

**Лабораторная работа № 2**  
**СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И**  
**РЕЛЕ**

**Цель работы:** Ознакомиться с основными схемами соединения вторичных обмоток трансформаторов тока и реле, используемых в устройствах релейной защиты и автоматики. Оценить чувствительность этих схем к различным видам К.З.

**Программа работы:**

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием необходимыми для выполнения работы.
2. Опытным путем исследовать распределение токов в реле для основных схем соединения трансформаторов тока и реле при коротком замыкании в месте установки трансформаторов тока. Данные опытов занести в табл. 1.
3. Опытным путем исследовать распределение токов в реле, включенном на разность токов двух фаз, со стороны высшего напряжения трансформатора со схемой соединения  $Y/\Delta-11$ , при К.З. на стороне низшего напряжения.
4. Данные опытов занести в табл. 2.
5. Для тех видов К.З., которые в таблицах 1 и 2 помечены звездочкой, построить векторные диаграммы и на основании этих построений определить токи в реле и коэффициенты схемы.
6. Не проводя опытов построить векторные диаграммы и определить токи в реле для остальных приведенных в таблице 2 схем соединения трансформаторов тока и реле. Полученные данные занести в табл. 2.
7. Для основных схем соединения трансформаторов тока и реле определить расчетные токи в реле при междуфазных К.З. и занести в табл.3.

8. Сделать вывод о целесообразности использования рассмотренных схем в комплектах защит от междуфазных К.З. и от замыканий на землю.

### **Выполнение работы:**

**1) В схему лабораторной установки рис. 1**, представленной на стенде входят:

- понижающий трансформатор 220/36В подключенный к сети 220В рубильником SA1 (на схеме не показан);
- трансформатор напряжения с коэффициентом трансформации равным 1, первичная обмотка которого ( $U_n = 36В$ ) соединена в звезду, а на вторичной обмотке можно получить схемы звезды с нулем или треугольника в зависимости от положения выключателя SA2;
- в фазы А и С низковольтного трансформатора с  $K_u$  со стороны питания, включены трансформаторы тока ТА1;
- со стороны вторичной обмотки этого трансформатора установлены трансформаторы тока ТА2 включенные в фазы А, В и С и специальный трансформатор-фильтр нулевой последовательности ТА3;
- сопротивление  $Z_l$  имитирует сопротивление линии, а с помощью ключей SA4 можно получить нужный вид короткого замыкания. Замыкая и размыкая ключ SA3 можем получить четырехпроводную и трехпроводную электрическую цепь.

Вторичные обмотки трансформаторов тока ТА1, ТА2, ТА3 выведены на лицевую сторону стенда. Кроме того что в состав стенда входят пять амперметров с пределом измерения 0-5А, которые включаются вместо реле при изучении той или иной схемы соединений трансформаторов тока и реле (при этом вторичные обмотки неиспользуемых трансформаторов тока должны быть замкнуты).

Так как напряжение на доступных прикосновению частях ключей SA2,SA3,SA4 не превышает 36В, то все переключения с их помощью можно проводить не отключая рубильника SA1.

Такое устройство стенда позволяет провести испытания основных схем соединения трансформаторов тока и реле в трех и четырехпроводных сетях при коротких замыканиях в местах установки трансформаторов тока и некоторых из этих схем установленных на стороне звезды силового трансформатора Y/Δ-11 при коротких замыканиях на стороне треугольника.

**2) Исследования по пункту 2 программы провести в следующем порядке:**

1. Замкнуть накоротко вторичные обмотки трансформаторов тока ТА1 и ТА3. Ключ SA2 поставить в положение Y. Используя вторичные обмотки трансформаторов тока ТА2 последовательно собрать схемы полной и неполной звезды, схему включения одного реле на разность токов двух фаз, включая вместо реле амперметры установленные на стенде. Производя переключения ключами SA3,SA4, исследовать распределение токов в реле при различных видах К.З. в четырех и трехпроводных сетях. Данные занести в таблицу 1.

2. Замкнуть накоротко вторичные обмотки трансформаторов тока ТА1. Ключ SA2 поставить в положение Y. Используя вторичные обмотки трансформаторов тока ТА2 и амперметры, собрать схему трансформаторного фильтра нулевой последовательности. Подключить к вторичной обмотке трансформатора тока нулевой последовательности ТА3, настольный амперметр, с пределом измерения

0-1А. Исследовать распределение токов в реле этих схем.

Занести результаты измерений в соответствующие графы таблицы 1.

**3) Исследования по пункту 3 программы произвести в следующем порядке:**

Ключ SA2 переключить в положение Δ. Замкнуть накоротко вторичные обмотки трансформаторов тока ТА2 и ТА3. Используя вторичные обмотки трансформатора тока ТА1 и один из амперметров установленных на стенде собрать схему включения одного реле на разность тока двух фаз. Разомкнуть ключ SA3 и провести исследования распределения тока в реле, в соответствии с табл. 2.

Данные занести в таблицу 2.

**4) Выполнение пункта 4 программы рекомендуется провести в следующем порядке:**

1. Изобразить векторную диаграмму токов (при том или ином виде К.3.) на стороне первичных обмоток трансформаторов тока (  $\dot{I}_A$  ;  $\dot{I}_B$  ;  $\dot{I}_C$  ; ).

2. Записать в векторной форме выражение для токов, протекающих в каждом реле, схемы через токи во вторичных обмотках трансформаторов тока (  $\dot{I}_a$  ;  $\dot{I}_b$  ;  $\dot{I}_c$  ).

3. Принять, для простоты направление и величину тока в первичной и вторичной обмотках трансформаторов тока одинаковыми (  $\dot{I}_A = \dot{I}_a = \dot{I}_\phi$  )

Графически решая векторное уравнение определить величину тока в реле.

4. Определить величину коэффициента схемы по следующему выражению:

$$K_{CX} = \frac{I_p}{I_\phi},$$

где  $I_\phi$  – ток, протекающий во вторичной обмотке трансформатора тока (ток фазы).

$I_p$  - ток, протекающий в реле (выраженный через  $\dot{I}_\phi$ ).

