

**MiCOM P63x**

**Дифференциальная защита  
трансформатора**

**Руководство по применению**

***AREVA T&D***

## Символы и обозначения

### Символы

|                 |                                    |
|-----------------|------------------------------------|
| $\underline{I}$ | Вектор тока                        |
| $\underline{a}$ | оператор поворота фазы на $+120^0$ |
| $\underline{V}$ | напряжение                         |
| $\varphi$       | угол                               |
| $S$             | мощность                           |
| $k$             | коэффициент согласования           |

### Сокращения

|         |  |
|---------|--|
| prim    | первичная величина   |
| sec     | вторичная величина   |
| rel     | переменная реле  |
| nom     | номинальное значение   |
| max     | максимальное значение  |
| max-1   | второе по величине значение  |
| mid     | среднее значение   |
| min     | минимальное значение   |
| СТ      | основной трансформатор тока (комплект)   |
| A, B, C | Фазы A, B или C  |
| x       | фиктивная переменная для фазы A, B или C   |
| x+1     | фиктивная переменная для отстающей фазы по отношению к фазе A, B или C   |
| x-1     | фиктивная переменная для опережающей фазы по отношению к фазе A, B или C   |
| amp     | согласованный по амплитуде   |
| vec     | согласованные по амплитуде и по группе соединений (включая отстройку/фильтрацию от тока нулевой последовательности |
| zero    | составляющая нулевой последовательности  |
| pos     | составляющая прямой последовательности   |
| neg     | составляющая обратной последовательности   |
| 1,2,3   | измерительная система 1, 2 или 3   |
| y       | фиктивная переменная для измерительной системы 1, 2 или 3  |
| a,b,c,d | сторона или обмотка a, b, c или d защищаемого объекта  |
| z       | фиктивная переменная стороны или обмотки a, b, c или d защищаемого объекта   |
| d       | дифференциальная переменная  |
| R       | тормозная переменная   |

## **1 Введение**

Устройство защиты серии MiCOM 30 подробно описано в соответствующем руководстве по эксплуатации в части технических характеристик, функциональных возможностей и правильного обращения с устройством при монтаже, подключении, наладки и эксплуатации. Однако руководство по эксплуатации не предоставляет информации о философии каждого из специфических устройств и способов использования функциональных возможностей устройства в каждом отдельном случае применения устройства.

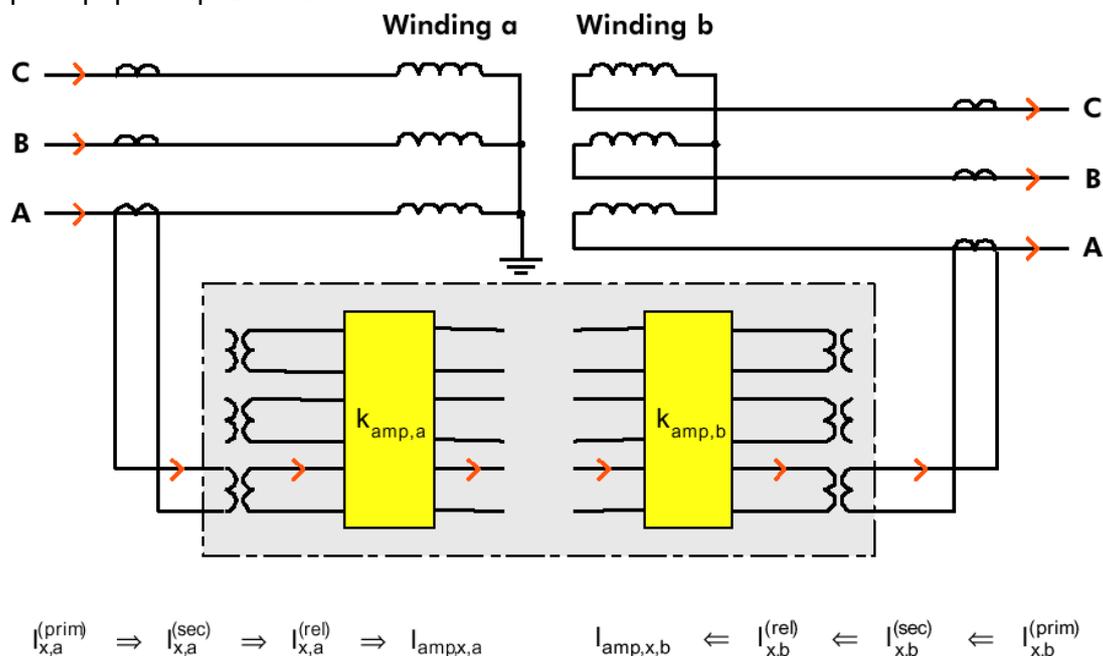
Настоящее руководство предназначено восполнить этот пробел. Читателям предоставляется возможность улучшить понимание конструкции и функциональной схемы и затем предложить инструкции по заданию уставок, наладке и опробованию устройств серии MiCOM P63x использующихся в качестве дифференциальной защиты трансформаторов.

## 2 Режим работы и основные рекомендации по заданию уставок

Дифференциальная защита основана на принципе сравнения измеряемых величин т.е. мгновенные значения токов всех сторон сравниваются друг с другом. Сравнение токов выполняется с учетом амплитуд и фаз изменяемых токов.

### 2.1 Согласование по амплитуде

Прежде чем выполнить сравнение фазных токов обмоток каждой из обмоток, необходимо выполнить согласование измеряемых токов в соответствии с фактической трансформацией слагающейся из номинального коэффициента трансформации силового трансформатора и измерительных трансформаторов тока.



Целью амплитудного согласования является абсолютное равенство соответствующих фазных токов сторон в условиях нормального режима и отсутствии каких либо погрешностей (идеальная система). Фазные токи которые были согласованы до равенства по абсолютной величине считаются в дальнейшем амплитудно-согласованными токами.

$$I_{amp,x,a} = I_{amp,x,b}$$

Масштабирование/согласование с целью получения равенства абсолютных значений достигается одним коэффициентом амплитудного согласования для каждой из сторон  $K_{amp}$ :

$$K_{amp} * I_{x,a}^{(rel)} = K_{amp,b} * I_{x,b}^{(rel)}$$

фазные ток в реле может быть выражен как первичный фазный ток для каждой из сторон с помощью индивидуальных номинальных коэффициентов трансформации, т.е. через номинальный ток реле и вторичный и первичный номинальные токи трансформаторов тока:

$$k_{amp,a} \cdot I_{x,a}^{(rel)} = k_{amp,b} \cdot I_{x,b}^{(rel)}$$

$$k_{amp,a} \cdot \frac{I_{x,a}^{(sec)}}{I_{nom,rel,a}} = k_{amp,b} \cdot \frac{I_{x,b}^{(sec)}}{I_{nom,rel,b}}$$

$$k_{amp,a} \cdot \frac{I_{x,a}^{(prim)}}{\frac{I_{nom,CT,a}^{(prim)}}{I_{nom,CT,a}^{(sec)}} \cdot I_{nom,rel,a}} = k_{amp,b} \cdot \frac{I_{x,b}^{(prim)}}{\frac{I_{nom,CT,b}^{(prim)}}{I_{nom,CT,b}^{(sec)}} \cdot I_{nom,rel,b}}$$

При условии что для каждой из сторон номинальный ток реле и вторичный номинальный ток трансформатора тока совпадают, мы получаем:

$$k_{amp,a} \cdot \frac{I_{x,a}^{(prim)}}{I_{nom,CT,a}^{(prim)}} = k_{amp,b} \cdot \frac{I_{x,b}^{(prim)}}{I_{nom,CT,b}^{(prim)}}$$

Соотношение между первичными токами получается из соотношений номинальных напряжений трансформатора:

$$\frac{I_{x,a}^{(prim)}}{I_{x,b}^{(prim)}} = \frac{k_{amp,b} \cdot I_{nom,CT,a}^{(prim)}}{k_{amp,a} \cdot I_{nom,CT,b}^{(prim)}} = \frac{V_{nom,b}^{(prim)}}{V_{nom,a}^{(prim)}}$$

Как можно заметить, уравнение не определяет абсолютных значений индивидуальных коэффициентов амплитудного согласования для каждой из сторон а определяет лишь отношение этих коэффициентов:

$$\frac{k_{amp,a}}{k_{amp,b}} = \frac{V_{nom,a}^{(prim)} \cdot I_{nom,CT,a}^{(prim)}}{V_{nom,b}^{(prim)} \cdot I_{nom,CT,b}^{(prim)}}$$

Правильность расчета абсолютных значений коэффициентов амплитудного согласования выражается в рассчитанных номинальных токах трансформатора. Это делается путем задания базисной мощности трансформатора  $S_{ref}$  в качестве единой величины для обеих сторон:

$$\frac{k_{amp,a}}{k_{amp,b}} = \frac{V_{nom,a}^{(prim)} \cdot I_{nom,CT,a}^{(prim)}}{V_{nom,b}^{(prim)} \cdot I_{nom,CT,b}^{(prim)}} = \frac{\frac{I_{nom,CT,a}^{(prim)}}{1}}{\frac{I_{nom,CT,b}^{(prim)}}{1}} = \frac{\frac{I_{nom,CT,a}^{(prim)}}{S_{ref}^{(prim)}}}{\frac{I_{nom,CT,b}^{(prim)}}{S_{ref}^{(prim)}}}} = \frac{\frac{I_{nom,CT,a}^{(prim)}}{I_{ref,a}^{(prim)}}}{\frac{I_{nom,CT,b}^{(prim)}}{I_{ref,b}^{(prim)}}}} = \frac{\frac{I_{nom,CT,a}^{(prim)}}{\sqrt{3} \cdot V_{nom,a}^{(prim)}}}{\frac{I_{nom,CT,b}^{(prim)}}{\sqrt{3} \cdot V_{nom,b}^{(prim)}}}}$$

Расчет номинальных токов трансформатора возможен только в случаях когда номинальная мощность каждой из обмоток одинакова и следовательно может быть задана одно общее значение базисной мощности трансформатора  $S_{ref}$ . У трехобмоточных трансформаторов мощности разных обмоток обычно отличаются. В таких случаях рекомендуется задавать в качестве базисной  $S_{ref}$ , наибольшую из мощностей обмоток.

