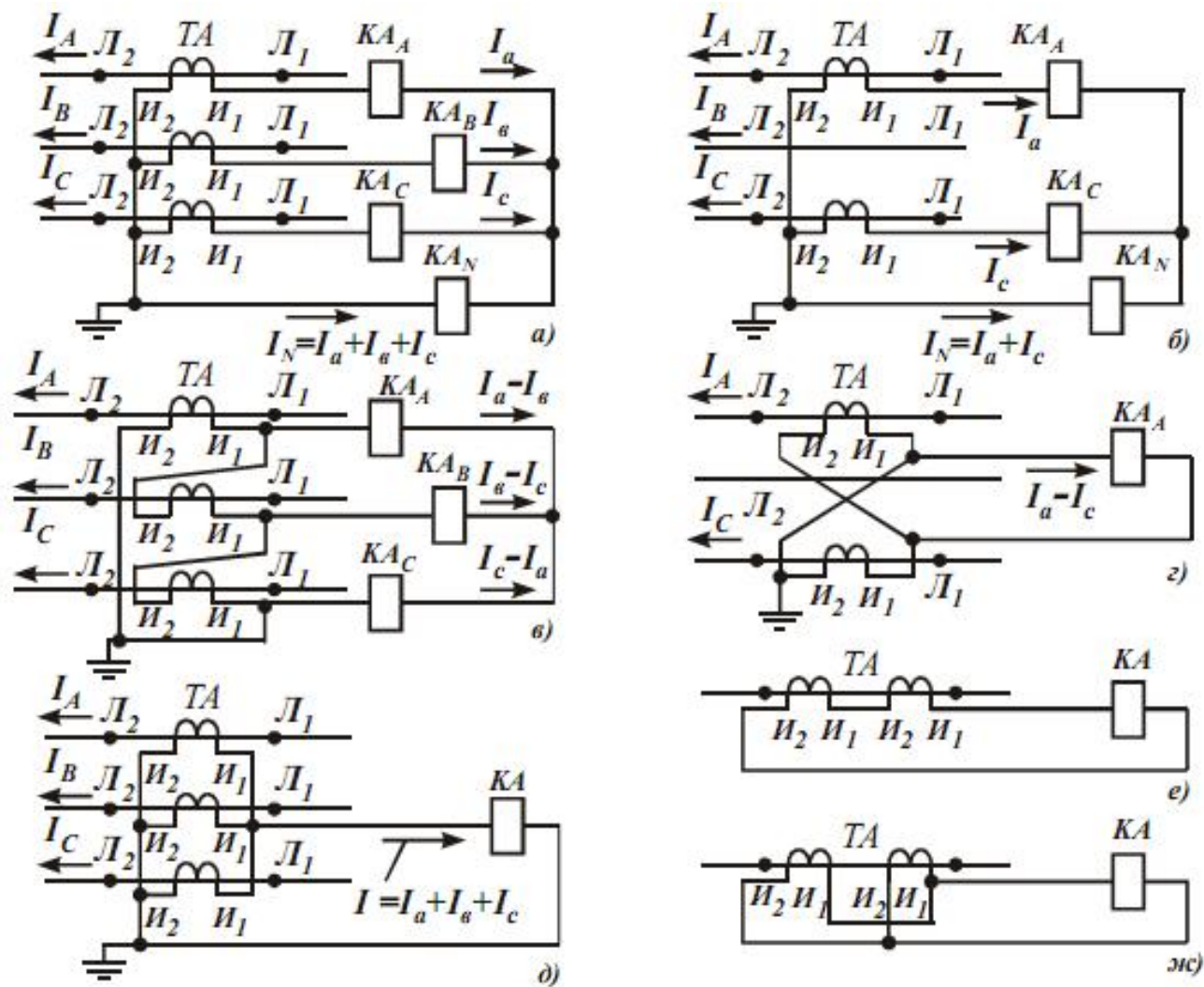
е) определяют действительную расчетную нагрузку $Z_{\text{н.расч.}}$, которая должна равняться или быть меньше допустимой, т.е.

$$Z_{\text{н.расч.}} \leq Z_{\text{н.доп}}$$

Схемы соединения трансформаторов тока.