- 5) При выполнении пункта 5 программы рекомендуется** выразить величины тока в фазах IA, IB, IC через ток трехфазного К.З.  $I_K^{(3)}$ . Ток в реле в этом случае будет представлен в долях  $I_K^{(3)}$ . Полученный таким образом ток реле, следует занести в табл. 2.
- 6) При выполнении пункта 6 в программе следует** понимать, что за расчетные значения тока в реле принимается наибольших из вторичных токов, проходящий хотя бы в одном из реле защиты, при наиболее неблагоприятном виде К.З. Для упрощения практических расчетов все токи в табл. 3 следует выразить через ток трехфазного К.З. Данными табл. 3 можно будет воспользоваться в дальнейшей работе при определении коэффициентов чувствительности максимальных токовых защит (МТЗ) и дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ).
- 7) Для вывода о целесообразности** использования рассмотренных схем в комплектах защит при различных видах К.З. в распределительных сетях следует учесть целый ряд факторов: назначение защиты, вид повреждений, на которые должна реагировать защита, требования, предъявляемые к чувствительности защиты, простота выполнения и эксплуатация.

Таблица 1

Распределение токов в реле при коротких замыканиях в месте установки трансформаторов тока.

Схема соединения т.т. и реле	Вид К.З.	Токи реле			
		КА I	КА II	КА III	КА IV
1	2	3	4	5	6
1. Полная схема звезда с четырьмя реле.	ABCO* ABO* BCO CAO AO* BO CO ABC* AB BC* CA				
2. Неполная звезда с тремя реле (третье реле включено в обратный провод).	ABCO* ABO* BCO CAO* AO* BO CO ABC* AB* BC CA*				
3. Схема включения одного реле на разность токов двух фаз.	ABCO* ABO* BCO CAO* AO* BO* CO ABC AB* BC CA*				

1	2	Токи реле			
		КА I	КА II	КА III	КА IV
4.Трехтрансформаторный фильтр нулевой последовательности.	АВСО* АВО* АО* АВС* АВ*				
5.Трансформатор тока нулевой последовательности	АВСО АВО АО АВС АВ				

Таблица 2

Распределение токов реле установленных на стороне звезды силового трансформатора со схемой Y/Δ-11 при К.З. на стороне треугольника

1	2	Токи реле			
		КА I	КА II	КА III	КА IV
1.Схема включения одного реле на разность токов двух фаз	АВС АВ* ВС СА				
2.Неполная звезда с тремя реле.	АВС* АВ* ВС СА*				
3.Треугольник с тремя реле.	АВС* АВ* ВС СА*				

Формулы для определения расчетных токов в реле для типовых схем соединения трансформаторов тока и реле при двухфазных К.З.

Схема соединения т.т. и реле	Ксх <sup>(3)</sup>	Токи в реле при двухфазном К.З.	
		В месте установки защиты или за трансформатором Y/Y	За трансформатором Y/ $\Delta$ -11
1. Полная звезда			
2. Неполная звезда с тремя реле			
3. Неполная звезда с двумя реле			
4. Треугольник с тремя реле			
5. Треугольник с двумя реле			
6. Схема включения одного реле на разность токов двух фаз А и С			

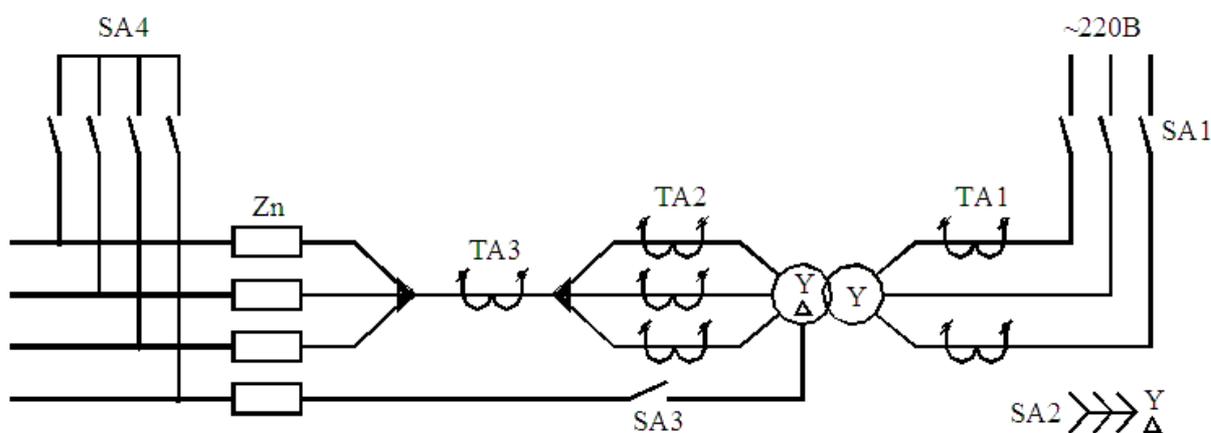


Рис. 1. Схема лабораторного стенда.

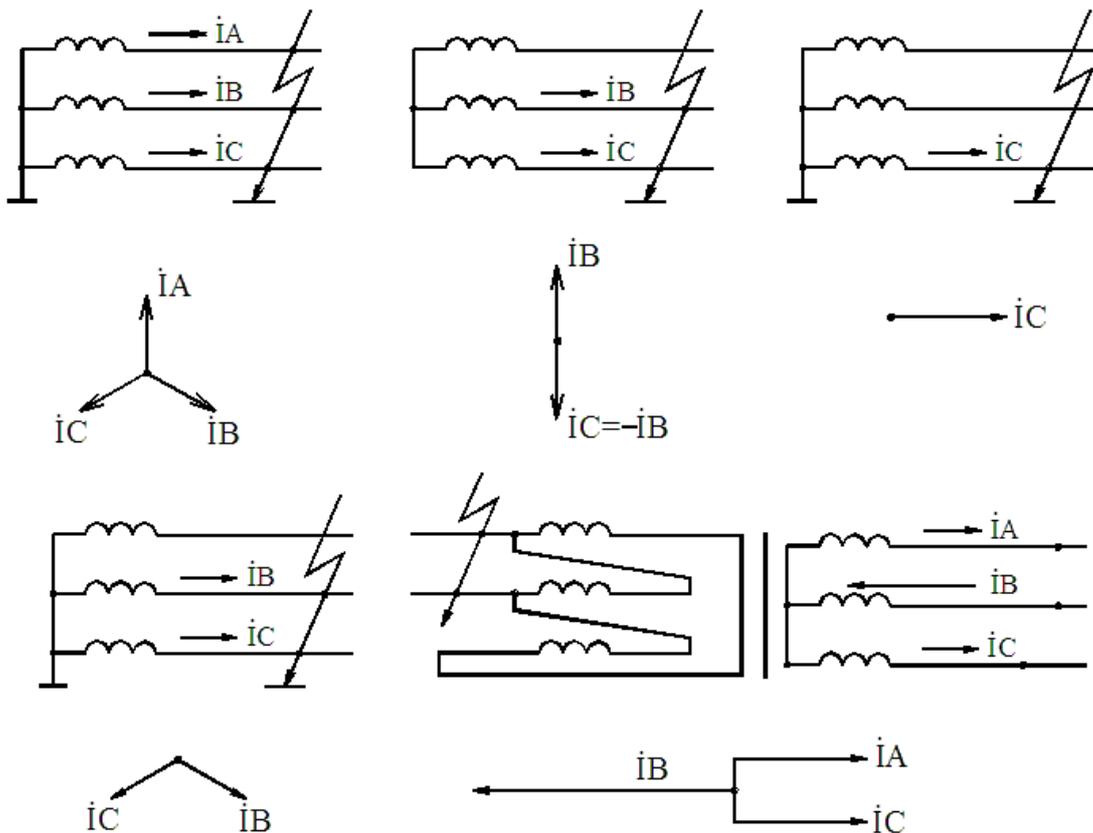


Рис. 2. Векторные диаграммы токов с первичной стороны при разных видах К.З.