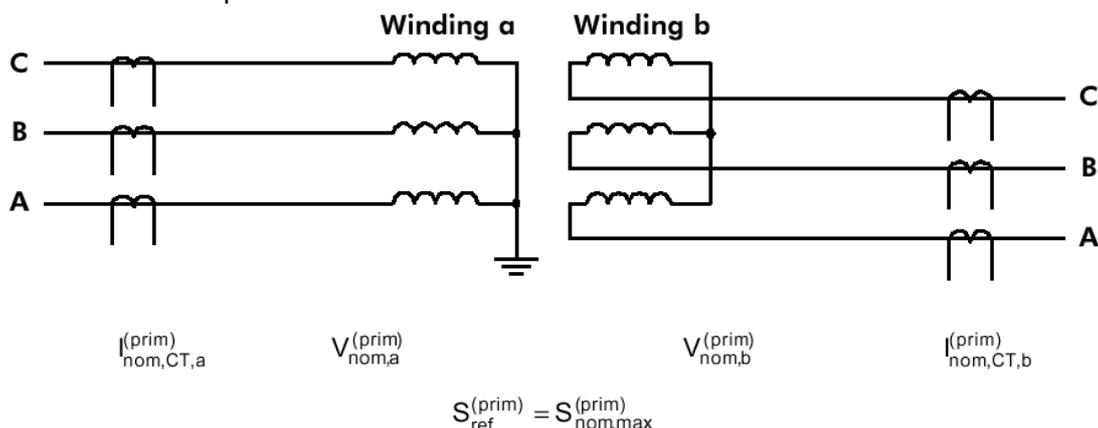
Во всех случаях *общая* базисная мощность  $S_{ref}$  должна быть установлена для всех сторон. Коэффициент амплитудного согласования в каждом случае определяется следующим образом:

$$k_{amp,z} = \frac{I_{nom,CT,z}^{(prim)}}{I_{ref,z}^{(prim)}} = \frac{I_{nom,CT,z}^{(prim)}}{\frac{S_{ref}^{(prim)}}{\sqrt{3} \cdot V_{nom,z}^{(prim)}}}$$

Амплитудно-согласованные фазные токи формируются путем скалярного умножения, при этом фазные токи сторон умножаются на соответствующие сторонам коэффициенты амплитудного согласования:

$$I_{amp,x,z} = k_{amp,z} \cdot I_{x,z} = \frac{I_{nom,CT,z}^{(prim)}}{I_{ref,z}^{(prim)}} \cdot I_{x,z} = \frac{I_{nom,CT,z}^{(prim)}}{\frac{S_{ref}^{(prim)}}{\sqrt{3} \cdot V_{nom,z}^{(prim)}}} \cdot I_{x,z}$$

Задание коэффициентов амплитудного согласования очень простая процедура не требующая выполнения расчетов. Должны быть заданы лишь следующие номинальные первичные величины:



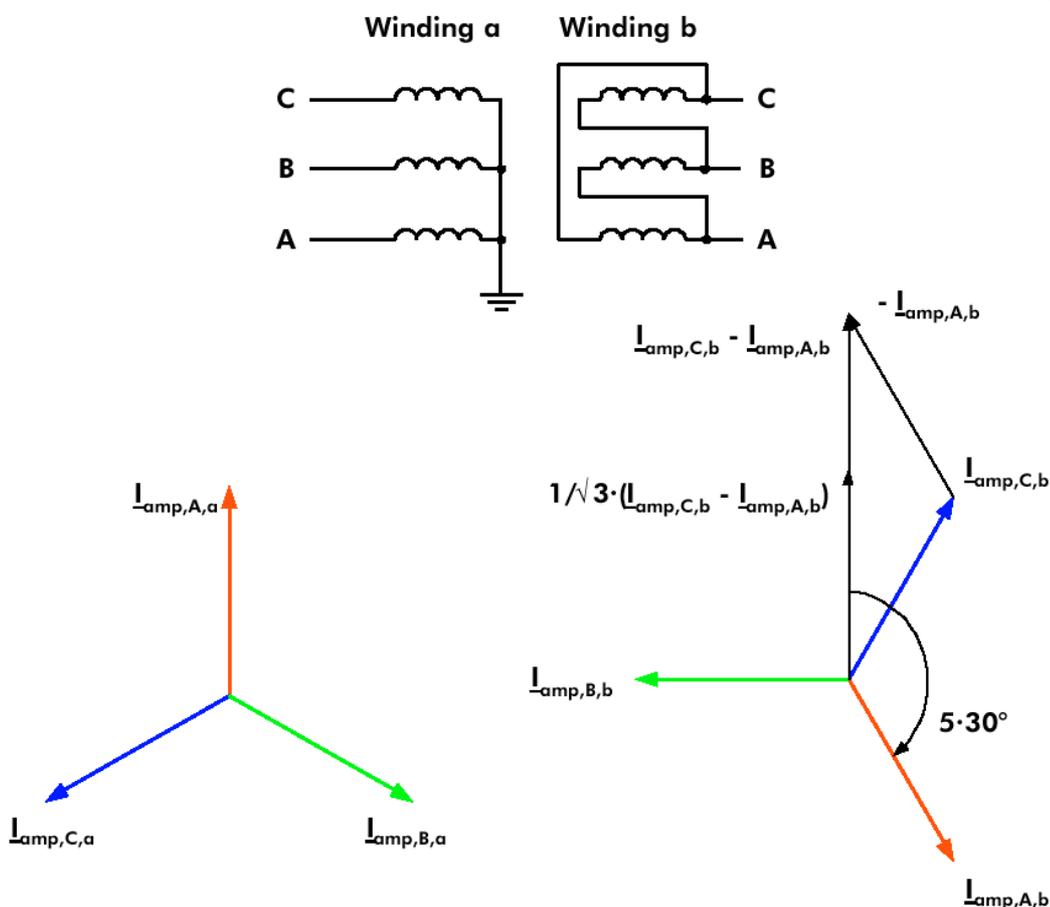
Коэффициенты амплитудного согласования рассчитываются автоматически в устройстве защиты. Устройство также выполняет автоматическую проверку того что рассчитанные коэффициенты  $k_{amp,z}$  находятся в допустимых пределах:

- ни один из коэффициентов амплитудного согласования  $k_{amp,z}$  не должен превышать значения 5:  $k_{amp,z} \leq 5$
- отношение максимального из коэффициентов амплитудного согласования  $k_{amp,max}$  к второму по величине коэффициенту амплитудного согласования  $k_{amp,max-1}$  не должно быть более 3:  $k_{amp,max} / k_{amp,max-1} \leq 3$
- второй по величине коэффициент амплитудного согласования  $k_{amp,max-1}$  не должен быть менее 0,7 :  $k_{amp,max-1} \leq 0,7$

## 2.2 Согласование фаз и фильтрация токов нулевой последовательности.

Поскольку при сравнении измеряемых токов учитывается и фаза тока, необходимо выполнить согласование по фазе амплитудно-согласованных токов в соответствии с группой соединения трансформатора. Это согласование может быть выполнено без учета схемы соединения обмоток поскольку соотношения фаз токов сторон трансформатора однозначно характеризуется номером группы соединений.

Согласование фаз выполняется математическими векторными операциями с амплитудно-согласованными токами фаз *стороны низкого напряжения* в соответствии с характеристикой группы соединений трансформатора. На приведенном ниже рисунке приведен пример преобразований для группы 5, соединение обмоток Yd5 (звезда/треугольник– 5)



При выполнении согласования фаз не выполняются операции с величинами стороны высокого напряжения. Однако, следует принять во внимание, что обмотка на стороне высокого напряжения соединена в звезду нейтраль которой может быть заземлена по условиям режима работы сети. В случае короткого замыкания в сети, ток нулевой последовательности будет замыкаться через заземленную нейтраль, которая находится в зоне дифференциальной защиты и следовательно будет восприниматься измерительной системой как дифференциальный ток. Результатом этого может быть нежелательное отключение трансформатора.

По этой причине составляющие нулевой последовательности трехфазной системы должны быть исключены на стороне высокого напряжения. В соответствии с этим утверждением, ток нулевой последовательности определяется на основе амплитудно-согласованных токов фаз:

$$I_{amp,zero,z} = \frac{1}{3} \cdot (I_{amp,A,z} + I_{amp,B,z} + I_{amp,C,z})$$

На стороне низкого напряжения ток нулевой последовательности в приведенном выше примере автоматически фильтруется исходя из математических векторных операций. В этом нет необходимости во всех случаях и не всегда это требуется, но основываясь на том что результат вычитания двух фазных токов:

$$I_{amp,A,z} = I_{amp,zero,z} + I_{amp,pos,z} + I_{amp,neg,z}$$

$$I_{amp,B,z} = I_{amp,zero,z} + \underline{a}^2 \cdot I_{amp,pos,z} + \underline{a} \cdot I_{amp,neg,z}$$

$$I_{amp,C,z} = I_{amp,zero,z} + \underline{a} \cdot I_{amp,pos,z} + \underline{a}^2 \cdot I_{amp,neg,z}$$

$$I_{amp,A,z} - I_{amp,B,z} = (1 - \underline{a}^2) \cdot I_{amp,pos,z} + (1 - \underline{a}) \cdot I_{amp,neg,z}$$

$$I_{amp,B,z} - I_{amp,C,z} = (\underline{a}^2 - \underline{a}) \cdot I_{amp,pos,z} + (\underline{a} - \underline{a}^2) \cdot I_{amp,neg,z}$$

$$I_{amp,C,z} - I_{amp,A,z} = (\underline{a} - 1) \cdot I_{amp,pos,z} + (\underline{a}^2 - 1) \cdot I_{amp,neg,z}$$

Следующая таблица показывает что для всех нечетных групп соединений, симметричная составляющая нулевой последовательности на стороне низкого напряжения автоматически фильтруются, в то время как для четных групп соединения трансформаторов, составляющая нулевой последовательности никогда не фильтруется автоматически. Последнее также верно для стороны высокого напряжения, поскольку как объяснялось выше, на ней не выполняются операции с векторами по согласованию фаз.

Согласование векторов тока по фазе и фильтрация токов нулевой последовательности должны всегда рассматриваться в комбинации. В следующей таблице приведены математические операции с векторами по согласованию фаз.

