

Лекция

# Трансформаторы тока

© Ставропольский  
государственный аграрный  
университет

Ставрополь, 2007

## ■ **Первичные измерительные преобразователи тока**

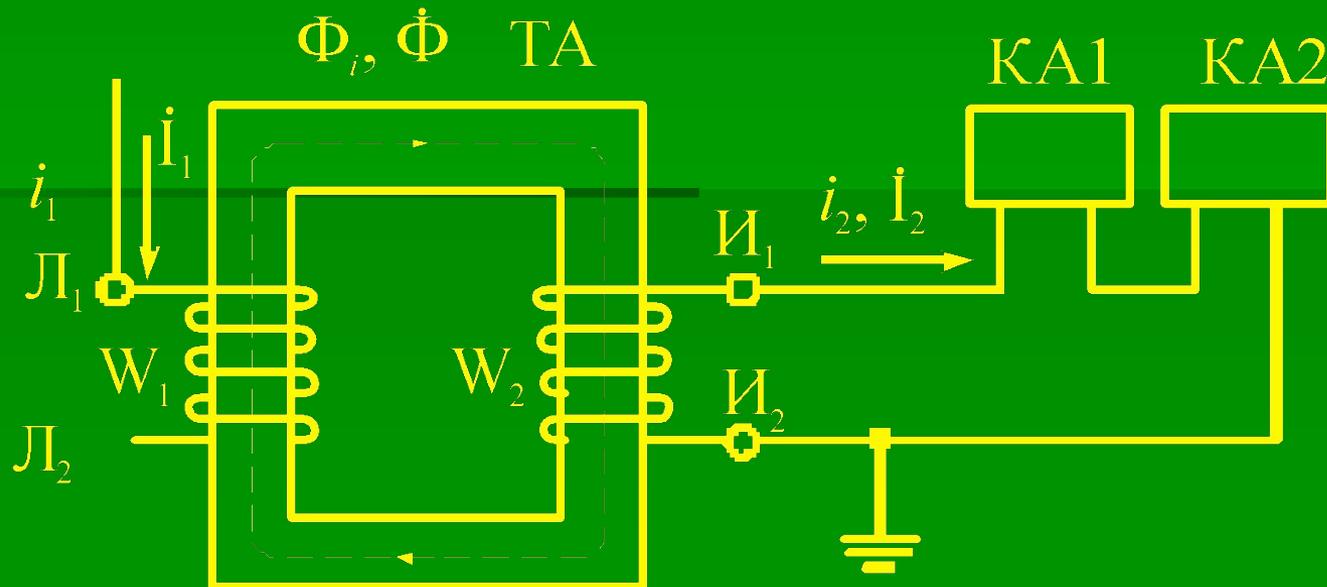
- **К измерительным органам**  
воздействующая величина – ток –  
обычно подводится от первичных  
измерительных преобразователей тока.  
Они обеспечивают изоляцию цепей тока  
измерительных органов от высокого  
напряжения и позволяют независимо от  
номинального первичного тока получить  
стандартное 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  $I_{\text{НОМ}} = 2; 2,5 \text{ А}$ .

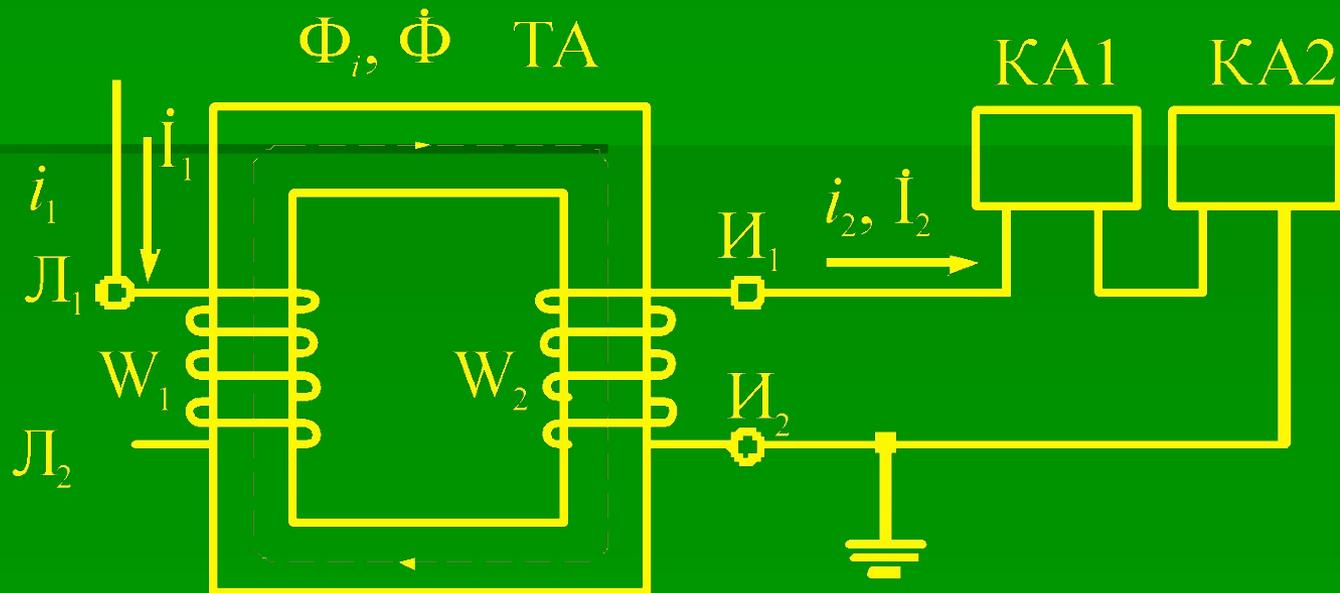
- Трансформаторы тока иногда используют и в сетях напряжением до 1000 В.
- Для правильного действия особенно релейной защиты требуется точная работа трансформаторов тока при токах перегрузки электроустановки и токах к. з., которые во много раз могут превышать их номинальные первичные токи.

- **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.**

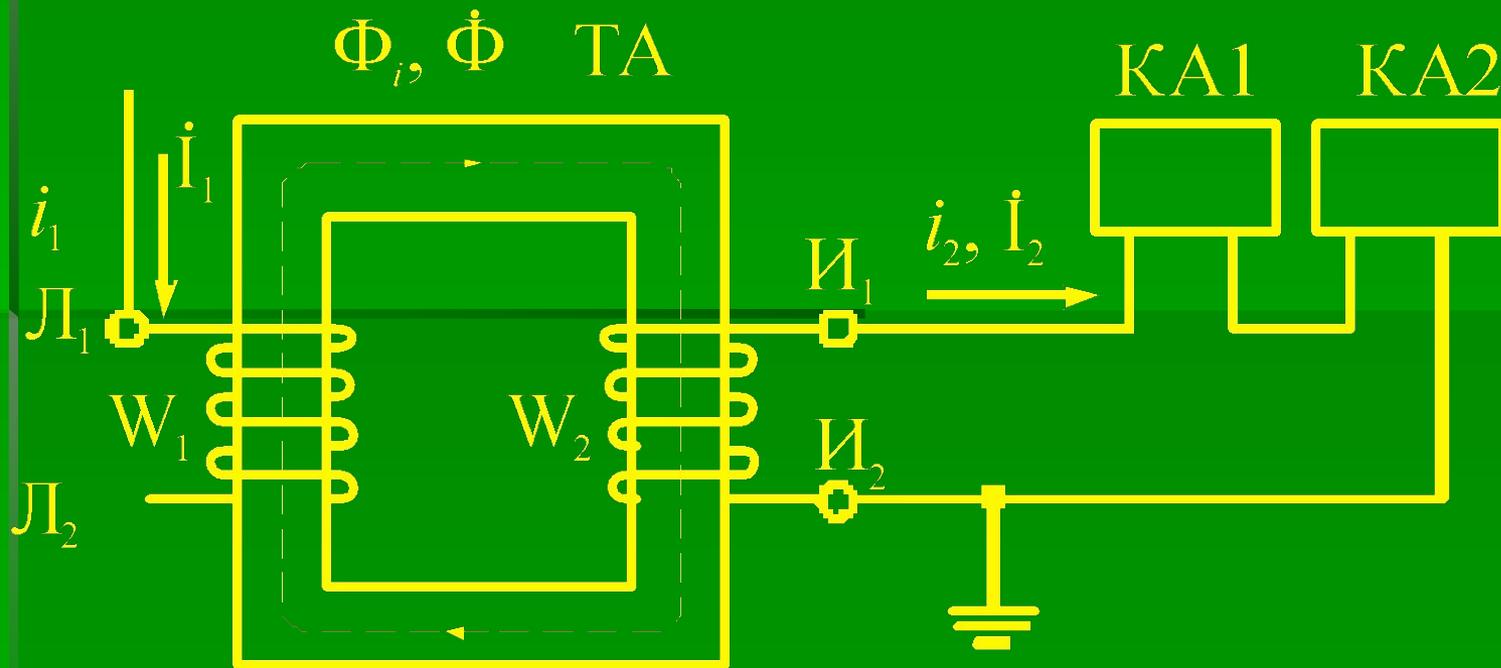
- Первичная обмотка трансформатора ТА с числом витков  $W_1$  включается в цепь первичного тока  $I_1$  сети, а ко вторичной обмотке с числом витков  $W_2$  подключаются цепи тока измерительных органов, например измерительных реле тока КА1, КА2 с относительно малым сопротивлением.



