

Лекция

Трансформаторы тока

© Ставропольский
государственный аграрный
университет

Ставрополь, 2007

■ **Первичные измерительные преобразователи тока**

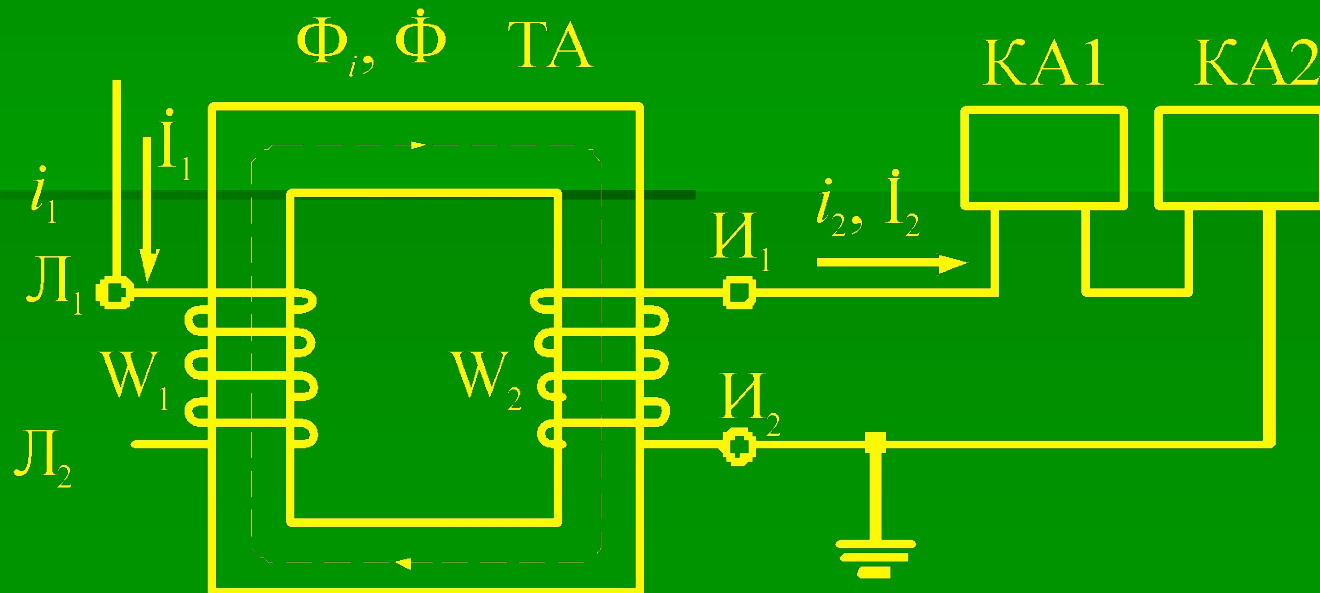
- **К измерительным органам**
воздействующая величина – ток –
обычно подводится от первичных
измерительных преобразователей тока.
Они обеспечивают изоляцию цепей тока
измерительных органов от высокого
напряжения и позволяют независимо от
номинального первичного тока получить
стандартное значение вторичного тока.

- Наиболее распространенными первичными преобразователями тока являются измерительные трансформаторы тока ТА. Они имеют стандартный номинальный вторичный ток $I_{\text{НОМ}} = 1; 5 \text{ А}$ при любых значениях номинального первичного тока; допускается изготовление трансформаторов тока с номинальным вторичным током $I_{\text{НОМ}} = 2; 2,5 \text{ А}$.

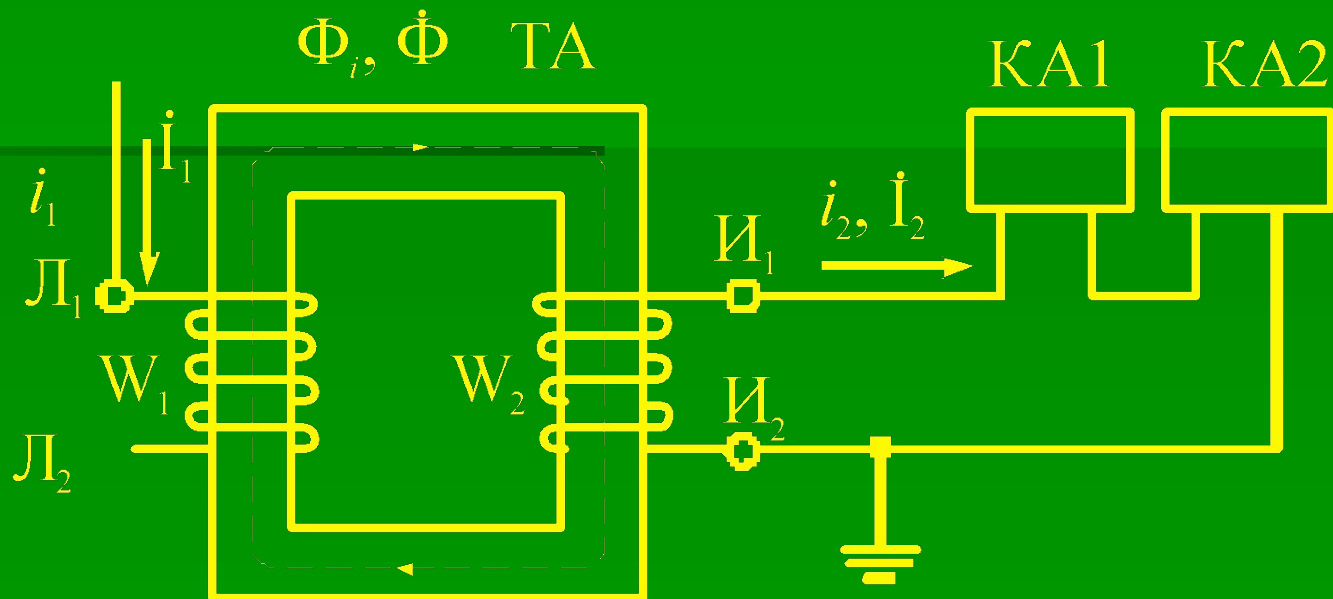
- Трансформаторы тока иногда используют и в сетях напряжением до 1000 В.
- Для правильного действия особенно релейной защиты требуется точная работа трансформаторов тока при токах перегрузки электроустановки и токах к. з., которые во много раз могут превышать их номинальные первичные токи.

- **Правильная работа быстродействующих устройств защиты и автоматики должна обеспечиваться при переходных процессах в трансформаторах тока. Особенностью измерительных трансформаторов тока является режим короткого замыкания (близкий к короткому замыканию) его вторичной цепи.**

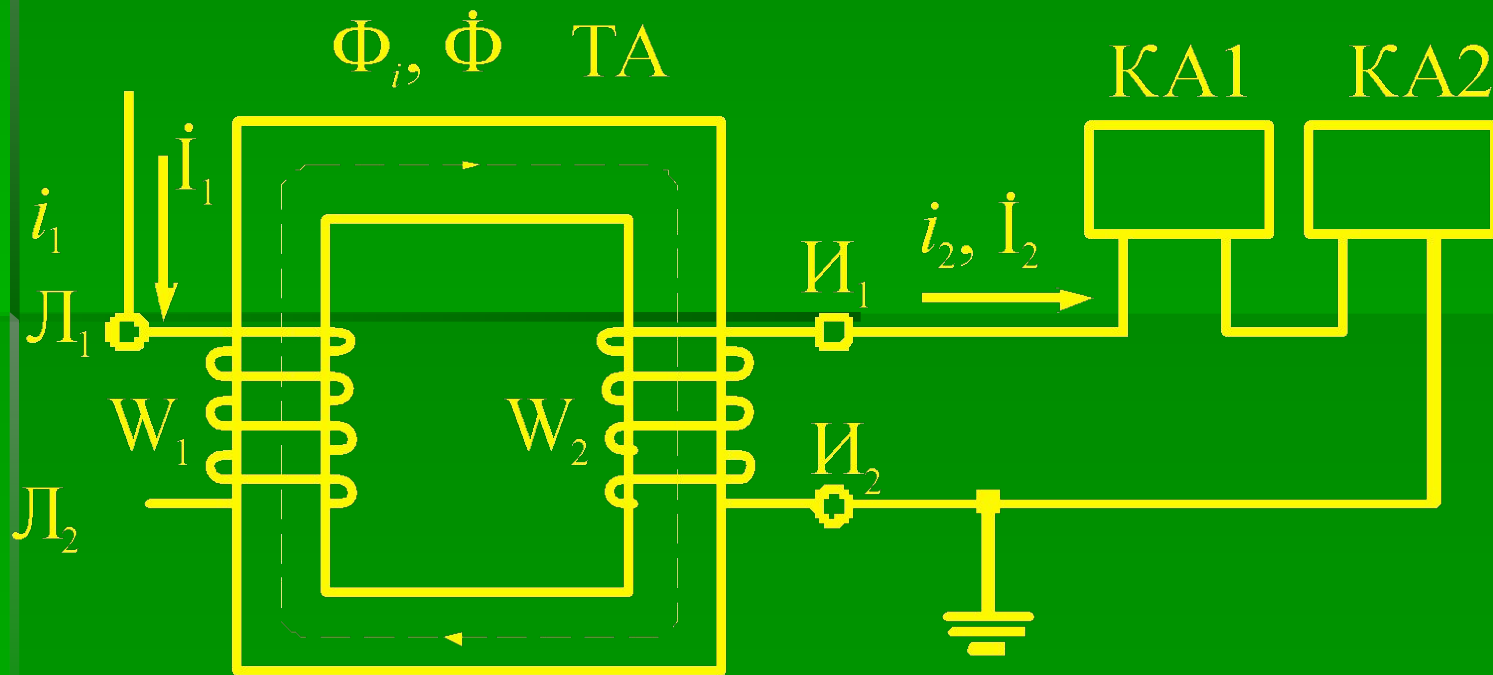
- Первичная обмотка трансформатора ТА с числом витков W_1 включается в цепь первичного тока I_1 сети, а ко вторичной обмотке с числом витков W_2 подключаются цепи тока измерительных органов, например измерительных реле тока КА1, КА2 с относительно малым сопротивлением.