Математические операции на стороне высокого напряжения:

|  | С фильтрацией 3I <sub>0</sub>                | Без фильтрации 3I <sub>0</sub>      |
|--|--|-------------------------------------|
|  | With I <sub>zero</sub> filtering             | Without I <sub>zero</sub> filtering |
|  | $I_{vec,y,z} = I_{amp,x,z} - I_{amp,zero,z}$ | $I_{vec,y,z} = I_{amp,x,z}$         |

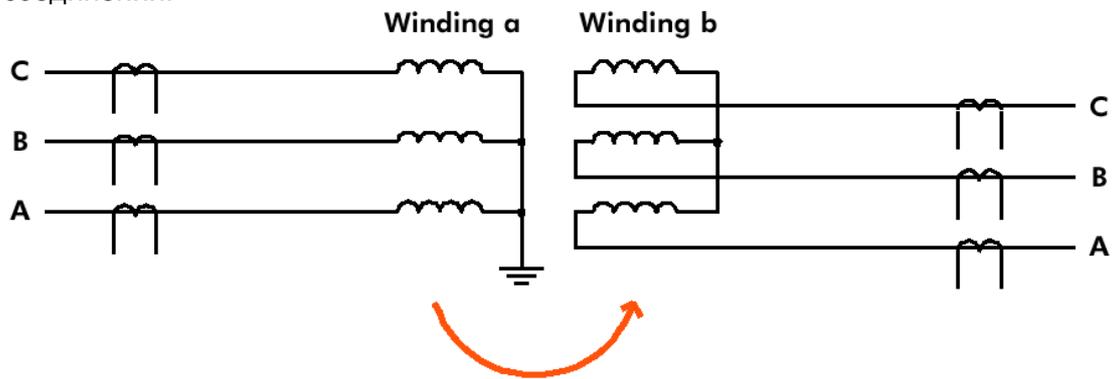
Математические операции на стороне низкого напряжения для четных номеров групп соединения:

| Группа       | С фильтрацией 3lo                                 | Без фильтрации 3lo             |
|--------------|---|--------------------------------|
| Vector Group | With $I_{zero}$ filtering                         | Without $I_{zero}$ filtering   |
| 0            | $I_{vec,y,z} = I_{amp,x,z} - I_{amp,zero,z}$      | $I_{vec,y,z} = I_{amp,x,z}$    |
| 2            | $I_{vec,y,z} = -(I_{amp,x+1,z} - I_{amp,zero,z})$ | $I_{vec,y,z} = -I_{amp,x+1,z}$ |
| 4            | $I_{vec,y,z} = I_{amp,x-1,z} - I_{amp,zero,z}$    | $I_{vec,y,z} = I_{amp,x-1,z}$  |
| 6            | $I_{vec,y,z} = -(I_{amp,x,z} - I_{amp,zero,z})$   | $I_{vec,y,z} = -I_{amp,x,z}$   |
| 8            | $I_{vec,y,z} = I_{amp,x+1,z} - I_{amp,zero,z}$    | $I_{vec,y,z} = I_{amp,x+1,z}$  |
| 10           | $I_{vec,y,z} = -(I_{amp,x-1,z} - I_{amp,zero,z})$ | $I_{vec,y,z} = -I_{amp,x-1,z}$ |

Математические операции на стороне низкого напряжения для нечетных номеров групп соединения:

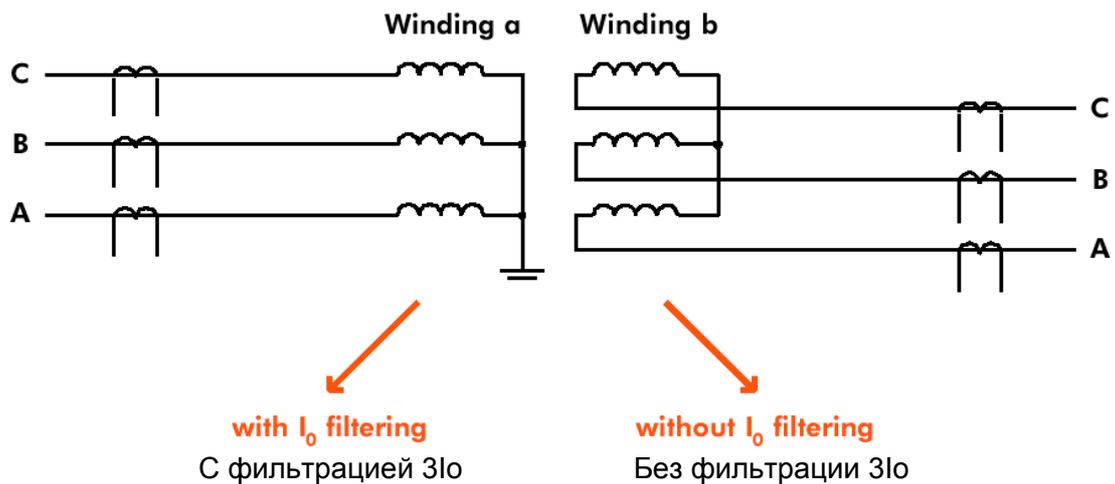
| Группа       | С фильтрацией 3lo  | Без фильтрации 3lo |
|--------------|--|--------------------|
| Vector Group |  |                    |
| 1            | $I_{vec,y,z} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{amp,x,z} - I_{amp,x+1,z})$   |                    |
| 3            | $I_{vec,y,z} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{amp,x-1,z} - I_{amp,x+1,z})$ |                    |
| 5            | $I_{vec,y,z} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{amp,x-1,z} - I_{amp,x,z})$   |                    |
| 7            | $I_{vec,y,z} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{amp,x+1,z} - I_{amp,x,z})$   |                    |
| 9            | $I_{vec,y,z} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{amp,x+1,z} - I_{amp,x-1,z})$ |                    |
| 11           | $I_{vec,y,z} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{amp,x,z} - I_{amp,x-1,z})$   |                    |

Задание уставки группы соединений очень простая операция которая не требует выполнения расчетов. Необходимо лишь задать номер группы соединений:



0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 or 11

Задание уставки фильтрации токов нулевой последовательности очень простая операция которая не требует выполнения расчетов. Фильтрация токов нулевой последовательности должна быть введена для тех сторон трансформатора на которых возможно заземление нейтрали по условиям режима работы сети:



## 2.3 Характеристика срабатывания

После согласования токов по всем сторонам, защищаемый трансформатор можно рассматривать как узел тока описанный первым законом Кирхгоффа. Согласно этого закона в идеальных условиях векторная сумма токов всех сторон равна нулю в условиях нормальной работы. Только при возникновении замыкания в зоне дифференциальной защиты сумма токов будет отличаться от нуля, а именно равна дифференциальному току  $I_d$ . Следовательно величина дифференциального тока  $I_d$  может служить критерием определения замыкания в защищаемой зоне.

Однако на практике, дифференциальный ток присутствует даже при отсутствии замыкания. Факторы в наибольшей степени влияющие на величину дифференциального тока в нормальном режиме:

- ток намагничивания трансформатора, который протекает только со стороны с которой подается питание на трансформатор и следовательно воспринимается как дифференциальный ток
- зависящая от тока погрешность трансформаторов тока включенных в дифференциальную схему.

Поскольку ток намагничивания определяется уровнем напряжения в системе и следовательно может рассматриваться как константа, независимо от уровня нагрузки. Погрешность комплектов трансформаторов тока включенных в схему дифференциальной защиты зависит от тока нагрузки трансформатора.

Поэтому в защите не используется характеристика срабатывания с постоянной уставкой по дифференциальному току. Характеристика срабатывания защиты формируется как функция от тормозного тока  $I_R$ . Тормозной ток зависит от тока нагрузки защищаемого трансформатора. Функция  $I_d = f(I_R)$  является характеристикой срабатывания (действия на отключение) в координатах  $I_d - I_R$ .

### 2.3.1 Определение токов $I_d$ и $I_R$

Согласно первому закону Кирхгоффа дифференциальный ток  $I_d$  всегда равен векторной сумме токов всех ветвей:

$$I_{d,y} = \left| I_{vec,y,a} + I_{vec,y,b} + I_{vec,y,c} + \dots \right|$$

Тормозной ток  $I_R$  представляет сквозной ток защищаемого трансформатора, и для случая дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора он равен векторной сумме токов:

$$I_{R,y} = \frac{1}{2} \cdot \left| I_{vec,y,a} - I_{vec,y,b} \right|$$

В случае питания КЗ в зоне защиты с двух сторон токами одинаковой амплитуды и фазы, токи взаимно уничтожаются т.е. тормозной ток становится равным нулю и эффект торможения отсутствует. Исчезновение тормозного эффекта при замыканиях в защищаемой зоне это желаемый результат поскольку в этом случае дифференциальная защита приобретает максимальную чувствительность.

В случае дифференциальной защиты для трансформатора более чем с двумя обмотками, мы должны использовать различные варианты определения тормозного тока  $I_R$ , поскольку не определяется векторная разность между более чем двумя переменными:

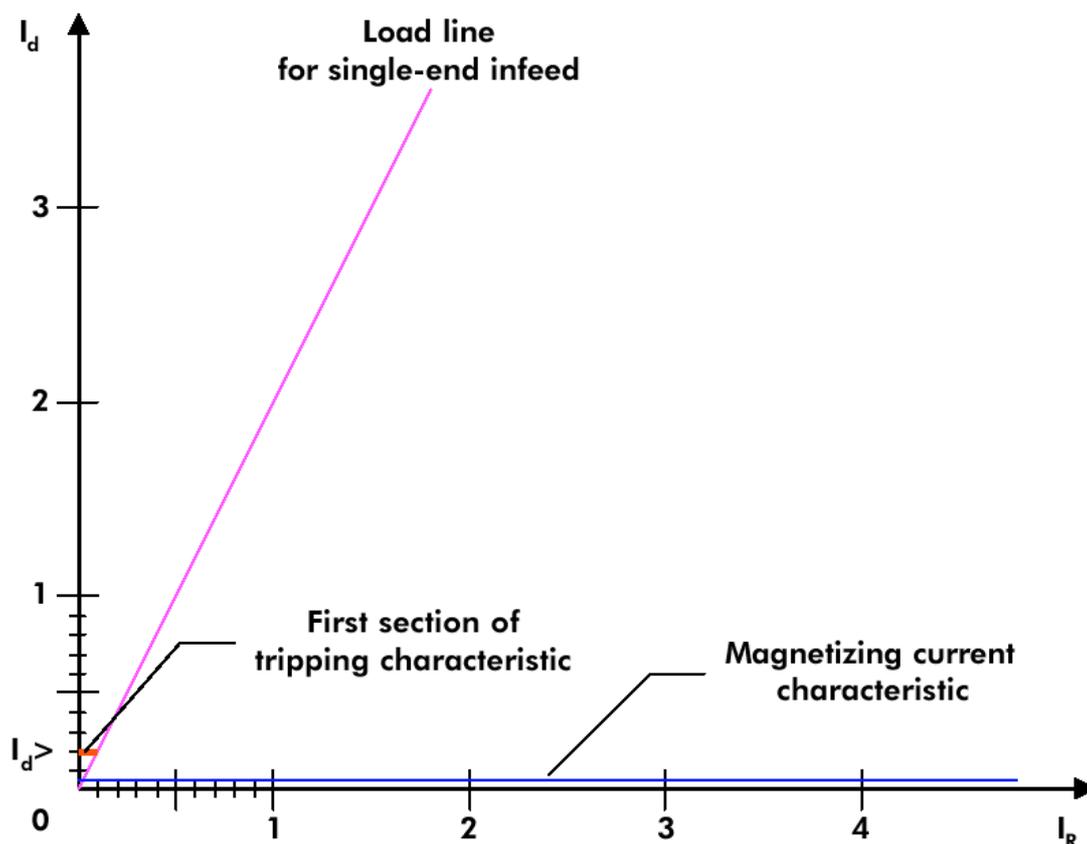
$$I_{R,y} = \frac{1}{2} \cdot \left( \left| I_{vec,y,a} \right| + \left| I_{vec,y,b} \right| + \left| I_{vec,y,c} \right| + \dots \right)$$