### Краткие теоретические сведения

#### Первичные токи в электрических сетях при коротких замыканиях.

Наиболее опасными повреждениями в системах электроснабжения являются короткие замыкания. В системах с заземленной нейтралью различают следующие виды коротких замыканий: трехфазное, двухфазное и однофазное замыкание на землю или нулевой провод. В системах с изолированной нейтралью основные повреждения – это замыкания трехфазные и двухфазные.

На понижающих трансформаторах короткое замыкание может произойти как на выводах высшего напряжения (со стороны питания) так и на выводах низшего напряжения (за трансформаторами). Так как защита устанавливается в начале защищаемого участка, то численные значения и

фазные соотношения токов К.З. проходящих через защиту могут существенно отличаться друг от друга.

Трехфазные короткие замыкания составляют примерно 5%. При коротком замыкании в месте установки защиты фазные токи протекающие по первичным обмоткам трансформаторов тока одинаковы по величине и сдвинуты относительно друг друга на  $120^\circ$  (звезда токов). Ток короткого замыкания в этом случае равен току трехфазного К.З.  $I_k = I_k^{(3)}$ .

Двухфазные короткие замыкания на нулевой провод составляет примерно 20%. При этом виде К.З. ток неповрежденной фазы отсутствует. Токи поврежденных фаз одинаковы по величине и сдвинуты относительно друг друга на  $120^\circ$ . Ток короткого замыкания равен току трехфазного К.З.  $I_k = I_k^{(3)}$ .

При двухфазном коротком замыкании токи повреждения проходят только в двух замкнутых фазах. Их величины равны между собой, а векторы сдвинуты на  $180^\circ$ . Для распределительных сетей значение этих токов можно считать равным  $I_k^{(2)} = \sqrt{3}/2 I_k^{(3)}$ . Такие короткие замыкания составляют примерно 20% от всех видов К.З.

Короткие замыкания на землю (нулевой провод) составляют примерно 60%. При таких коротких замыканиях по поврежденной фазе протекает утроенный ток нулевой последовательности.  $I_k^{(1)} = 3I_0$ , а токи в неповрежденных фазах отсутствуют.

Векторные диаграммы токов со стороны первичных обмоток Т.Т. для этих случаев показаны на рис.2.

Если трансформатор со схемой соединения  $Y/\Delta-11$  работают с глухозаземленной нейтралью, то при однофазном К.З. на землю на выводе обмотки трансформатора со стороны питания по всем трем фазам трансформатора протекают равные токи К.З. в несколько раз превышающие номинальный ток трансформатора. Объясняется это тем, что ток однофазного К.З.  $I_k^{(1)}$ , выходящий из глухозаземленной нейтрали

трансформатора, должен распределиться между тремя фазами звезды обязательно поровну, поскольку в соответствующих фазах обмотки низшего напряжения (соединенной в треугольник) проходят также равные между собой токи К.З.

Таким образом, через понижающий трансформатор с глухозаземленной нейтралью проходят токи при однофазном К.З. в питающей сети. Исходя из этого, приходится принимать специальные меры, чтобы защита трансформатора не реагировала на такие повреждения в питающей линии.

Особым случаем является распределение токов на сторонах силового трансформатора со схемой соединения Y/Δ-11 при двухфазном К.З. на стороне треугольника (за трансформатором).

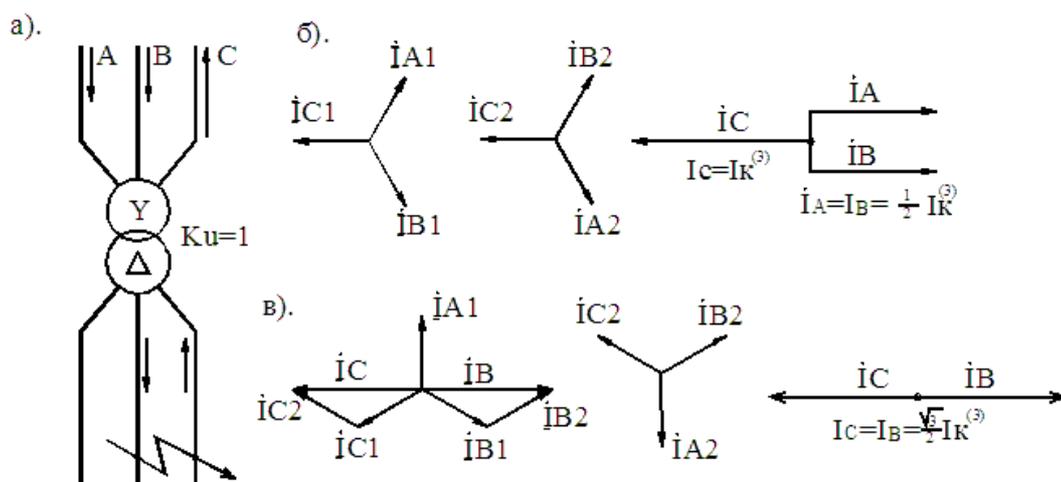


Рис. 3 Распределение токов и векторные диаграммы при К.З. за трансформатором Y/Δ-11.

- а) поясняющая схема распределение токов на сторонах ВН и НН.
- б) векторные диаграммы токов прямой и обратной последовательности и полных токов на сторонах ВН и НН соответственно.

Для определения распределения токов воспользуемся методом симметричных составляющих, согласно которому любую

несимметричную систему векторов можно представить в виде системы векторов прямой обратной и нулевой последовательности.

Аналитически это можно записать следующим образом:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{AO},$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{BO},$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{CO},$$

$$\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C,$$

где:  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  - векторы полных токов;

$\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{B1}, \dot{I}_{C1}$  - векторы токов прямой последовательности;

$\dot{I}_{A2}, \dot{I}_{B2}, \dot{I}_{C2}$  - векторы токов обратной последовательности;

$\dot{I}_{AO}, \dot{I}_{BO}, \dot{I}_{CO}$  - векторы токов нулевой последовательности.