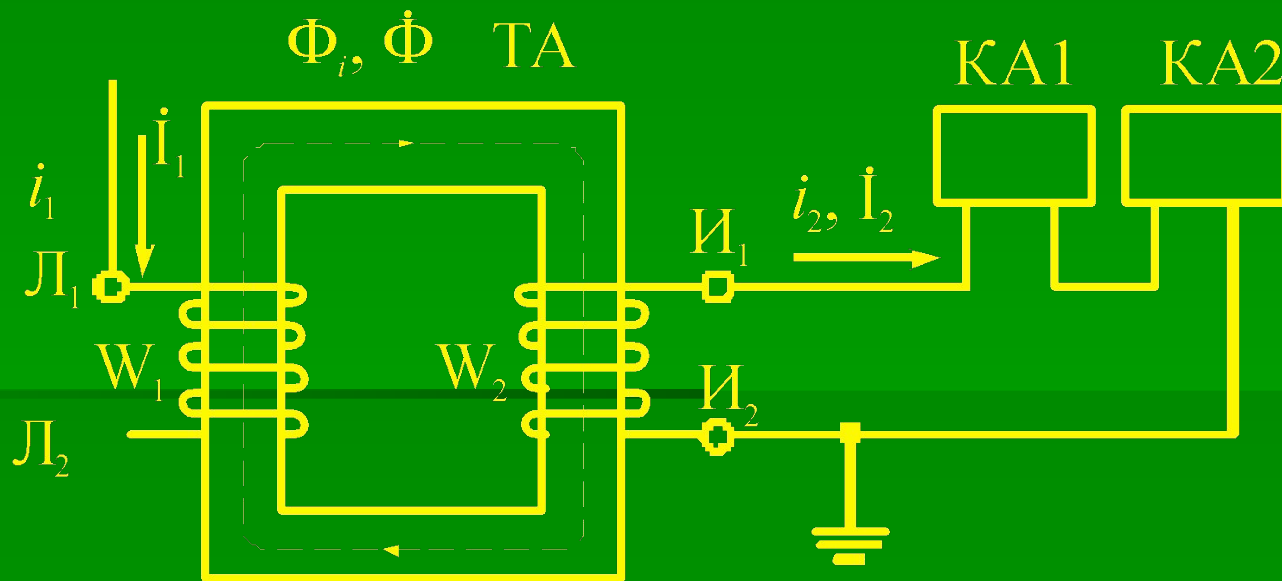
- **Начала и концы обмоток трансформатора тока указываются на их выводах. Выводы первичной обмотки L_1 и L_2 маркируются произвольно, а выводы вторичной обмотки I_1 и I_2 – с учетом принятого обозначения выводов первичной обмотки.**



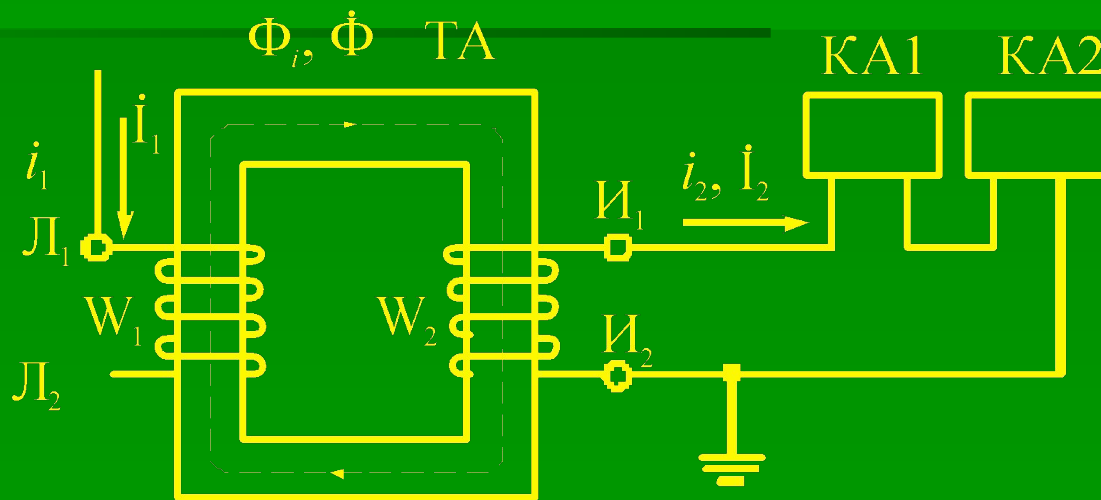
- При этом за начало вторичной обмотки принимается вывод, из которого мгновенный ток i_2 направляется в цепь нагрузки, а в первичной обмотке ток i_1 направлен от начала $Л_1$ к концу $Л_2$.



- При такой маркировке мгновенное значение тока в обмотке реле имеет то же направление, что и при включении непосредственно в защищаемую цепь (без трансформатора).



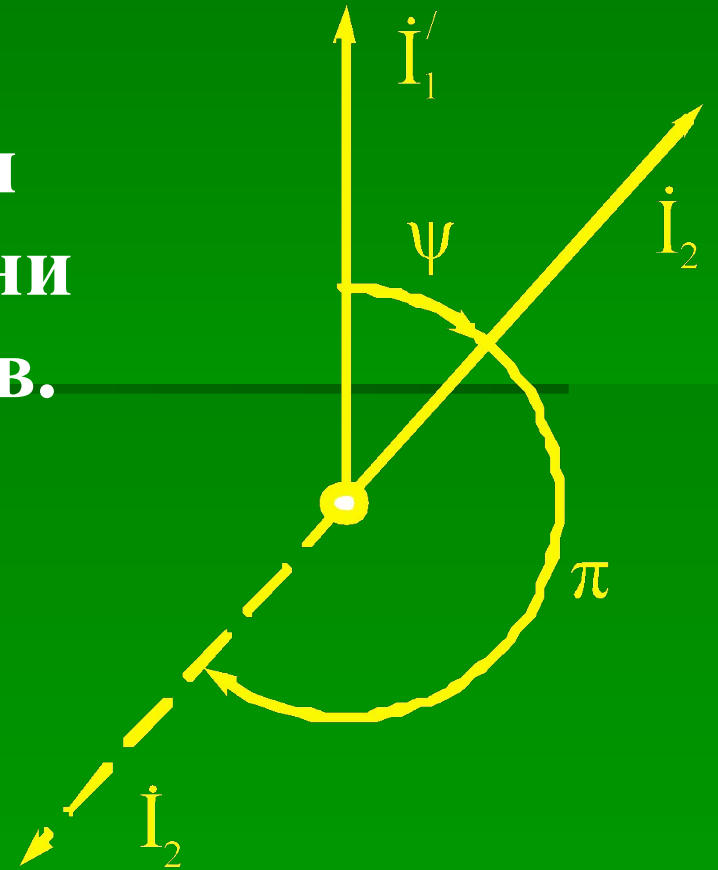
- На рисунке показаны направления токов i_1 , i_2 для некоторого момента времени и принятой намотки витков. Направление магнитного потока Φ_1 при заданном направлении тока i_1 определяется по правилу буравчика. Ток i_2 всегда направлен так, что размагничивает магнитопровод.



- **Соотношение синусоидальных токов (напряжений, потоков и др.) изображается обычно векторной диаграммой. Векторная диаграмма может быть изображена и имеет определенный смысл только при условии, что для каждой из величин выбрано положительное направление.**

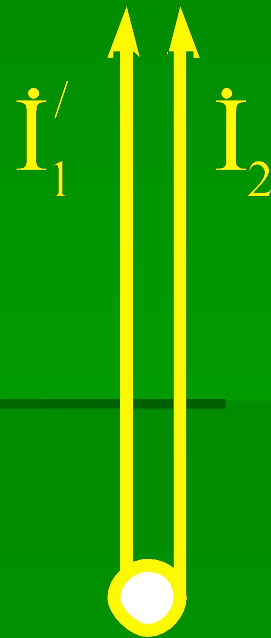
- На рисунке показаны направления токов i_1 , i_2 для некоторого момента времени и принятой намотки витков.

- Направление магнитного потока Φ_1 при заданном направлении тока i_1 определяется по правилу буравчика. Ток i_2 всегда направлен так, что размагничивает магнитопровод.