В этом случае, тормозной эффект никогда не исчезает в случае внутреннего замыкания; тормозной эффект даже увеличивается в случае подпитки КЗ с нескольких сторон. Однако, коэффициент  $\frac{1}{2}$  в формуле расчета тормозного тока означает что дифференциальный ток  $I_d$  будет в два раза больше тормозного тока  $I_R$ , что гарантирует надежное отключение при подпитке замыкания с нескольких сторон.

### 2.3.2 Первый участок характеристики срабатывания

Первый участок характеристики является самым чувствительным диапазоном характеристики срабатывания представляет собой горизонтальный участок с регулируемой уставкой  $I_d >$ . Значение устанавливаемое по умолчанию равно 0,2 должно учитывать ток намагничивания трансформатора, который протекает даже в режиме холостого хода и составляет не более 5% от номинального тока трансформатора.

Первый участок характеристики проходит горизонтально до пересечения с линией нагрузки при одностороннем питании. Это облегчает выполнение наладочных работ и проверок. При одностороннем питании требуемая характеристика всегда соответствует заданной базовой уставке  $I_d >$  и соответственно не требуется выполнение предварительных расчетов для проверки уставки.



Линия первого участка характеристики срабатывания соответствует горизонтальной линии дифференциального тока задаваемого уставкой  $I_{d>}$ . Первый участок характеристики отключения описывается уравнением:

$$I_{d,y}(I_{R,y}) = I_{d>} >$$

Пересечение первого участка характеристики срабатывания с линией нагрузки происходит при тормозном токе  $I_{R,m1}$ , который является функцией базовой уставки  $I_{d>}$ :

$$I_{R,m2} = 0,5 \cdot I_{d>} >$$

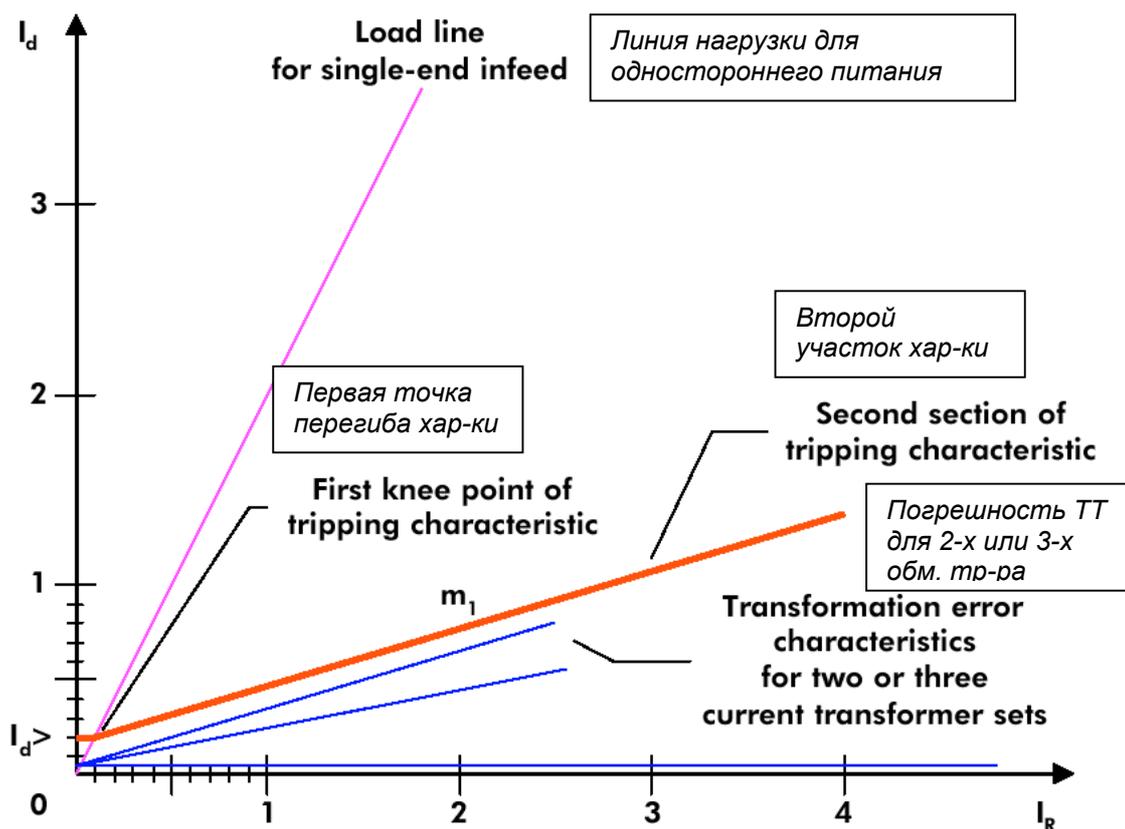
### 2.3.3 Второй участок характеристики срабатывания

Второй участок характеристики перекрывает диапазон нагрузочных токов, таким образом что на этом участке мы должны отстроиться не только от тока намагничивания но также и от дифференциального тока небаланса вызванного погрешностями трансформаторов тока.

Если мы рассчитаем погрешность в самом неблагоприятном случае для трансформаторов класса 10P, то максимальная допустимая погрешность в соответствии со стандартом DIN EN 60044-1 составляет 3% от номинального тока. Угловая погрешность может быть принята на уровне  $2^{\circ}$  при номинальном токе. Суммарная максимальная погрешность при номинальном токе может быть примерно оценена как  $(0,0-3+\sin 2^{\circ}) \approx 6,5\%$ . При увеличении тока до предела определяющего номинальную максимальную погрешность то для трансформаторов тока класса 10P она достигает максимум 10%. Погрешность не лимитируется при превышении предела максимальной кратности тока, ограниченного максимально допустимой погрешностью.

Зависимость погрешности трансформатора тока от величины протекающего тока носит нелинейный характер. В рабочем диапазоне токов т.е. при кратностях токах ниже чем максимально допустимая по условиям 10% погрешности, мы можем ожидать, что в худшем случае, погрешность не будет превышать 10%.

Второй участок характеристики срабатывания представляет собой прямую линию наклон которой должен обеспечивать отстройку от суммарного небаланса дифференциального тока вызванного погрешностью комплектов трансформаторов тока. Уставкой  $m_1$  задается наклон второго участка характеристики. Значение коэффициента  $m_1$ , задаваемое по умолчанию составляет 0,3 в защите для трехобмоточного трансформатора.



Линия характеризующая второй участок характеристики проходит через точку пересечения линии первого участка характеристики с линией тока нагрузки при одностороннем питании. Второй участок характеристики описывается уравнением:

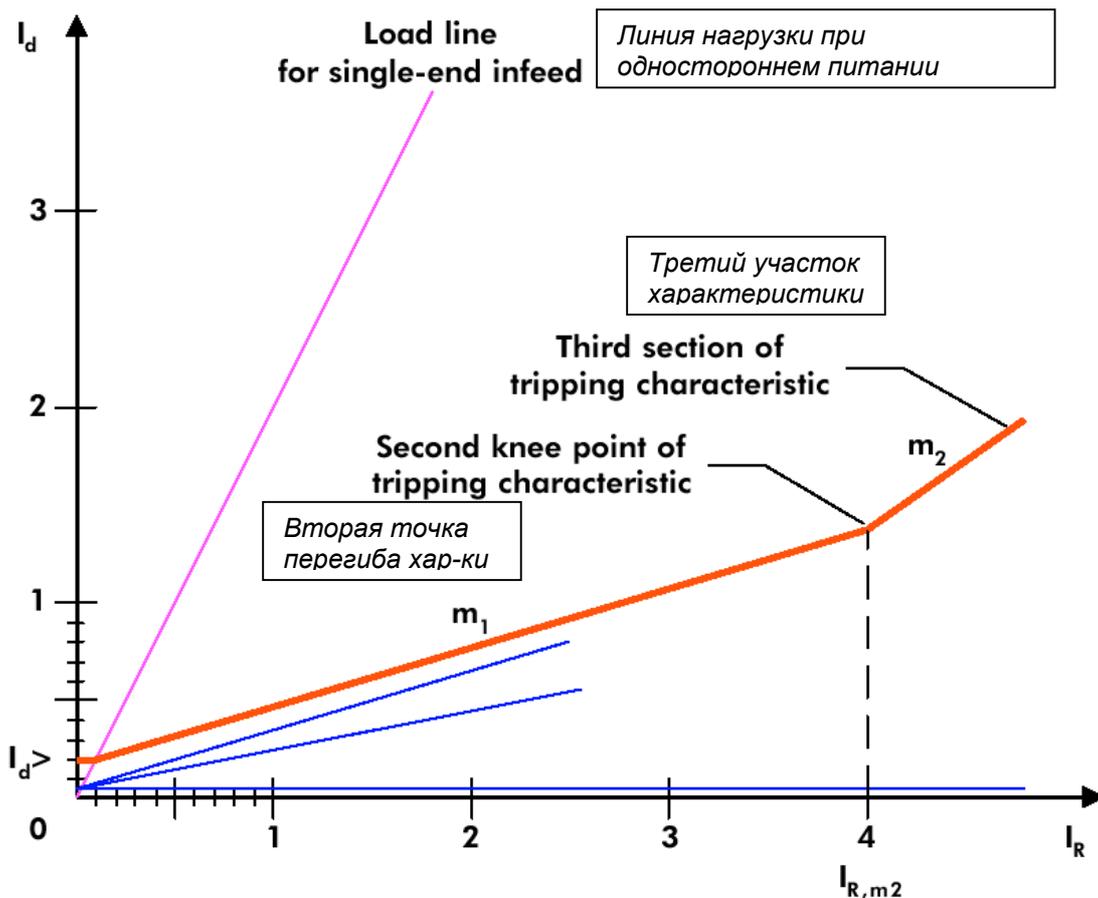
$$I_{d,y}(I_{R,y}) = m_1 \cdot I_{R,y} + I_d > \cdot (1 - 0,5 \cdot m_1)$$

Параллельный сдвиг первого участка характеристики при изменении базовой уставки  $I_d >$  влечет также параллельный сдвиг второго участка характеристики.