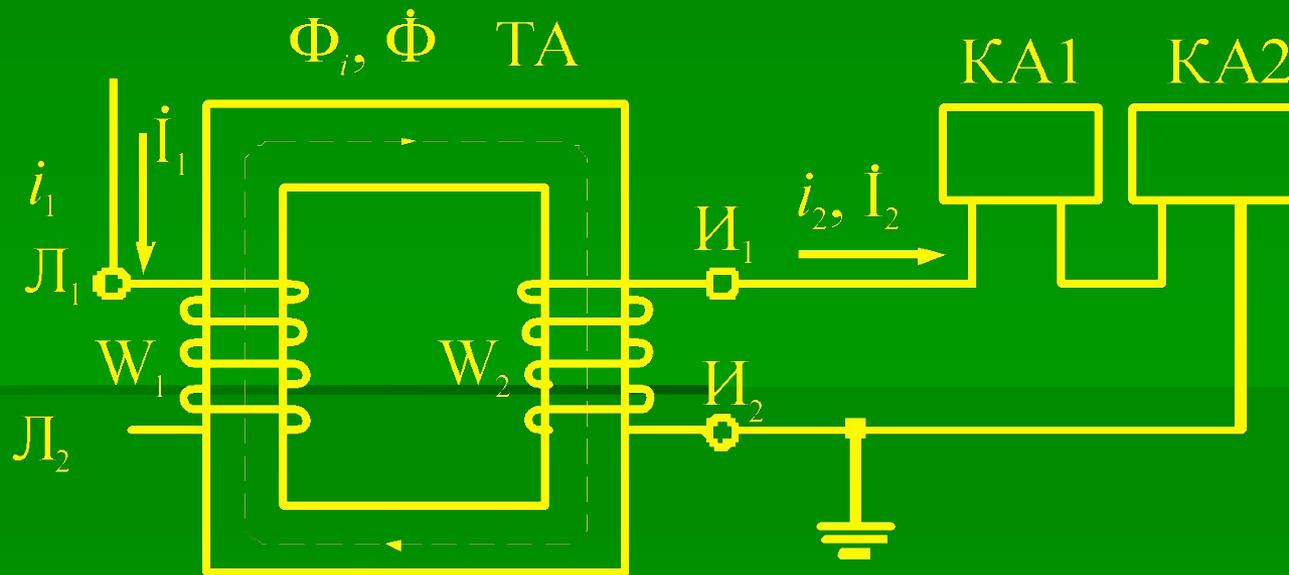
- **Начала и концы обмоток трансформатора тока указываются на их выводах. Выводы первичной обмотки  $L_1$  и  $L_2$  маркируются произвольно, а выводы вторичной обмотки  $I_1$  и  $I_2$  – с учетом принятого обозначения выводов первичной обмотки.**



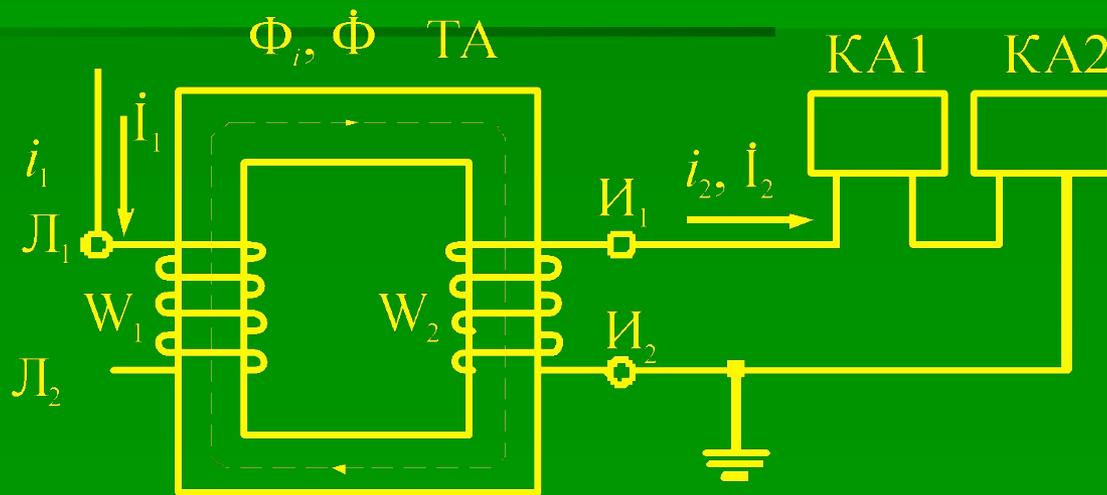
- При этом за начало вторичной обмотки принимается вывод, из которого мгновенный ток  $i_2$  направляется в цепь нагрузки, а в первичной обмотке ток  $i_1$  направлен от начала  $L_1$  к концу  $L_2$ .



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



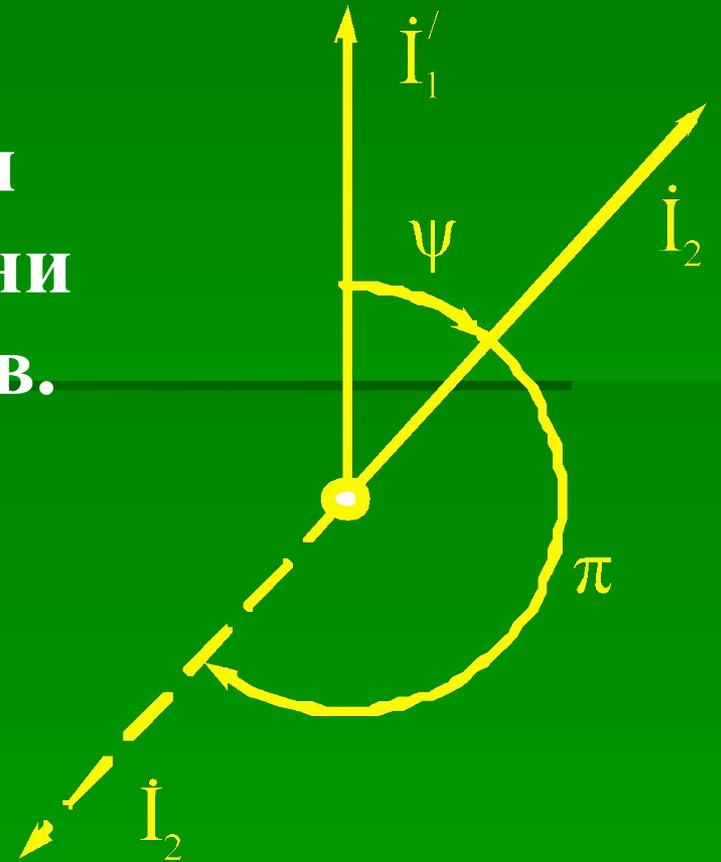
- На рисунке показаны направления токов  $i_1$ ,  $i_2$  для некоторого момента времени и принятой намотки витков. Направление магнитного потока  $\Phi_1$  при заданном направлении тока  $i_1$  определяется по правилу буравчика. Ток  $i_2$  всегда направлен так, что размагничивает магнитопровод.