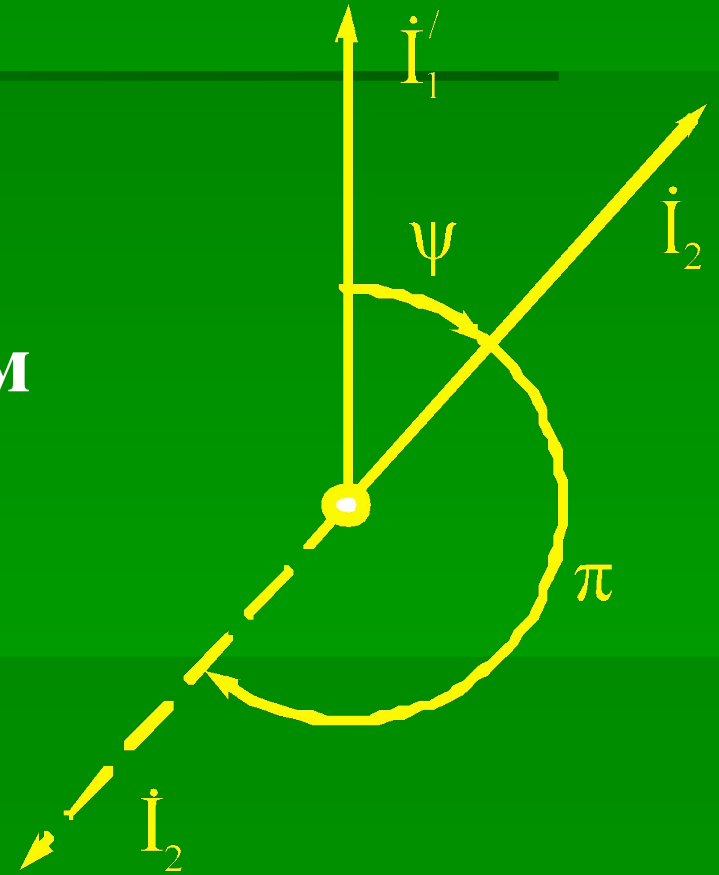
- **Соотношение синусоидальных токов (напряжений, потоков и др.) изображается обычно векторной диаграммой. Векторная диаграмма может быть изображена и имеет определенный смысл только при условии, что для каждой из величин выбрано положительное направление.**

- Так, из данной диаграммы следует, что ток отстаёт по фазе от тока на угол ψ .
- Это означает, что ток i_2 достигает, например, положительного максимального мгновенного значения позже, чем ток i_1 , на время $t = \psi/\omega$.



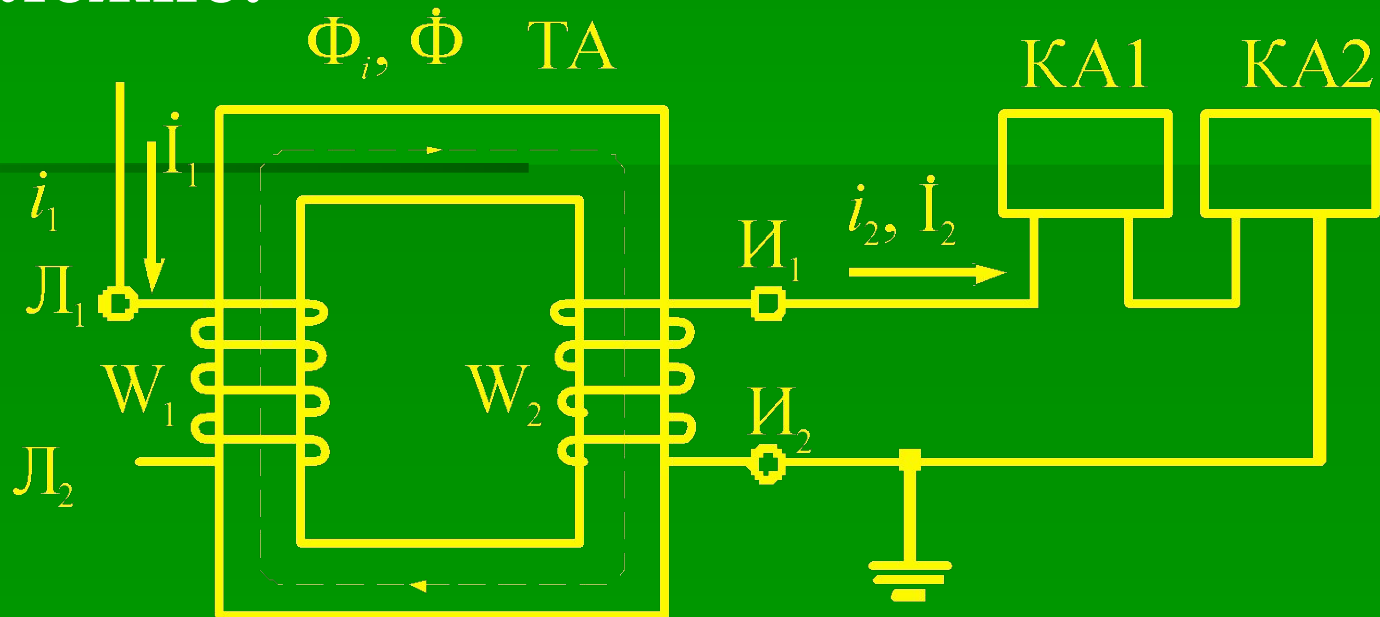
- Однако указанный момент времени становится неопределенным, если неизвестно, какое из двух возможных направлений тока считается положительным.

- Если для одного положительного направления ток отстаёт по фазе от тока на угол ψ , для другого (противоположного) направления тока (при неизменном положительном направлении тока) угол сдвига фаз равен $\psi + \pi$ (на рисунке показано пунктиром).



- Поэтому при построении векторной диаграммы первичного и вторичного токов трансформатора тока ТА необходимо задаться их положительными направлениями.

- Если для первичного тока I_1 принять положительное направление от начала к концу обмотки, а для вторичного I_2 – от конца к началу обмотки, как показано стрелками на рисунке, то векторы магнитодвижущих сил (МДС) первичной и вторичной обмоток оказываются направленными противоположно.



■ При этом, согласно закону полного тока.

■
$$I_1 \cdot W_1 - I_2 \cdot W_2 = F_{\text{нам}}$$

■ В идеальном трансформаторе результирующая МДС $F_{\text{нам}} = 0$.