### 2.3.4 Третий участок характеристики срабатывания

Вторая точка перегиба характеристики срабатывания определяет конец зоны сверх токов в направлении увеличения тормозного тока в безаварийном режиме. В отдельных режимах она может достигать токов до четырехкратного номинального, например, при отключении параллельного трансформатора.

Следовательно вторая точка перегиба ( $I_{R,m2}$ ) значение которой устанавливаемое по умолчанию равно  $4 \cdot I_{ref} \cdot I_{R,m2}$ , должна задаваться равной максимально возможному току при работе трансформатора.



Тормозные токи лежащие за второй точкой перегиба характеристики оцениваются как непрерывный ток короткого замыкания. В случае действительно непрерывных токов, третий участок характеристики должен быть чрезвычайно крутым. Однако мы должны принимать во внимание возможность возникновения повреждения в защищаемой зоне как результат длительного протекания аварийного тока в системе, введено ограничение предельного значения  $m_2$  коэффициента наклона третьего участка характеристики. Значение устанавливаемое по умолчанию для коэффициента  $m_2$  равно 0,7.

Линия третьего участка характеристики проходит через точку пересечения вертикальной линии тормозного тока  $I_{R,m2}$  с линией второго участка характеристики срабатывания. Третий участок характеристики описывается следующим уравнением:

$$I_{d,y}(I_{R,y}) = m_2 \cdot I_{R,y} + I_{d >} \cdot (1 - 0,5 \cdot m_1) + I_{R,m2} \cdot (m_1 - m_2)$$

Параллельный сдвиг первого участка характеристики при изменении базовой уставки  $I_{d >}$  влечет также параллельный сдвиг третьего участка характеристики.

### 2.3.5 Алгоритм обработки $I_d$ и $I_R$

Для оценки значений дифференциального  $I_d$  и тормозного  $I_R$  токов в осях  $I_d - I_R$ , не используются мгновенные значения выпрямленных величин поскольку они не обеспечивают стабильность в работе при всех условиях.

Дифференциальный  $I_d$  и тормозной  $I_R$  токи подвергаются такой обработке как цифровое сглаживание. Главной целью такого сглаживания является необходимость обеспечения минимальных остаточных колебаний; оно также должно обеспечивать максимально возможное быстроедействие (время восстановления после переходного процесса). Поскольку оба этих требования находятся в естественном противоречии друг с другом, необходимо найти компромиссное решение. Двойное сглаживание дифференциального и тормозного токов достигается благодаря сложным алгоритмическим анализам.

Сначала выпрямленные значения дифференциального и тормозного токов подвергаются полупериодному нерекурсивному сглаживанию, имеющему очень маленькое время схождения. Исходные величины, использованные в этом сглаживании относятся к величинам одного сглаживания.

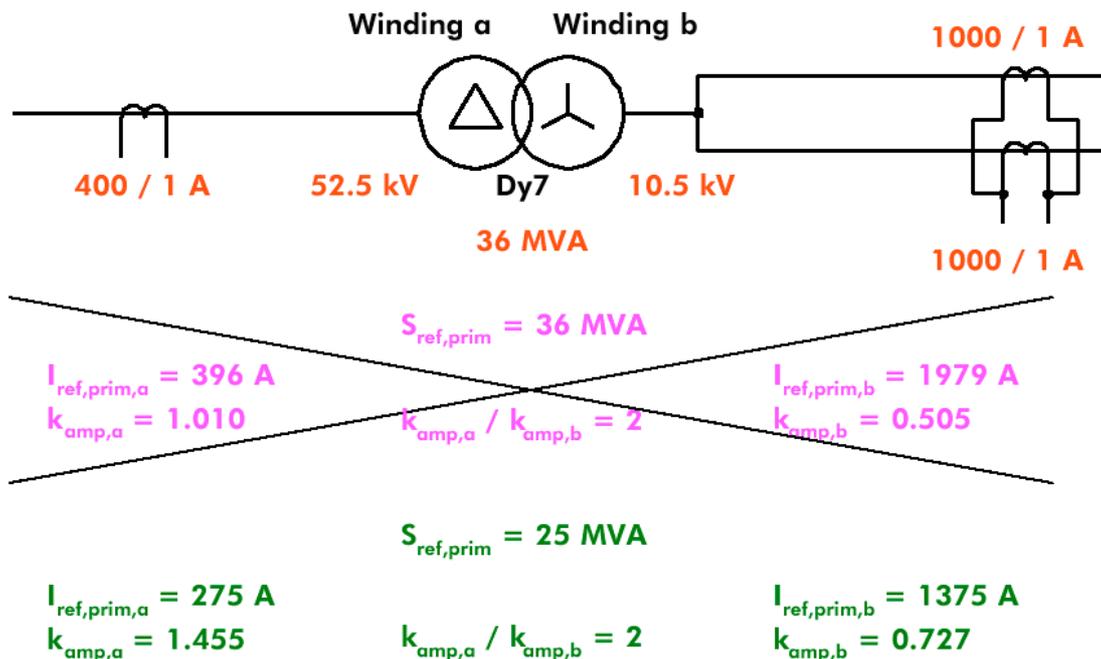
В последующем, втором сглаживании величины одного сглаживания подвергаются дополнительному рекурсивному сглаживанию. Исходные величины, использованные во втором сглаживании относятся к величинам двойного сглаживания.

### 3 Инструкции по выбору уставок для случаев специального применения

#### 3.1 Неудобный первичный номинальный ток трансформатора тока

⇒ Согласование амплитуды

В редких случаях возможно возникновение проблемы когда невозможно выполнить одно из условий необходимых для согласования амплитуды. На следующем примере приведен один из таких случаев:



Если в качестве базисной мощности  $S_{ref}$  выбрать номинальную мощность трансформатора  $S_{nom}$ , как это рекомендуется, то на стороне низкого напряжения не выполняется условие  $k_{amp} \geq 0,7$ . Это происходит из-за слишком большой разницы между первичным номинальным током трансформатора на первичном номинальном токе трансформатора тока, который равен 1000А, а номинальный ток обмотки низкого напряжения трансформатора составляет 1979А.

Одним из способов решения проблемы это изменить базисную мощность трансформатора. Отношение коэффициента амплитудного согласования рассчитанного выше к минимально допустимому составляет  $0,505/0,7=0,72$ . Если мы уменьшим базисную мощность трансформатора как минимум в такой пропорции  $0,72 \cdot 36 \text{ MVA} = 25,9 \text{ MVA} \approx 25 \text{ MVA}$ , то проблема согласования амплитуд снимается.

⇒ Характеристика срабатывания

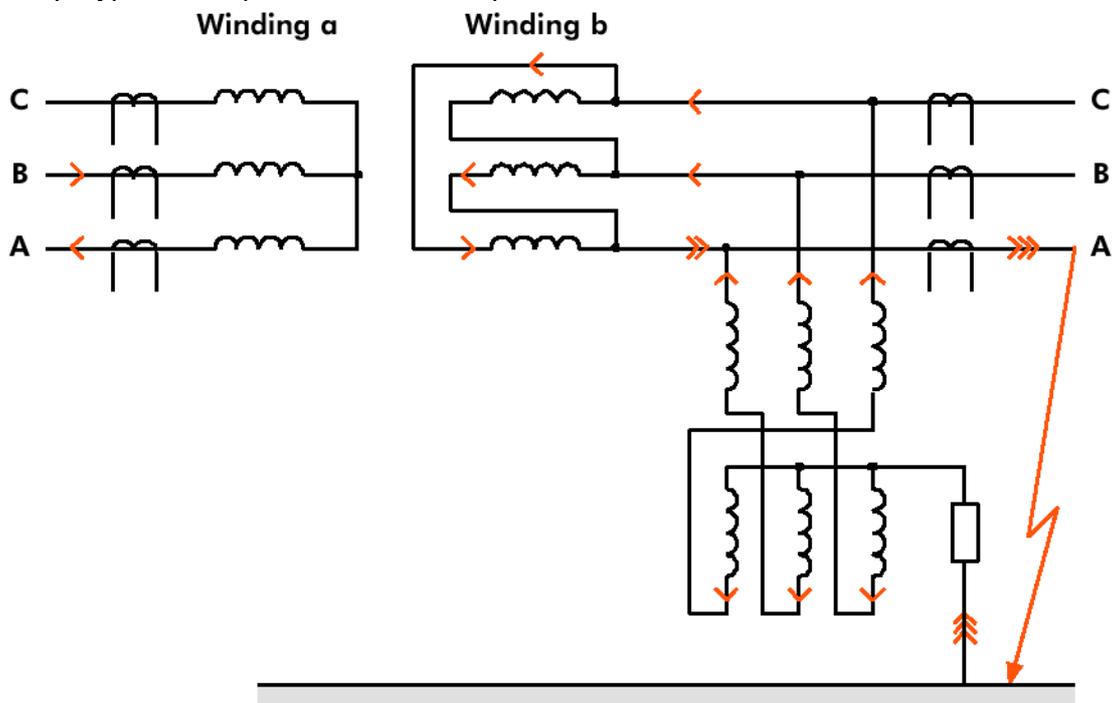
Однако следует отметить, что из-за амплитудного согласования выполненного с отклонением от номинальных параметров трансформатора, токи фаз рассчитываются большими на коэффициент  $1,455/1,010 = 1,44$ . По этой причине, уставка базисного тока  $I_{d>}$  характеристики отключения должна быть также повышена с тем же коэффициентом  $1,44 \cdot 0,2 = 0,288 \approx 0,3$ .