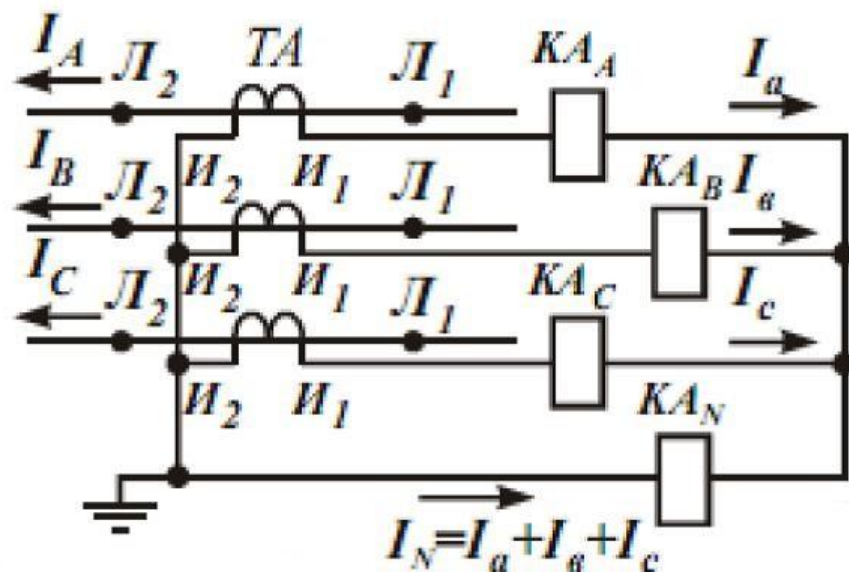
Релейная защита питается от типовых схем которые различаются различными вариантами соединения трансформаторов тока и обмоток реле. Для каждой схемы соединения рассчитывается коэффициент схемы. Этот коэффициент показывает *в сколько раз токи в реле отличаются от токов которые протекают во вторичной обмотке трансформаторов тока*. Такие изменения происходят из-за того что в элементах различных схем вторичные токи могут складываться или вычитаться.

$$k_{\text{сх}} = \frac{I_{\text{р}}}{I_{2.\text{тт}}}$$



Типовые схемы соединения вторичных обмоток трансформаторов тока

Схема соединения трансформаторов тока в полную звезду.

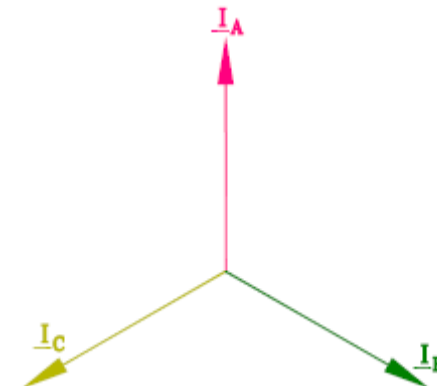


Нормальный режим - в реле проходят токи фаз, а в нулевом проводе их геометрическая сумма (при симметричном режиме она равна нулю).

$$I_a = \frac{I_A}{n_T}; I_b = \frac{I_B}{n_T}; I_c = \frac{I_C}{n_T}$$

$$\underline{I}_{\text{нн}} = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c$$

$$K_{\text{сх}}=1$$



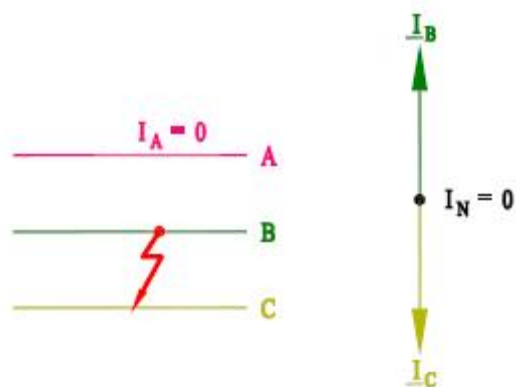
Трёхфазное КЗ - аналогично нормальному режиму.