Рассмотрим короткое замыкание фаз В и С на стороне треугольника. При таком виде КЗ ток фазы А отсутствует  $\dot{I}_A=0$ , также отсутствует составляющая нулевой последовательности, а значения векторов прямой и обратной последовательности равны между собой и составляют половину тока трехфазного К.З.  $I_1^{(2)} = I_2^{(2)} = 1/2 \cdot I_K^{(3)}$ .

Произведем геометрическое сложение векторов токов прямой и обратной последовательности на стороне НН. Векторы токов фаз В и С будут сдвинуты относительно друг друга на  $180^\circ$  и равны между собой и их величины составят  $\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_K^{(3)}$ , т.е.  $I_B^{(2)} = I_C^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_K^{(3)}$ .

Построим векторную диаграмму полных токов на стороне ВН. Из-за наличия углового сдвига между векторами тока на сторонах НН и ВН в  $30^\circ$  повернем диаграмму токов прямой последовательности стороны НН на  $-30^\circ$  (по часовой стрелке), а векторную диаграмму токов обратной последовательности стороны НН повернем на  $+30^\circ$  (против часовой стрелки).

В результате получим векторные диаграммы токов прямой и обратной последовательности на стороне ВН. Используя метод симметричных составляющих запишем векторные уравнения для полных токов фаз А, В, С на стороне ВН.

$$\dot{I}_O = 0,$$

$$\dot{I}_{AO} = \dot{I}_{BO} = \dot{I}_{CO} = 0,$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2},$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2}$$

В результате геометрического сложения векторов прямой и обратной последовательности получим, что в одной из фаз (фаза С рис.3) звезды значение тока в два раза больше, чем в других фазах(фазы А и В рис.3) и равно току трехфазного К.З. ( $I_C = I_k^{(3)}$ ). При этом векторы большего тока и двух меньших направлены в противоположные стороны.

### **Типовые схемы соединения трансформаторов тока и реле.**

При выполнении защиты элементов электрических сетей используются типовые схемы соединения трансформаторов тока и реле. К основным из них относят схемы полной и неполной звезды, включения реле на разность токов двух фаз, схема соединения обмоток трансформаторов в треугольник и обмоток реле в звезду, включение обмотки реле на сумму токов трех фаз (фильтр токов нулевой последовательности).

От характера распределения токов во вторичных обмотках трансформаторов тока и реле в нормальных и аварийных режимах зависит правильная работа устройств релейной защиты и автоматики. В общем случае токи протекающие в реле ( $I_p$ ) и токи протекающие во вторичных обмотках трансформаторов тока (токи в фазе  $I_f$ ) неодинаковы

Отношение этих токов называется коэффициентом схемы

$$K_{CX} = \frac{I_P}{I_\Phi}$$

Величина коэффициента схемы учитывается при определении параметров защиты и ее чувствительности. Согласно ПУЭ чувствительность защит, реагирующих на величины, возрастающие в условиях повреждения определяются, как отношение расчетных значений этих величин при металлическом К. З. в пределах защищаемой зоны к параметрам срабатывания защит.

Для токовых защит коэффициент чувствительности можно определить следующим образом

$$K_\chi = \frac{I_P}{I_{YP}}$$

где:  $I_P$  – расчетное значение тока в реле при наиболее неблагоприятном виде повреждения в конце защищаемой зоны.

$I_{ур}$  - ток уставки реле.

Переходя к первичным токам, и учитывая определение коэффициента схемы, получим:

$$K_\chi = \frac{I_{K\min} / n_T}{\frac{I_{C3} \cdot K_{CX}^{(3)}}{n_T}} = \frac{I_{K\min}}{I_{C3} \cdot K_{CX}^{(3)}}$$

, где:  $I_{K\min}$  - наименьшее значение тока в реле в минимальном режиме работы системы,

$I_{C3}$  - расчетное значение тока срабатывания защиты,

$K_{CX}^{(3)}$  - величина коэффициента схемы в симметричном режиме.

$n_T$  - коэффициент трансформации трансформатора тока.

Если учесть, что в распределительных сетях с.х. назначения наименьшим значением тока является значение двухфазного тока при К.З. в конце защищаемой зоны, получим

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{К min}}^{(2)} \cdot K_{\text{СХ}}^{(2)}}{I_{\text{СЗ}} \cdot K_{\text{СХ}}^{(3)}}$$

где  $I_{\text{К min}}^{(2)}$  - наименьшее значение тока К.З в минимальном режиме работы системы;

$K_{\text{СХ}}^{(2)}$  - значение коэффициента схемы при двухфазном К.З.

В общем случае коэффициент чувствительности защиты определяется по выражению:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{К min}}^{(n)} \cdot K_{\text{СХ}}^{(n)}}{I_{\text{СЗ}} \cdot K_{\text{СХ}}^{(m)}}$$

где  $I_{\text{К min}}^{(n)}$  - расчетный вид повреждения по которому определяется чувствительность защиты;

$K_{\text{СХ}}^{(n)}$  - коэффициент схемы при расчетном виде повреждения;

$I_{\text{СЗ}}$  – ток срабатывания защиты;

$K_{\text{СХ}}^{(m)}$  - коэффициент схемы в симметричном режиме.

При расчете защит проектировщики используют специальные таблицы, в которых приведены значения коэффициентов схемы вида  $K_{\text{сх}}^{(n)}$ ,  $K_{\text{сх}}^{(m)}$  заранее рассчитанные для всевозможных случаев выполнения элементов сети и схем соединения трансформаторов тока и реле.

Очевидно, что при прочих равных условиях чувствительность защиты пропорциональна отношению:  $\frac{K_{\text{СХ}}^{(n)}}{K_{\text{СХ}}^{(m)}}$ , и чем выше это отношение, тем чувствительнее защита.

Следовательно: говоря о чувствительности той или иной схемы соединения трансформаторов тока и реле, мы имеем в виду чувствительность защиты в измерительной части, которой используются эти схемы.