### 3.2 Заземляющий трансформатор в зоне защиты

#### ⇒ Согласование фаз (группы соединений) и фильтрация тока нулевой последовательности

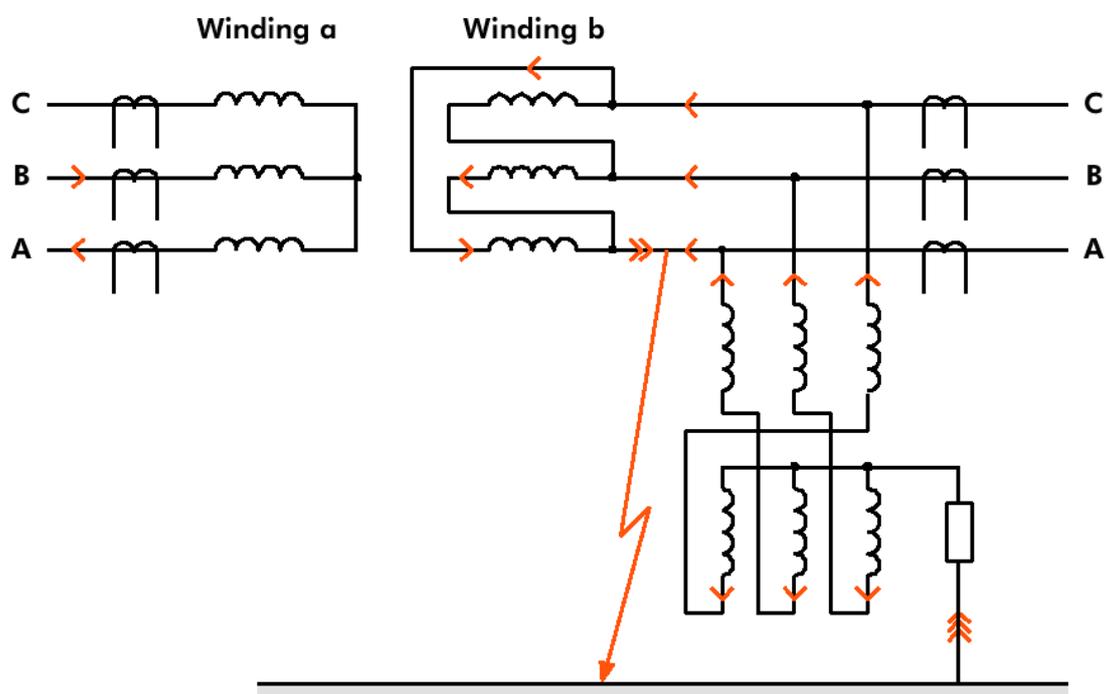
Если с одной из сторон в зоне дифференциальной защиты трансформатора находится заземляющий трансформатор от с этой стороны обязательно вводится фильтрация тока нулевой последовательности. Это выполняется даже если обмотки фаз силового трансформатора собраны в треугольник на стороне где выполнено подключение заземляющего трансформатора. Основное требование заключается в том что фильтрация тока нулевой последовательности всегда вводится на той стороне где в зоне дифференциальной защиты возможно заземление нейтрали по условиям режима работы сети.

На следующем рисунке показано растекание токов в схеме с подобной конфигурацией, при внешнем однофазном замыкании.



На стороне высокого напряжения фильтрация токов нулевой последовательности выведена, поскольку нейтраль трансформатора не заземлена и таким образом нет необходимости в формировании токов согласованных по фазе в зависимости от группы соединений трансформатора. Следует также отметить что на стороне низкого напряжения выполняется как фильтрация тока нулевой последовательности так и согласование фаз в соответствии с группой соединений номер 5 в сочетании с тем что токи фаз на стороне низкого напряжения должны установиться меньше с коэффициентом  $\sqrt{3}$  чем токи в фазах на стороне высокого напряжения трансформатора. Это означает что для измерительной системы в фазе «С» оба согласованных тока равны нулю а для измерительных систем фаз «В» и «А» согласованные токи взаимно уравниваются.

В случае замыкания в защищаемой зоне дифференциальная защита трансформатора действует на отключение. Приведенный ниже рисунок показывает растекание токов в случае однофазной подпитки места замыкания со стороны высокого напряжения:

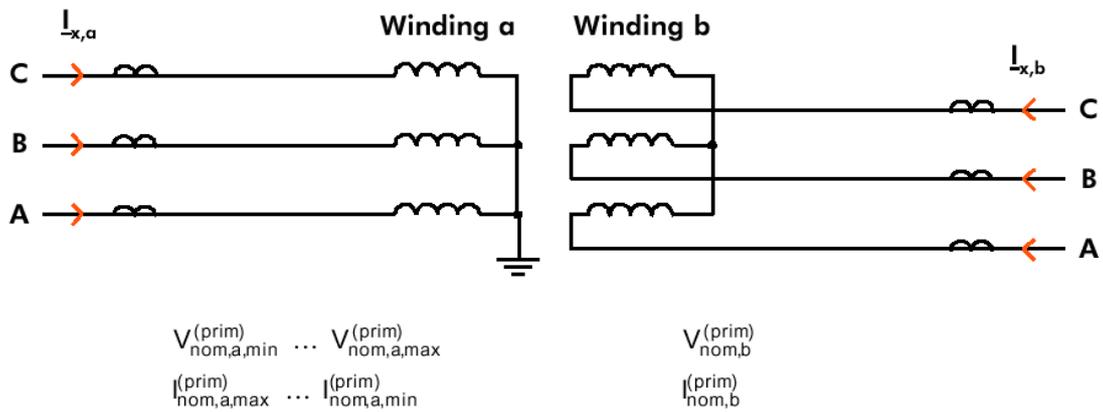


В случае односторонней подпитки места замыкания со стороны обмотки высокого напряжения, комплект трансформаторов тока на стороне низкого напряжения не обтекается током замыкания. Если токи в фазах А и В на стороне обмотки высокого напряжения достигают достаточной величины это приводит к срабатыванию дифференциальной защиты трансформатора.

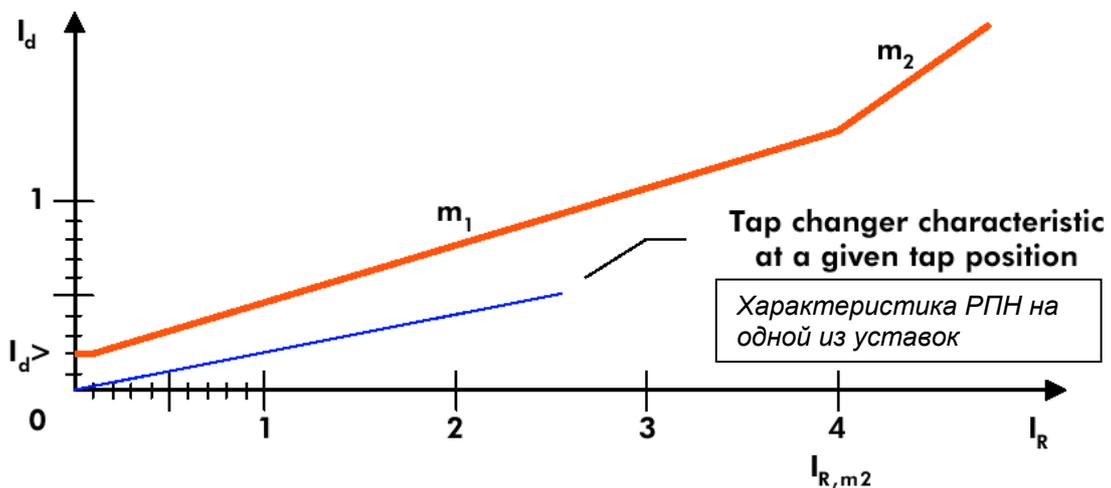
### 3.3 Трансформаторы с регулированием напряжения

#### ⇒ Амплитудное согласование

Питающие трансформаторы обычно имеют возможность регулирования напряжения на шинах низкого напряжения путем переключения отпаяк обмотки высокого напряжения. Номинальный коэффициент трансформации изменяется при работе РПН, т.е. номинальное напряжение стороны высокого напряжения и соответствующий ей номинальный ток не являются в этом случае постоянной величиной и регулируются в диапазоне определяемым диапазоном РПН.



Следовательно, амплитудное согласование может быть достигнуто только при среднем номинальном напряжении стороны высокого напряжения, которое также должно быть определено. В зависимости от фактического положения РПН, появляются и линейно изменяются большие или меньшие значения дифференциального и тормозного токов. Изменение отпайки РПН приводит к изменению наклона этой характеристики регулятора напряжения.



С учетом характеристики срабатывания дифференциальной защиты, амплитудное согласование должно выполняться исходя из такого среднего номинального напряжения со стороны обмотки высокого напряжения, чтобы совпадали наклоны характеристик РПН в крайних положениях.

$$\frac{|I_{vec,y,a,max} + I_{vec,y,b}|}{\frac{1}{2} \cdot |I_{vec,y,a,max} - I_{vec,y,b}|} = \frac{|I_{vec,y,a,min} + I_{vec,y,b}|}{\frac{1}{2} \cdot |I_{vec,y,a,min} - I_{vec,y,b}|}$$

При протекании тока нагрузки со стороны высокого напряжения «а» в направлении стороны низкого напряжения «b»,  $I_{vec,y,a} = I_{vec,y,a}$  и  $I_{vec,y,b} = I_{vec,y,b}$  :

$$\frac{|I_{vec,y,a,max} - I_{vec,y,b}|}{\frac{1}{2} \cdot |I_{vec,y,a,max} + I_{vec,y,b}|} = \frac{|I_{vec,y,a,min} - I_{vec,y,b}|}{\frac{1}{2} \cdot |I_{vec,y,a,min} + I_{vec,y,b}|}$$

Кроме того,  $I_{vec,y,a,max} > I_{vec,y,b}$  и  $I_{vec,y,a,min} < I_{vec,y,b}$  :

$$\frac{I_{vec,y,a,max} - I_{vec,y,b}}{I_{vec,y,a,max} + I_{vec,y,b}} = \frac{I_{vec,y,b} - I_{vec,y,a,min}}{I_{vec,y,a,min} + I_{vec,y,b}}$$