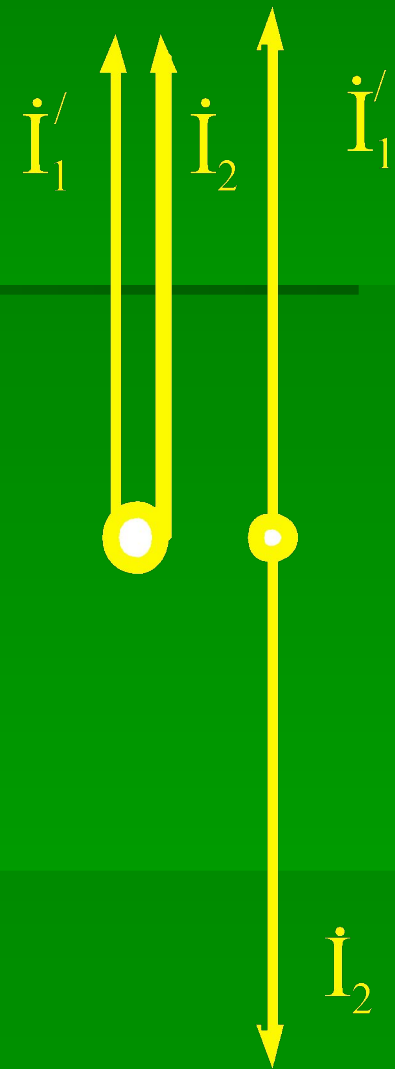
■ При этом

■ Или
$$I_1 \cdot W_1 - I_2 \cdot W_2 = 0 \quad (2)$$

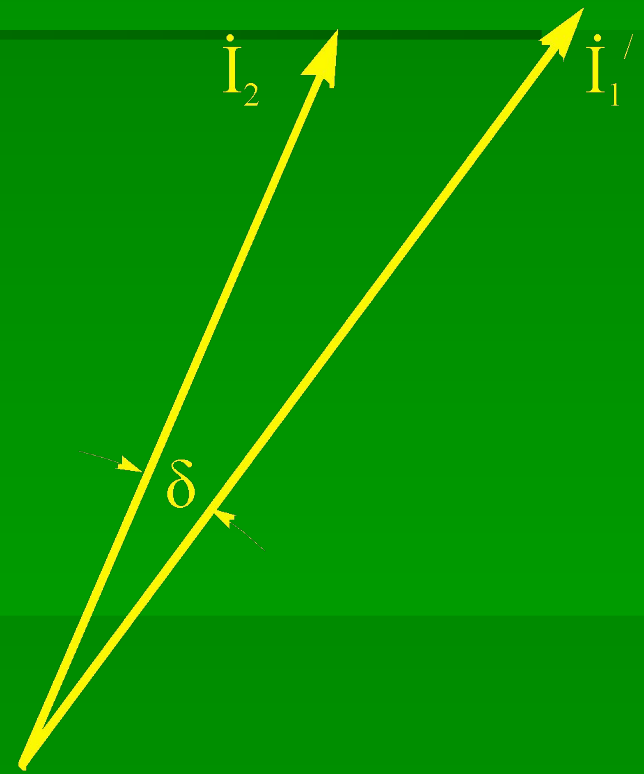
■
$$\cdot \quad (3)$$

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{W_1}{W_2} = I_1'$$

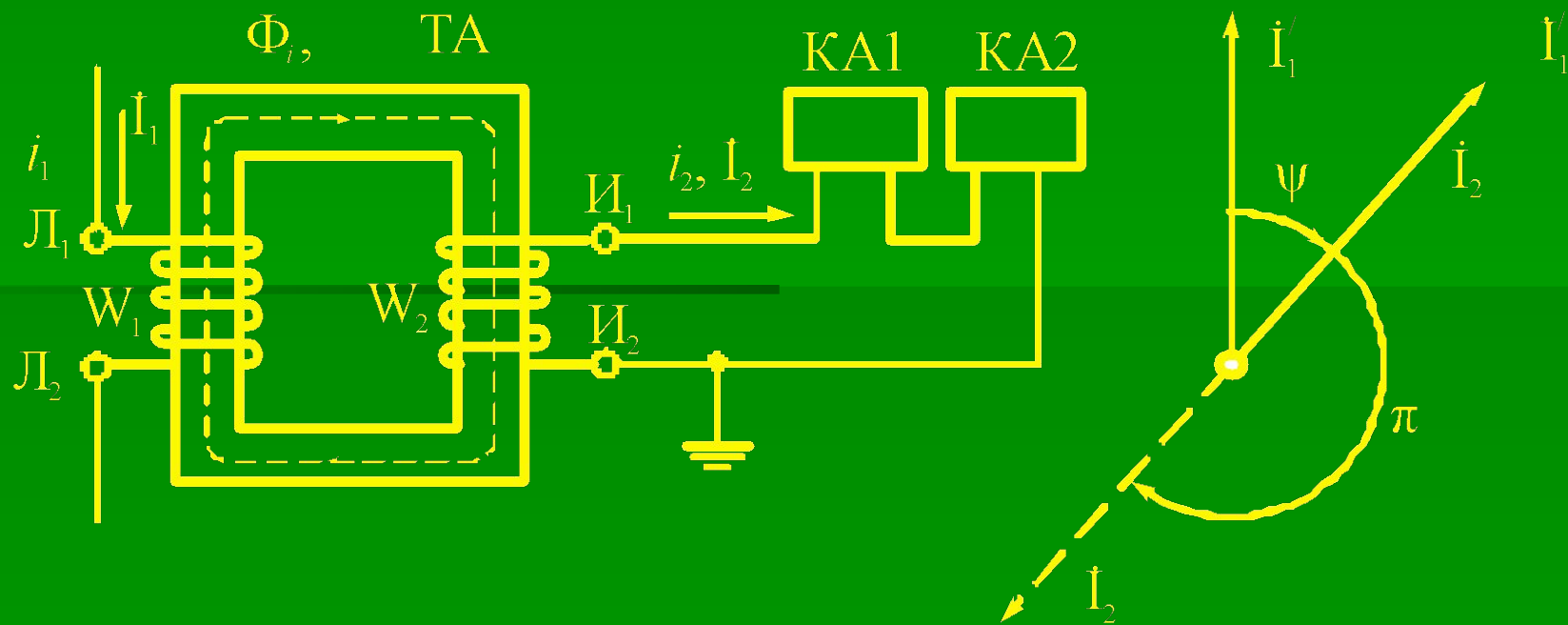
- Токи и равны и совпадают по фазе. На векторной диаграмме они могут быть изображены одним вектором



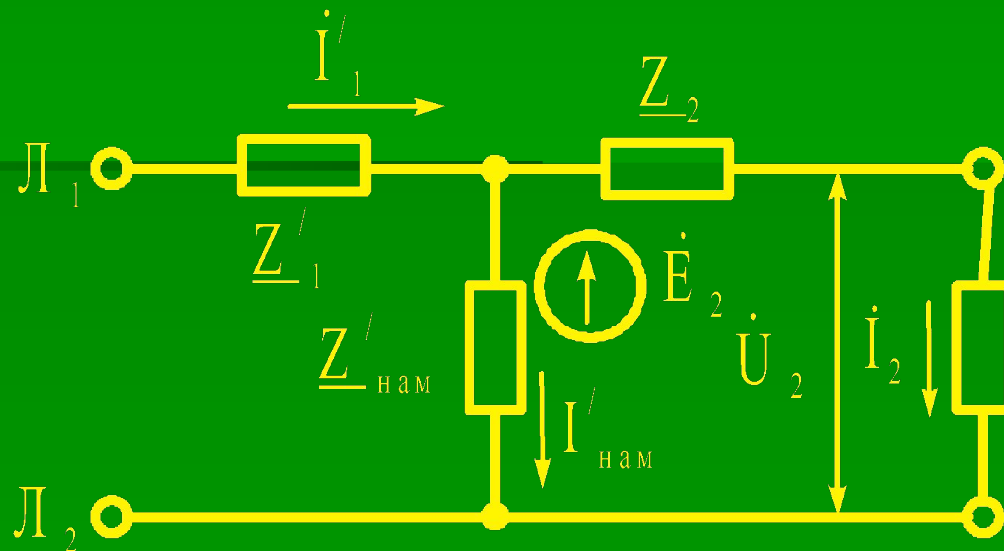
- Если положительное направление токов и принято от начала обмоток к их концам, то МДС обеих обмоток направлены одинаково, а токи и изображаются векторами, сдвинутыми по фазе на угол δ



- В дальнейшем при построении векторных диаграмм положительное направление тока принимается от начала к концу обмотки, а тока – от конца к началу



- Схема замещения трансформатора тока, нагруженного сопротивлением \underline{Z}_H , показана на рисунке. Сопротивления первичной обмотки и ветви намагничивания \underline{Z}'_1 , $\underline{Z}'_{\text{нам}}$ и токи приведены ко вторичной обмотке. Направление токов определено на основании выражения $1 \quad \dot{I}'_1 \cdot W_1 - \dot{I}'_2 \cdot W_2 = F_{\text{нам}}$



- Для принятого положительного направления токов

$$I_1 \cdot W_1 - I_2 \cdot W_2 = I_{нам} \cdot W_1$$

- откуда

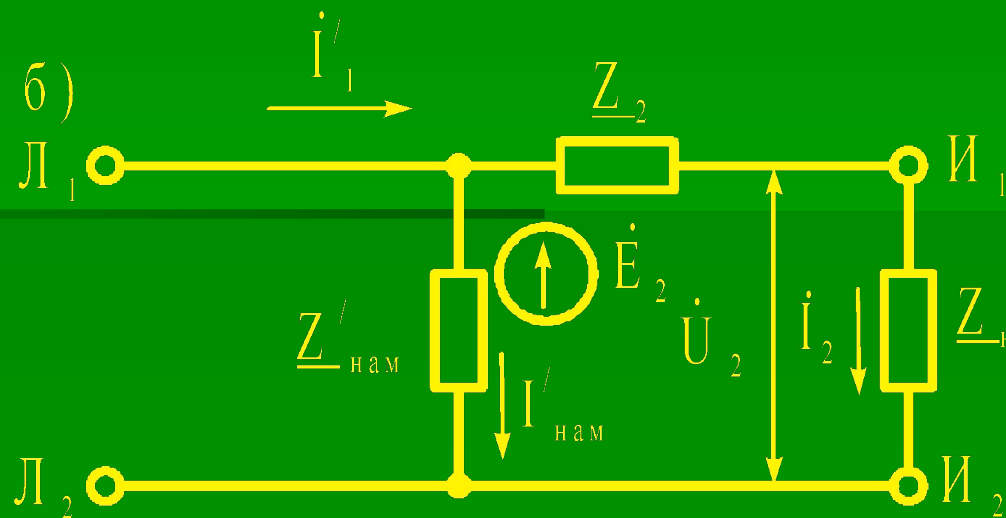
$$I_1 \cdot \frac{W_1}{W_2} = I_2 + I_{нам} \cdot \frac{W_1}{W_2}$$