$$I_a = \frac{I_A}{n_T}; I_b = \frac{I_B}{n_T}; I_c = \frac{I_C}{n_T}$$

$$\underline{I}_{\text{нн}} = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c$$

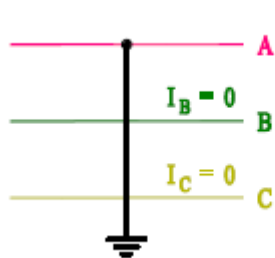
$$k_{\text{сх}}^{(3)} = 1$$

Двухфазное КЗ - ток проходит только в двух повреждённых фазах (соответственно и в реле), а ток в неповреждённой фазе отсутствует. Теоретически ток в нулевом проводе также практически отсутствует при 3-х и 2-х фазных КЗ, но при неидентичности характеристик и погрешностей ТТ в нулевом проводе в нормальном режиме протекает ток небаланса, который возрастает при К.З.



$$k_{cx}^{(2)} = 1$$

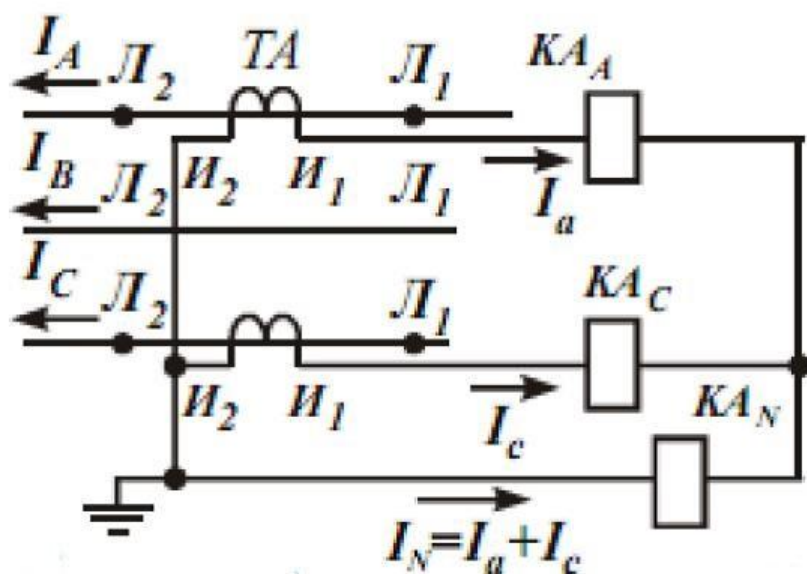
Однофазное КЗ - первичный ток к.з. проходит только по одной поврежденной фазе. Соответствующий ему вторичный ток проходит также только через одно реле и замыкается по нулевому проводу.



$$k_{cx}^{(1)} = 1$$

Особенности схемы: Защита реагирует на все виды к.з, и имеет одинаковую чувствительность (коэффициент чувствительности при разных повреждениях одинаковый). При всех замыканиях, кроме замыкания на землю, в нулевом проводе протекает геометрическая сумма токов в реле, в следствии чего, ток в нулевом проводе приблизительно равен нулю (в нем протекают токи неаланса). Реле в нулевом проводе реагирует только на токи к.з. на землю.

Схема соединения трансформаторов тока и обмоток реле в неполную звезду.