- **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.**

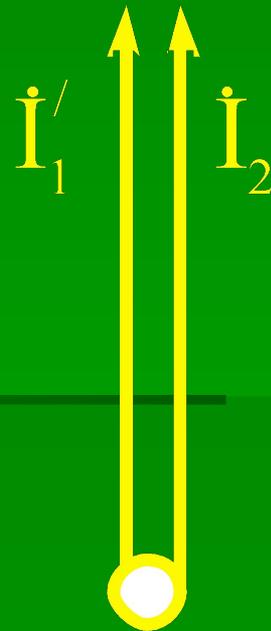
- На рисунке показаны направления токов  $i_1$ ,  $i_2$  для некоторого момента времени и принятой намотки витков.

- Направление магнитного потока  $\Phi_1$  при заданном направлении тока  $i_1$  определяется по правилу буравчика. Ток  $i_2$  всегда направлен так, что размагничивает магнитопровод.



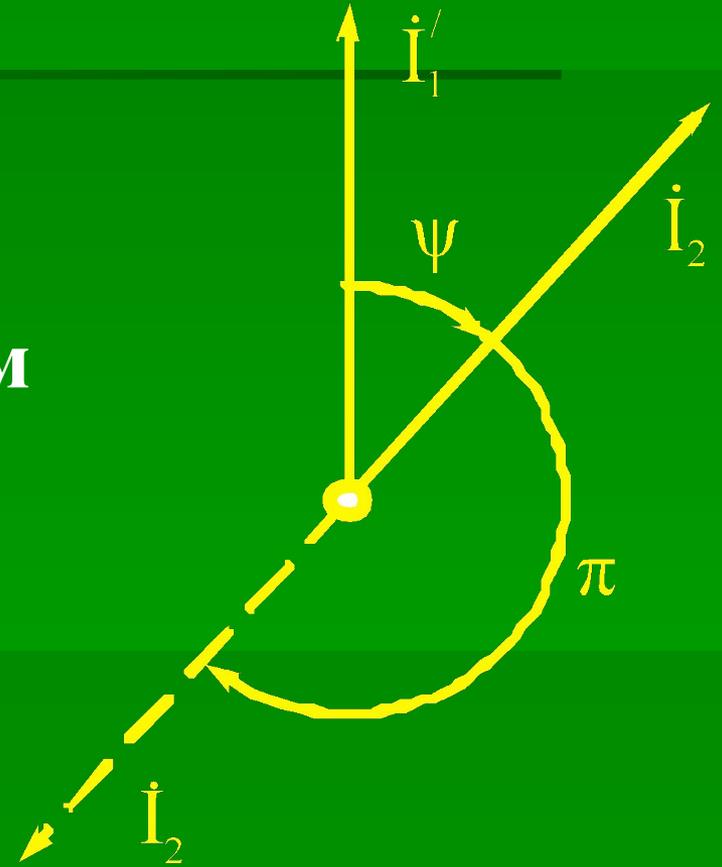
- **Соотношение синусоидальных токов (напряжений, потоков и др.) изображается обычно векторной диаграммой. Векторная диаграмма может быть изображена и имеет определенный смысл только при условии, что для каждой из величин выбрано положительное направление.**

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



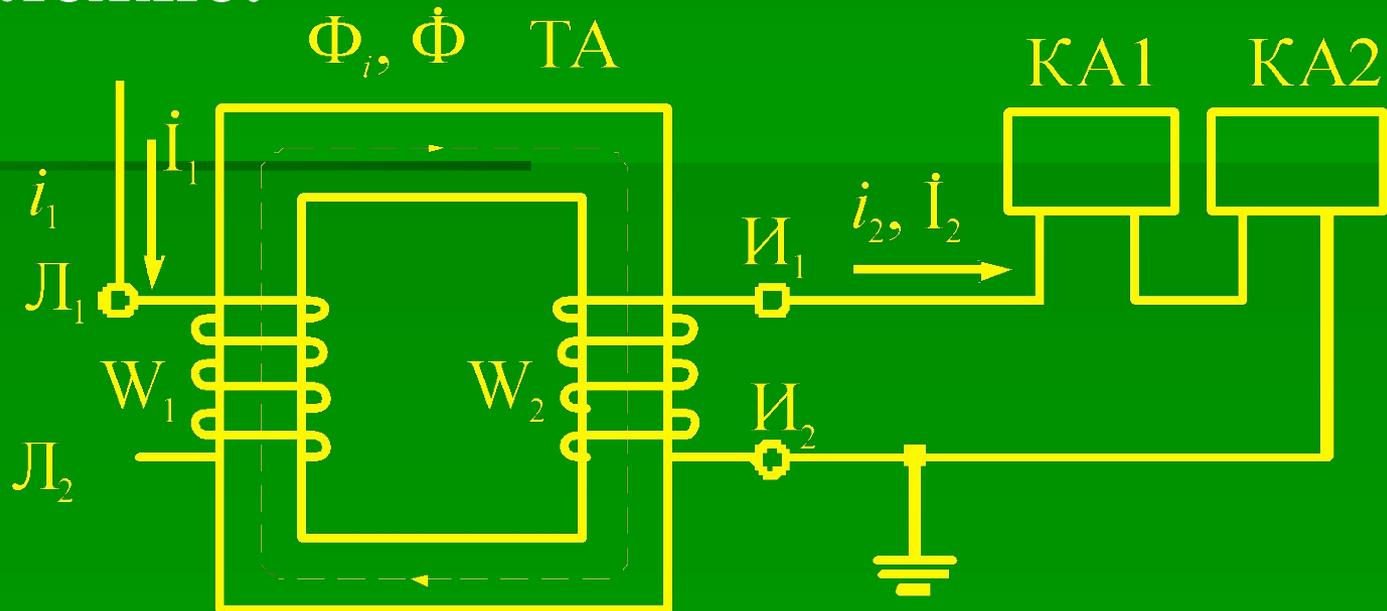
- Однако указанный момент времени становится неопределенным, если неизвестно, какое из двух возможных направлений тока считается положительным.

- Если для одного положительного направления ток отстает по фазе от тока на угол  $\psi$ , 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  $F_{\text{нам}} = 0$ .