**Схема соединения трансформаторов тока и обмоток реле в полную звезду.**

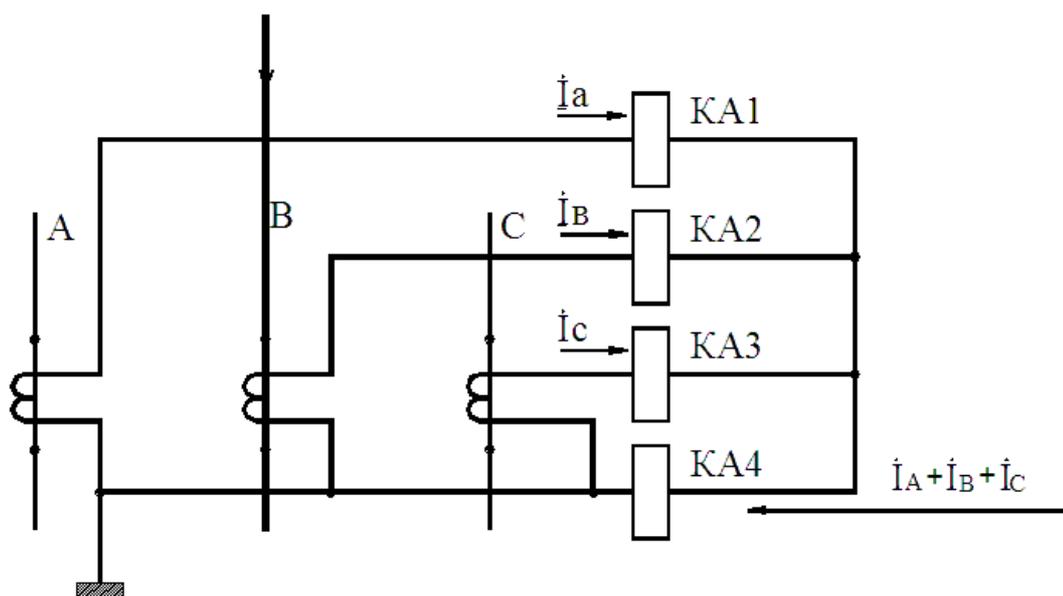
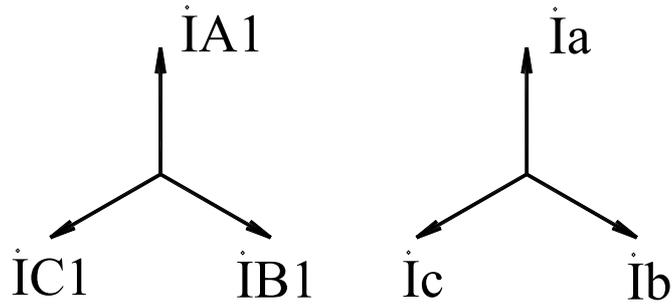


Рис.4 . Трехфазная четырехпроводная релейная схема полной звезды.

Для выполнения схемы необходимо иметь три трансформатора тока, установленные в фазах защищаемого элемента. Вторичные обмотки трансформаторов тока и обмотки реле соединяются в полную звезду. При этом в общую точку объединяются одноименные выводы вторичных обмоток трансформаторов тока. Обмотки реле также соединяются в полную звезду. Нулевые точки трансформаторов тока и реле соединяются одним проводом, в который включено четвертое реле. Этот провод называется нулевым или обратным проводом. Токораспределение в схеме полной звезды показано на рис. 4.

Из нее видно, что в реле КА1, КА2, КА3 протекают вторичные токи фаз  $\dot{I}_a$ ;  $\dot{I}_b$ ;  $\dot{I}_c$ , а в реле КА4(включенном в нулевой провод) их сумма  $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$ .

При трехфазном К.З. векторная диаграмма представляет собой симметричную звезду трех одинаковых векторов сдвинутых относительно друг друга на  $120^\circ$ .



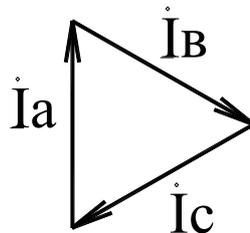
Эта картина сохраняется и на стороне вторичных обмоток трансформатора тока, отсюда

$$I_{KA1} = I_a, \quad I_{KA2} = I_b, \quad I_{KA3} = I_c,$$

$$I_{KA1} = I_{KA2} = I_{KA3} = I_\phi$$

Величина  $K_{CX} = \frac{I_P}{I_\phi} = \frac{I_\phi}{I_\phi} = 1$  для всех реле.

В нулевом проводе полной звезды протекает сумма токов всех фаз  $I_{KA4} = I_a + I_b + I_c$ , это геометрическая сумма равна 0. Ток в реле КА4 не протекает.

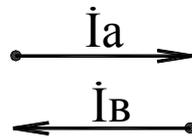


При двухфазных К.З. токи появляются только в поврежденных фазах, они равны между собой и направлены в противоположные стороны. Например при К.З. фаз А и В появляется ток в реле КА1 и КА2. Причем

$$I_{KA1} = I_{KA2} = I_\phi,$$

$$K_{CX} = \frac{I_P}{I_\phi} = 1.$$

Ток в реле КА4 равен сумме токов фаз А и В  $I_{КА4} = I_a + I_b$ , а так как эти токи противоположно направлены и равны между собой, то ток в реле включен в нулевой провод отсутствует  $I_{КА4} = 0$ .

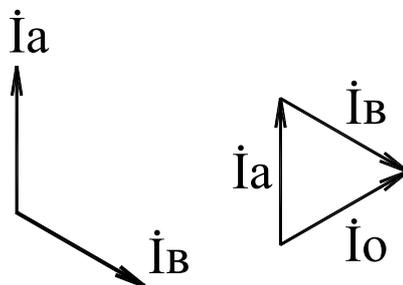


Следовательно реле КА4 не будет реагировать на симметричную нагрузку и межфазные К.З. При однофазном К.З. вторичный ток протекает через реле включенные в замкнутую сеть фазу и нулевой провод полной звезды. Например при коротком замыкании фазы А на землю  $I_a = I_{КА1} = I_{КА4}$

при этом  $K_{CX} = \frac{I_p}{I_\phi} = 1$ .

$I_a = I_o$

При двухфазном К.З на землю (например АВ) сохраняется сдвиг в  $120^\circ$  между векторами замкнутых фаз и появляется ток  $I_a = I_{КА1}, I_b = I_{КА2}$ , в нулевом проводе протекает геометрическая сумма этих токов  $I_{КА4} = I_a + I_b$ , численно равная току фазы и в этом случае токи в реле КА1, КА2, КА4 численно равны току фазы и  $K_{CX} = \frac{I_p}{I_\phi} = 1$



В рассмотренной схеме реле, установленные в фазах (КА1, КА2, КА3) реагируют на все виды коротких замыканий с одинаковым  $K_{CX} = 1$ , а реле установленное в нулевом проводе полной звезды реагирует только на

К.З. на землю. Реле включенное в нулевой провод является фильтром нулевой последовательности.