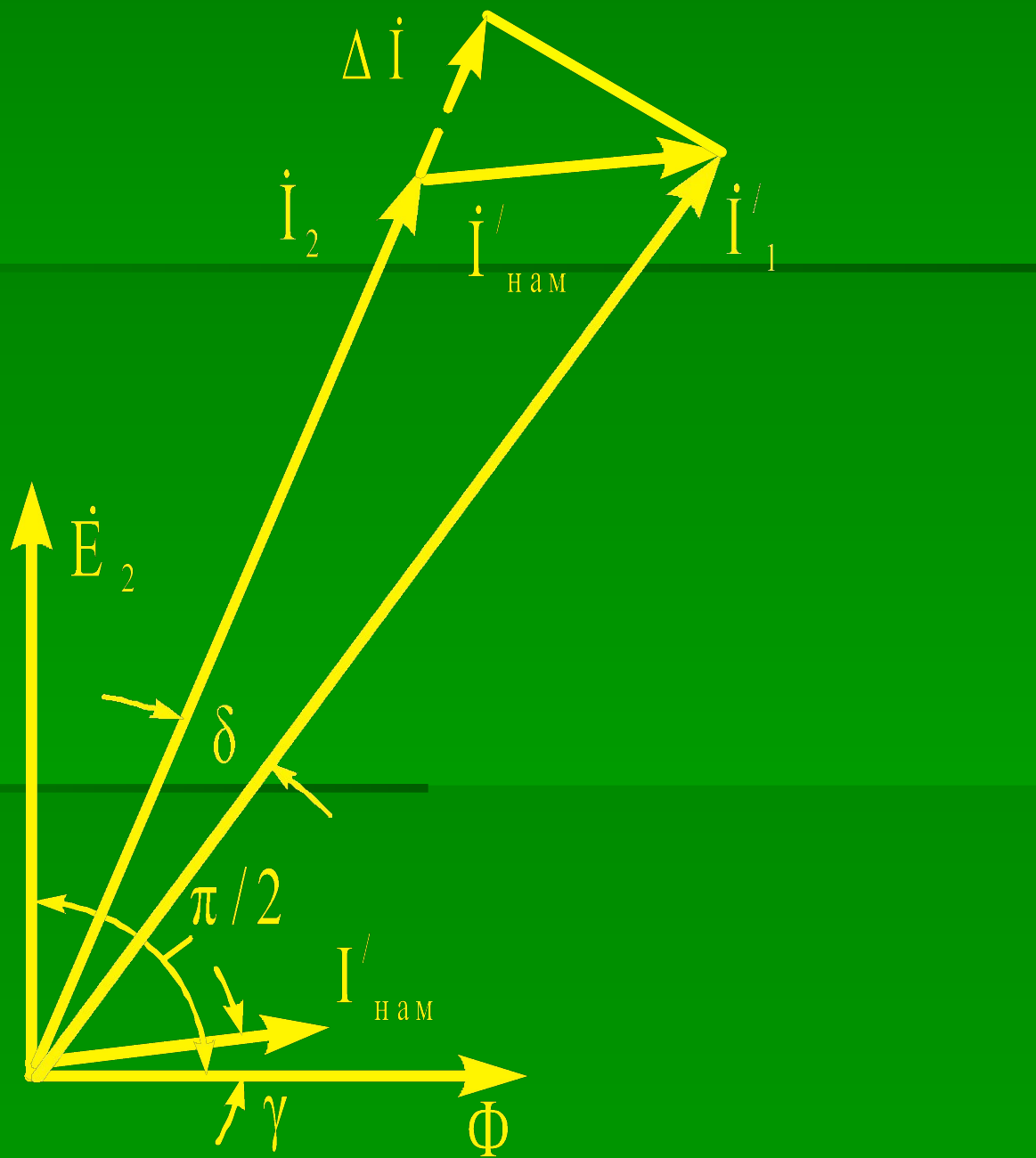
- ИЛИ

$$I_1' = I_2 + I_{нам}'$$

(4)

- Из схемы замещения видно, что сопротивление первичной обмотки \underline{Z}'_1 не влияет на распределение тока между ветвью намагничивания $\underline{Z}_{\text{нам}}$ и ветвью нагрузки $\underline{Z}_{\text{н}}$; поэтому из схемы, изображенной на рисунке в соответствии с которой построена векторная диаграмма рисунок оно исключено



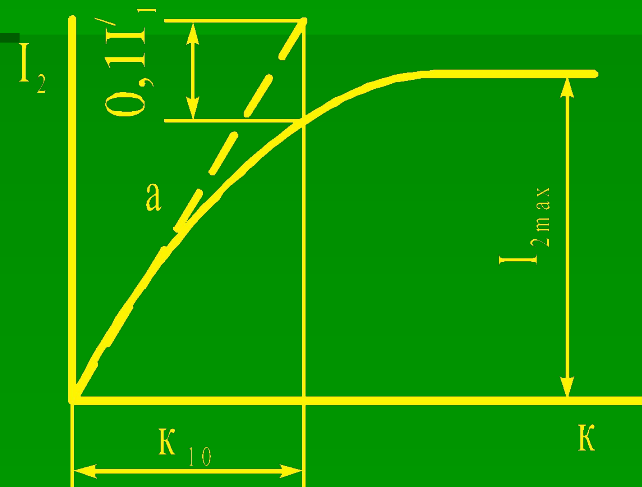


- Из векторной диаграммы видно, что вторичный ток I_2 отличается от приведенного первичного I'_1 как по значению на ΔI , так и по фазе на угол δ . Ток значительно меньше тока I_1 , поэтому результирующая МДС $F_{\text{нам}}$ определяющая рабочий магнитный поток Φ и ЭДС E_2 , во много раз меньше МДС первичной обмотки $I_1 \cdot W_1$. Очевидно, что чем меньше сопротивление нагрузки Z_H , т. е. чем ближе режим цепи вторичной обмотки к режиму короткого замыкания, тем большая часть тока I'_1 замыкается по цепи вторичной обмотки и тем точнее работает трансформатор тока.

- По мере увеличения сопротивления нагрузки Z_H ток I'_1 распределяется таким образом, что ток I_2 уменьшается, а ток $I'_{\text{нам}}$ увеличивается, т. е. трансформатор тока начинает работать с большими погрешностями. В пределе, когда $Z_H = \infty$ (обмотка разомкнута), ток $I_2 = 0$, а $I'_{\text{нам}} = I'_1$ и результирующая МДС резко возрастает. Она становится равной МДС первичной обмотки. Следствием этого является значительное увеличение магнитного потока Φ .

- При размыкании вторичной обмотки магнитопровод быстро насыщается, что обуславливает появление на разомкнутой обмотке трансформатора несинусоидальной ЭДС e_2 , максимальные мгновенные значения которой могут достигать тысяч и даже десятков тысяч вольт, что представляет опасность для обслуживающего персонала и изоляции. Наряду с этим в связи с увеличением магнитного потока возрастают потери в стали и магнитопровод трансформатора недопустимо перегревается, что может привести к усиленному износу или даже повреждению изоляции трансформатора тока.

- Таким образом, нормальным режимом работы трансформатора тока является режим короткого замыкания вторичной цепи с малой МДС $F_{\text{нам}}$. На точность работы трансформатора тока влияет не только нагрузка, но и значение первичного тока I_1 . На рисунке представлена зависимость вторичного тока I_2 от кратности первичного тока $k = I_1/I_{1 \text{ ном}}$ для некоторой постоянной нагрузки $Z_{\text{н}}$.



- До точки перегиба (точка а) эта зависимость близка к прямолинейной. Дальнейшее увеличение первичного тока I_1 из-за насыщения магнитопровода трансформатора почти не приводит к росту вторичного тока, а ток намагничивания резко возрастает. Таким образом, точность трансформатора тока с ростом кратности k ухудшается. С увеличением нагрузки перегиб наступает при меньших кратностях тока.

- Согласно ГОСТ 7746-78, точность работы трансформаторов тока, предназначенных для релейной защиты, характеризуется полной погрешностью

$$\varepsilon = \left(\frac{100}{I_1} \right) \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (i_2 \cdot K_1 - i_1)^2 dt} \quad (5)$$

- где I_1 – действующее значение первичного тока, А;
- T – длительность периода тока, с;
- K_1 – номинальный коэффициент трансформации (отношение номинального первичного тока к номинальному вторичному току).

- Трансформаторы тока, используемые в релейной защите, имеют два класса точности: 5Р и 10Р. Полная погрешность первых не должна превышать $\varepsilon = 5\%$, а вторых $\varepsilon = 10\%$ при заданной вторичной нагрузке и расчетной предельной кратности первичного тока.
- Полная погрешность связана с *предельной кратностью k_{10}* трансформатора тока, представляющей собой наибольшее отношение первичного тока к его номинальному значению, при котором полная погрешность при заданной вторичной нагрузке не превышает $\varepsilon = 10\%$.

- **Предприятие-поставщик гарантирует значение предельной кратности для номинальной нагрузки (номинальная предельная кратность $k_{10ном}$).**
Трансформаторы тока выбираются так, чтобы полная погрешность не превышала $\varepsilon = 10\%$ при заданной вторичной нагрузке и кратности первичного тока, соответствующей условиям срабатывания защиты.

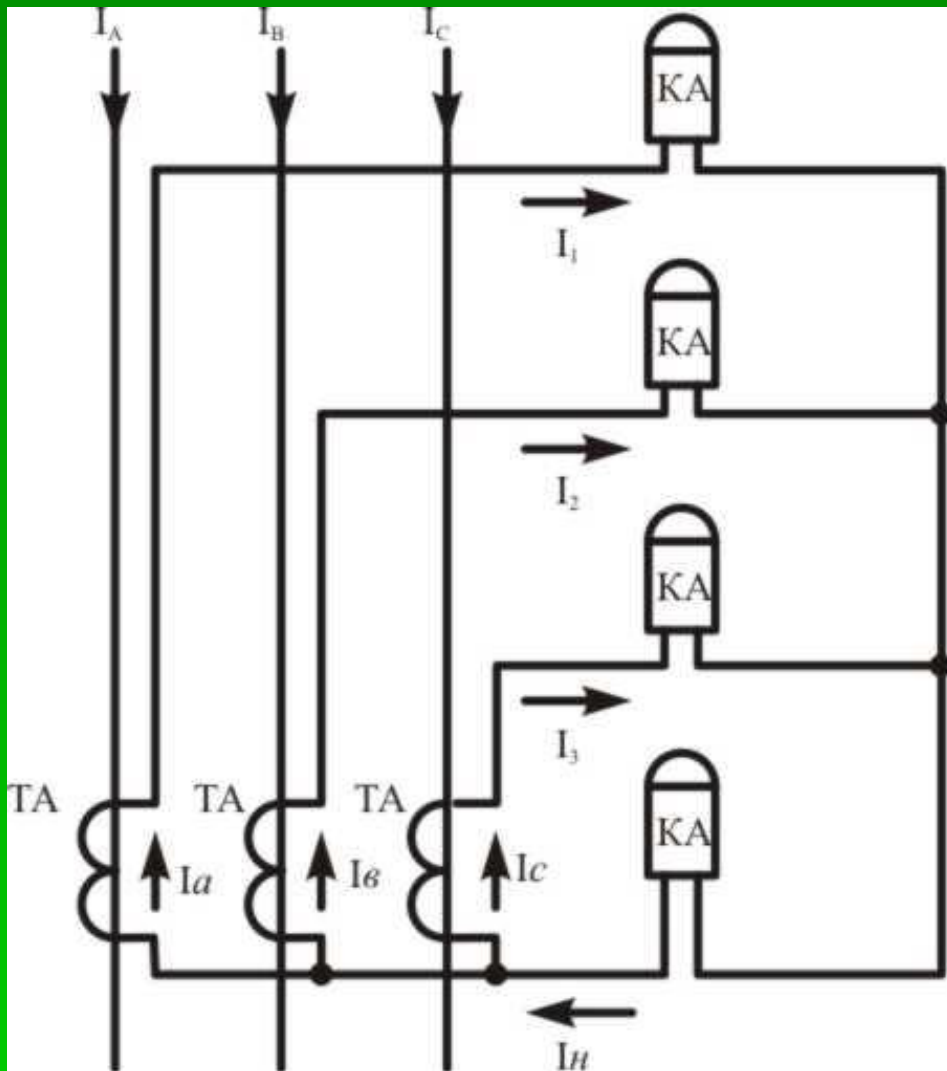
- **Рассмотренные соотношения и векторная диаграмма характерны и для вторичных измерительных трансформаторов тока, которые, как правило, входят в измерительную часть современных устройств защиты, автоматики и телемеханики.**