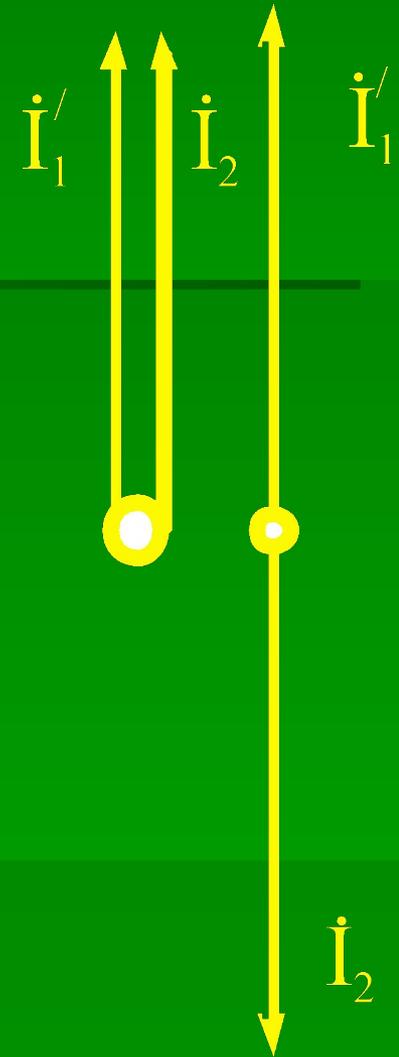
■ При этом

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

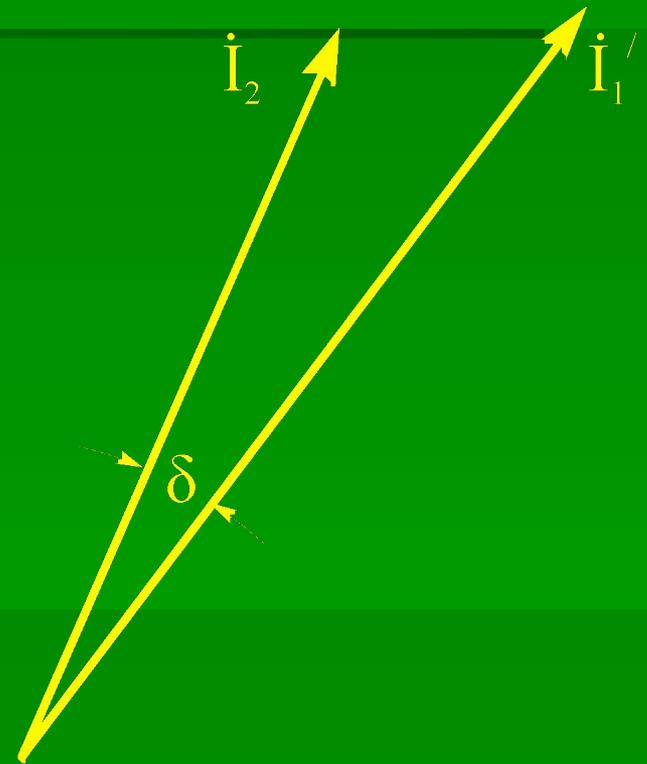
■ 
$$\cdot \quad (3)$$

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

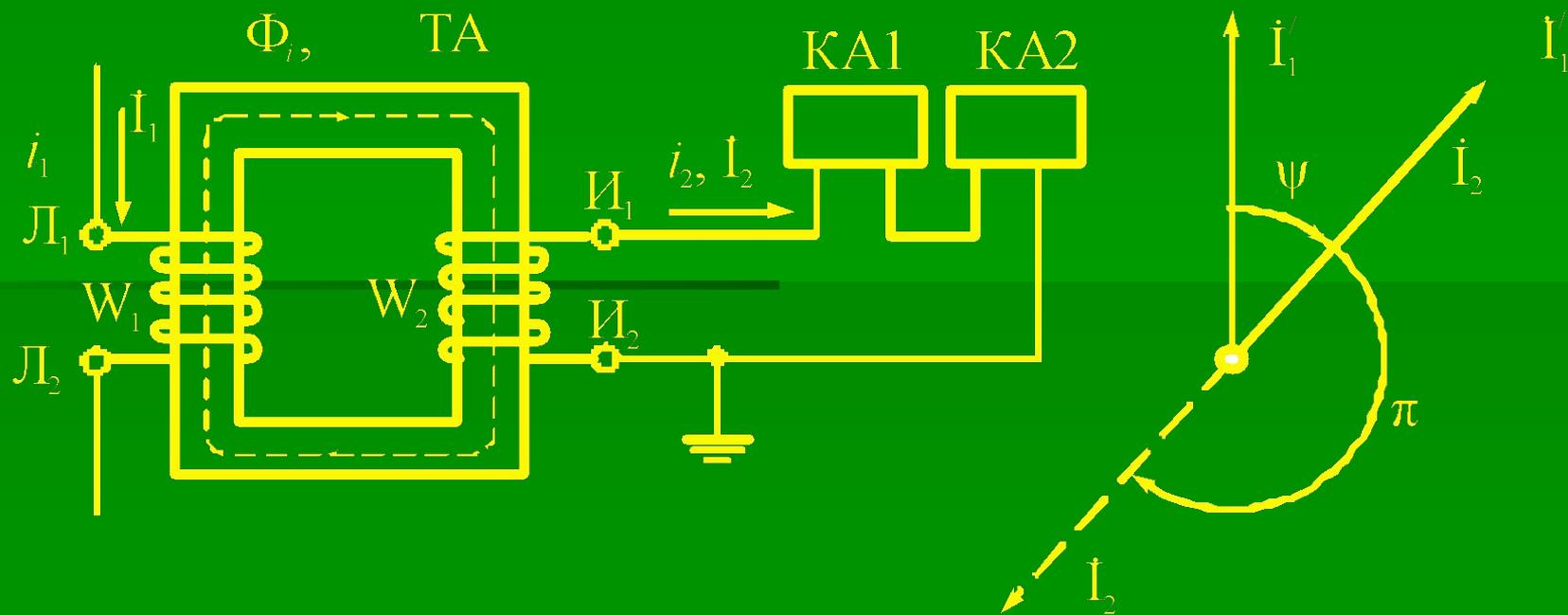
- Токи и равны и совпадают по фазе. На векторной диаграмме они могут быть изображены одним вектором



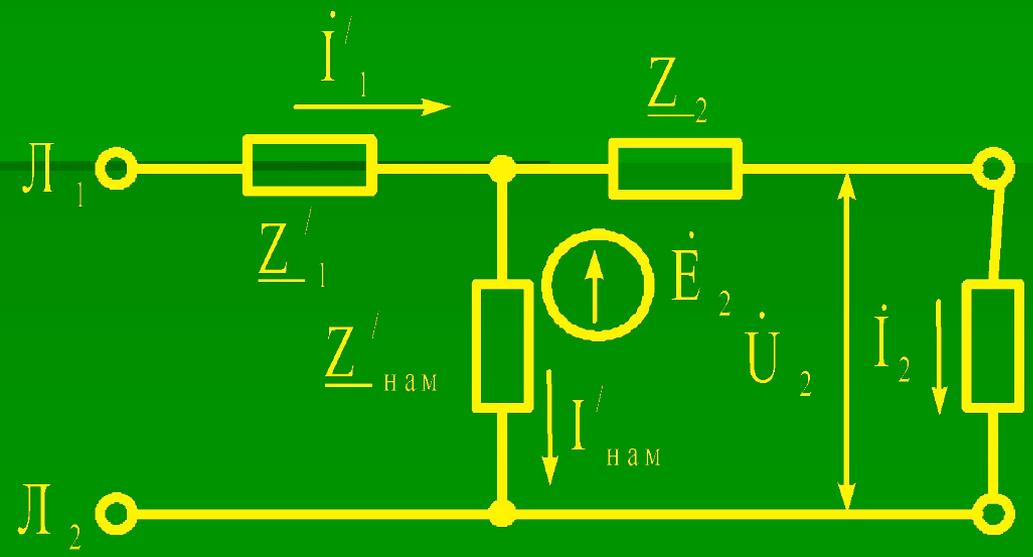
- Если положительное направление токов и принято от начала обмоток к их концам, то МДС обеих обмоток направлены одинаково, а токи и изображаются векторами, сдвинутыми по фазе на угол  $\delta$



- 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

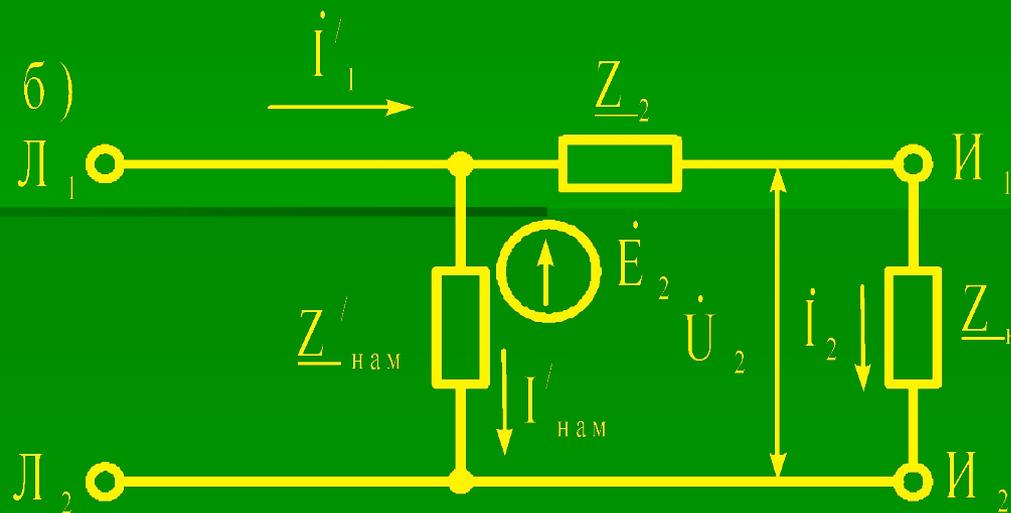
$$I_1 \cdot \frac{W_1}{W_2} = I_2 + I_{нам} \cdot \frac{W_1}{W_2}$$