Симметричные токи прямой и обратной последовательности через нулевой провод не проходят так как вектора каждой из этих систем дают нуль. Токи же нулевой последовательности совпадают по фазе и поэтому в нулевом проводе утроенные значения этого тока  $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 3\dot{I}_0$ . Обрыв нулевого провода в нормальном режиме и при отсутствии повреждений на землю не оказывает влияния на работу схемы. Однако при повреждении на землю по нулевому проводу замыкаются токи повреждения. При этом ток повреждения, при оборванном нулевом проводе полной звезды, может замыкаться только через вторичные обмотки трансформаторов тока неповрежденных фаз, представляющих для него большое сопротивление, что было бы равносильно ее разомкнутому состоянию. Исходя из этого, выполнение схемы соединения трансформаторов тока и обмоток реле в полную звезду без нулевого провода не допустимо.

Защита со схемой соединения трансформаторов тока и реле в полную звезду может использоваться в сетях с глухозаземленной нейтралью. Она будет действовать на отключение защищаемого элемента как при К.З между фазами так и при К.З на землю.

Анализируя подобным образом, токораспределение для других схем трансформаторов тока и реле можно построить соответствующие векторные диаграммы и определить токи в реле и величину коэффициента схемы.

### **Двухфазная трехрелейная и двухрелейная схема с соединением трансформаторов тока в неполную звезду.**

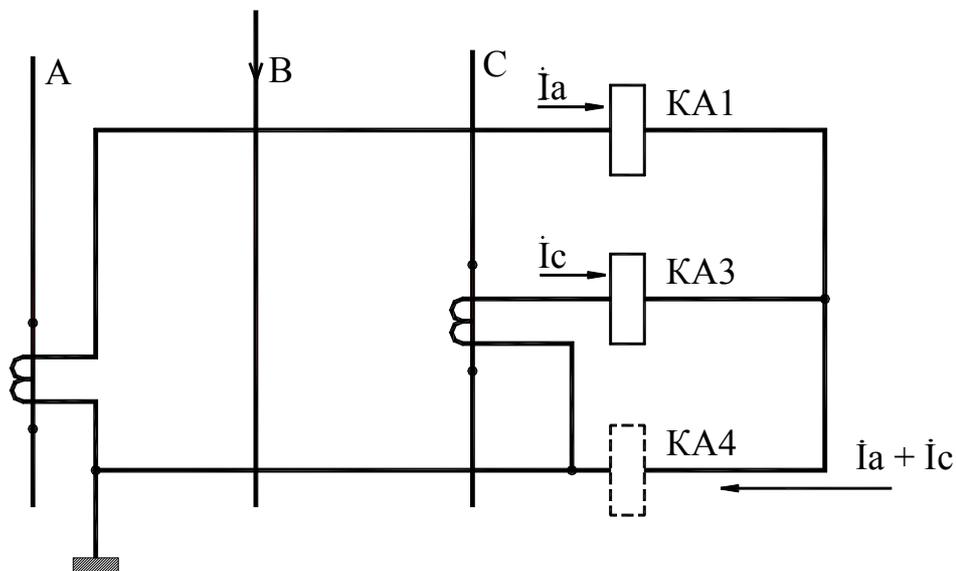


Рис. 5. Схема неполной звезды.

Приведенная на рис.5 схема неполной звезды получается из схемы полной звезды рис.4, если из последней исключить один из трансформаторов тока вместе с присоединенным к его вторичной обмотке реле. Для выполнения схемы неполной звезды используются трансформаторы тока установленные в фазах А и С, что характерно для сетей с изолированной нейтралью.

Анализируя схему неполной звезды приходим к следующим выводам:

1. При симметричных К.З. в реле КА1 и КА3 протекают вторичные токи соответствующих фаз, а в реле КА4 которое включено в общий (нулевой) провод звезды ток равен геометрической сумме  $\dot{I}_{КА4} = \dot{I}_a + \dot{I}_c$ . Схема реагирует на все виды К.З. за исключением короткого замыкания на землю фазы, в которой отсутствует трансформатор тока Коэффициент схемы равен 1 ( $K_{сх} = 1$ ). Схема применяется только для защиты от межфазных замыканий.

2. Ток в обратном проводе неполной звезды проходит в нормальном режиме, при межфазных К.З. и некоторых замыканиях на землю.

Поэтому нулевой провод необходим для нормальной работы схемы, и выполнять ее без нулевого провода недопустимо.

3. При коротких замыканиях в месте установки схемы трехрелейный и двухрелейный ее варианты равноценны, имеют одинаковую чувствительность и  $K_{сх} = 1$ .

4. При установке схемы неполной звезды на стороне высшего напряжения силового трансформатора со схемой  $Y/\Delta-11$  чувствительность защиты может оказаться в два раза меньшей по сравнению со схемой полной звезды, при некоторых двухфазных замыканиях на стороне треугольника (за трансформатором). При этом трехрелейная схема будет иметь одинаковую чувствительность со схемой полной звезды. Величина тока в реле в этом случае равна току трехфазного К.З.  $I_p = I_k^{(3)}$ . Двухрелейная схема будет иметь чувствительность в два раза меньшую чем трехрелейная и ток в реле при двухрелейной схеме неполной звезды будет равен половине тока трехфазного К.З.  $I_p = \frac{1}{2} I_k^{(3)}$

Защита по схеме неполной звезды может быть использована в сетях с изолированной нейтралью для отключения межфазных К.З и двойных замыканий на землю. При защите трансформатора со схемой  $Y/\Delta-11$  следует выбирать двух или трехрелейный вариант защиты при условии получения нормированного значения коэффициента чувствительности. Для защиты линии 6÷35кВ достаточно двухрелейного варианта защиты.