Схемы соединения трансформаторов тока и реле

- Для питания цепей учёта, измерения и релейной защиты применяются различные схемы соединения. Поэтому ток во вторичной обмотке трансформатора тока (I_{2T}) и ток в обмотке реле (I_p) могут существенно различаться, поэтому для учёта этого вводится коэффициент схемы.

$$K_{cx} = \frac{I_p}{I_{2T}}$$

Схема соединения трансформаторов тока и реле в звезду



$$I_a = \frac{I_A}{n_T}$$

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

- При трёхфазном коротком замыкании и при перегрузках токи во вторичных обмотках трансформаторов тока и токи, проходящие по обмоткам реле равны и коэффициент схемы в этом случае равен 1 .

- При двухфазном коротком замыкании например В – С:

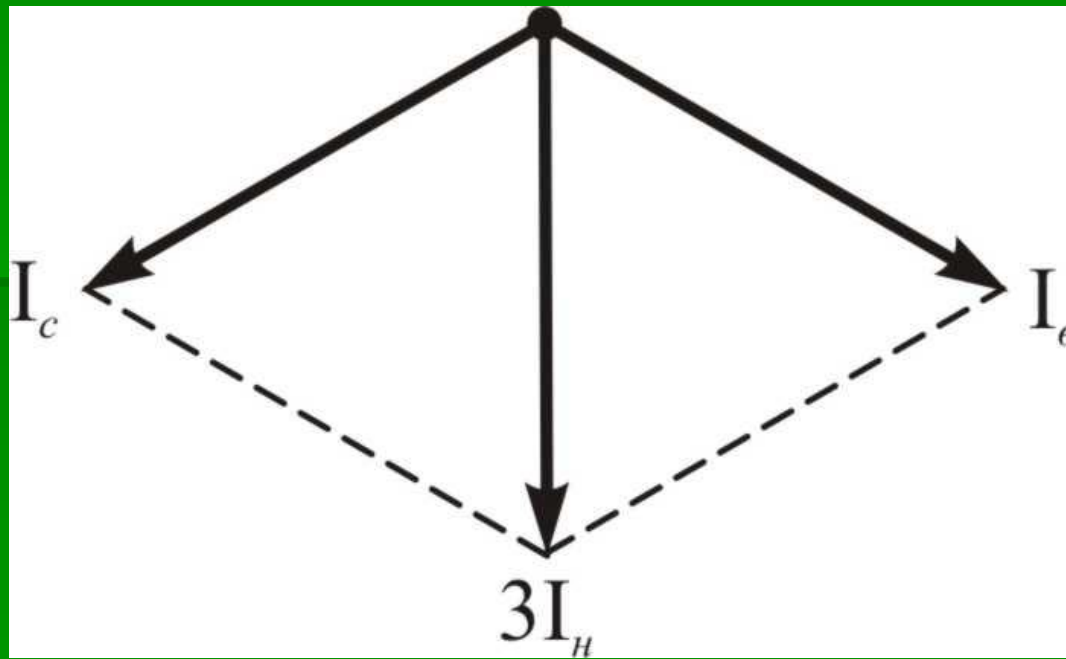
- $I_A = 0; I_a = 0.$

- $I_B = -I_C; I_v = -I_c; I_n = 0.$

- Коэффициент схемы равен 1

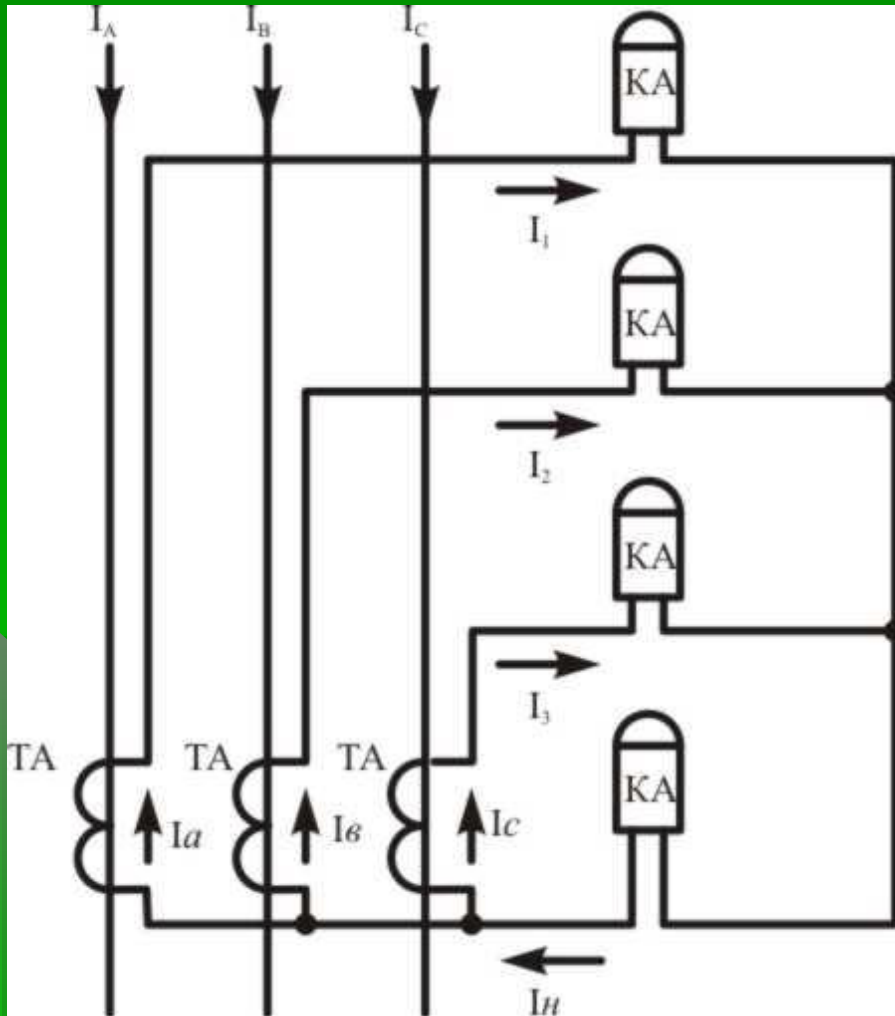


- При двухфазном коротком замыкании на землю через нулевой провод протекают токи нулевой составляющей $I_H = 1/3(I_B + I_C)$, то есть $1/3$ их геометрической суммы. Коэффициент схемы в данном случае будет равен 1.



- При однофазном коротком замыкании на землю через нулевой провод протекает ток. Таким образом, реле установленное в нулевом проводе обтекается токами нулевой последовательности и коэффициент схемы будет равен 1 .
- Во всех режимах короткого замыкания во вторичных обмотках трансформаторов тока и реле соответствующих фаз токи одинаковы. Нулевой провод реле является фильтром токов нулевой последовательности.
- Данная схема применяется в сетях с глухозаземлённой и эффективнозаземлённой нейтралью.