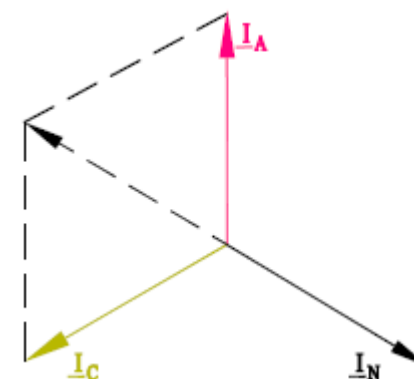
ТТ устанавливаются в две фазы и соединяются аналогично схеме звезды.

Нормальный режим - в реле проходят токи фаз, а в нулевом проводе их геометрическая сумма

$$I_a = \frac{I_A}{\eta_r}; I_c = \frac{I_C}{\eta_r}$$

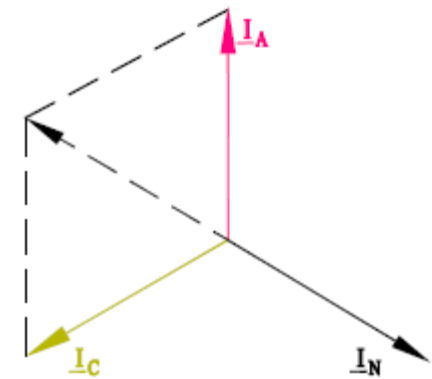
$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_c$$

$$K_{cx} = 1$$

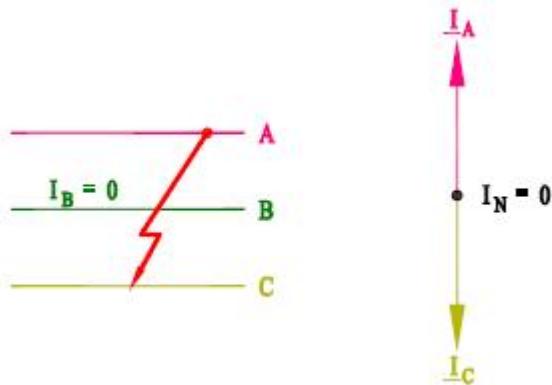


Трехфазное КЗ - токи проходят по обоим реле и в обратном проводе.

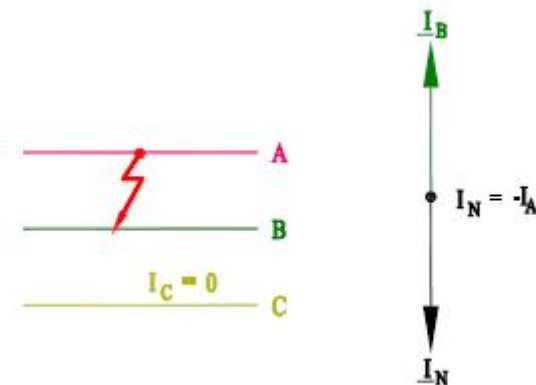
$$k_{cx}^{(3)} = 1$$



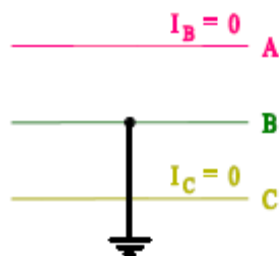
Двухфазное КЗ - в зависимости от того, какие фазы повреждены токи проходят в одном или двух реле. Ток в обратном проводе при 2-х к.з. между фазами А и С, в которых установлены ТТ, с учетом $I_A = -I_C$, равен нулю, а при замыканиях между фазами АВ и ВС он соответственно равен $I_{об} = I_A$ и $I_{об} = I_C$:



$$k_{cx}^{(2)} = 1$$

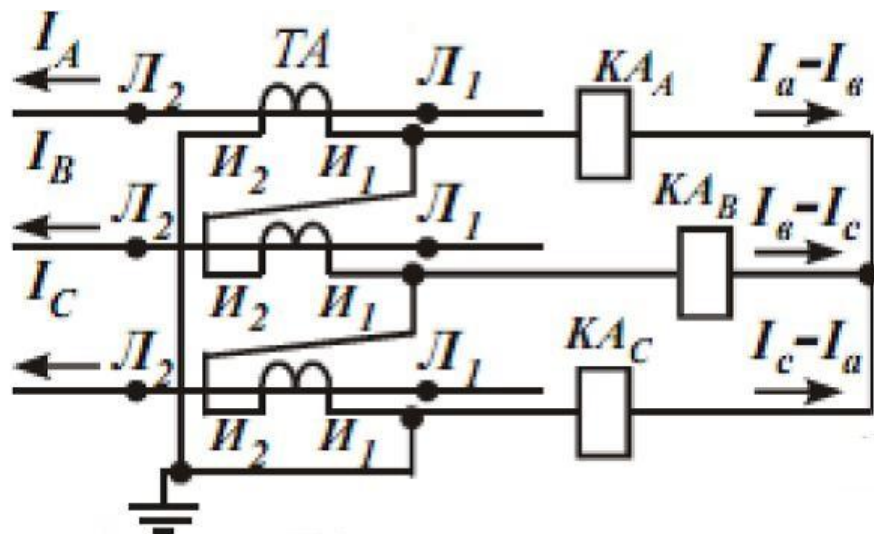


Однофазное КЗ - схема реагирует на однофазные к.з. лишь в тех фазах в которых установлены ТТ. В следствии этого для защит от однофазных к.з. не применяется



$$k_{cx}^{(1)} = 1$$

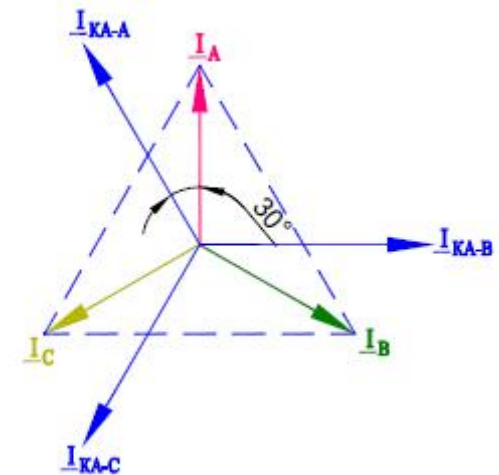
Соединение трансформаторов тока в треугольник, а обмоток реле в звезду



Вторичные обмотки ТТ, соединенные последовательно разноименными выводами, образуют треугольник.

$$\dot{I}_I = \frac{\dot{I}_A}{n_T} - \frac{\dot{I}_B}{n_T}; \dot{I}_{II} = \frac{\dot{I}_B}{n_T} - \frac{\dot{I}_C}{n_T}; \dot{I}_{III} = \frac{\dot{I}_C}{n_T} - \frac{\dot{I}_A}{n_T}$$

$$K_{cx} = \frac{I_p}{I_\phi} = \frac{\sqrt{3}I_\phi}{I_\phi} = \sqrt{3}$$



Трёхфазное КЗ - аналогично нормальному режиму.

Двухфазное КЗ - при двухфазном КЗ в зависимости от поврежденных фаз в разных реле протекают разные токи.

Повреждены фазы	Токи в фазах	Токи в реле		
		I	II	III
A, B	$I_B = -I_A$ $I_C = 0$	$2I_A$	I_B	$-I_A$
B, C	$I_C = -I_B$ $I_A = 0$	$-I_B$	$2I_B$	I_C
C, A	$I_A = -I_C$ $I_B = 0$	I_A	$-I_C$	$2I_C$

$$k_{cx}^{(2)} = 2$$

Однофазное КЗ - при КЗ на землю токи нулевой последовательности не проходят в реле (проходят только токи прямой и обратной последовательности, то есть только часть тока КЗ); схема соединения ТА1–ТА3 в треугольник является комбинированным фильтром токов прямой и обратной последовательности.