**Схема соединения трансформаторов тока в треугольник, а обмоток в звезду.**

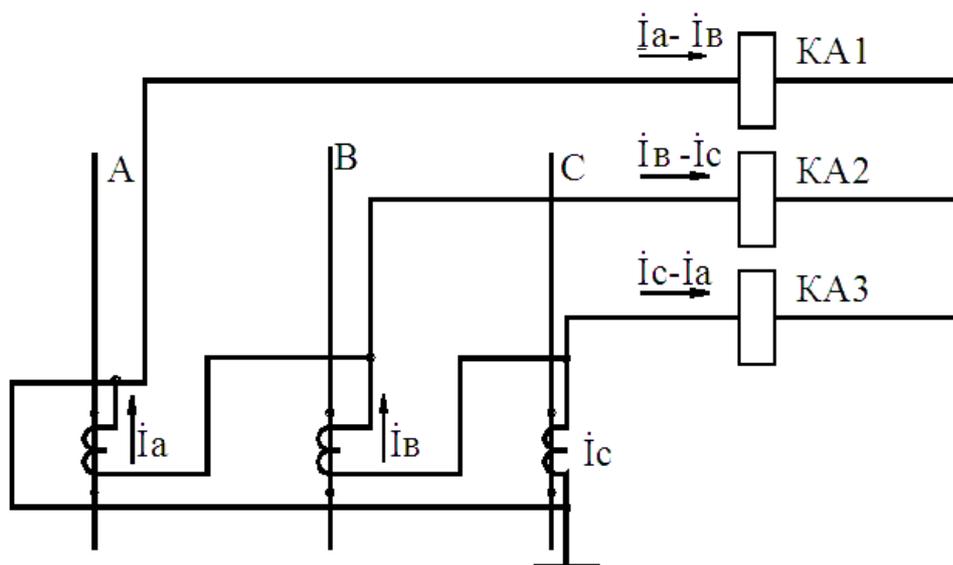


Рис.6. Треугольник с тремя реле

Для выполнения схемы следует иметь три трансформатора тока и три (или два) реле. Вторичные обмотки трансформаторов тока включаются по схеме треугольник (т.е. соединяются последовательно разноименными выводами). Реле, соединенное в звезду, подключается к вершинам этого треугольника. В каждом реле этой схемы протекает ток равный геометрической разности токов двух фаз.

Проводя анализ токораспределения, приходим к выводу:

- 1) Схема чувствительна ко всем видам К.З., так как при всех видах К.З. токи проходят как минимум по двум реле.
- 2) Величина тока в реле зависит от вида К.З
- 3) При трехфазном К.З и симметричном токе нагрузки ток в реле в  $\sqrt{3}$  раз больше тока фазы и сдвинут относительно него на  $30^\circ$ . Величина коэффициента схемы равна  $\sqrt{3}$ .

$$K_{CX}^{(3)} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_\phi}{I_\phi} = \sqrt{3}$$

При двухфазных К.З. ток в одном из реле в два раза больше тока во вторичной обмотке трансформатора тока.

- 4) Токи нулевой последовательности не выходят за пределы треугольника трансформаторов тока, не имея пути замыкания через обмотки реле.
- 5) При установке схемы треугольника (двух и трехрелейного варианта) на стороне звезды силового трансформатора со схемой соединения  $Y/\Delta-11$ , ток в реле превышает в  $\sqrt{3}$  раза ток трехфазного К.З. если последнее имеет место на стороне треугольника  $I_p = \sqrt{3} \cdot I_\phi$ .

Если на стороне треугольника имеют место несимметричные межфазные К.З, то ток в реле в этом случае в 1,5 раза превышает ток при трехфазном К.З.  $I_p = 1,5 \cdot I_K^{(3)}$ , где  $I_K^{(3)}$  - ток короткого замыкания за трансформатором приведенный к стороне питания.

Схема соединения трансформаторов тока в треугольник, а реле в звезду, в основном применяется для дифференциальных и дистанционных защит.

**Схема с двумя трансформаторами тока и одним реле, включенным на разность токов.**

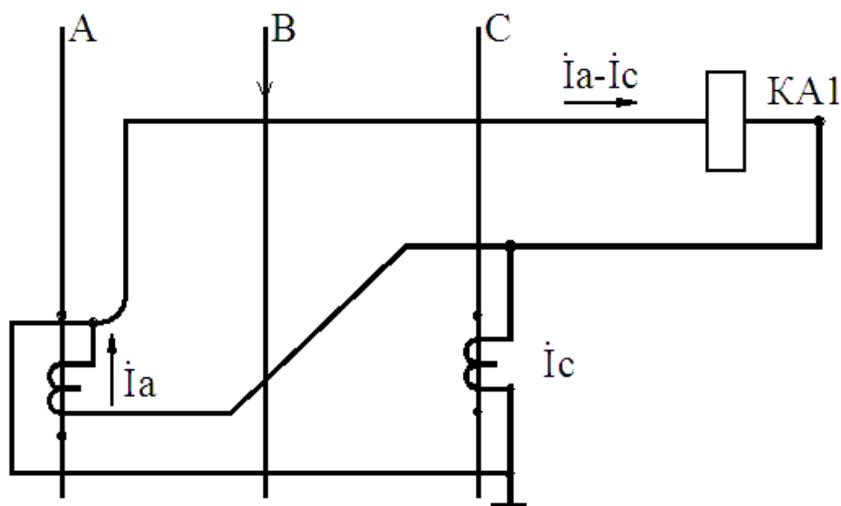


Рис.7. Включение реле на разность токов двух фаз.

При выполнении этой схемы трансформаторы тока устанавливаются в двух фазах, их вторичные обмотки соединяются разноименными зажимами, к которым подключается обмотка реле. При этом ток в реле равен геометрической разности токов двух фаз  $I_{KA1} = I_a - I_c$  (рис.7). Из анализа токораспределения в реле при различных видах короткого замыкания следует, что:

- схема защиты реагирует на все виды коротких замыканий в месте ее установки, за исключением К.З. на землю той фазы, в которой отсутствует трансформатор тока;
- в нормальном режиме и при трехфазных коротких замыканиях в реле протекает ток в  $\sqrt{3}$  раз больше тока во вторичной обмотке трансформатора тока (тока фазы), поэтому коэффициент схемы  $K_{CX}^{(3)} = \sqrt{3}$  при двухфазных коротких замыканиях величина тока в реле зависит от сочетания поврежденных фаз, поэтому защита использующая эту схему, имеет разную чувствительность в зависимости от вида короткого замыкания .

Наименьшая чувствительность наблюдается при двухфазных К.З. с участием фазы, в которой отсутствует трансформатор тока, в этом случае схема включения реле на разность токов двух фаз имеет чувствительность в  $\sqrt{3}$  раз меньше, чем схема полной и неполной звезды.

Защита установленная на стороне звезды силового трансформатора со схемой  $Y/\Delta$ -11 может отказать в действии при двухфазном К.З. за трансформатором.

Несмотря на простоту и экономичность (с точки зрения используемой аппаратуры) применение схемы включения реле на разность токов двух фаз ограничено. Она в основном применяется в сетях с напряжением 6÷10 кВ для защиты двигателей и линий при условии обеспечения нормированного коэффициента чувствительности.