Схема соединения трансформаторов тока и реле в неполную звезду



$$I_{1a} = \frac{I_A}{n_T}$$

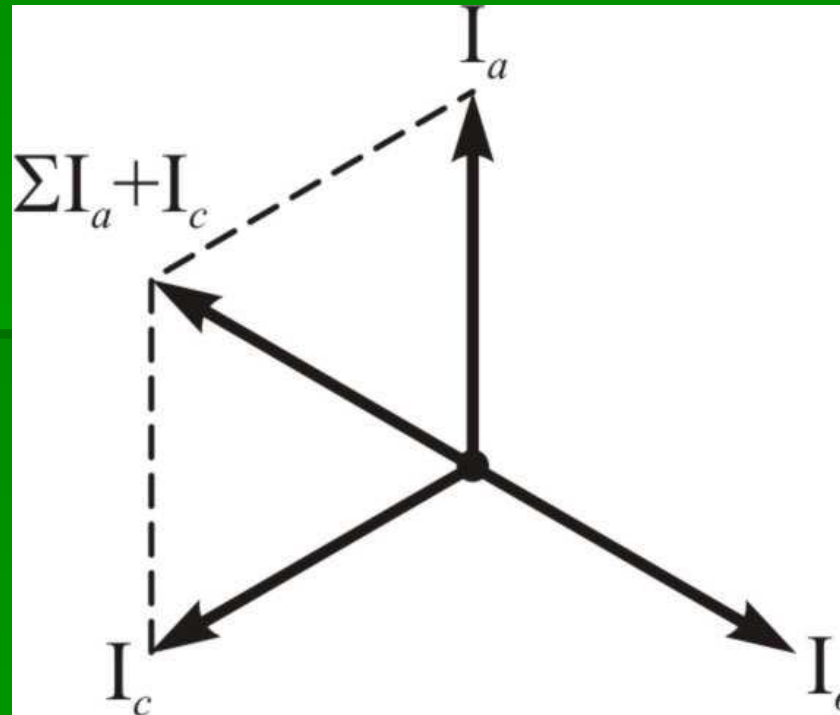
$$I_{1c} = \frac{I_C}{n_T}$$

■ При перегрузках или трёхфазном коротком замыкании токи во всех фазах одинаковы.

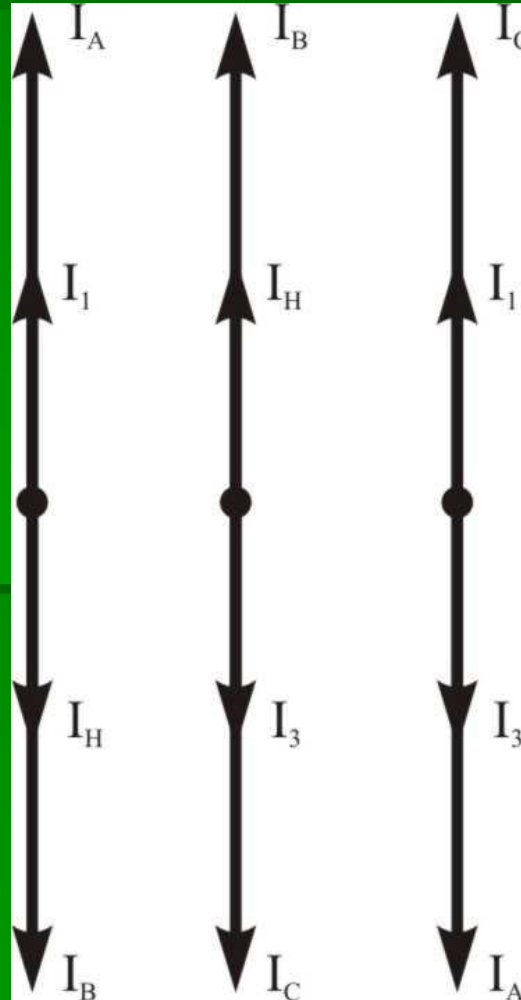
■ , $I_N = I_a + I_c$

■ то есть примерно $I_b = -I_N$

■ Таким образом, коэффициент схемы будет равен 1.



- При двухфазном коротком замыкании фаз А и С $I_H = 0$, при замыкании фаз А и В или В и С $I_B = I_a$ или $I_B = I_c$, следовательно, коэффициент схемы равен 1



При однофазном коротком замыкании фазы А на землю $I_H = I_a$, $k_{сх} = 1$. При однофазном коротком замыкании фазы С на землю, $I_H = I_c$, $k_{сх} = 1$. При замыкании фазы В на землю $I_H = 0$, то есть данная схема при замыкании фазы в которой нет трансформатора тока не реагирует. Данную схему целесообразно применять в сетях с изолированной нейтралью, где необходимости в защите от замыканий на землю нет. Схема имеет минимальное число элементов.

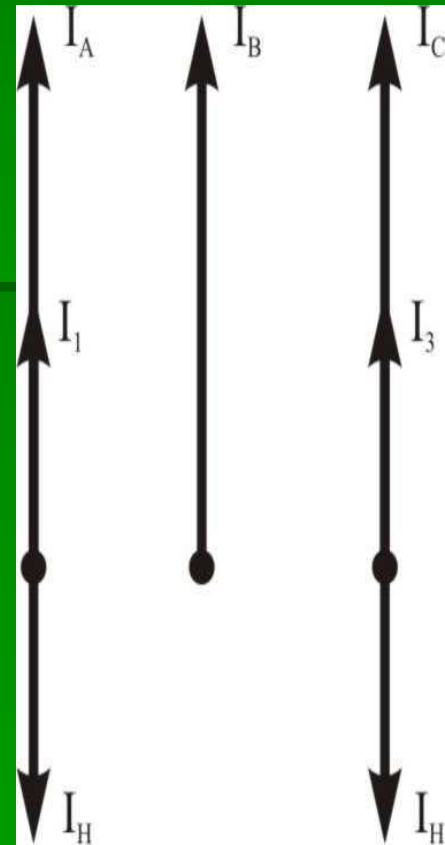
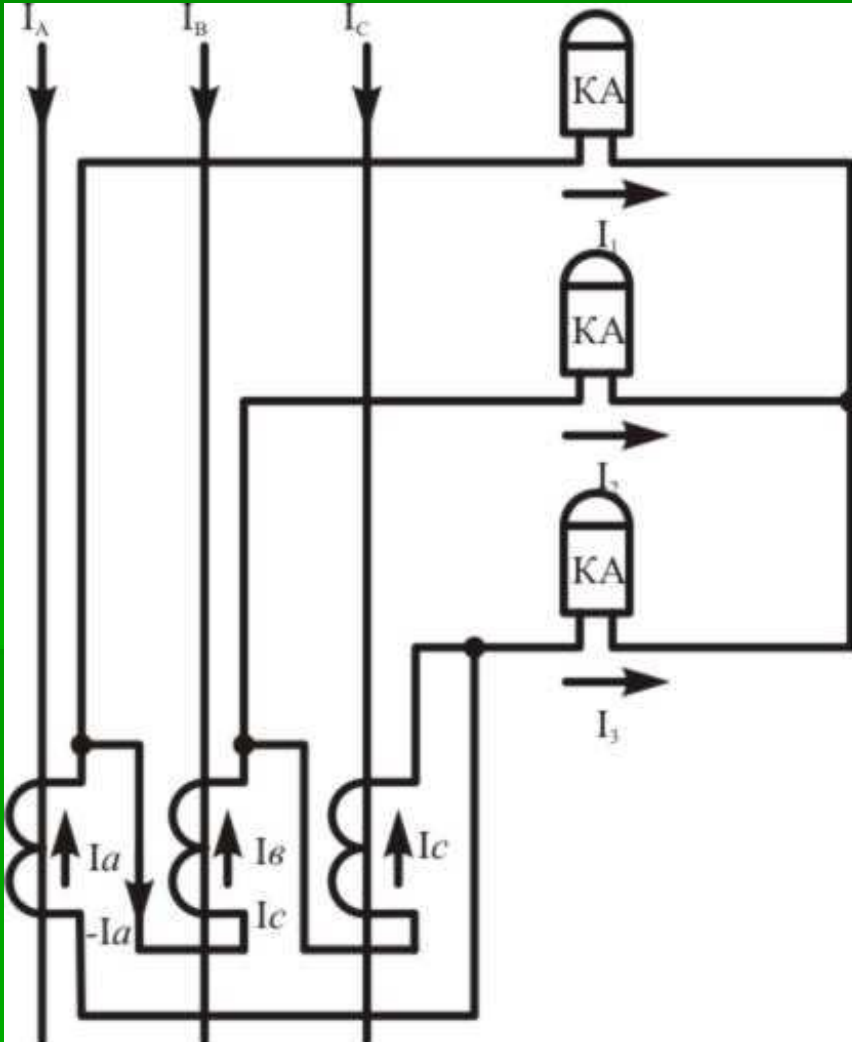


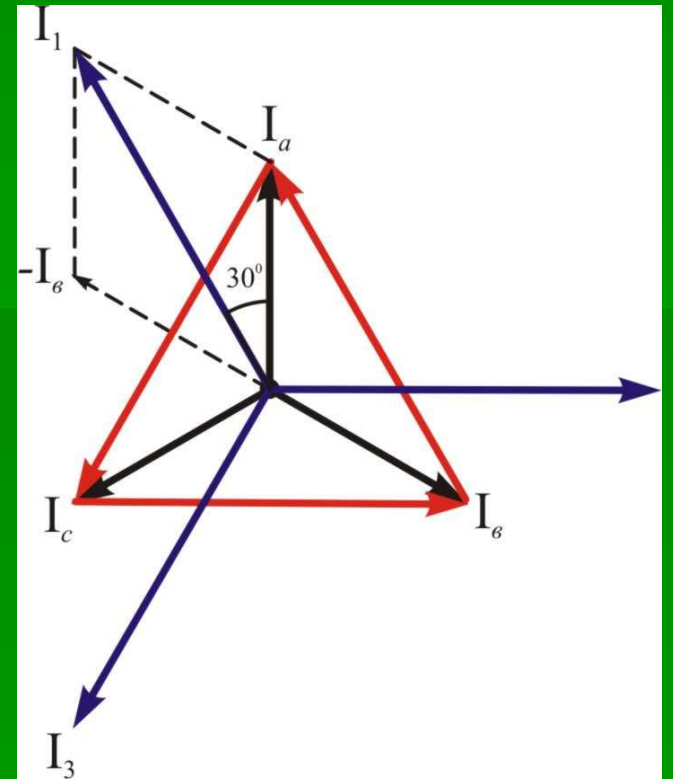
Схема соединения трансформаторов тока и реле в треугольник, а реле в звезду



$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{I_A}{n_T} - \frac{I_B}{n_T} \\ I_2 &= \frac{I_B}{n_T} - \frac{I_C}{n_T} \\ I_3 &= \frac{I_C}{n_T} - \frac{I_A}{n_T} \end{aligned} \right\}$$

■ При перегрузках и трёхфазных коротких замыканиях $I_p = I_1 = \sqrt{3} \cdot I_a \rightarrow k_{cx}^{(3)} = \sqrt{3}$

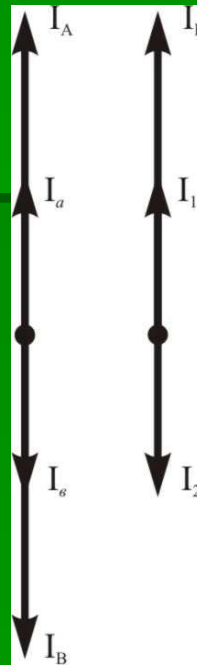
■ Таким образом через реле проходит ток в $\sqrt{3}$ раз больший и сдвинут на угол 30° . Токи нулевой последовательности не выходят за пределы треугольника.