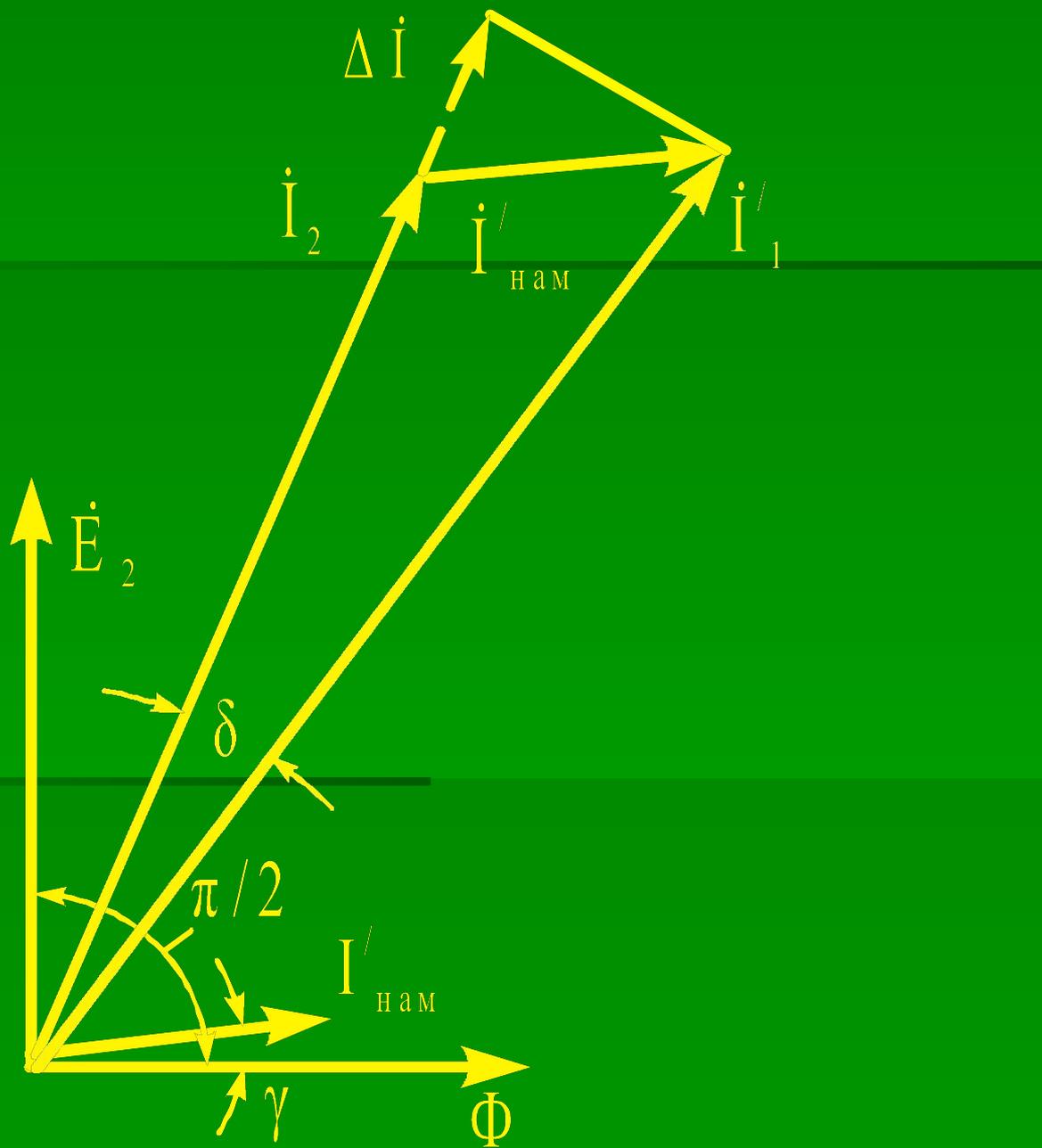
- ИЛИ

$$I_1' = I_2 + I_{нам}'$$

(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



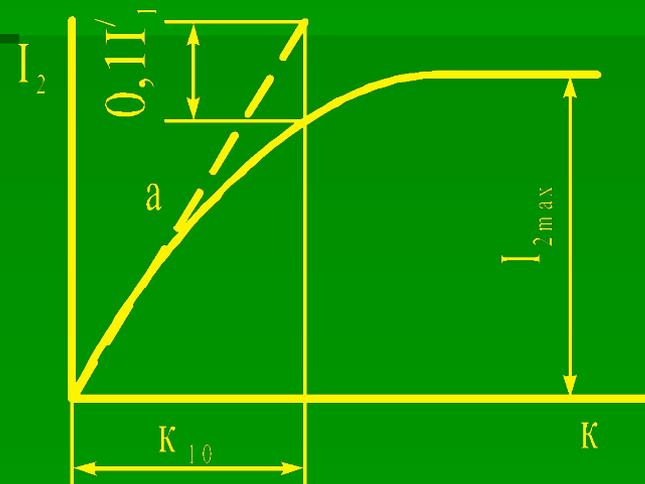


- Из векторной диаграммы видно, что вторичный ток  $I_2$  отличается от приведенного первичного  $I'_1$  как по значению на  $\Delta I$ , так и по фазе на угол  $\delta$ . Ток значительно меньше тока  $I'_1$ , поэтому результирующая МДС  $F_{\text{нам}}$  определяющая рабочий магнитный поток  $\Phi$  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  $\Phi$ .

- 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.**

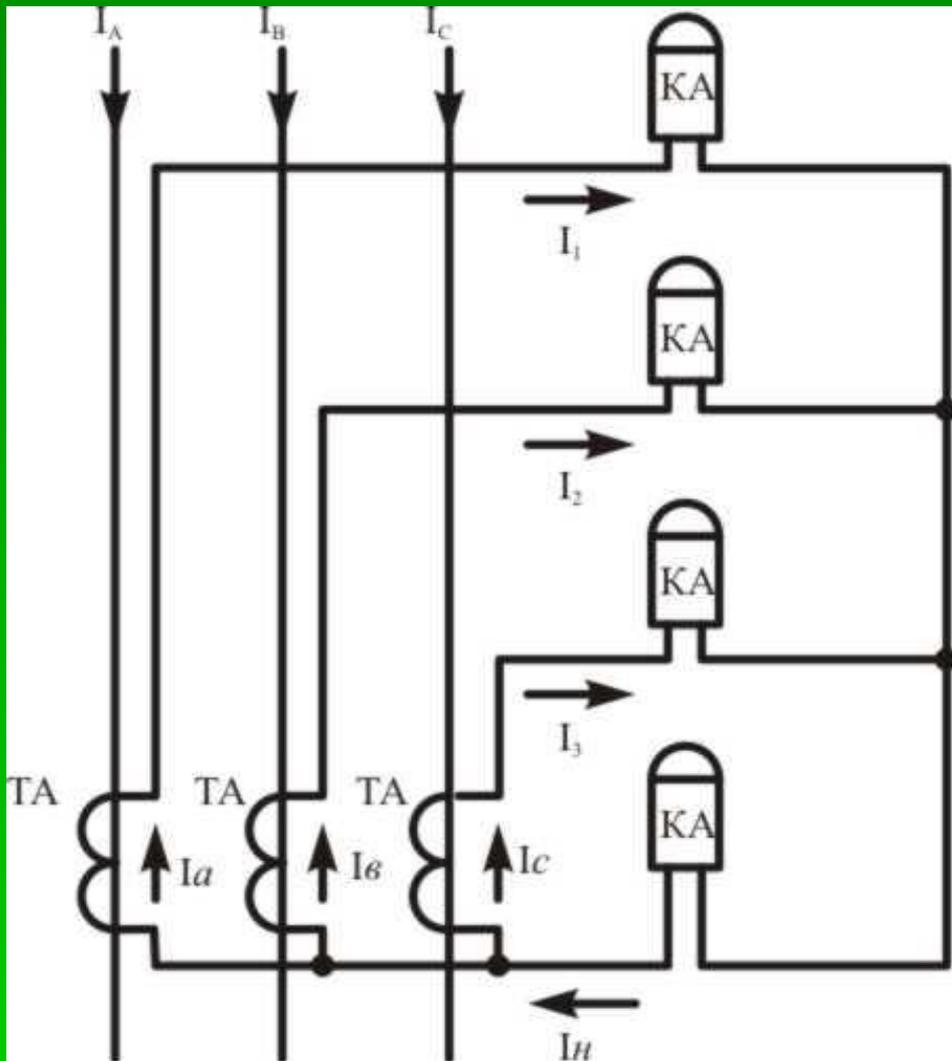
- **Рассмотренные соотношения и векторная диаграмма характерны и для вторичных измерительных трансформаторов тока, которые, как правило, входят в измерительную часть современных устройств защиты, автоматики и телемеханики.**

# 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:

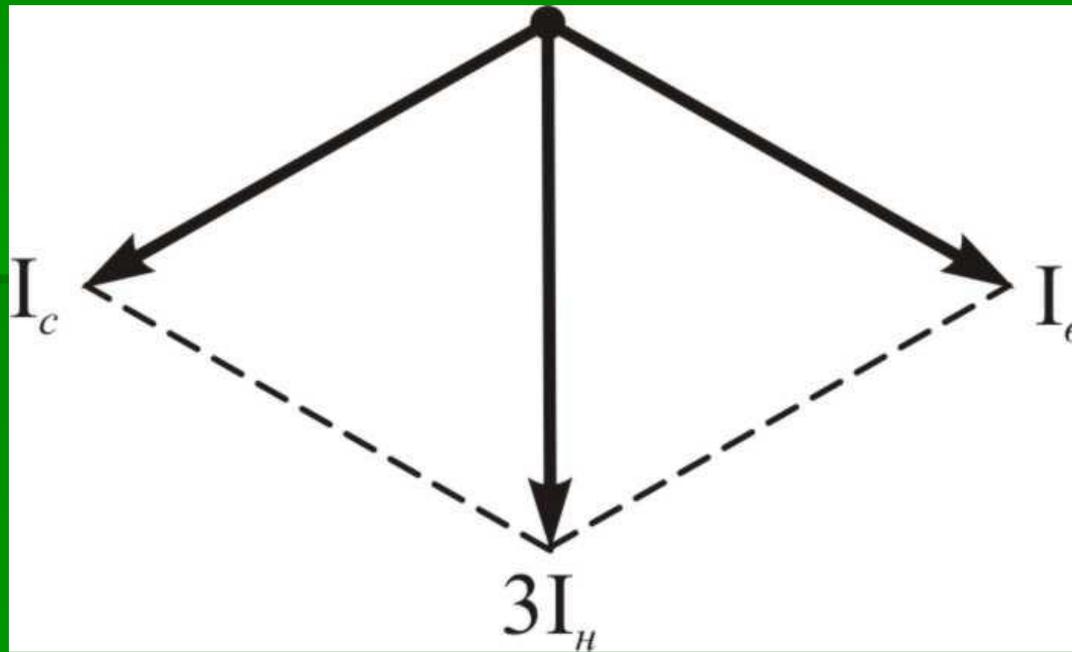
- $I_A = 0; I_a = 0.$

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

- Коэффициент схемы равен 1

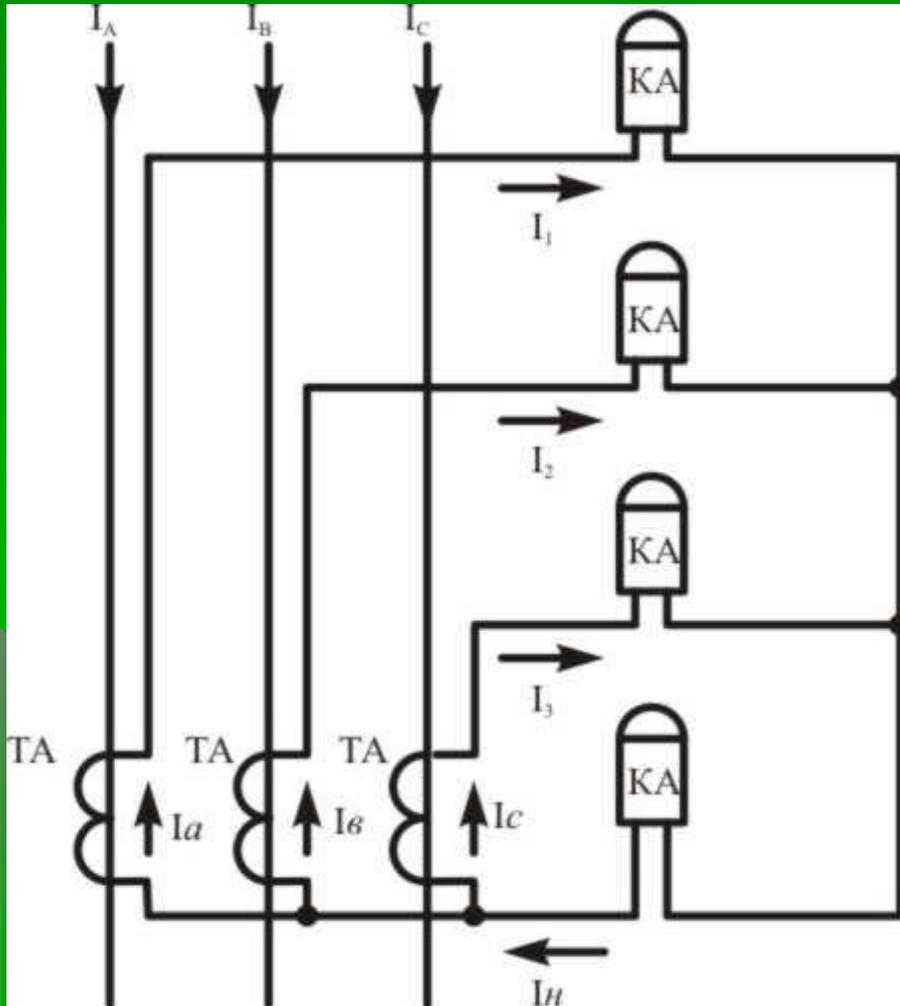


- При двухфазном коротком замыкании на землю через нулевой провод протекают токи нулевой составляющей  $I_H = 1/3(I_B + I_C)$ , то есть  $1/3$  их геометрической суммы. Коэффициент схемы в данном случае будет равен 1.



- 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



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

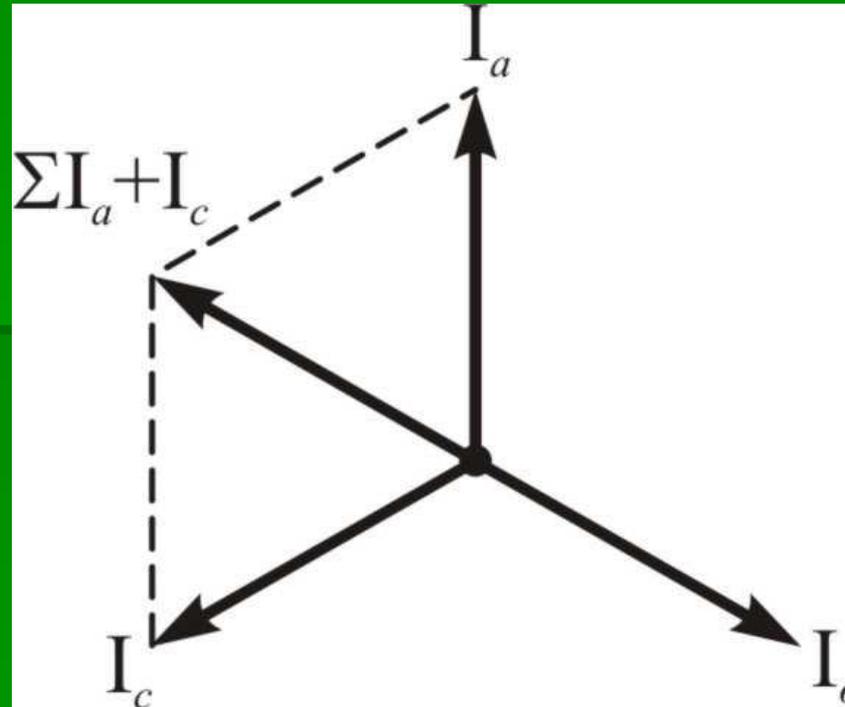
$$I_c = \frac{I_C}{n_T}$$

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

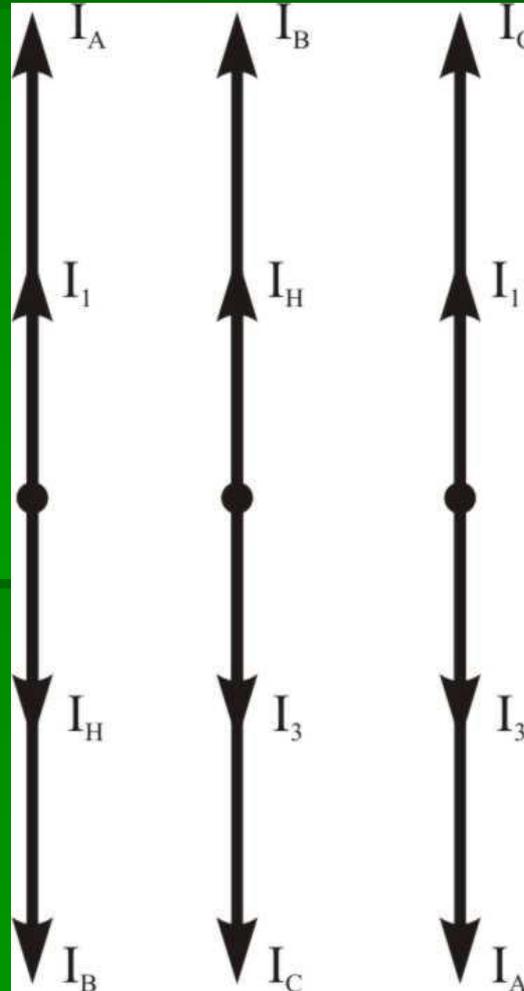
- ,  $I_N = I_a + I_c$

- то есть примерно  $I_b = -I_N$

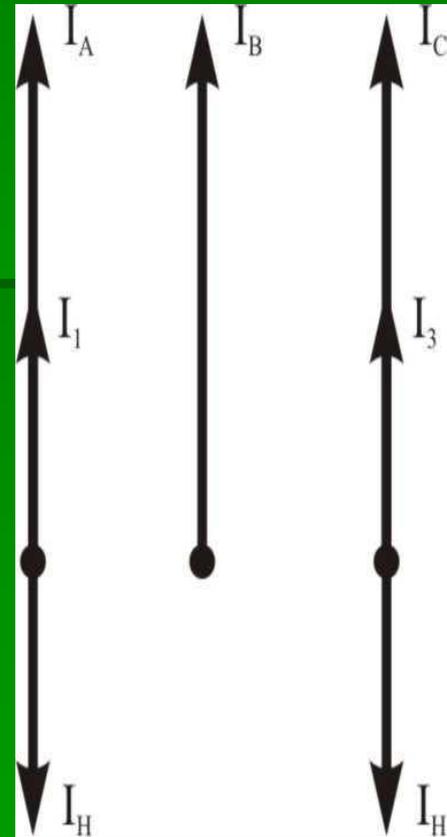
- Таким образом, коэффициент схемы будет равен 1.



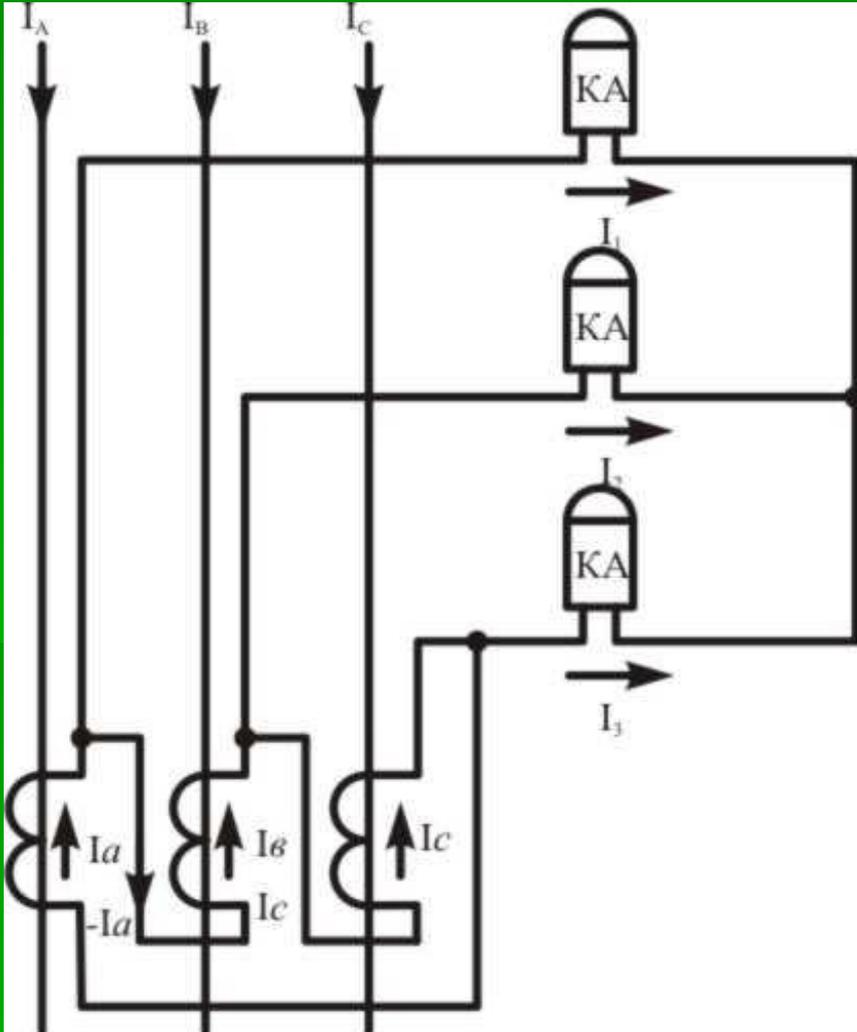
- При двухфазном коротком замыкании фаз А и С  $I_H = 0$ , при замыкании фаз А и В или В и С  $I_B = I_a$  или  $I_B = I_c$ , следовательно, коэффициент схемы равен 1



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.



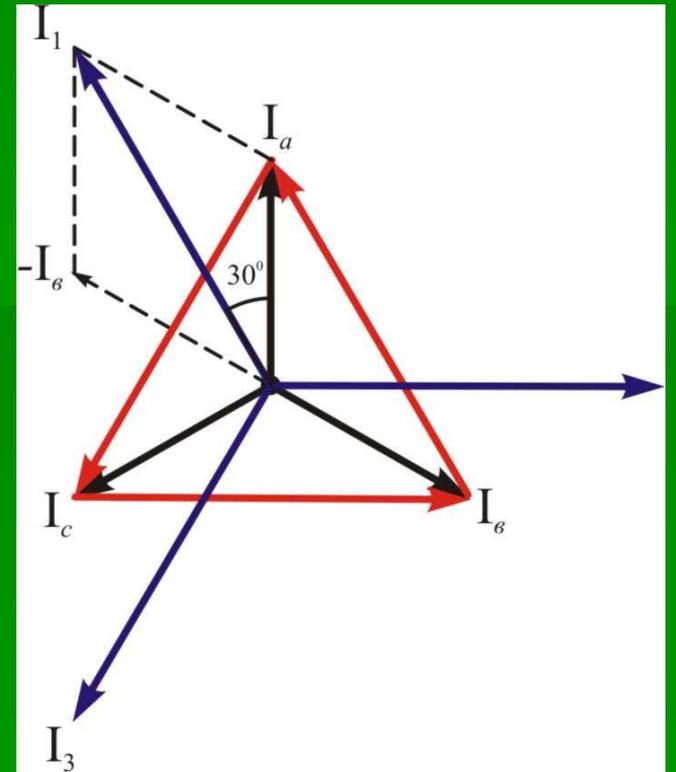
# Схема соединения трансформаторов тока и реле в треугольник, а реле в звезду



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

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

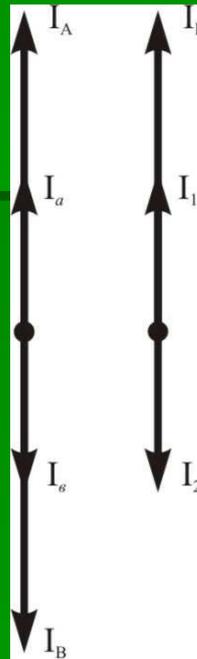
■ Таким образом через реле проходит ток в  $\sqrt{3}$  раз больший и сдвинут на угол  $30^\circ$ . Токи нулевой последовательности не выходят за пределы треугольника.