### Схема соединения трансформаторов тока в фильтр токов нулевой последовательности

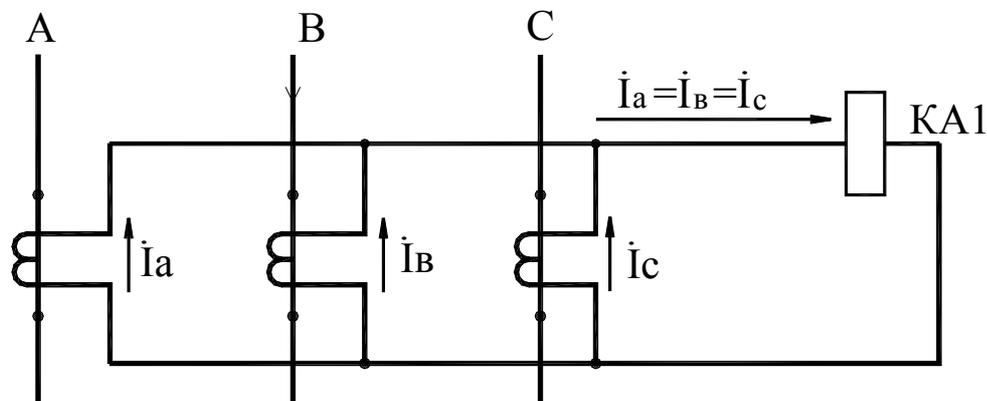


Рис.7. Трехфазный фильтр токов нулевой последовательности.

Для выполнения схемы трансформаторы тока устанавливаются в трех фазах, одноименные зажимы вторичных обмоток соединяются между собой и к ним параллельно подключается обмотка реле. В этом случае по обмотке реле протекает геометрическая сумма токов вторичных обмоток трансформаторов тока всех трех фаз  $I_{KA1} = I_a + I_b + I_c$ .

Из анализа распределение токов и векторных диаграмм для различных видов повреждений видно что, симметричные токи прямой и обратной последовательности через реле тока KA1 не проходят (векторы каждой из этих систем в сумме дают нуль) токи нулевой последовательности совпадают по фазе и поэтому в реле протекает утроенное значение этого тока  $I_{KA1} = 3 \cdot I_0$ .

Таким образом, рассмотренная схема ведет себя аналогично схеме включения реле в нулевой провод полной звезды и является фильтром токов нулевой последовательности.

Схема соединения трансформаторов тока в фильтр нулевой последовательности используется в комплекте быстродействующей защиты от замыканий на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью.

Кроме схемы трехтрансформаторного фильтра нулевой последовательности применяются специальные трансформаторы-фильтры нулевой последовательности ТТНП (трансформаторы тока нулевой последовательности).

Эти трансформаторы тока имеют тороидальный или прямоугольный магнитопровод с размещенной на нем вторичной обмоткой. В магнитопроводе ТТНП магнитные потоки от симметричных составляющих токов при несимметричных К.З., суммируются, в результате чего суммарные потоки прямой и обратной последовательности равны нулю. А суммарный поток нулевой последовательности создает во вторичной обмотке ЭДС нулевой последовательности.

Кабельный ТТНП не имеет недостатков трехтрансформаторного фильтра: отсоса тока в соседние трансформаторы неповрежденных фаз, большого тока небаланса, сложности схемы. Благодаря этому защита нулевой последовательности с ТТНП является более чувствительной. Наибольшая чувствительность достигается в случае отдачи фильтром максимальной мощности. Этому соответствует условие  $Z_{\phi} = Z_n$ , где:

$Z_{\phi}$  - сопротивление фильтра нулевой последовательности.

$Z_n$  - сопротивление нагрузки.

Трансформаторы тока нулевой последовательности используются при выполнении ненаправленной и направленной защиты от замыканий на землю кабельных (и реже воздушных) сетей 6÷10кВ, а также двигателей этих напряжений.

В сетях 0,38кВ ТТНП нашли применение при выполнении различных устройств защитного отключения УЗО и в защитах от однофазных коротких замыканий (например защита ЗТИ-0,4).

### Контрольные вопросы.

1. Для чего нужен нулевой провод в схемах полной и неполной звезды?
2. Что такое коэффициент схемы. В каких случаях он не равен 1 (при К.З. в месте установки трансформаторов тока)?
3. Какова чувствительность схемы включения реле на разность токов двух фаз по сравнению со схемой неполной звезды?
4. Почему для защиты трансформаторов со схемой  $Y_0/\Delta-11$  используется включение трансформаторов тока в треугольник?
5. Почему схема включения реле на разность токов двух фаз не используется для защиты трансформатора со схемой  $Y/\Delta-11$ .
6. Для защиты трансформатора  $Y/\Delta-11$  используется схема неполной звезды. Какой вариант этой схемы имеет большую чувствительность? Почему?
7. Чему равна величина расчетного тока в реле при К.З. за трансформатором  $Y/\Delta-11$ , если со стороны звезды установлены схемы включения трансформаторов тока и реле:
  - 1) Треугольник с двумя реле?
  - 2) Неполная звезда с двумя реле?
  - 3) Неполная звезда с тремя реле?
8. При каком виде К.З. в нулевом проводе схемы полной и неполной звезды отсутствует ток?
9. Какие схемы соединения трансформаторов тока и реле используются в сетях с изолированной нейтралью?
10. Почему в сетях с малой кратностью токов К.З. схема включения реле на разность токов может оказаться неприемлемой?
11. Почему в сетях напряжением  $6\div 35$ кВ для контроля повреждений достаточно двух трансформаторов тока?
12. Какие преимущества имеет защита от однофазных К.З. в сетях 110кВ и выше с трех трансформаторным фильтром нулевой последовательности по сравнению со схемой полной звезды?

13. Почему во вторичной обмотке трансформатора тока нулевой последовательности Т.Т.Н.П. не индуцируется Э.Д.С. при двухфазном К.З.?

### Литература

1. Будзко И.А., Лещинская Т.Б. «Электроснабжение сельского хозяйства» М.: «Колос». - 2000г.
2. Будзко И.А., Зуль Н.М. «Электроснабжение сельского хозяйства» М.: «Агропромиздат». - 1990г.
3. Федосеев А.Н. «Релейная защита электро- энергетических систем» М.: «Энергоатомиздат». - 1984г.
4. Практикум по электроснабжению сельского хозяйства под редакцией Будзко И.А М.: «Колос». - 1982г.
5. Чернобровов Н.А. «Релейная защита» М.: «Энергия». - 1966г.
6. Андреев В.А «Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах энергоснабжения» М.: «Высшая школа». - 1985г.
7. Шабад Н.А. «Защита трансформаторов распределительных сетей» Л.: «Энергоиздат». - 1981г.
8. Шабад Н.А «Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей» Л.: «Энергоатомиздат». - 1985г
9. «Правила устройства электроустановок» М.: «Энергосервис». - 2002г.