При желаемом среднем значении  $I_{vec,y,a,mid} = I_{vec,y,b}$  согласование амплитуд закончено:

$$\frac{I_{vec,y,a,max} - I_{vec,y,a,mid}}{I_{vec,y,a,max} + I_{vec,y,a,mid}} = \frac{I_{vec,y,a,mid} - I_{vec,y,a,min}}{I_{vec,y,a,min} + I_{vec,y,a,mid}}$$

$$\begin{aligned} I_{vec,y,a,max} \cdot I_{vec,y,a,min} + I_{vec,y,a,max} \cdot I_{vec,y,a,mid} - I_{vec,y,a,mid} \cdot I_{vec,y,a,min} - I_{vec,y,a,mid}^2 &= \\ = I_{vec,y,a,max} \cdot I_{vec,y,a,mid} - I_{vec,y,a,max} \cdot I_{vec,y,a,min} - I_{vec,y,a,mid} \cdot I_{vec,y,a,min} + I_{vec,y,a,mid}^2 & \end{aligned}$$

$$2 \cdot I_{vec,y,a,mid}^2 = 2 \cdot I_{vec,y,a,max} \cdot I_{vec,y,a,min}$$

$$I_{vec,y,a,mid} = \sqrt{I_{vec,y,a,max} \cdot I_{vec,y,a,min}}$$

Таким образом для выполнения согласования амплитуд, необходимо задавать среднегеометрическое между минимальным и максимальным напряжениями стороны высокого напряжения:

$$V_{nom,a,mid}^{(prim)} = \sqrt{V_{nom,a,min}^{(prim)} \cdot V_{nom,a,max}^{(prim)}}$$

⇒ **Характеристика срабатывания**

Наклон второго участка характеристики срабатывания  $m_1$  должен быть увеличен в соответствии с наклоном характеристики РПН в крайнем положении, т.е. уставка  $m_1$  должна быть увеличена следующим образом:

$$\frac{I_{nom,a,max}^{(prim)} - I_{nom,a,mid}^{(prim)}}{\frac{1}{2} \cdot (I_{nom,a,max}^{(prim)} + I_{nom,a,mid}^{(prim)})} \quad \text{or} \quad \frac{I_{nom,a,mid}^{(prim)} - I_{nom,a,min}^{(prim)}}{\frac{1}{2} \cdot (I_{nom,a,min}^{(prim)} + I_{nom,a,mid}^{(prim)})}$$

## 4 Инструкция по опробованию и наладке

### 4.1 Проверка сдвигов по фазе токов в фазах

Для оценки правильности подключения фазных токов выполняется проверка чередования фаз путем измерения сдвигов фаз фазных токов доступная в меню измерения рабочих параметров.

При идеально симметричной нагрузке трансформатора, углы фазных токов на данном конце должны индицироваться как показано ниже, с учетом направления вращения поля в системе:

|  |  |   |
|--|--|---|
|  | Вращение поля по часовой стрелке                                 | Вращение поля против часовой стрелки                              |
|  | $\varphi_{AB,z} = \varphi_{BC,z} = \varphi_{CA,z} = 120^{\circ}$ | $\varphi_{AB,z} = \varphi_{BC,z} = \varphi_{CA,z} = -120^{\circ}$ |

В этом случае уставка в параметрах функций, задающая направление вращения поля не оказывает влияния на результаты измерений.

Разность фаз между фазными токами высокой и низкой сторон должна показываться на дисплее согласно приведенной ниже таблицы с учетом группы соединений трансформатора и направления вращения поля в системе:

| Группа соед. | Поле вращ. по часовой стрелке       | Поле вращ. против час. стр.         |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Vector Group | Clockwise Rotating Field            | Counterclockwise Rotating Field     |
| 0            | $\varphi_{x,a-z} = \pm 180^{\circ}$ | $\varphi_{x,a-z} = \pm 180^{\circ}$ |
| 1            | $\varphi_{x,a-z} = -150^{\circ}$    | $\varphi_{x,a-z} = 150^{\circ}$     |
| 2            | $\varphi_{x,a-z} = -120^{\circ}$    | $\varphi_{x,a-z} = 120^{\circ}$     |
| 3            | $\varphi_{x,a-z} = -90^{\circ}$     | $\varphi_{x,a-z} = 90^{\circ}$      |
| 4            | $\varphi_{x,a-z} = -60^{\circ}$     | $\varphi_{x,a-z} = 60^{\circ}$      |
| 5            | $\varphi_{x,a-z} = -30^{\circ}$     | $\varphi_{x,a-z} = 30^{\circ}$      |
| 6            | $\varphi_{x,a-z} = \pm 0^{\circ}$   | $\varphi_{x,a-z} = \pm 0^{\circ}$   |
| 7            | $\varphi_{x,a-z} = 30^{\circ}$      | $\varphi_{x,a-z} = -30^{\circ}$     |
| 8            | $\varphi_{x,a-z} = 60^{\circ}$      | $\varphi_{x,a-z} = -60^{\circ}$     |
| 9            | $\varphi_{x,a-z} = 90^{\circ}$      | $\varphi_{x,a-z} = -90^{\circ}$     |
| 10           | $\varphi_{x,a-z} = 120^{\circ}$     | $\varphi_{x,a-z} = -120^{\circ}$    |
| 11           | $\varphi_{x,a-z} = 150^{\circ}$     | $\varphi_{x,a-z} = -150^{\circ}$    |

В этом случае уставки в параметрах функций, задающие направление вращения поля не оказывают влияния на результаты измерений. С другой стороны, изменение уставки в группе функциональных параметров, задающей полярность (прямая/обратная) подключения трансформаторов тока, изменяет результаты измерений на  $\pm 180^{\circ}$ .

## 4.2 Проверка базисной (основной) уставки характеристики срабатывания дифференциальной защиты

Значение установленной базисной уставки может быть легко проверено путем подачи токов только с одной стороны (см. Раздел 2.3.2).

### 4.2.1 Симметричное трехфазное питание с одной стороны

Ток срабатывания  $I_{x,z}$  определяется путем подачи симметричного трехфазного питания с одной стороны, при этом необходимо учитывать коэффициент амплитудного согласования  $k_{amp,z}$  :

$$I_{x,z} = \frac{I_d >}{k_{amp,z}} \cdot I_{nom,z}$$

На дисплее индицируются дифференциальный и тормозной токи :

$$I_{d,y} = \frac{k_{amp,z} \cdot I_{x,z}}{I_{nom,z}}$$

$$I_{R,y} = \frac{1}{2} \cdot \frac{k_{amp,z} \cdot I_{x,z}}{I_{nom,z}}$$

### 4.2.2 Однофазное питание с одной стороны

При подаче однофазного питания с одной стороны необходимо принимать во внимание не только коэффициент амплитудного согласования  $k_{amp,z}$  но и другой коэффициент согласования  $k_{vec,z}$  соответствующий группе соединений трансформатора и уставку ввода/вывода фильтрации тока нулевой последовательности. Ток срабатывания на отключение определяется следующим образом:

$$I_{x,z} = \frac{I_d >}{k_{amp,z} \cdot k_{vec,z}} \cdot I_{nom,z}$$

Соответствующий коэффициент согласования  $k_{vec,z}$  может быть взят из следующей таблицы.

Дифференциальный и тормозной токи выводятся на дисплей как измеряемые величины:

$$I_{d,y} = \frac{k_{amp,z} \cdot k_{vec,z} \cdot I_{x,z}}{I_{nom,z}}$$

$$I_{R,y} = \frac{1}{2} \cdot \frac{k_{amp,z} \cdot k_{vec,z} \cdot I_{x,z}}{I_{nom,z}}$$

Коэффициент согласования  $K_{vec,z}$  для индивидуальной измерительной системы 'y' как функция от фазы 'x' в которую подается питание и для стороны высокого напряжения:

|  | x = A  |        |        | x = B  |        |        | x = C  |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | y = 1  | y = 2  | y = 3  | y = 1  | y = 2  | y = 3  | y = 1  | y = 2  | y = 3  |
|  | 1/0.67 | 0/0.33 | 0/0.33 | 0/0.33 | 1/0.67 | 0/0.33 | 0/0.33 | 0/0.33 | 1/0.67 |

Без фильтрации 3Io/ с фильтрацией 3Io

Коэффициент согласования  $K_{vec,z}$  для индивидуальной измерительной системы 'y' как функция от фазы 'x' в которую подается питание и как функция группы соединений для стороны низкого напряжения:

| Vector Group | x = A  |        |        | x = B  |        |        | x = C  |        |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|              | y = 1  | y = 2  | y = 3  | y = 1  | y = 2  | y = 3  | y = 1  | y = 2  | y = 3  |
| 0            | 1/0.67 | 0/0.33 | 0/0.33 | 0/0.33 | 1/0.67 | 0/0.33 | 0/0.33 | 0/0.33 | 1/0.67 |
| 1            | 0.58   | 0      | 0.58   | 0.58   | 0.58   | 0      | 0      | 0.58   | 0.58   |
| 2            | 0/0.33 | 0/0.33 | 1/0.67 | 1/0.67 | 0/0.33 | 0/0.33 | 0/0.33 | 1/0.67 | 0/0.33 |
| 3            | 0      | 0.58   | 0.58   | 0.58   | 0      | 0.58   | 0.58   | 0.58   | 0      |
| 4            | 0/0.33 | 1/0.67 | 0/0.33 | 0/0.33 | 0/0.33 | 1/0.67 | 1/0.67 | 0/0.33 | 0/0.33 |
| 5            | 0.58   | 0.58   | 0      | 0      | 0.58   | 0.58   | 0.58   | 0      | 0.58   |
| 6            | 1/0.67 | 0/0.33 | 0/0.33 | 0/0.33 | 1/0.67 | 0/0.33 | 0/0.33 | 0/0.33 | 1/0.67 |
| 7            | 0.58   | 0      | 0.58   | 0.58   | 0.58   | 0      | 0      | 0.58   | 0.58   |
| 8            | 0/0.33 | 0/0.33 | 1/0.67 | 1/0.67 | 0/0.33 | 0/0.33 | 0/0.33 | 1/0.67 | 0/0.33 |
| 9            | 0      | 0.58   | 0.58   | 0.58   | 0      | 0.58   | 0.58   | 0.58   | 0      |
| 10           | 0/0.33 | 1/0.67 | 0/0.33 | 0/0.33 | 0/0.33 | 1/0.67 | 1/0.67 | 0/0.33 | 0/0.33 |
| 11           | 0.58   | 0.58   | 0      | 0      | 0.58   | 0.58   | 0.58   | 0      | 0.58   |

Без фильтрации 3Io/ с фильтрацией 3Io

## Приложение

### **А Группы соединений и конфигурация трансформаторов**

Группа соединений идентифицирует вид соединений обмоток трансформатора и соотношения сдвига фаз соответствующих им фаз напряжения. Она состоит из буквенного символа обозначающего вид соединения фаз обмоток и кодовое число определяющее сдвиг фаз.