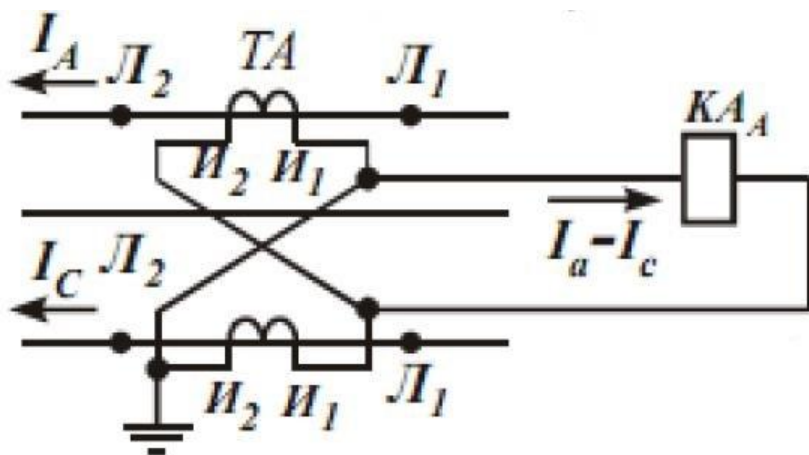
Повреждены фазы	Токи в фазах	Токи в реле		
		I	II	III
A	$I_A = I_K$ I_B и $I_C = 0$	I_A	0	$-I_A$
B	$I_B = I_K$ I_A и $I_C = 0$	$-I_B$	I_B	0
C	$I_C = I_K$ I_B и $I_A = 0$	0	$-I_C$	I_C

$$k_{cx}^{(1)} = 1$$

Схема реагирует на все виды КЗ. Так как при разных видах замыканий коэффициент чувствительности разный то защита имеет разную чувствительность. Схема применяется в основном для дифференциальных защит трансформаторов.

Схема соединений с двумя ТТ и одним реле, включенным на разность токов двух фаз.

В схеме вторичные обмотки ТТ, установленных в двух фазах, соединяются разноименными выводами. К трансформаторам тока реле присоединяется так, что по его обмотке проходит ток равный геометрической разности фазных токов.



Нормальный режим:

$$I_p = \sqrt{3} I_\phi$$

Трехфазное КЗ - аналогично нормальному режиму.

$$k_{cx}^{(3)} = \sqrt{3}$$

Двухфазное КЗ - при КЗ в разных фазах коэфф. чувствительности разные.

При двухфазном КЗ на фазах А и С в реле поступает два тока I_A и I_C , которые равны по величине и совпадают по фазе, т.к. это один и тот же ток КЗ петли фаз А и С. С учётом того, что трансформаторы тока соединены на разность токов и того, что ток фазы А поступает в полярный зажим трансформатора тока, а ток фазы С в неполярный зажим трансформатора тока, получим:

При КЗ А-С

$$k_{cx}^{(2)} = 2$$

При двухфазном КЗ между А и В или В и С в реле поступает только ток одной фазы, отсюда получим ток в реле:

При КЗ А-В С-

В

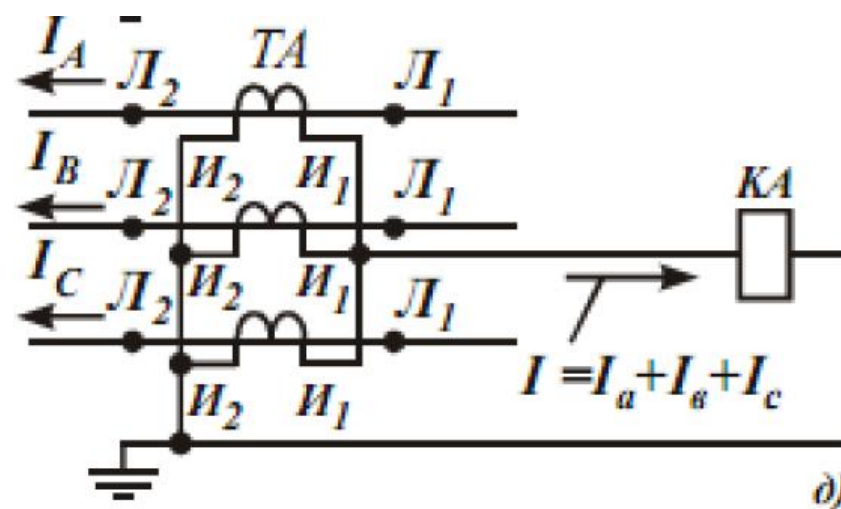
$$k_{cx}^{(2)} = 1$$

Схема применяется для защиты от междуфазных КЗ, когда она обеспечивает необходимую чувствительность когда не требуется её действие за трансформатором с соединением обмоток Y/D – 11 группа. . Схема защиты реагирует на все виды КЗ, за исключением замыкания на землю фазы, в которой трансформатор не установлен, поэтому применяется только для действия при многофазных повреждениях.

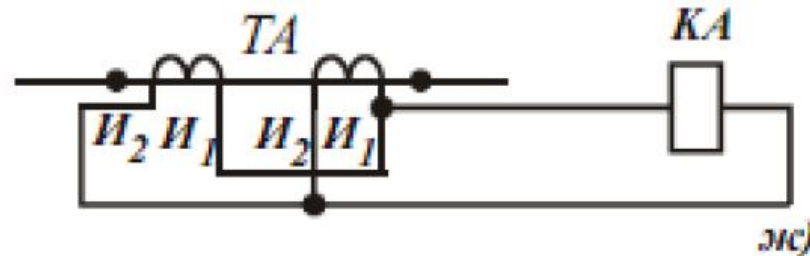
Схема соединения трансформаторов тока в фильтр нулевой последовательности.

Ток в реле появляется только при одно и двухфазных КЗ на землю.

Схема применяется в защитах от замыканий на землю.



Последовательное соединение трансформаторов тока



Нагрузка, подключенная к трансформаторам тока, распределяется поровну. Вторичный

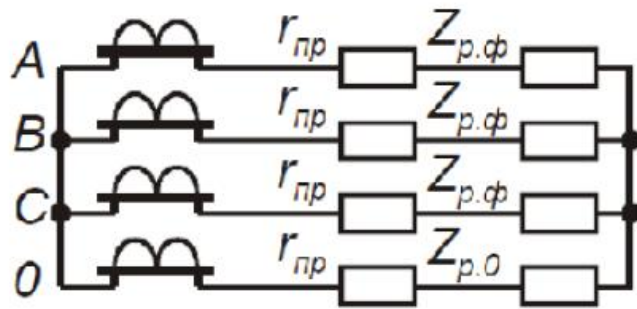
ток $I_2 = \frac{I_1}{n_T}$ остается неизменным, а напряжение, приходящееся на каждый трансформатор тока, составляет $\frac{I_2 Z_n}{2}$.

Схема применяется при использовании маломощных трансформаторов тока.

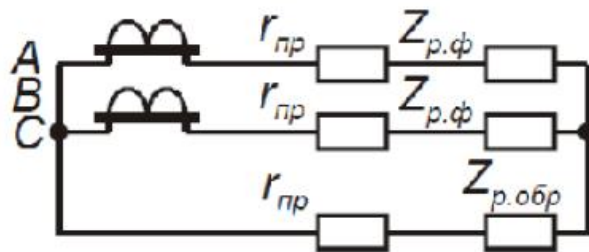
Нагрузка вторичной обмотки ТТ зависит также от схемы их соединения и вида КЗ. Поэтому нагрузка должна определяться для наиболее загруженного ТТ с учётом схемы соединения и для такого вида КЗ, при котором получаются наихудшие результаты.

Расчётные формулы для наиболее распространенных схем соединения вторичных обмоток ТТ и при различных видах КЗ приведены в таблицах.