- При двухфазном коротком замыкании например между фазами А и В $I_A = -I_B$; $I_C = 0$. Подставляя эти значения в выражения для токов в реле имеем

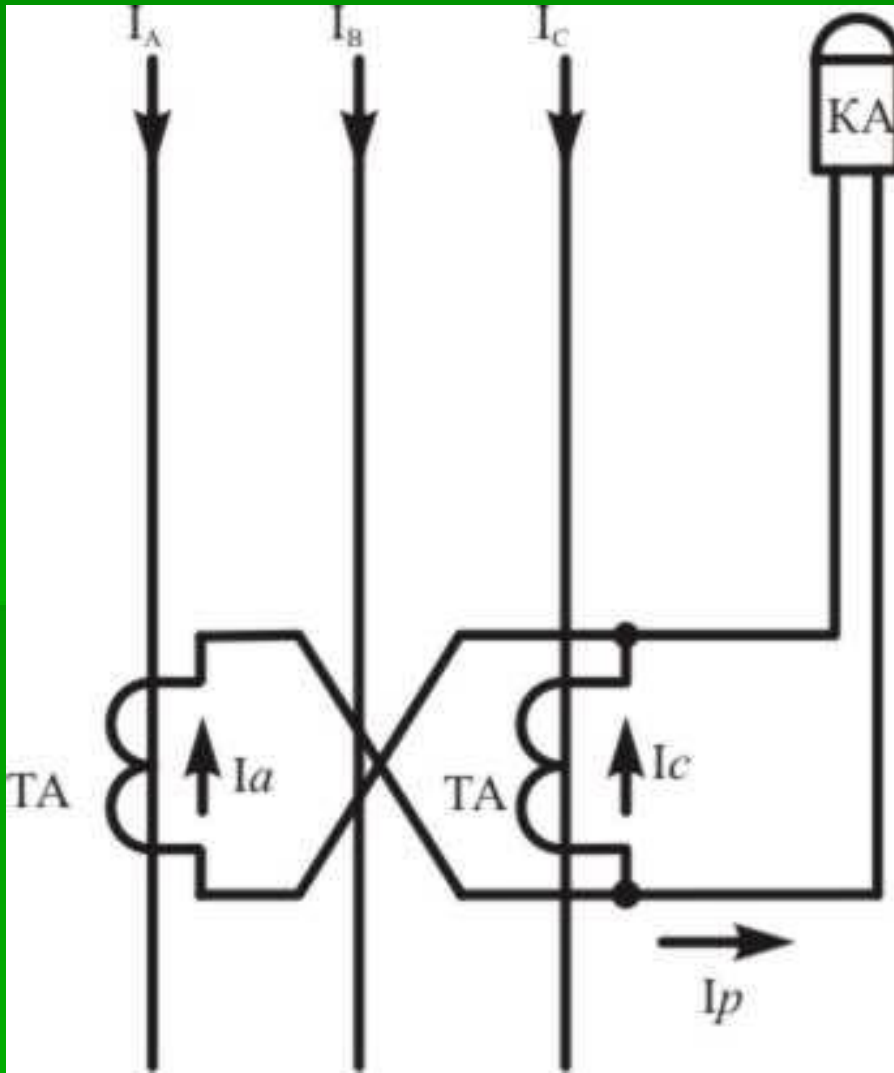
$$I_1 = \frac{I_A}{n_T} - \frac{-I_A}{n_T} = \frac{2I_A}{n_T} = 2I_a \quad I_2 = I_b \quad I_3 = I_a$$

- Таким образом, коэффициент схемы $k_{cx}^{(2)} = 1 - 2$



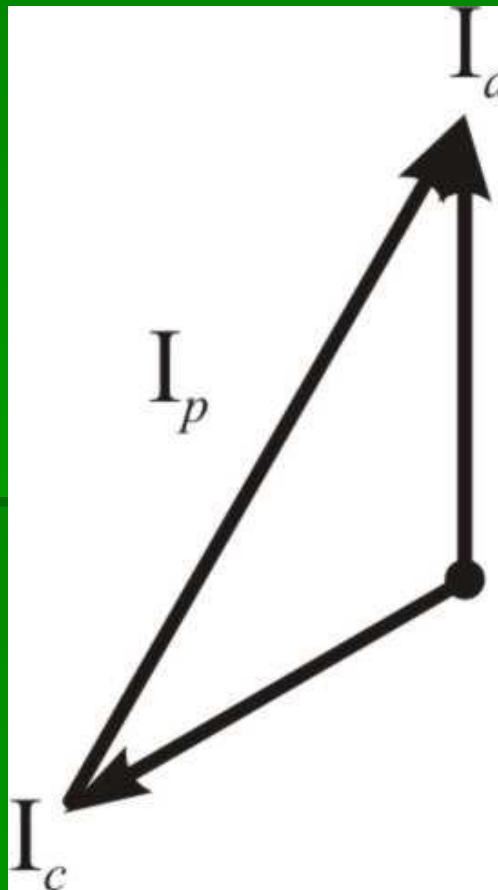
- При однофазном коротком замыкании например фаза А на землю $I_1 = I_a$; $I_2 = 0$; $I_3 = I_a$.
При двухфазном коротком замыкании на землю $k_{cx}^{(1)} = 1$
- Данная схема чувствительна ко всем видам короткого замыкания и применяется для дифференциальных защит трансформаторов.

Схема включения одного реле на разность ТОКОВ ДВУХ ФАЗ

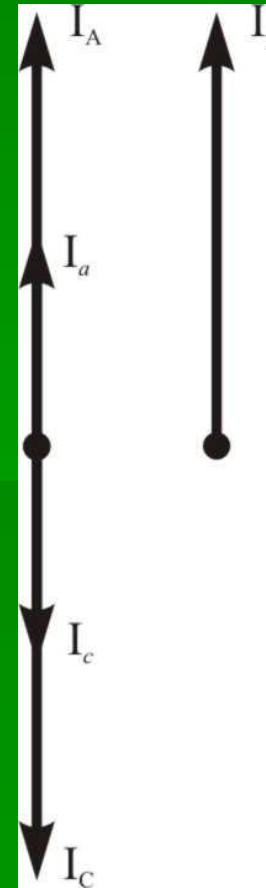


$$I_p = \frac{I_A}{n_T} - \frac{I_C}{n_T} = I_a - I_c$$

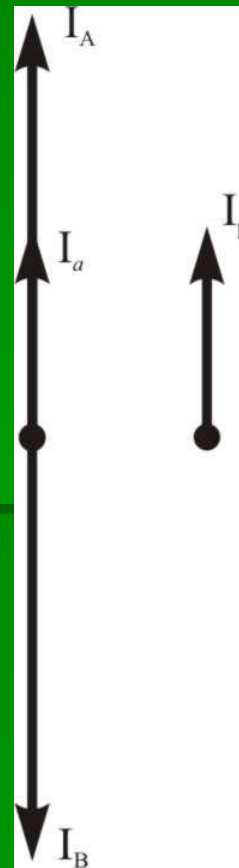
- При трёхфазном коротком замыкании $I_p = \sqrt{3} \cdot I_a$ и сдвинут на 30° таким образом $k_{cx}^{(3)} = \sqrt{3}$.



- При двухфазном коротком замыкании коэффициент схемы зависит от того какие фазы закорочены.
- Если закорочены фазы А и С значит $I_c = -I_a$ и тогда $I_p = 2I_a$ $k_{cx}^{(2)} = 2$



- Если закорочены фазы А и В или В и С через реле проходит ток одной фазы $I_p = I_A$ или $I_p = I_C$ коэффициент схемы в этом случае коэффициент схемы будет равен 1.



- При однофазном коротком замыкании если короткое замыкание произошло на фазе не имеющей трансформатор тока, то в этом случае реле на аварию не реагирует.
- Схема имеет наименьшее число элементов чувствительна ко всем видам короткого замыкания, кроме одного на землю.

Схема включения одного реле на сумму токов трёх фаз

$$I_p = I_a + I_b + I_c = 3I_0$$

Фильтр токов нулевой

последовательности