- 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

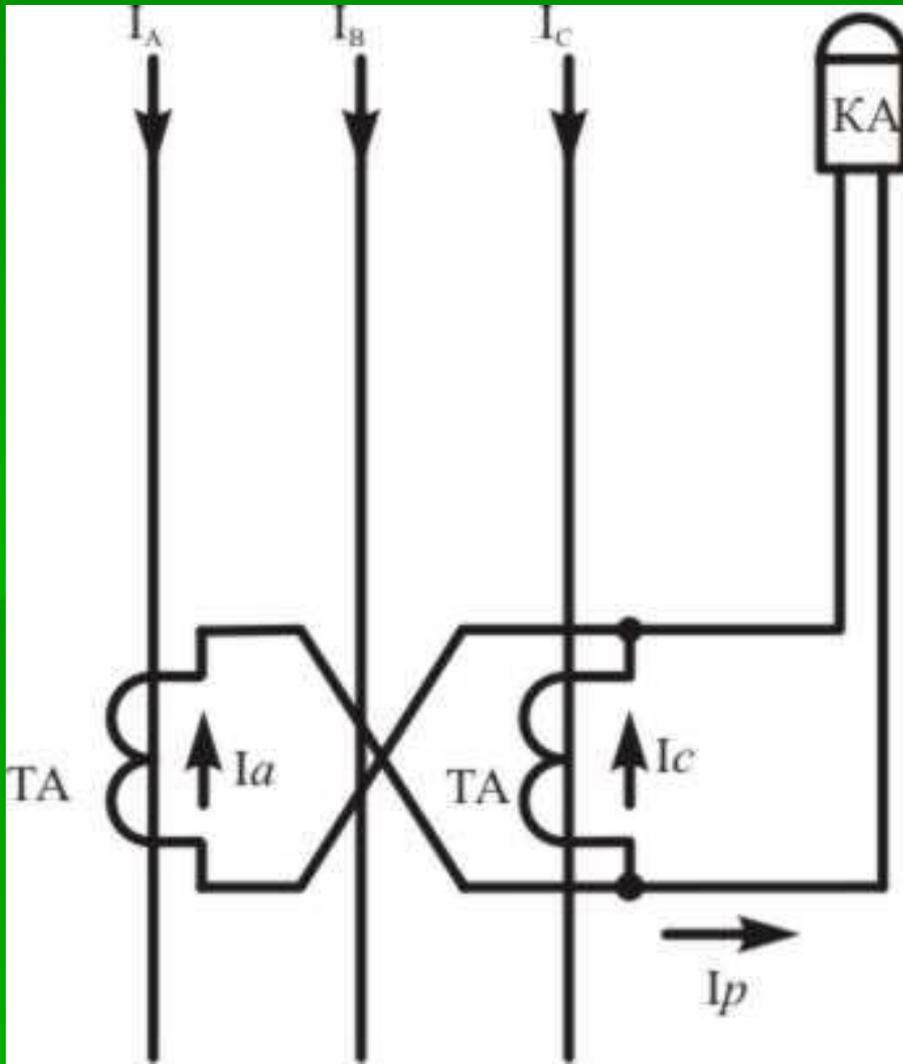
$$I_1 = \frac{I_A}{n_T} - \frac{-I_A}{n_T} = \frac{2I_A}{n_T} = 2I_a \quad I_2 = I_b \quad I_3 = I_a$$

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



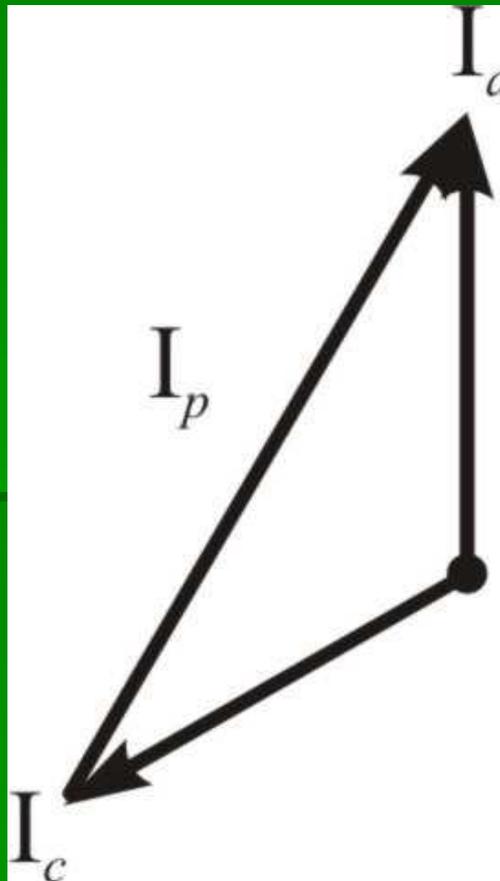
- При однофазном коротком замыкании например фаза А на землю  $I_1 = I_a$ ;  $I_2 = 0$ ;  $I_3 = I_a$ .  
При двухфазном коротком замыкании на землю  $k_{cx}^{(1)} = 1$
- Данная схема чувствительна ко всем видам короткого замыкания и применяется для дифференциальных защит трансформаторов.

# Схема включения одного реле на разность ТОКОВ ДВУХ ФАЗ

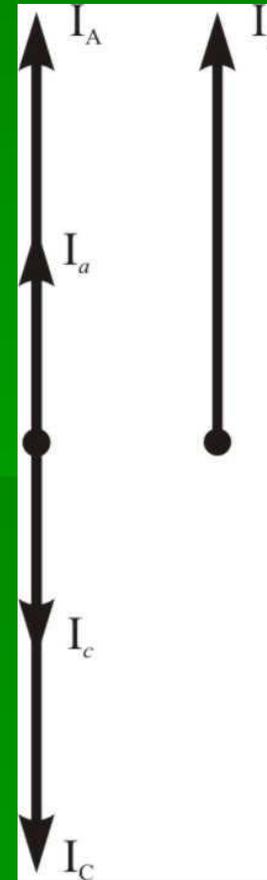


$$I_p = \frac{I_A}{n_T} - \frac{I_C}{n_T} = I_a - I_c$$

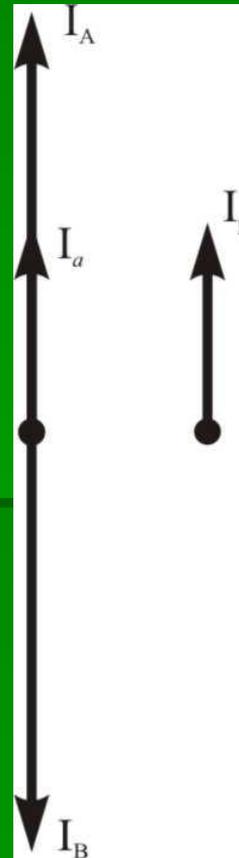
- При трёхфазном коротком замыкании  $I_p = \sqrt{3} \cdot I_a$  и сдвинут на  $30^\circ$  таким образом  $k_{cx}^{(3)} = \sqrt{3}$ .



- 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