Расчет нагрузки в зависимости от схемы соединения ТТ



Вид КЗ	Формулы для определения нагрузки на зажимах вторичных обмоток
Трёхфазное и двухфазное	$Z_{н.расч} = r_{пр} + Z_{р.ф} + r_{пер}$
Однофазное	$Z_{н.расч} = 2r_{пр} + Z_{р.ф} + Z_{р.0} + r_{пер}$

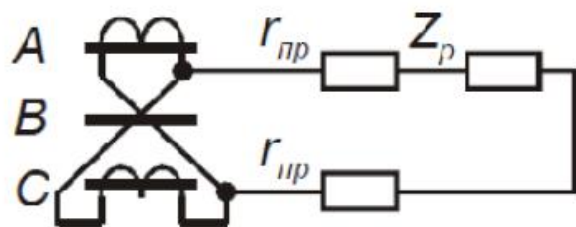


Вид КЗ	Формулы для определения нагрузки на зажимах вторичных обмоток
Трёхфазное	$Z_{н.расч} = \sqrt{3}r_{пр} + Z_{р.ф} + Z_{р.обр} + r_{пер}$
Двухфазное АВ или ВС	$Z_{н.расч} = 2r_{пр} + Z_{р.ф} + Z_{р.обр} + r_{пер}$
Двухфазное за транс-форматором Y/Δ-11	$Z_{н.расч} = 3r_{пр} + Z_{р.ф} + Z_{р.обр} + r_{пер}$

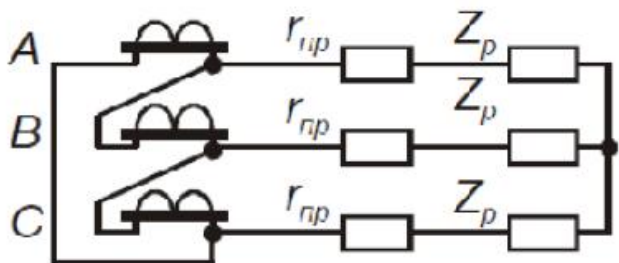
Примечания: 1. В формулы должно подставляться наибольшее значение (для наиболее загруженной фазы).

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

Расчет нагрузки в зависимости от схемы соединения ТТ

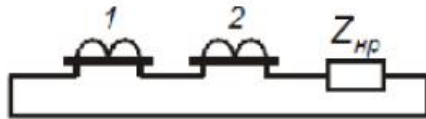


Вид КЗ	Формулы для определения нагрузки на зажимах вторичных обмоток
Трёхфазное	$z_{н\cdot расч} = \sqrt{3}(2r_{пр} + z_p) + r_{пер}$
Двухфазное AC	$z_{н\cdot расч} = 4r_{пр} + 2z_p + r_{пер}$
Двухфазное AB или BC	$z_{н\cdot расч} = 2r_{пр} + z_p + r_{пер}$

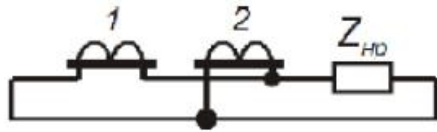


Вид КЗ	Формулы для определения нагрузки на зажимах вторичных обмоток
Трёхфазное или двух-фазное, трёхфазное за трансформатором Y/Δ-11	$z_{н\cdot расч} = 3r_{пр} + 3z_p + r_{пер}$
Однофазное	$z_{н\cdot расч} = 2r_{пр} + 2z_p + r_{пер}$

Расчет нагрузки в зависимости от схемы соединения ТТ



Вид КЗ	Формулы для определения нагрузки на зажимах вторичных обмоток
—	$z'_{н.расч} = 0.5 z_{н.расч}$ <p>Где $z_{н.расч} = 2r_{пр} + z_{р.} + r_{пер}$</p>



Вид КЗ	Формулы для определения нагрузки на зажимах вторичных обмоток
—	$z'_{н.расч} = 2 z_{н.расч}$ <p>Где $z_{н.расч} = 2r_{пр} + z_{р.} + r_{пер}$</p>