Для трехфазной системы переменного тока различаются следующие виды соединения обмоток:

- Delta (D,d) – Треугольник ( $\Delta$ )
- Wye (Y,y) – Звезда (Y)
- Zigzag (Z,z) – Зигзаг (Z)

Заглавные буквы используются для обозначения соединения обмотки высокого напряжения и соответственно прописные буквы для обозначения соединения обмоток среднего и низкого напряжения. При обозначении группы соединений первой указывается заглавная буква. Если несколько обмоток имеют одинаковые номинальные напряжения то заглавной буквой обозначается обмотка с большей располагаемой мощностью и если и мощности обмоток также равны то заглавной буквой обозначается обмотка является первой по порядку подключения принятому выше. Если имеется точка нейтрали обмотки соединенной в звезду или зигзаг то принимается идентификационный символ YN или ZN либо yn или zn , соответственно.

Для определения сдвига фаз в качестве опорного используется вектор напряжения стороны высокого напряжения. Кодовое число умноженное на угол  $30^{\circ}$  определяет угол на который вектор обмотки низкого напряжения отстает от вектора напряжения стороны высокого напряжения. Для многообмоточных трансформаторов вектор напряжения обмотки на стороне высокого напряжения также является опорным при определении группы соединений трансформатора; символ обозначающий эту обмотку указывается первым. Символы других обмоток указываются в последовательности уменьшения номинального напряжения обмоток.

Следовательно, обозначение группы соединения трансформатора является функцией направления взгляда. Группы соединений относящиеся к двум различным направлениям взгляда являются добавочными и дополняются до номера 12.

Группы соединений у которых соответствующие обмотки фаз относятся к одной и той же фазе считаются «правильными» группами соединений. Приведен ниже перечень включает только «правильные» группы соединений; включены все возможные «правильные» группы соединений.

«Неправильные» группы соединений создаются из «правильных» групп путем циклического обратного чередования фаз или транспозиции фаз.

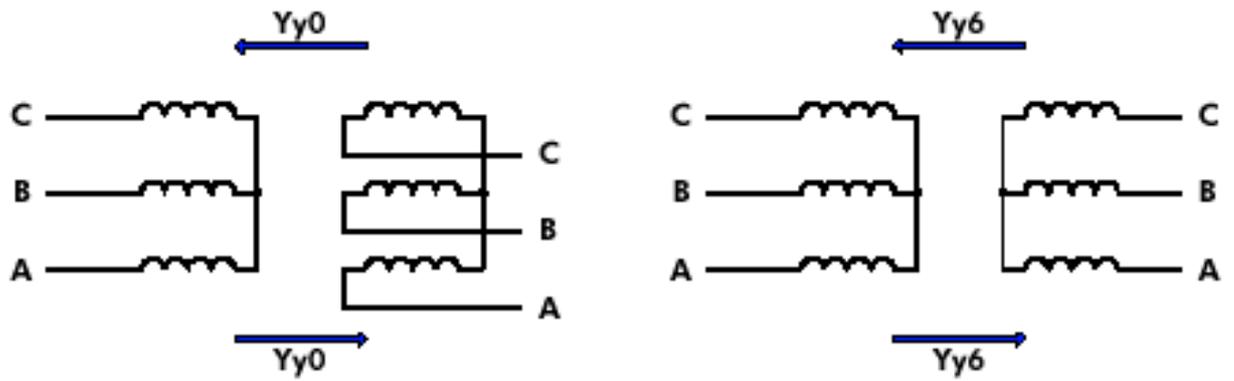
При транспозиции фаз «А» с «С», «В» с «А» и «С» с «В» мы получаем :

- Из «правильной» группы Yy-0: «неправильную» группу Yy-4
- Из «правильной» группы Yy-6: «неправильную» группу Yy-10
- Из «правильной» группы Yy-5: «неправильную» группу Yy-9

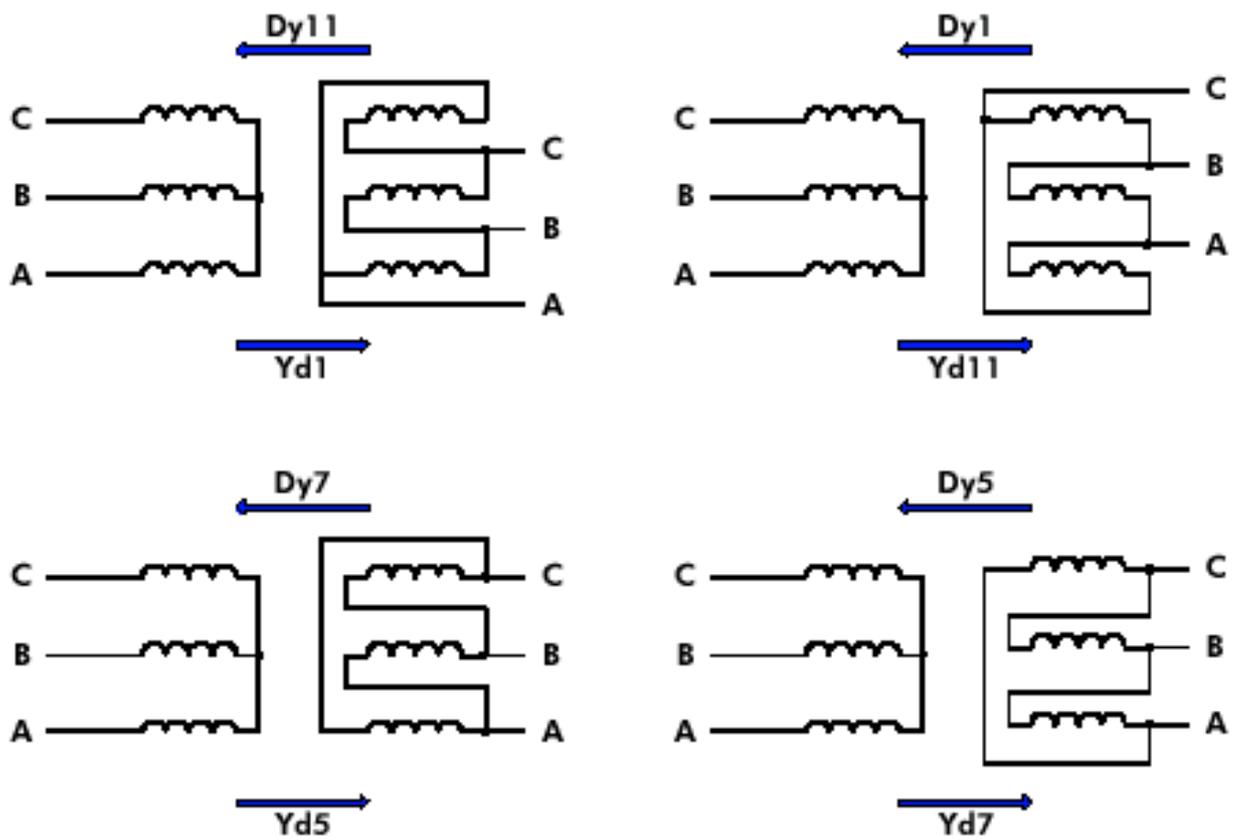
При транспозиции фаз «А» с «В», «В» с «С» и «С» с «А» мы получаем :

- Из «правильной» группы Yy-0: «неправильную» группу Yy-8
- Из «правильной» группы Yy-6: «неправильную» группу Yy-2
- Из «правильной» группы Yy-7: «неправильную» группу Yy-3

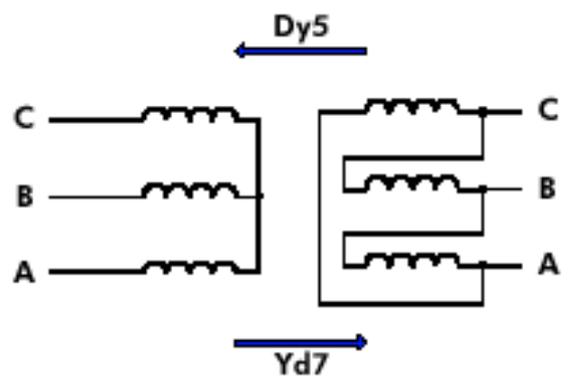
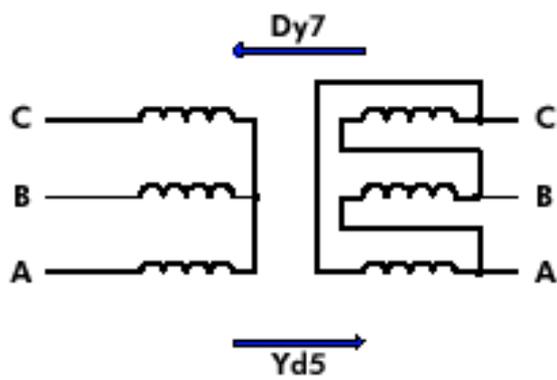
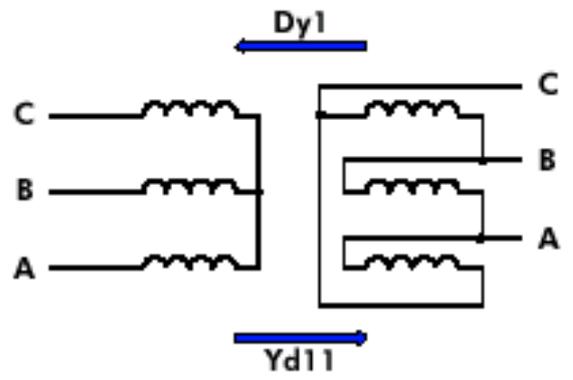
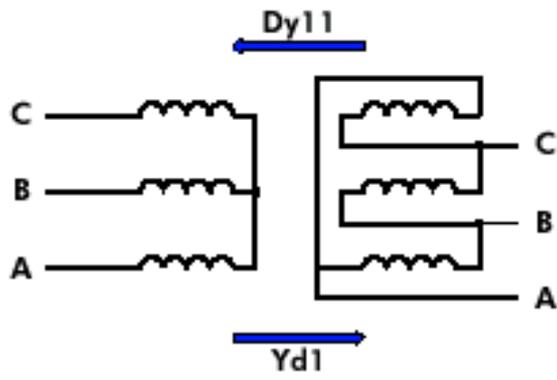
Все «правильные» группы видов  $Yy$  :



Все «правильные» группы видов  $Dy$  или  $Yd$ :



Все «правильные» группы вида Yz и Zy:



Все «правильные» группы вида Dz и Zd:

