

25

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по определению токов и напряжений при КЗ на всех выводах
трансформаторов со схемой соединения Y/Δ - 11
без метода симметричных составляющих
и по методу симметричных составляющих

составила инженер ЮЦПК
РП «Южэнерготехнадзор»
Перель Т.Г.

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трехфазный трансформатор может быть образован из трех однофазных, если их обмотки соединены между собой. Такой трансформатор называют трансформаторной группой или групповым трансформатором.

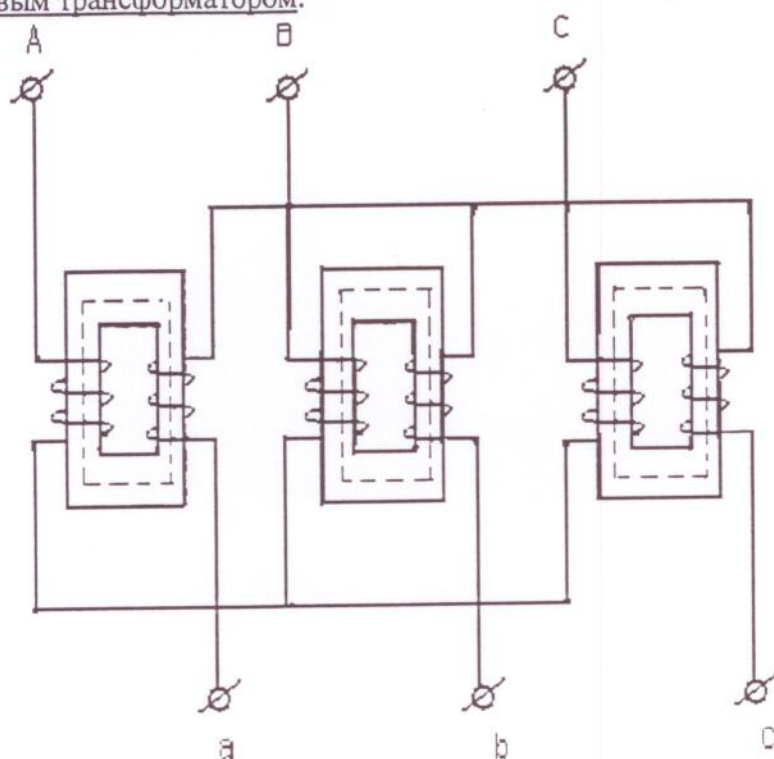


Рис.1. Принципиальная схема трехфазной трансформаторной группы.

Трехфазный трансформатор с общей магнитной системой для трех фаз с тремя стержнями называется трехстержневым трансформатором.

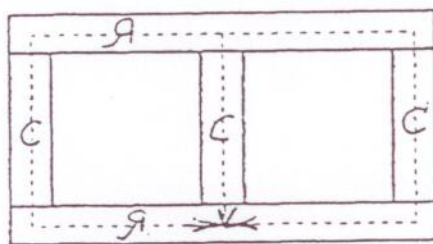


Рис.2. Магнитная цепь стержневого трехфазного трансформатора.

Трехфазные трансформаторы средней и малой мощности выполняются, как правило, трехстержневыми.

Магнитные цепи у группового трансформатора совершенно независимые друг от друга, одинаковые по длине, в то время, как у трехстержневого трансформатора они связаны и магнитная проводимость для потоков крайних фаз меньше, чем для средней фазы.

При подведении к фазам трехстержневого трансформатора на холостом ходу симметричных напряжений, намагничивающие токи образуют несимметричную систему, где токи двух крайних фаз А и С больше, чем ток средней фазы В. При небольшой нагрузке эта асимметрия сглаживается.

В трехфазных трансформаторах положительному направлению тока от начала к концу обмотки должно соответствовать определенное направление магнитного потока в стержнях, и в стержневых трансформаторах это направление одинаковое.

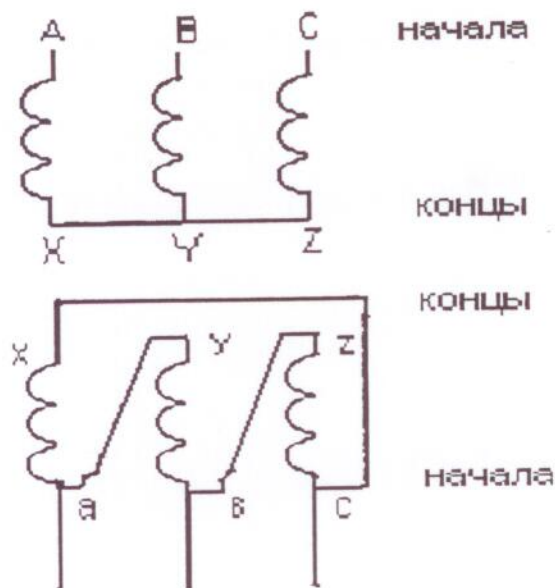


Рис. 3. Трансформатор группы Y/Δ-11 - ах-сз-бу.

Каждая обмотка трансформатора группы Y/Δ-11 может быть соединена звездой или треугольником. При соединении треугольником начало первой фазной обмотки соединяется с концом второй, а начало второй фазной обмотки - с концом третьей и начало третьей - с концом первой.

При соединении звездой все начала, а в случае соединения треугольником общие точки обмоток присоединяются к сети.

Начала фазных обмоток высшего напряжения принято обозначать большими буквами А, В, С, а их концы - буквами X, Y, Z.

Начала и концы обмоток низшего напряжения обозначаются соответственно малыми буквами а, б, с и х, у, з.

Следует отметить, что понятия начала и конца обмоток условны, но необходимы для правильного соединения фазных обмоток.

а) При соединении обмоток звездой под действием приложенного напряжения U_1 в обмотке протекает ток I_1 , возникает магнитный поток и наводит ЭДС, первые гармоники которой в фазах будут:

$$e_{A1} = E_{m1} \cdot \sin \omega t$$

$$e_{B1} = E_{m1} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_{C1} = E_{m1} \cdot \sin(\omega t - 240^\circ)$$

$$U_{A1} = U_{m1} \cdot \sin \omega t = e_{A1},$$

где 1 – первая гармоника

$$U_{A1} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi} \quad U_{\phi} = \frac{U_{A1}}{\sqrt{3}}$$

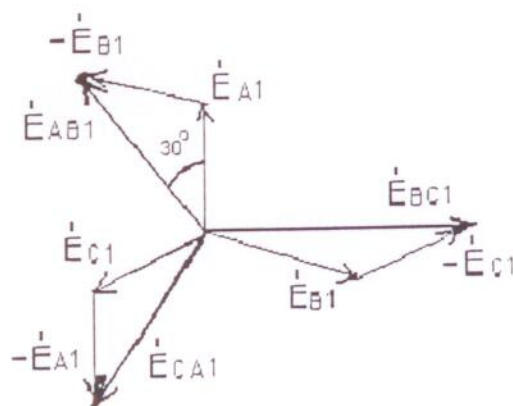
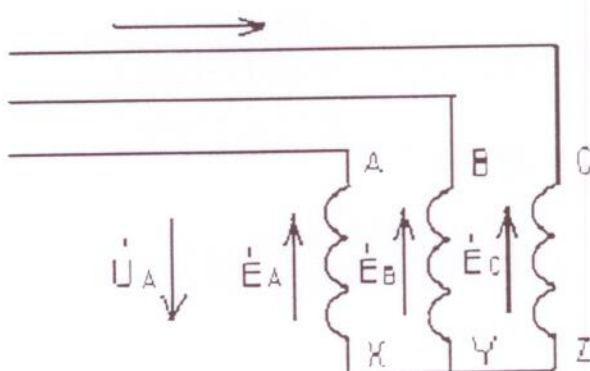


Рис. 4. Векторная диаграмма ЭДС.

Работать с ЭДС на х.х. не нужно, лучше работать с напряжениями во всех случаях.

Чтобы определить линейные ЭДС, применяя второй закон Кирхгофа, нужно иметь в виду, что обходя любой из 3-х контуров (А-Х) - (У-В) на высокой стороне звезды, перемещаемся по обмотке А от начала А к концу Х, а по обмотке В - от ее конца У к началу В, т.е. изменяют направление обхода обмотки В относительно обмотки А. В этом случае производится вычитание векторов. Так, например, чтобы получить линейную ЭДС E_{AB1} , нужно повернуть вектор E_{B1} на 180 градусов и провести вектор $-E_{B1}$ из конца вектора E_{A1} . Точно также линейная ЭДС $E_{BC1} = E_{B1} - E_{C1}$ и линейная ЭДС $E_{CA1} = E_{C1} - E_{A1}$.

(Из напряжения опережающей фазы вычитают напряжение отстающей фазы. Поэтому $U_A - U_B$, $U_B - U_C$, $U_C - U_A$).

Векторы линейных ЭДС опережают векторы фазных ЭДС на угол 30 градусов, по величине $E_{л1} = E_{ф1} \cdot \sqrt{3}$.

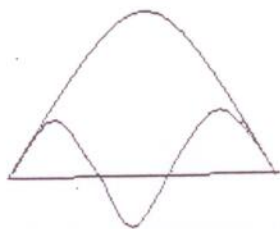


Рис. 5. Третьи гармоники ЭДС в фазах.

$$e_{A3} = E_{u3} \cdot \sin 3\omega t$$

$$e_{B3} = E_{u3} \cdot \sin 3(\omega t - 120^\circ) = E_{u3} \cdot \sin 3\omega t$$

$$e_{C3} = E_{u3} \cdot \sin 3(\omega t - 240^\circ) = E_{u3} \cdot \sin 3\omega t$$

Отсюда следует, что при соединении звездой в линейном напряжении нет третьей гармонической ЭДС, т.к. в фазах они все равны между собой и направлены к нулевой точке или от нее, совпадая по фазе. И по каждому из контуров

(A-X) - (Y-B)	$\dot{E}_{A3} = \dot{E}_{B3} = \dot{E}_{C3}$	или так	$\dot{E}_{A3} = \dot{E}_{B3} = \dot{E}_{C3}$
(B-Y) - (Z-C)	↑↑↑		↑
(C-Z) - (X-A)			

Рис. 6. Векторные диаграммы ЭДС третьих гармоник.

Третьи гармонические фазных ЭДС и напряжений уравниваются, и третьей гармонической в линейных ЭДС и напряжениях нет.

Все сказанное относительно ЭДС справедливо и для напряжений, только нужно иметь в виду, что в первичной обмотке трансформатора ЭДС и напряжения сдвинуты друг по отношению к другу на полпериода - на 180 градусов.

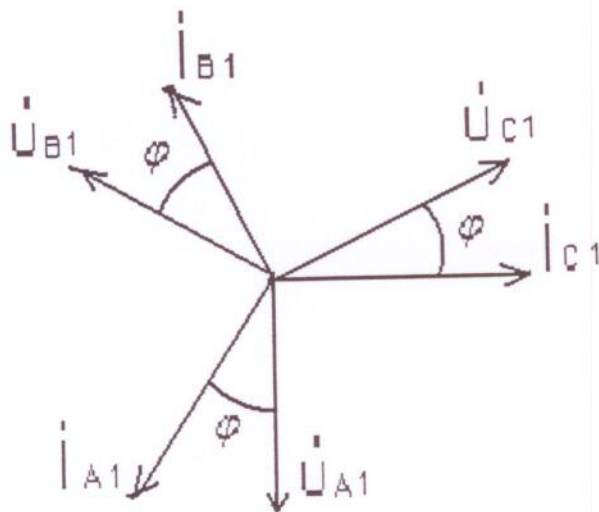


Рис. 7. Векторные диаграммы токов и напряжений прямой последовательности.

Лучше на векторной диаграмме рисовать \dot{U} и \dot{E} совпадающими по фазе, приняв противоположные направления отсчета, как на схеме рис. 7.

При соединении звездой фазные токи одновременно являются и линейными:

$$I_{\phi} = I_{\phi}.$$

Так как при соединении звездой третьи гармонические отсутствуют в линейном напряжении, то они отсутствуют и в линейном (фазном токе).

Если все три обмотки равномерно нагружены током $I_{\phi 1}$, смещенным относительно напряжения $U_{\phi 1}$ на угол φ , то активная мощность трехфазной системы на стороне звезды – на стороне высокого напряжения,

$$\text{ввиду } U_{\phi 1} = \frac{U_{\phi 1}}{\sqrt{3}} \quad I_{\phi 1} = I_{\phi 1}, \text{ будет:}$$

$$P = 3U_{\phi 1} \cdot I_{\phi 1} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\phi 1} \cdot I_{\phi 1} \cdot \cos \varphi.$$

Соответственно реактивная мощность будет:

$$Q = 3U_{\phi 1} \cdot I_{\phi 1} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\phi 1} \cdot I_{\phi 1} \cdot \sin \varphi.$$

$$\text{А полная мощность } S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

При соединении трехфазной обмотки треугольником первые гармонические фазных ЭДС обмоток образуют также, как и при соединении звездой симметричную трехлучевую звезду векторов \dot{E}_{a1} , \dot{E}_{b1} , \dot{E}_{c1} .

Так от узла *a* течет ток I'_{ax} и подходит ток I'_{cz} : $I'_a = I'_{ax} - I'_{cz}$,

Таким образом, чтобы получить линейный ток I'_a , нужно произвести вычитание векторов I'_{ax} и I'_{cz} .

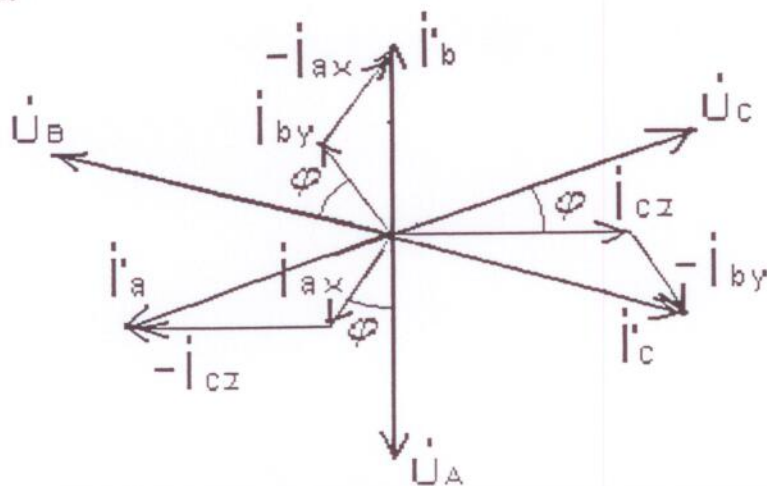


Рис. 10. Векторная диаграмма линейных и фазных токов на низкой стороне (на стороне треугольника) трансформатора.

Из диаграммы следует, что $I_{\Delta 1} = I_{\phi 1} \cdot \sqrt{3}$.

$$I_{\phi 1} = \frac{I_{\Delta 1}}{\sqrt{3}}, \quad U_{\Delta 1} = U_{\phi 1}.$$

Мощность системы при соединении обмоток треугольником составляет:

$$P = 3U_{\phi 1} \cdot I_{\phi 1} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\Delta 1} \cdot I_{\Delta 1} \cdot \cos \varphi$$

Большое эксплуатационное значение при включении трансформатора на параллельную работу имеет взаимное направление векторов первичной и вторичной ЭДС. Поэтому, кроме указания соединения первичной и вторичной обмоток, вводится обозначение угла между этими векторами.

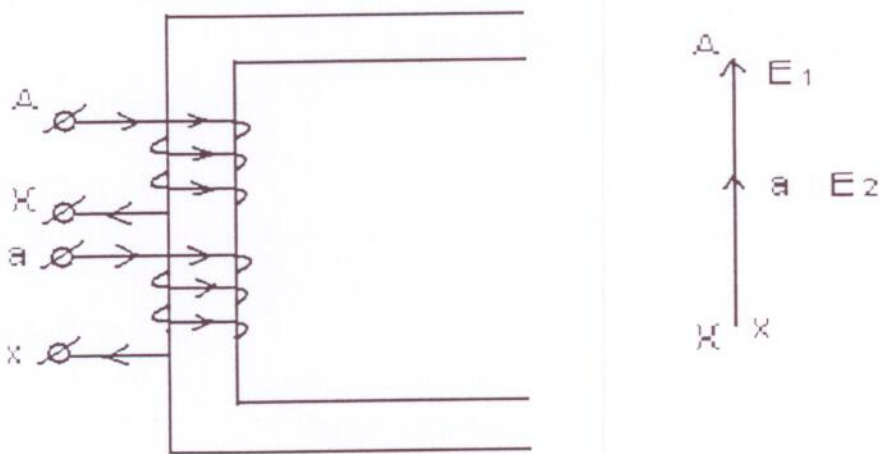


Рис. 11. Намотка обмоток трансформатора, соответствующая 12 (0) группе трансформатора.

а) Одна фаза трансформатора с первичной обмоткой **AX** высшего напряжения и вторичной **ax** низшего напряжения намотаны в одну и ту же сторону, и если их верхние зажимы **A** и **a** приняты за начала, а нижние **X** и **x** за концы обмоток и, так как обе обмотки расположены на одном и том же стержне и пронизываются одним и тем же потоком, то наводимые в этом случае в обмотках ЭДС имеют в любой момент времени направления, одинаковое относительно зажимов обмоток:

от конца **X** к началу **A** в одной обмотке и от конца **x** к началу **a** в другой обмотке, и соответственно этому ЭДС на зажимах обмоток E_1 и E_2 совпадают по фазе и изображаются двумя векторами **XA** и **xa**, одинаково направленными.

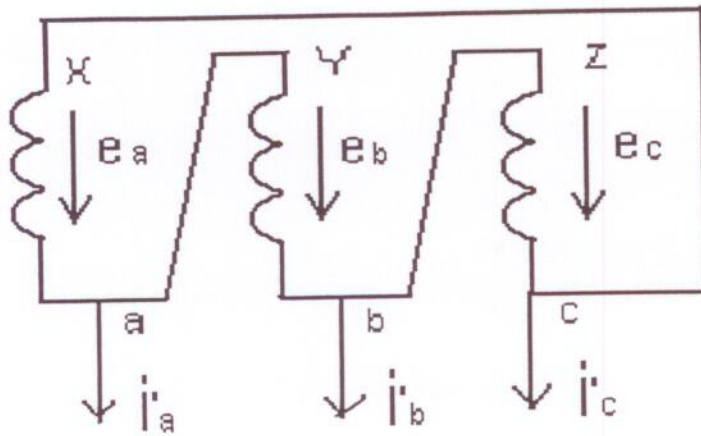


Рис.8. Распределение токов и ЭДС в обмотке трансформатора, соединенной в треугольник ax, cz, by .

При соединении обмоток треугольником образуется замкнутый контур, который нужно обходить в одном направлении - от начала к концу каждой обмотки и для выяснения действия этих ЭДС \dot{e}_{a1} , \dot{e}_{b1} , \dot{e}_{c1} по замкнутому контуру треугольника, нужно векторы этих ЭДС геометрически сложить.

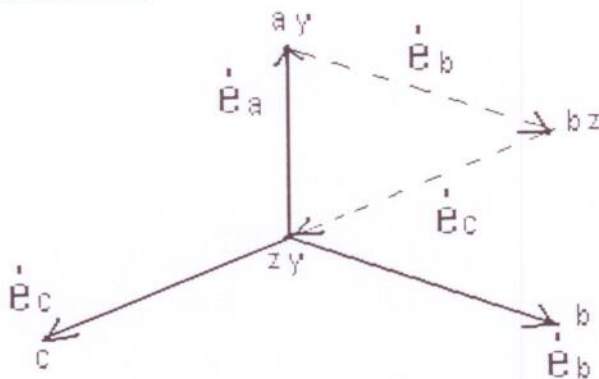


Рис.9. Векторная диаграмма ЭДС на стороне треугольника трансформатора.

Такое сложение - штриховыми линиями на рисунке показывает, что сумма всех трех ЭДС равна нулю, или это означает, что при соединении обмоток треугольником первые гармонические фазных ЭДС в замкнутом контуре треугольника находятся во взаимном равновесии.

Третьи гармонические ЭДС действуют в замкнутом контуре треугольника все в одном направлении $\uparrow\uparrow\uparrow$, либо от начала каждой фазной обмотки к ее концу, либо в обратном направлении.

Под действием этих ЭДС $\dot{E}_{a3} + \dot{E}_{b3} + \dot{E}_{c3}$ в замкнутом контуре треугольника течет ток третьей гармонической $3\dot{I}_0$.

Между каждыми двумя линейными проводами, отходящими от зажимов a , b , c действуют соответствующие первые гармонические фазных ЭДС. Таким образом, при соединении обмоток треугольником $E_{\pi} = E_{\phi 1}$.

Третьи гармонические ЭДС E_3 в линейных напряжениях не появляются, так как в замкнутом треугольнике они целиком затрачиваются на преодоление падения напряжения от тока $3\dot{I}_0$.

Первые гармонические линейных токов \dot{I}_a , \dot{I}_b , \dot{I}_c определяются по закону Кирхгофа.

Так от узла а течет ток I'_{ax} и подходит ток I'_{cx} : $I'_a = I'_{ax} - I'_{cx}$,

Таким образом, чтобы получить линейный ток I'_a , нужно произвести вычитание векторов I'_{ax} и I'_{cx} .

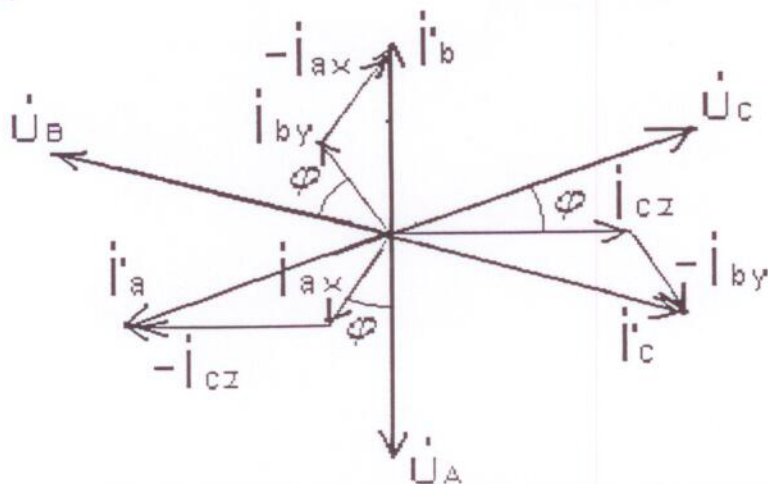


Рис. 10. Векторная диаграмма линейных и фазных токов на низкой стороне (на стороне треугольника) трансформатора.

Из диаграммы следует, что $I_{\Delta l} = I_{\phi l} \cdot \sqrt{3}$.

$$I_{\phi l} = \frac{I_{\Delta l}}{\sqrt{3}}, \quad U_{\Delta l} = U_{\phi l}.$$

Мощность системы при соединении обмоток треугольником составляет:

$$P = 3U_{\phi l} \cdot I_{\phi l} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\Delta l} \cdot I_{\Delta l} \cdot \cos \varphi$$

Большое эксплуатационное значение при включении трансформатора на параллельную работу имеет взаимное направление векторов первичной и вторичной ЭДС. Поэтому, кроме указания соединения первичной и вторичной обмоток, вводится обозначение угла между этими векторами.

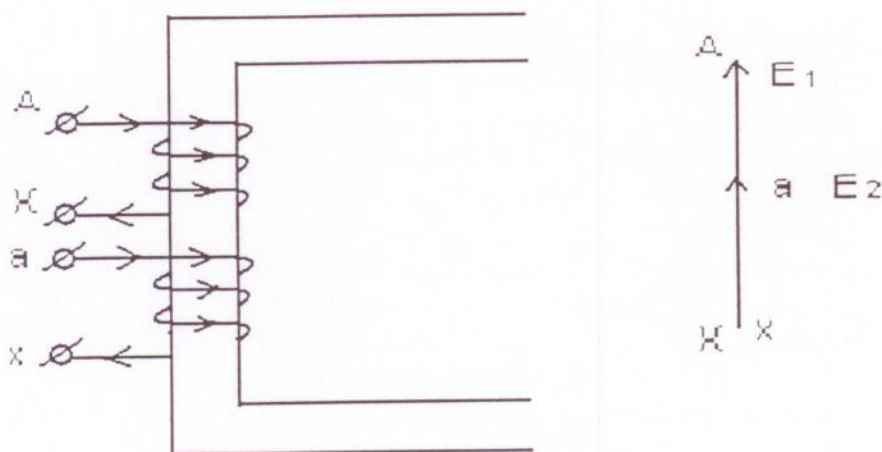


Рис. 11. Намотка обмоток трансформатора, соответствующая 12 (0) группе трансформатора.

а) Одна фаза трансформатора с первичной обмоткой **AX** высшего напряжения и вторичной **ax** низшего напряжения намотаны в одну и ту же сторону, и если их верхние зажимы **A** и **a** приняты за начала, а нижние **X** и **x** за концы обмоток и, так как обе обмотки расположены на одном и том же стержне и пронизываются одним и тем же потоком, то наводимые в этом случае в обмотках ЭДС имеют в любой момент времени направления, одинаковое относительно зажимов обмоток:

от конца **X** к началу **A** в одной обмотке и от конца **x** к началу **a** в другой обмотке, и соответственно этому ЭДС на зажимах обмоток E_1 и E_2 совпадают по фазе и изображаются двумя векторами **XA** и **xa**, одинаково направленными.

б) Если обмотки намотаны в разные стороны, но сохраняют то же обозначение зажимов, то ЭДС E_1 и E_2 относительно начала обмоток направлены в разные стороны, например, от X к A и от a к x. Соответственно этому, ЭДС E_1 и E_2 должны быть изображены векторами \vec{XA} и \vec{xa} , направленными в противоположные стороны.

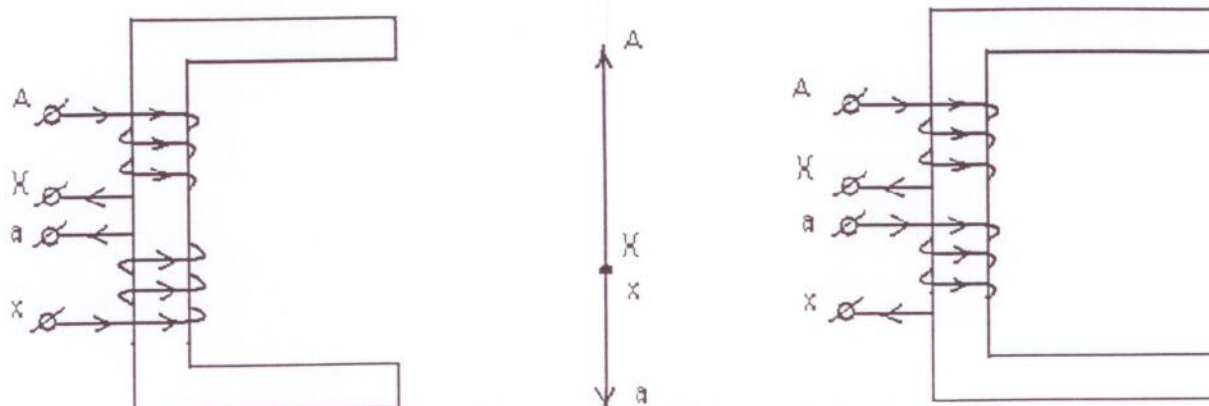


Рис. 12. Намотка обмоток трансформатора, соответствующая 6-ой группе трансформатора.

Такое же расположение векторов может быть получено путем \uparrow изменения обозначения концов и при одинаковом направлении намотки обмоток. Таким образом, угол сдвига фазной вторичной ЭДС относительно первичной зависит от направления намотки обмоток и от принятого обозначения зажимов обмоток (маркировки).

При расположении обмоток на одном стержне этот угол может быть равным нулю или 180 градусов.

Угол сдвига линейной ЭДС будет зависеть еще от способа соединения фазных обмоток.

Пусть обе обмотки соединены звездой, намотаны в одну и ту же сторону и имеют одинаковое обозначение зажимов.

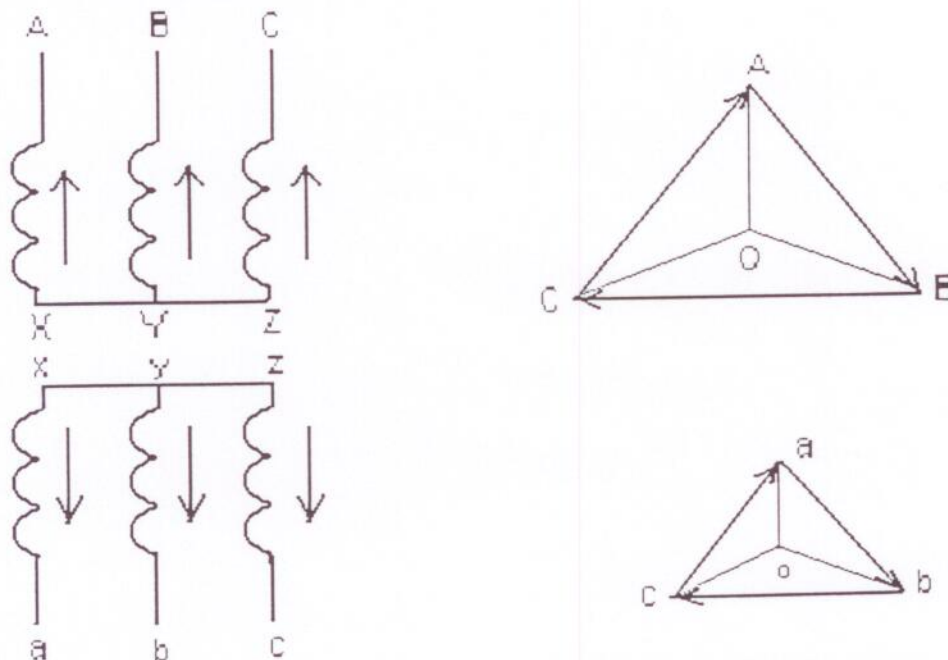


Рис.13. Векторная диаграмма линейных и фазных ЭДС в трансформаторе Y/Y-0.

Так как вторичная обмотка как бы повторяет собой первичную, то треугольник abc вторичных линейных ЭДС и звезда oa, ob, oc вторичных фазных ЭДС совпадают по фазе соответственно с треугольником ABC и звездой OA, OB, OC линейных и фазных первичных ЭДС и угол сдвига вторичной линейной ЭДС относительно первичной равен 0.

Это группа Y/Y-0.

На практике принято выражать этот угол не в градусах, а в более крупных единицах, равных 30 градусов каждая.

Совпадающим по фазе векторам соответствует угол, равный 0. И полученная группа соединения обмоток обозначается Y/Y-0.

При обмотках, намотанных в противоположных направлениях, вектора вторичных фазных и линейных ЭДС должны быть повернуты на 180 градусов. И тогда угол между вторичными и первичными ЭДС равен шести угловым единицам.

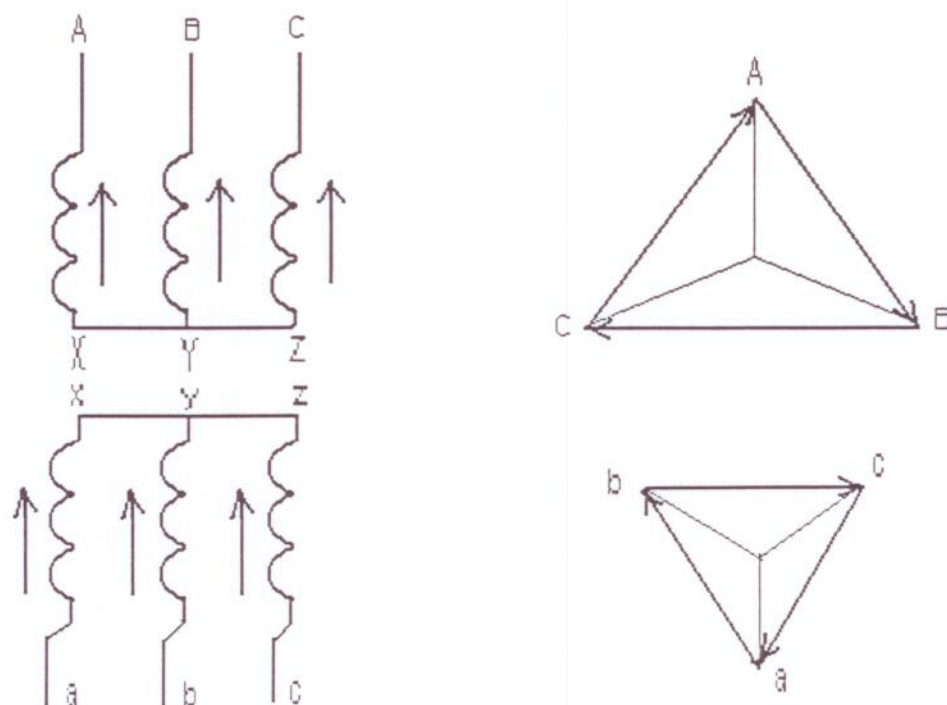


Рис.14. Векторная диаграмма линейных и фазных ЭДС в трансформаторе Y/Y-6.

Если изменить маркировку зажимов вторичной обмотки, вместо **а, в, с** на **в, с, а** или **с, а, в**, то можно получить ряд других групп Y/Y- 2 и Y/Y- 4, но эти группы не имеют практического применения.

Четные группы (2, 4, 6, 10, 12) получаются, если обе обмотки ВН и НН имеют одинаковые соединения - обе или в Y или обе в Δ. Нечетные группы (1, 3, 5, 7, 9, 11) получаются, если одна обмотка в Y, а другая в Δ.

Перемаркировка только двух фаз на любой стороне лишает трансформатор группы. Такой трансформатор не может работать параллельно ни с одним из трансформаторов, имеющим группу в часовом обозначении. То есть, если циклическое перемещение ABC, BCA, CAB, то это дает группу трансформатору.

А если BAC, ACB, то это группы не дает.

Двойная перемаркировка 2-х фаз, осуществляемая на стороне высокого и на стороне низкого напряжения, изменяет нечетные группы на ± 2 часа (например, из группы 5 может быть получена группа $5 + 2 = 7$ и $5 - 2 = 3$).

Пересоединениями на крышке трансформатора можно перевести группы одну в другую: либо 12, 4, 8 группы, либо 6, 10, 12, либо все нечетные группы.

Рассмотрим обмотки трансформатора, из которых первичная соединена звездой, а вторичная - треугольником по схеме **ax-cz-by**. Обмотки намотаны в одну и ту же сторону. В этом случае фазные ЭДС как с высокой, так и с низкой стороны полностью совпадают как в трансформаторе Y/Y/0.

ЭДС между зажимами А и В равна линейной ЭДС $\dot{E}_{AB} = \dot{E}_B - \dot{E}_A$, которая отстает от фазной ЭДС \dot{E}_B на 30 градусов.

ЭДС между зажимами **а** и **в** равна ЭДС \dot{E}_a .

Из сопоставления треугольников ABC и abc видно, что угол между векторами соответствующих первичных и вторичных линейных ЭДС равен 330 градусов, то есть 11 условных угловых единиц, следовательно данная группа соединения обмоток $Y/\Delta-11$.

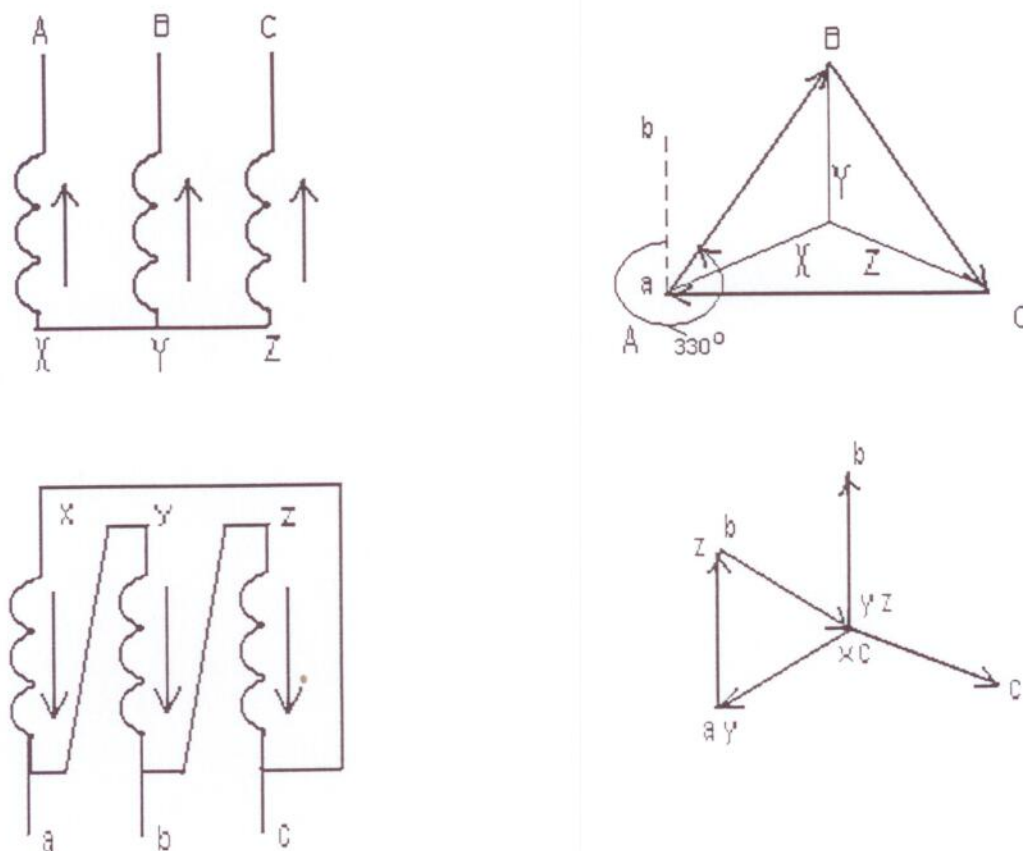


Рис.15. Векторная диаграмма линейных и фазных ЭДС в трансформаторе $Y/\Delta-11$.

Если бы обмотки были намотаны в противоположные стороны, но маркировка осталась бы прежняя, но треугольник abc повернулся бы на 180 градусов. В этом случае угол между вектором AB и вектором ab был бы 150 градусов, что соответствует группе $Y/\Delta-5$.

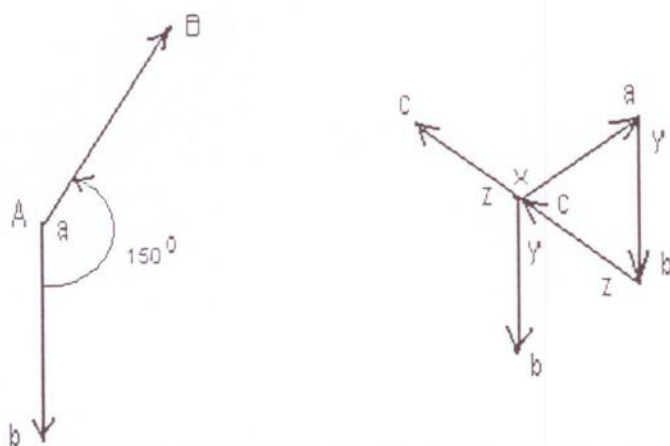


Рис.16. Векторная диаграмма линейных и фазных ЭДС в трансформаторе $Y/\Delta-5$.

Если вторичная обмотка соединена треугольником по схеме $ax-vy-cz$, то при одинаковом направлении намотки получается группа соединений $Y/\Delta-1$.

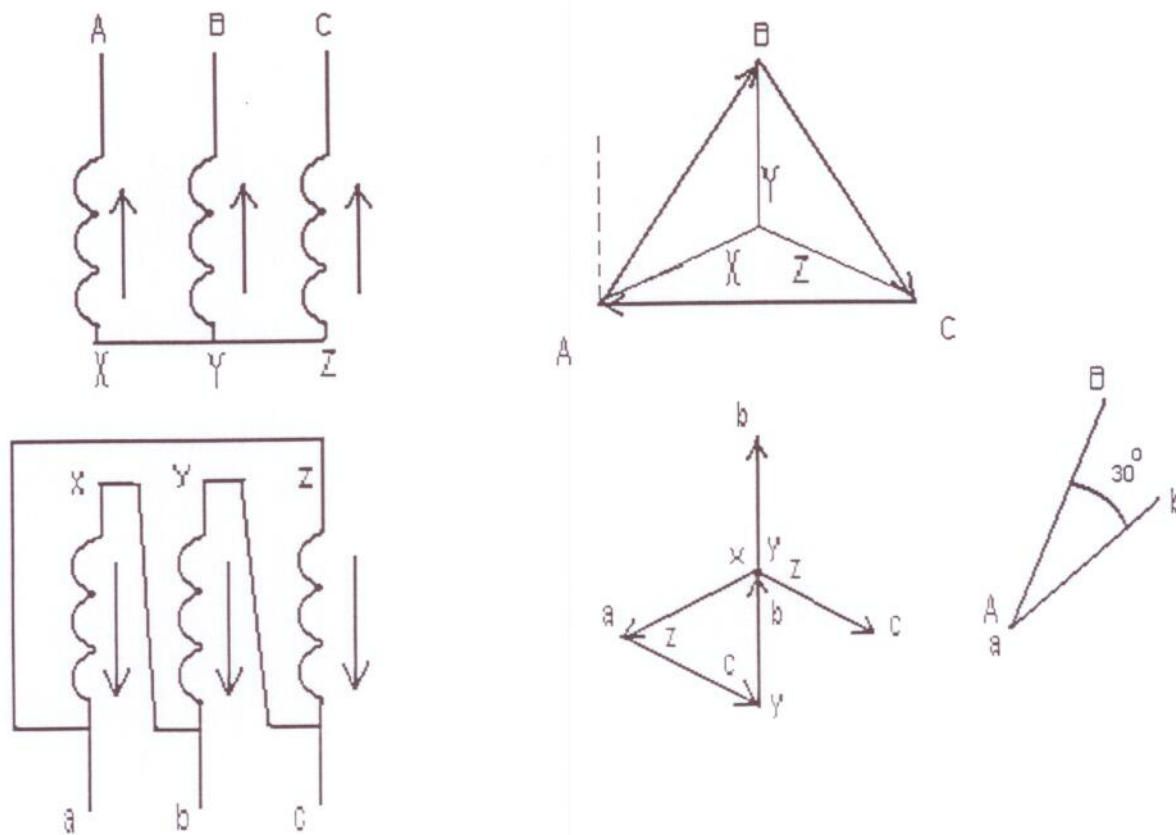


Рис.17. Векторная диаграмма линейных и фазных ЭДС в трансформаторе Y/Δ-1 (ax-by-cz).

Подключение на параллельную работу трансформаторов с разной группой недопустимо.

Силовой двухобмоточный трансформатор с группой соединений обмоток Y/Δ -11.

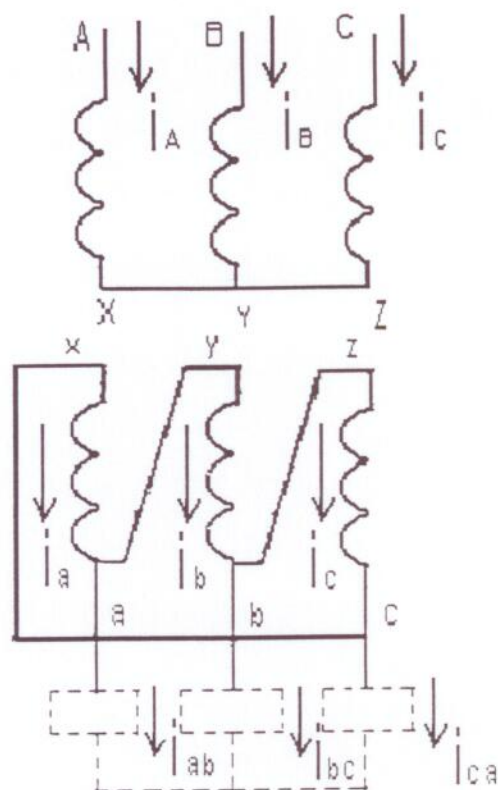


Рис.18. Режим нагрузки на низкой стороне трансформатора Y/Δ-11.

Задаваясь положительными направлениями токов со стороны высшего напряжения $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ и учитывая, что направления фазных токов $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ отличаются от направлений токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ на 180 градусов, показываем начала стрелок для $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ как бы входящими в полярные концы А, В, С, а начала стрелок фазных токов $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ - выходящими из полярных концов полярных концов а, в, с.

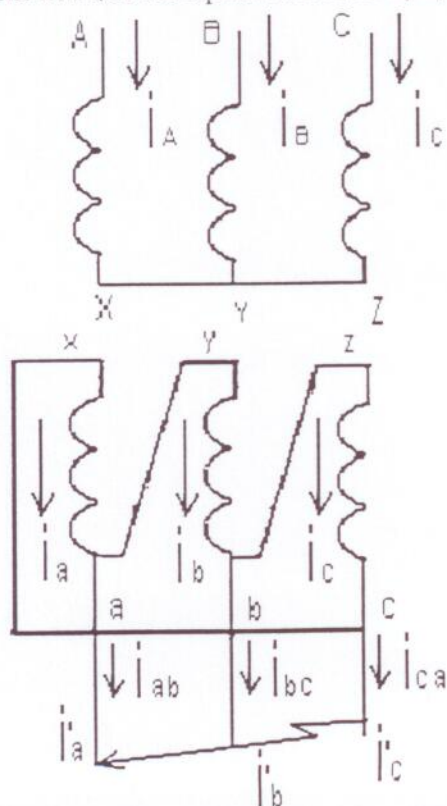


Рис. 19. Режим 3-х фазного КЗ на низкой стороне трансформатора Y/Δ-11 за Δ.

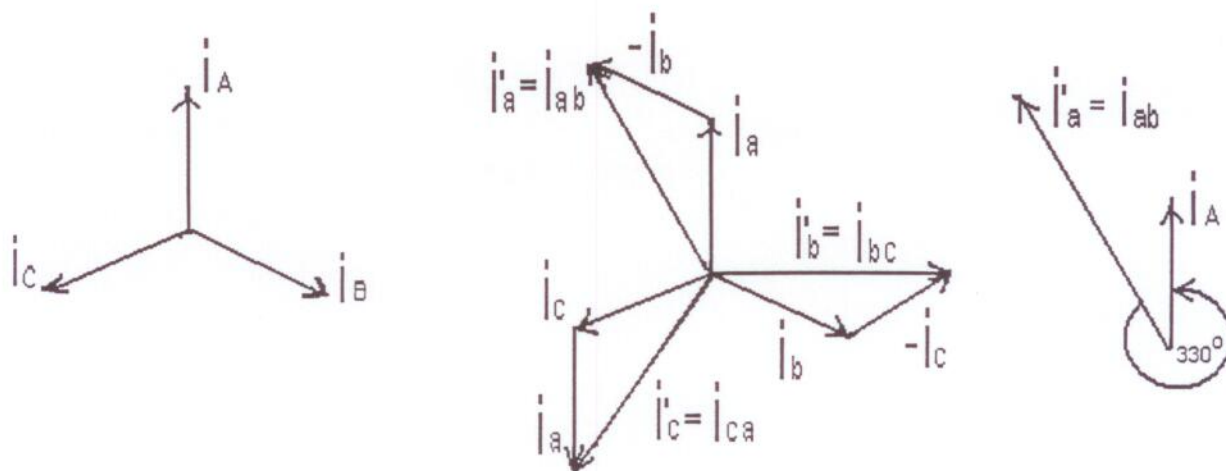


Рис. 20. Определение линейных токов на выходе треугольника в трансформаторе группы Y/Δ -11.

Учитывая выбранные положительные направления линейных токов $\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$, можем, например, для точки **a** написать равенство $\dot{I}_{ab} + \dot{I}_a - \dot{I}_c = 0$.

Аналогичные выражения получаются для точек **b** и **c**.

Тогда линейные токи низшего напряжения для фаз **a**, **b**, **c** равны:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} = \dot{I}_a - \dot{I}_c$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{bc} = \dot{I}_b - \dot{I}_c$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{ca} = \dot{I}_c - \dot{I}_a$$

На векторной диаграмме токи $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ при этом совпадают с векторами $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$.

Векторы линейных токов $\dot{I}_a = \dot{I}_{ab}, \dot{I}_b = \dot{I}_{bc}, \dot{I}_c = \dot{I}_{ca}$ получаются сдвинутыми относительно векторов токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ на 330 градусов против часовой стрелки.

Положительный отсчет угла против движения часовой стрелки.

Определение линейных напряжений при соединении в Y.

При соединении в звезду линейные и фазные токи одинаковые. Почему? Потому что для тока, текущего через фазную обмотку, нет иного пути, кроме линейного провода. Значит у них токи одинаковые.

Линейные напряжения больше фазных в $\sqrt{3}$ раз.

Так как в случае соединения в звезду, одноименные выводы соединяют (концы на данном рисунке), то результирующие линейные напряжения находятся вычитанием. Из напряжения опережающей фазы вычитается напряжение отстающей следующей за ней фазы.

Векторная диаграмма симметричных линейных напряжений (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}) сдвинута на 30 градусов в сторону вращения векторов относительно диаграммы фазных напряжений U_A, U_B, U_C . Иными словами, линейное напряжение U_{AB} опережает на 30 градусов U_A ,

напряжение U_{BC} опережает на 30 градусов U_B ,

напряжение U_{CA} опережает на 30 градусов U_C .

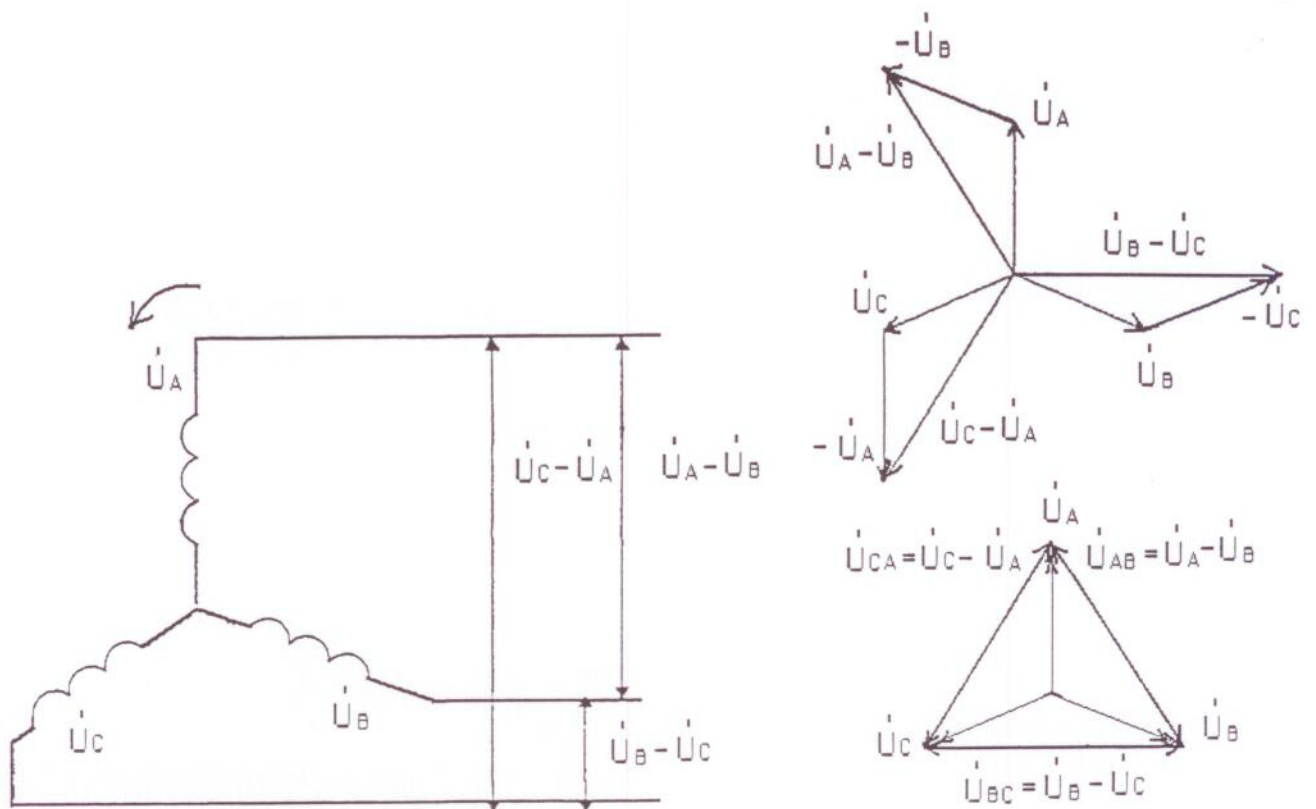


Рис. 21. Определение линейных напряжений на высокой стороне трансформатора группы Y/Δ-11.

Перенесем векторы U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} параллельно самим себе, так, чтобы их концы и начала оказались у концов векторов U_A , U_B , U_C , образующих звезду. Получился треугольник. Значит, для получения величин линейных напряжений достаточно около звезды фазных напряжений построить треугольник.

Для определения направлений линейных напряжений у векторов, образующих стороны треугольника, нужно расставить стрелки в направлении вращения фаз.

U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} обозначение линейных напряжений.

Порядок индексов произволен; он показывает, в каком направлении производилось вычитание (геометрическое, а не алгебраическое). При геометрическом вычитании из одной величины другой, равной ей по модулю, мы можем получить величину от 0 до удвоенного значения.

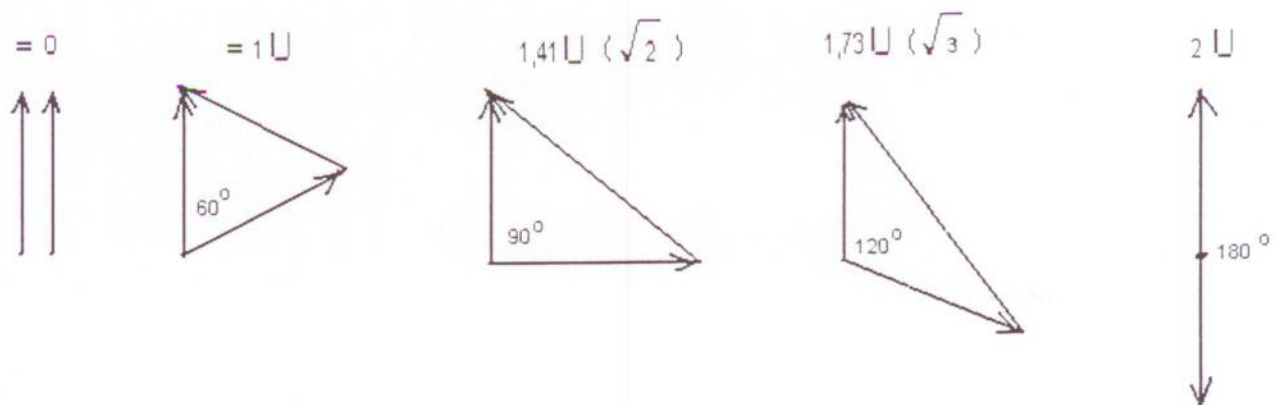


Рис. 22. Геометрическое вычитание векторов напряжения.

Трехфазные трансформаторы характеризуются двумя коэффициентами трансформации:

а) **фазным** - равным отношению числа витков $W_{ВН}$ фазы обмотки ВН к числу витков $W_{НН}$ фазы обмотки НН или же отношению фазных напряжений этих обмоток в режиме холостого хода:

$$K_{\phi} = \frac{W_{ВН}}{W_{НН}} = \frac{U_{\phi_{ВН}}}{U_{\phi_{НН}}};$$

б) **линейным** - равным отношению линейного напряжения обмотки ВН к линейному напряжению обмотки НН в режиме холостого хода:

$$K_L = \frac{U_{Л_{ВН}}}{U_{Л_{НН}}}$$

Для схем Y/Y и Δ/Δ коэффициенты трансформации равны: $K_L = K_{\phi}$.

Для схемы Y/Δ линейный коэффициент $K_L = \sqrt{3} K_{\phi}$.

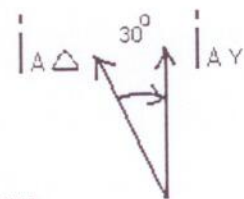
Для схемы Δ/Y линейный коэффициент $K_L = \frac{K_{\phi}}{\sqrt{3}}$, где $K_{\phi} = \frac{U_Y}{U_{\Delta}} = K_T$.

В учебнике Ульянова, где $K_T = \frac{U_Y}{U_{\Delta}} \cdot e^{j30^\circ N}$, где N - часовая группа 1, 12, 7 и т.д.

Для схемы Y/Y - $K_L = \frac{U_{Л_{ВН}}}{U_{Л_{НН}}} = \frac{U_{BY_{Л}}}{U_{HY_{Л}}} = \frac{\sqrt{3}U_{BY_{\phi}}}{\sqrt{3}U_{HY_{\phi}}} = K_{\phi} = K_T = \frac{W_{ВН}}{W_{НН}}$

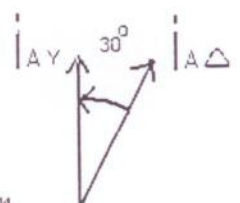
Для схемы $Y/\Delta-11$ $K_L = \frac{U_{Л_{ВН}}}{U_{Л_{НН}}} = \frac{U_{BY_{Л}}}{U_{H\Delta_{Л}}} = \frac{\sqrt{3}U_{BY_{\phi}}}{U_{H\Delta_{\phi}}} = \sqrt{3}K_{\phi} = \sqrt{3} \frac{U_{ВН\phi}}{U_{НН\phi}}$

Для схемы $Y/\Delta-11$.



Линейный ток Δ поворачивается на 30° по отношению тока Y по часовой стрелке.

Для схемы $Y/\Delta-1$



Поворот вектора тока Δ к Y происходит в противоположную сторону и на 30° против часовой стрелки.

Выводы:

На стороне высшего напряжения, где обмотки соединены в звезду, междуфазные напряжения в $\sqrt{3}$ больше фазных.

$$U_{\text{л}\gamma} \equiv U_{\phi\gamma} \cdot \sqrt{3}.$$

На стороне низшего напряжения, где обмотки соединены в треугольник, линейные напряжения равны фазным.

$$U_{\text{л}\Delta} \equiv U_{\phi\Delta}.$$

Но $U_{\text{л}\Delta}$ обмотки низшего напряжения отстает от $U_{\text{л}\gamma}$ обмотки высшего напряжения на 330 градусов в трансформаторах Y / Δ -11:

$$\frac{U_{Y\Delta}}{U_{\Delta\Delta}} = \frac{U_{ABY}}{U_{ab\Delta}} = \frac{U_{BCY}}{U_{bc\Delta}} = \frac{U_{CAY}}{U_{ca\Delta}} = \sqrt{3} K_T$$

$$U_{\phi Y} = \frac{U_{\text{л}Y}}{\sqrt{3}} = \frac{U_{\Delta} \cdot K_T \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{3}} = U_{\text{л}\Delta} \cdot K_T$$

$$U_{\text{л}Y} = U_{\text{л}\Delta} \cdot K_T \sqrt{3} \quad U_{\text{л}\Delta} = \frac{U_{\text{л}Y}}{K_T \sqrt{3}}$$

$$\dot{U}_{AY} = \dot{U}_{ac\Delta} \cdot K_T = (\dot{U}_{a\Delta} - \dot{U}_{c\Delta}) \cdot K_T \quad U_{ac\Delta} = \frac{U_{AY}}{K_T}$$

$$\dot{U}_{BY} = \dot{U}_{ba\Delta} \cdot K_T = (\dot{U}_{b\Delta} - \dot{U}_{a\Delta}) \cdot K_T \quad U_{ba\Delta} = \frac{U_{BY}}{K_T}$$

$$\dot{U}_{CY} = \dot{U}_{cb\Delta} \cdot K_T = (\dot{U}_{c\Delta} - \dot{U}_{b\Delta}) \cdot K_T \quad U_{cb\Delta} = \frac{U_{CY}}{K_T}$$

$$U_{\text{л}Y} = U_{\text{л}\Delta} \cdot K_T \sqrt{3} \quad U_{\text{л}\Delta} = \frac{U_{\text{л}Y}}{K_T \sqrt{3}}$$

$$U_{AB} = U_{ab\Delta} \cdot K_T \sqrt{3} \quad U_{ab\Delta} = \frac{U_{AB}}{K_T \sqrt{3}}$$

$$U_{BC} = U_{bc\Delta} \cdot K_T \sqrt{3} \quad U_{bc\Delta} = \frac{U_{BC}}{K_T \sqrt{3}}$$

$$U_{CA} = U_{ca\Delta} \cdot K_T \quad U_{ca\Delta} = \frac{U_{CA}}{K_T \sqrt{3}}$$

На стороне низшего напряжения треугольника линейный ток на выходе треугольника больше фазного тока треугольника в $\sqrt{3}$ раз;

$$\frac{\dot{I}_a}{\dot{I}_A} = \frac{\dot{I}_b}{\dot{I}_B} = \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_C} = \frac{W_Y}{W_\Delta \cdot \sqrt{3}} = \frac{K_T}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{I}_{a\Delta} = \dot{I}_{AY} \cdot \frac{K_T}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{I}_{b\Delta} = \dot{I}_{BY} \cdot \frac{K_T}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{I}_{c\Delta} = \dot{I}_{CY} \cdot \frac{K_T}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{I}'_{a\Delta} = \dot{I}_{a\Delta} - \dot{I}_{b\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_{AY} - \dot{I}_{BY})$$

$$\dot{I}'_{b\Delta} = \dot{I}_{b\Delta} - \dot{I}_{c\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_{BY} - \dot{I}_{CY})$$

$$\dot{I}'_{c\Delta} = \dot{I}_{c\Delta} - \dot{I}_{a\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_{CY} - \dot{I}_{AY})_{\Delta}$$

Выразим токи в фазах Δ через линейные токи:

$$\dot{I}'_a = \dot{I}_a - \dot{I}_b$$

$$\dot{I}'_b = \dot{I}_b - \dot{I}_c$$

$$\dot{I}'_c = \dot{I}_c - \dot{I}_a$$

$$\text{Вычтем: } \dot{I}'_a - \dot{I}'_c = \dot{I}_a - \dot{I}_b - \dot{I}_c + \dot{I}_a = 2\dot{I}_a - (\dot{I}_b + \dot{I}_c) = 2\dot{I}_a - (-\dot{I}_a) = 2\dot{I}_a + \dot{I}_a = 3\dot{I}_a$$

Аналогично:

$$\dot{I}_b = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}'_b - \dot{I}'_a)$$

$$\dot{I}_c = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}'_c - \dot{I}'_b)$$

$$\dot{I}_a = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}'_a - \dot{I}'_c)$$

2. 2-х фазное КЗ ВС на высокой стороне трансформатора

$$\dot{I}_K = \dot{I}_{BK} = -\dot{I}_{CK}$$

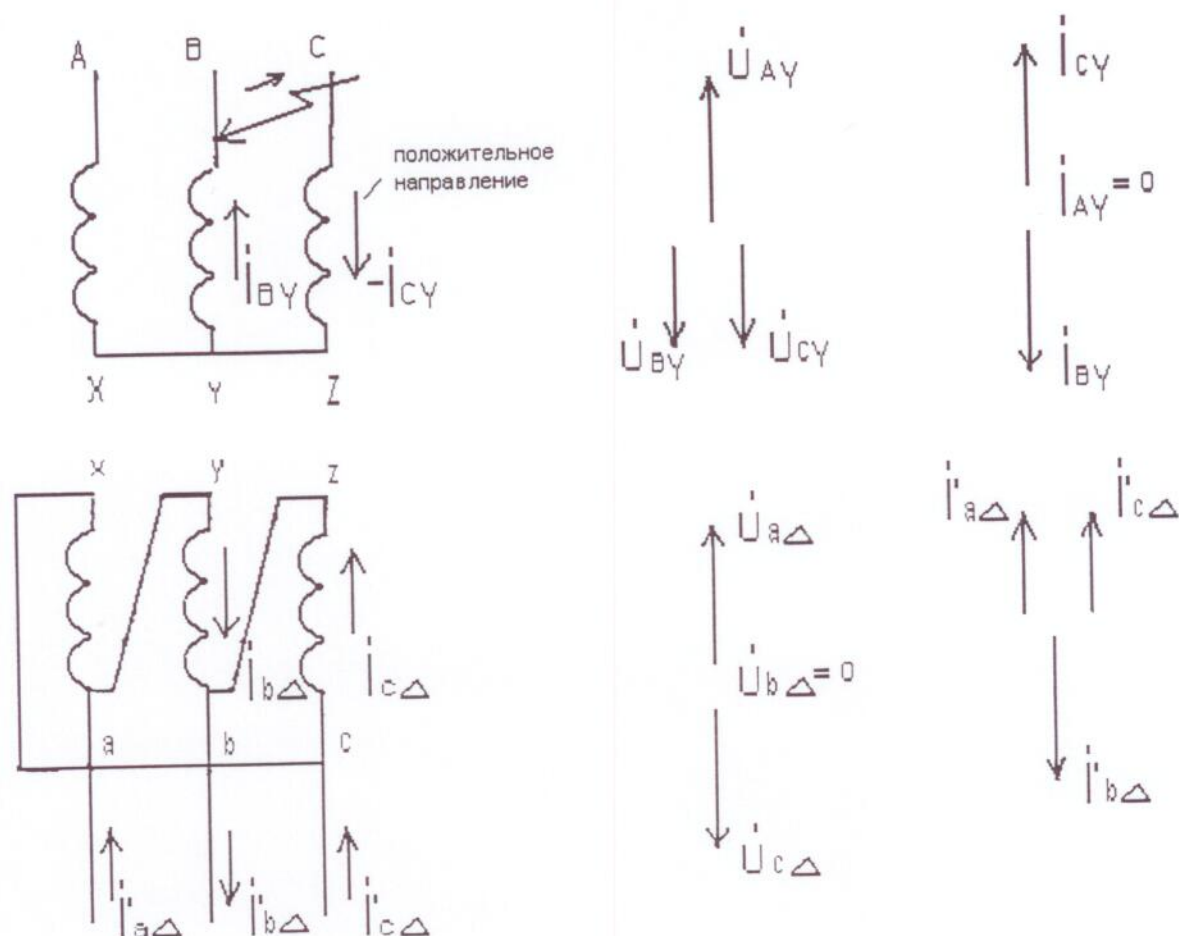


Рис. 23. Векторная диаграмма 2-х фазного КЗ ВС на высокой стороне трансформатора Y / Δ -11.

$$\dot{I}_{AY} = 0$$

$$\dot{I}_{AY} + \dot{I}_{BY} + \dot{I}_{CY} = 0$$

$$\dot{I}_{BY} + \dot{I}_{CY} = 0$$

$$\dot{I}_{BY} = -\dot{I}_{CY}$$

$$\dot{I}_{a\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot \dot{I}_{AY} = 0$$

$$\dot{I}_{b\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot \dot{I}_{BY}$$

$$\dot{I}_{c\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot \dot{I}_{CY} = -\frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot \dot{I}_{BY}$$

$$\dot{I}'_{a\Delta} = \dot{I}_{a\Delta} - \dot{I}_{b\Delta} = -\dot{I}_{b\Delta} = -\frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot \dot{I}_{BY}$$

$$\dot{I}'_{b\Delta} = \dot{I}_{b\Delta} - \dot{I}_{c\Delta} = (\dot{I}_{BY}) \cdot \frac{K_T}{\sqrt{3}} = 2 \dot{I}_{BY} \cdot \frac{K_T}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{I}'_{c\Delta} = \dot{I}_{c\Delta} - \dot{I}_{a\Delta} = \dot{I}_{c\Delta} - 0 = \dot{I}_{c\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot \dot{I}_{CY} = -\dot{I}_{BY} \cdot \frac{K_T}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{U}_{AY} + \dot{U}_{BY} + \dot{U}_{CY} = 0$$

$$\dot{U}_{AY} = -(\dot{U}_{BY} + \dot{U}_{CY})$$

$$\dot{U}_{BY} = \dot{U}_{CY} = -\frac{\dot{U}_{AY}}{2}$$

$$\dot{U}_{a\Delta} = \frac{\dot{U}_{ABY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{AY} - \dot{U}_{BY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{-2 \cdot \dot{U}_{BY} - \dot{U}_{BY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{-3\dot{U}_{BY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = -\frac{\dot{U}_{BY}}{K_T} \cdot \sqrt{3}$$

$$\dot{U}_{b\Delta} = \frac{\dot{U}_{BCY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{BY} - \dot{U}_{CY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = 0$$

$$\dot{U}_{c\Delta} = \frac{\dot{U}_{CAY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{CY} - \dot{U}_{AY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{BY} + 2 \dot{U}_{BY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{3\dot{U}_{BY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{BY}}{K_T} \cdot \sqrt{3}$$

Метод симметричных составляющих

1. 2х фазное КЗ ВС на высокой стороне трансформатора.

$$I_A = 0; \quad I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = I_{A1} + I_{A2} + 0 = 0; \quad I_{A1} = -I_{A2}.$$

$$U_A = U_{A1} + U_{A2} + U_{A0} = U_{A1} + U_{A2} + 0 = U_{A1} + U_{A2}; \quad U_{A1} = U_{A2} = \frac{U_A}{2}$$

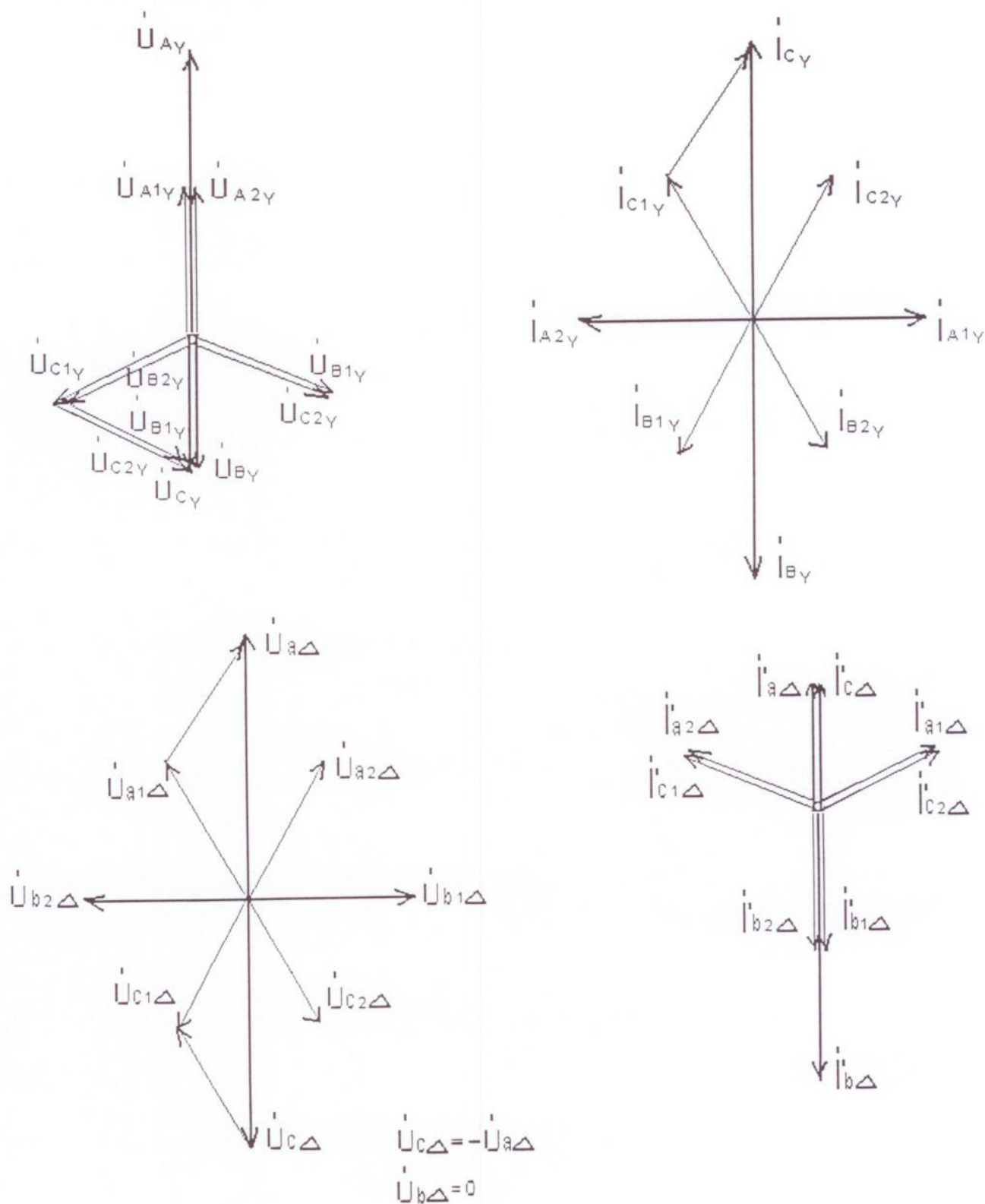


Рис. 24. Векторная диаграмма 2-х фазного КЗ ВС на высокой стороне трансформатора Y/Δ -II методом симметричных составляющих.

2.1. 2-х фазное КЗ ВС на высокой стороне трансформатора.

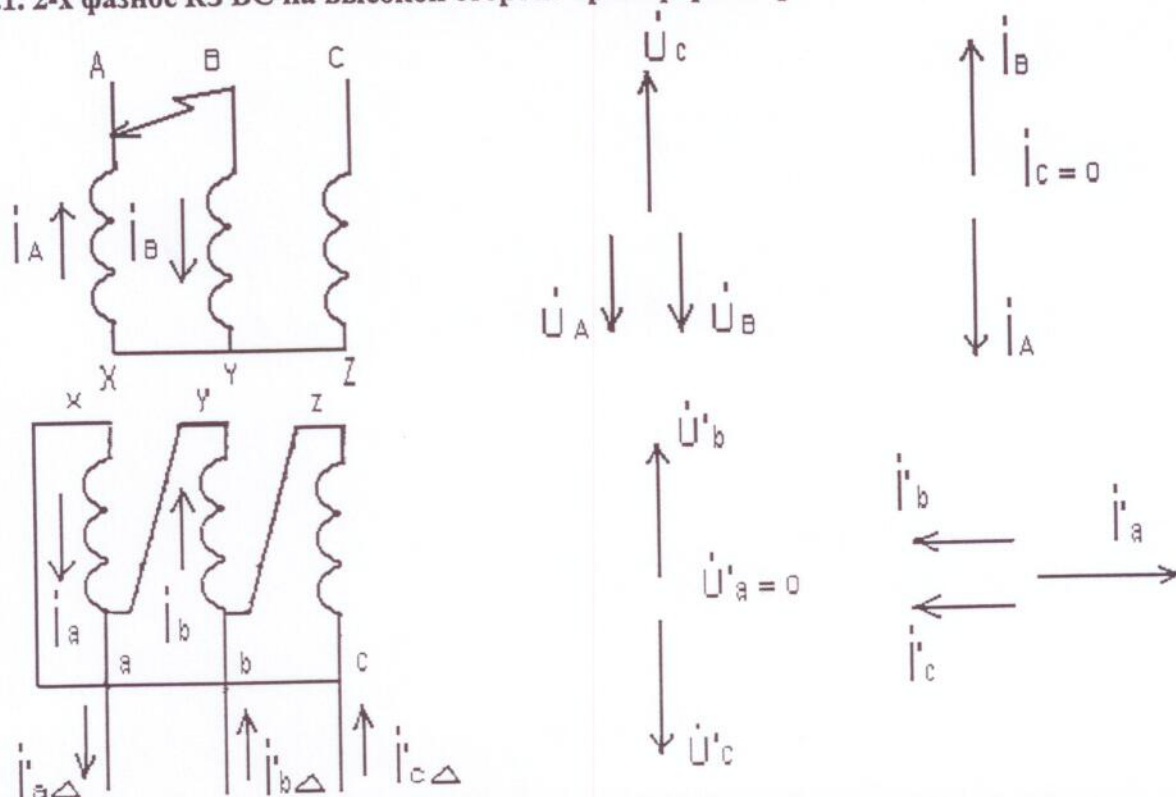


Рис. 25. Векторная диаграмма токов и напряжений при 2-х фазном КЗ ВС на высокой стороне трансформатора Y / Δ -11.

$$\dot{I}_{CY} = 0$$

$$\dot{I}_{AY} + \dot{I}_{BY} + \dot{I}_{CY} = 0$$

$$\dot{I}_{AY} = -\dot{I}_{BY}$$

$$\dot{I}'_{a\Delta} = \dot{I}_{a\Delta} - \dot{I}_{b\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_{AY} - \dot{I}_{BY}) = 2 \cdot \dot{I}_{AY} \cdot \frac{K_T}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{I}'_{b\Delta} = \dot{I}_{b\Delta} - \dot{I}_{c\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_{BY} - \dot{I}_{CY}) = \dot{I}_{BY} \cdot \frac{K_T}{\sqrt{3}} = \dot{I}_{AY} \cdot \frac{K_T}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{I}'_{c\Delta} = \dot{I}_{c\Delta} - \dot{I}_{a\Delta} = -\frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot \dot{I}_{AY}$$

$$\dot{U}_{AY} + \dot{U}_{BY} + \dot{U}_{CY} = 0$$

$$\dot{U}_{CY} = -(\dot{U}_{AY} + \dot{U}_{BY})$$

$$\dot{U}_{AY} = \dot{U}_{BY} = -\frac{\dot{U}_{CY}}{2}$$

$$\dot{U}_{a\Delta} = \frac{\dot{U}_{ABY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{AY} - \dot{U}_{BY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = 0$$

$$\dot{U}_{b\Delta} = \frac{\dot{U}_{BCY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{BY} - \dot{U}_{CY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{BY} + 2 \dot{U}_{BY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{3 \dot{U}_{BY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{BY}}{K_T} \cdot \sqrt{3}$$

$$\dot{U}_{c\Delta} = \frac{\dot{U}_{CAY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{CY} - \dot{U}_{AY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{-2 \dot{U}_{AY} - \dot{U}_{AY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = -\frac{3 \dot{U}_{AY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = -\frac{\dot{U}_{BY}}{K_T} \cdot \sqrt{3}$$

$$\dot{I}_{a\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot \dot{I}_{AY}$$

$$\dot{I}_{b\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot \dot{I}_{BY}$$

$$\dot{I}_{c\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot \dot{I}_{CY} = 0$$

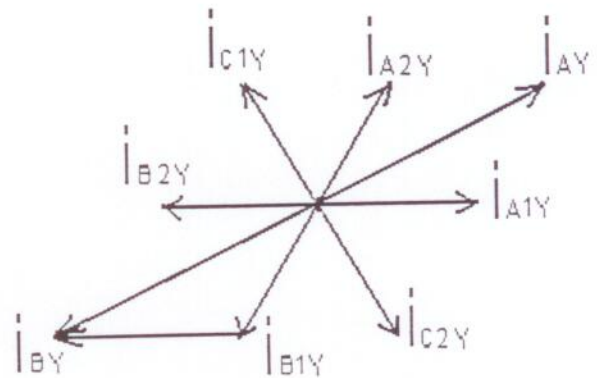
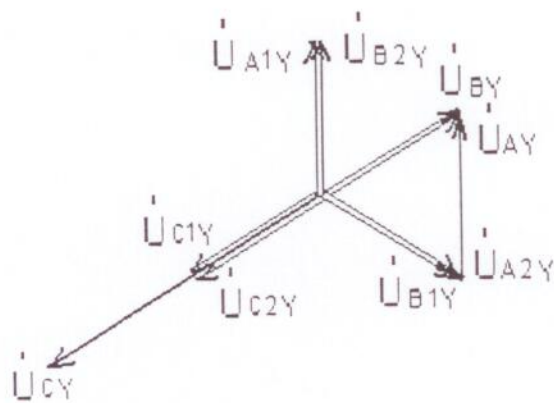
2.2. 2-х фазное КЗ АВ на высокой стороне трансформатора (методом симметричных составляющих).

$$\dot{I}_C = 0 \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{C0} = 0 \quad \dot{I}_{C1} = \dot{I}_{C2}$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{C0}$$

$$\dot{U}_{C1} = \dot{U}_{C2} = \frac{\dot{U}_C}{2}$$

на стороне Y:



на стороне Δ:

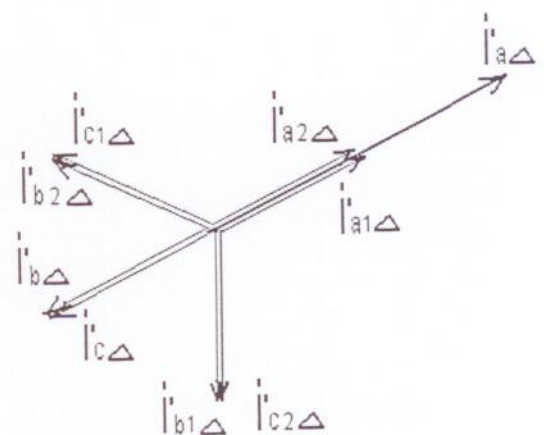
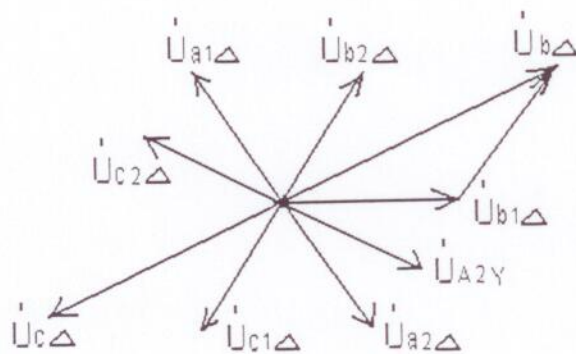


Рис. 26. Векторная диаграмма 2-х фазного КЗ АВ на высокой стороне трансформатора (методом симметричных составляющих).

3. 2-х фазное КЗ АС на высокой стороне трансформатора.

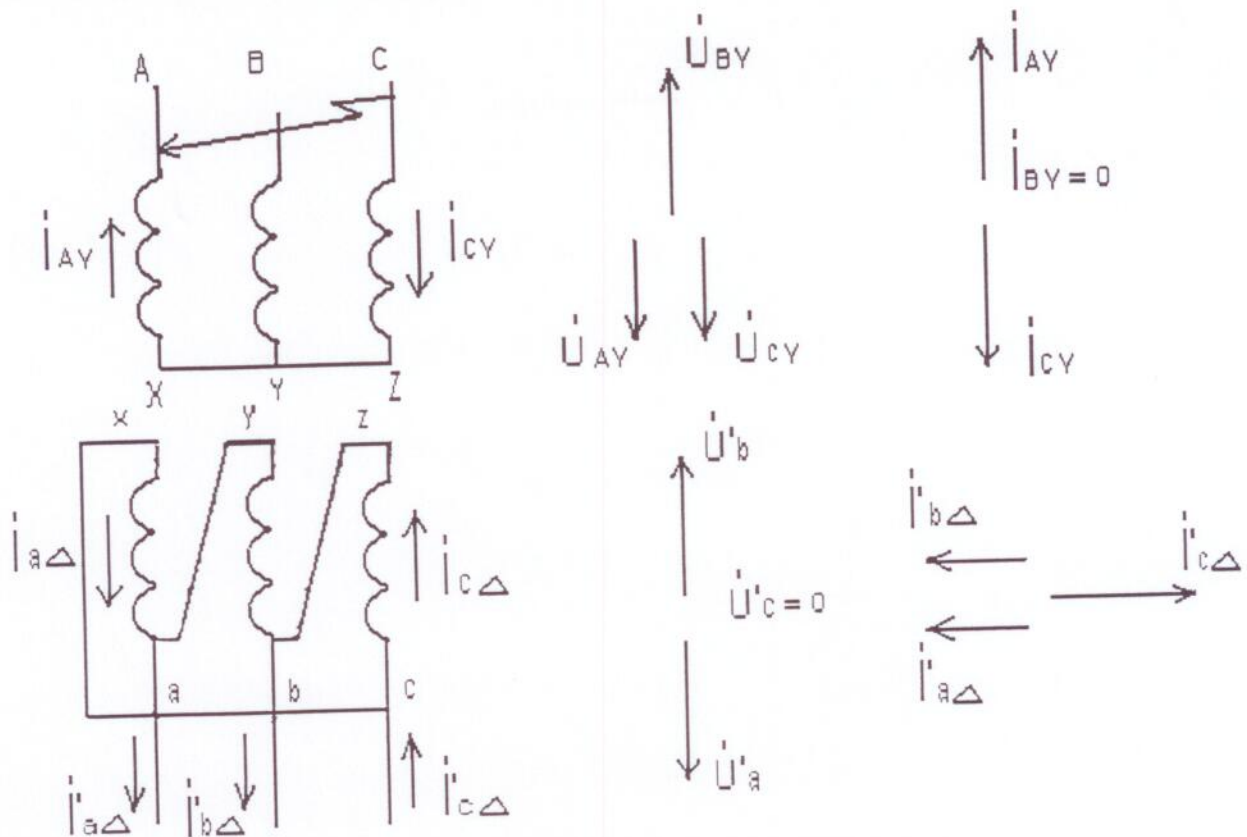


Рис. 27. Векторная диаграмма 2-х фазного КЗ АС на высокой стороне трансформатора Y / Δ -11.

$$i_{BY} = 0$$

$$i_{AY} + i_{BY} + i_{CY} = 0$$

$$i_{AY} = -i_{CY}$$

$$i_{c\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot i_{CY} = -\frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot i_{AY}$$

$$i'_{a\Delta} = i_{a\Delta} - i_{b\Delta} = i_{a\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot i_{AY}$$

$$i'_{b\Delta} = i_{b\Delta} - i_{c\Delta} = -i_{c\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot i_{AY}$$

$$i'_{c\Delta} = i_{c\Delta} - i_{a\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot (i_{CY} - i_{AY}) = -2 \cdot \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot i_{AY}$$

$$U_{AY} + U_{BY} + U_{CY} = 0$$

$$U_{BY} = -(U_{AY} + U_{CY})$$

$$U_{AY} = U_{CY} = -\frac{U_{BY}}{2}$$

$$i_{a\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot i_{AY}$$

$$i_{b\Delta} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \cdot i_{BY} = 0$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{a\Delta} &= \frac{\dot{U}_{ABY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{AY} - \dot{U}_{BY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{AY} + 2\dot{U}_{BY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{3\dot{U}_{AY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{AY}}{K_T} \cdot \sqrt{3} \\ \dot{U}_{b\Delta} &= \frac{\dot{U}_{BCY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{BY} - \dot{U}_{CY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{-2\dot{U}_{CY} - \dot{U}_{BY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{-3\dot{U}_{CY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{CY}}{K_T} \cdot \sqrt{3} \\ \dot{U}_{c\Delta} &= \frac{\dot{U}_{CAY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = \frac{\dot{U}_{CY} - \dot{U}_{AY}}{\sqrt{3} \cdot K_T} = 0.\end{aligned}$$

4. 3-х-фазное КЗ на высокой стороне трансформатора Y / Δ - 11.

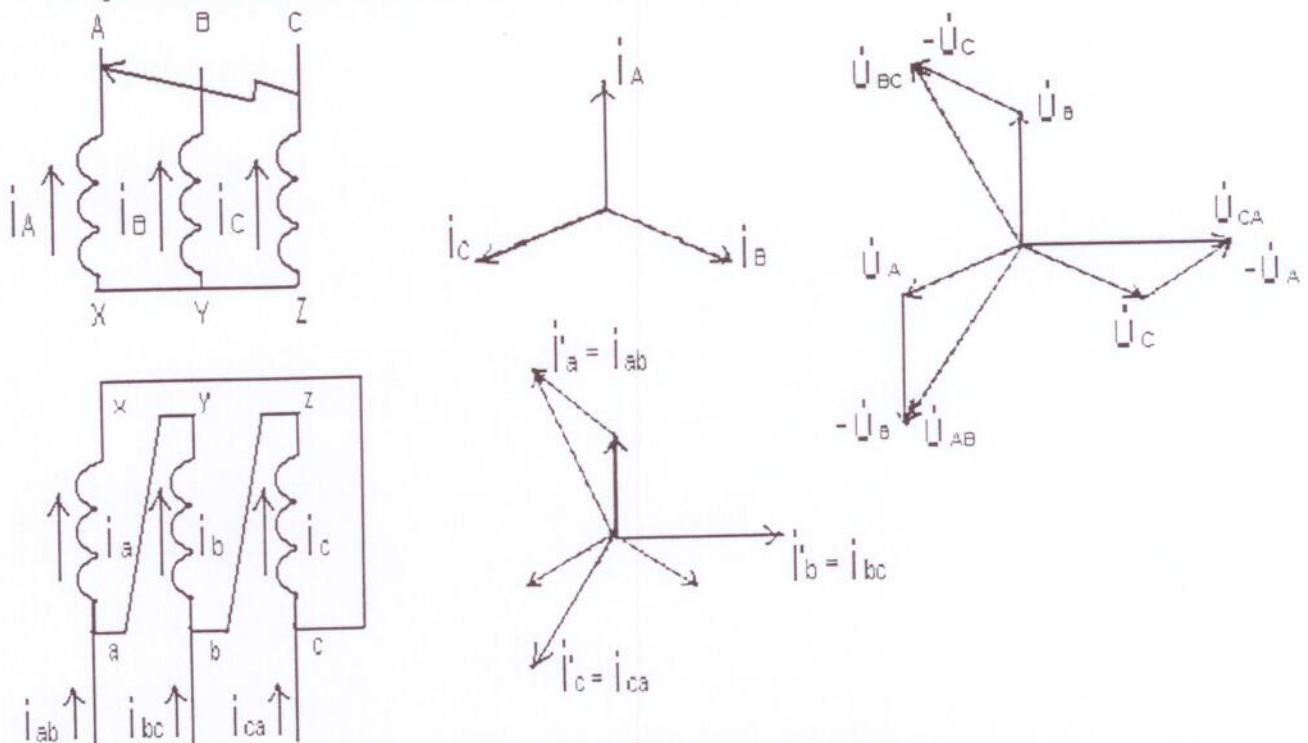


Рис. 28. Векторная диаграмма 3-х фазного КЗ на высокой стороне трансформатора Y / Δ - 11.

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{I}'_a - \dot{I}'_b}{\sqrt{3} \cdot K_T}$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{I}'_b - \dot{I}'_a}{\sqrt{3} \cdot K_T}$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{I}'_c - \dot{I}'_b}{\sqrt{3} \cdot K_T}$$

$$\dot{U}_A = \frac{\dot{U}_a - \dot{U}_c}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}'_{ac\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T$$

$$\dot{U}_B = \frac{\dot{U}_b - \dot{U}_a}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}'_{ba\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T$$

$$\dot{U}_C = \frac{\dot{U}_c - \dot{U}_b}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}'_{cb\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T$$

5. 2-х фазное КЗ в 'с' на низкой стороне трансформатора Y / Δ - 11 за Δ.

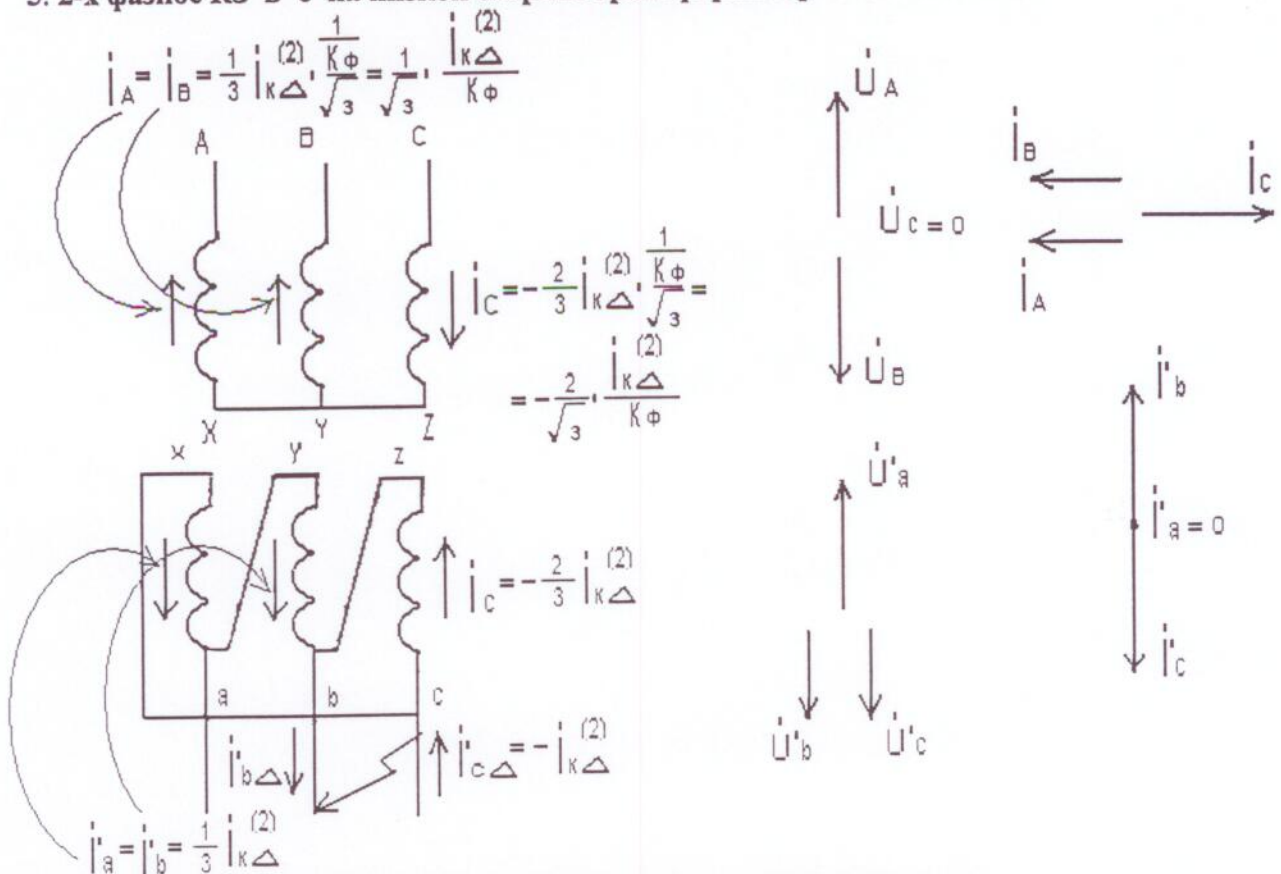


Рис. 29. Векторная диаграмма 2-х фазного КЗ в 'с' на низкой стороне трансформатора Y / Δ - 11 за Δ.

$$i'_{a\Delta} = 0$$

$$i'_{a\Delta} + i'_{b\Delta} + i'_{c\Delta} = 0$$

$$i'_{b\Delta} + i'_{c\Delta} = 0 \quad i'_{b\Delta} = -i'_{c\Delta}$$

$$i_{AY} = i_{a\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = \frac{1}{3} \cdot i'_{b\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = \frac{i'_{b\Delta}}{\sqrt{3} K_T}$$

$$i_{BY} = i_{b\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = \frac{1}{3} \cdot i'_{b\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = \frac{i'_{b\Delta}}{\sqrt{3} K_T}$$

$$i_{CY} = i_{c\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = -\frac{2}{3} \cdot i'_{c\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = -\frac{2i'_{c\Delta}}{\sqrt{3} K_T}$$

$$U'_{a\Delta} + U'_{b\Delta} + U'_{c\Delta} = 0$$

$$U'_{a\Delta} = -(U'_{b\Delta} + U'_{c\Delta}) = -2U'_{b\Delta}$$

$$U_{AY} = \frac{U_{a\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{U'_{a\Delta} - U'_{c\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{-2U'_{b\Delta} - U'_{b\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = -\frac{3U'_{b\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = -U'_{b\Delta} \cdot \sqrt{3} \cdot K_T$$

$$U_{BY} = \frac{U_{b\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{U'_{b\Delta} - U'_{a\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{U'_{b\Delta} + 2U'_{b\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{3U'_{b\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = U'_{b\Delta} \cdot \sqrt{3} \cdot K_T$$

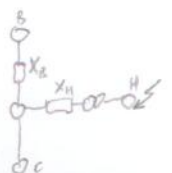
$$U_{CY} = \frac{U_{c\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{U'_{c\Delta} - U'_{b\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = 0 \rightarrow U_C = 0 \text{ в узле ВН. } U'_C = i'_C \cdot (X_B + X_H)$$

$$i_{a\Delta} = \frac{1}{3} \cdot i_{K\Delta}^{(2)} = \frac{1}{3} \cdot i'_{b\Delta}$$

$$i_{b\Delta} = \frac{1}{3} \cdot i_{K\Delta}^{(2)} = \frac{1}{3} \cdot i'_{b\Delta}$$

$$i_{c\Delta} = -\frac{2}{3} \cdot i_{K\Delta}^{(2)} = -\frac{2}{3} \cdot i'_{c\Delta}$$

РАСЧЕТЫ ПО АРМ СРЗА
ПОДТВЕРЖАЮТ



6.1. 2-х фазное КЗ а' в' на низкой стороне трансформатора Y/Δ - 11 за Δ (без метода симметричных составляющих).

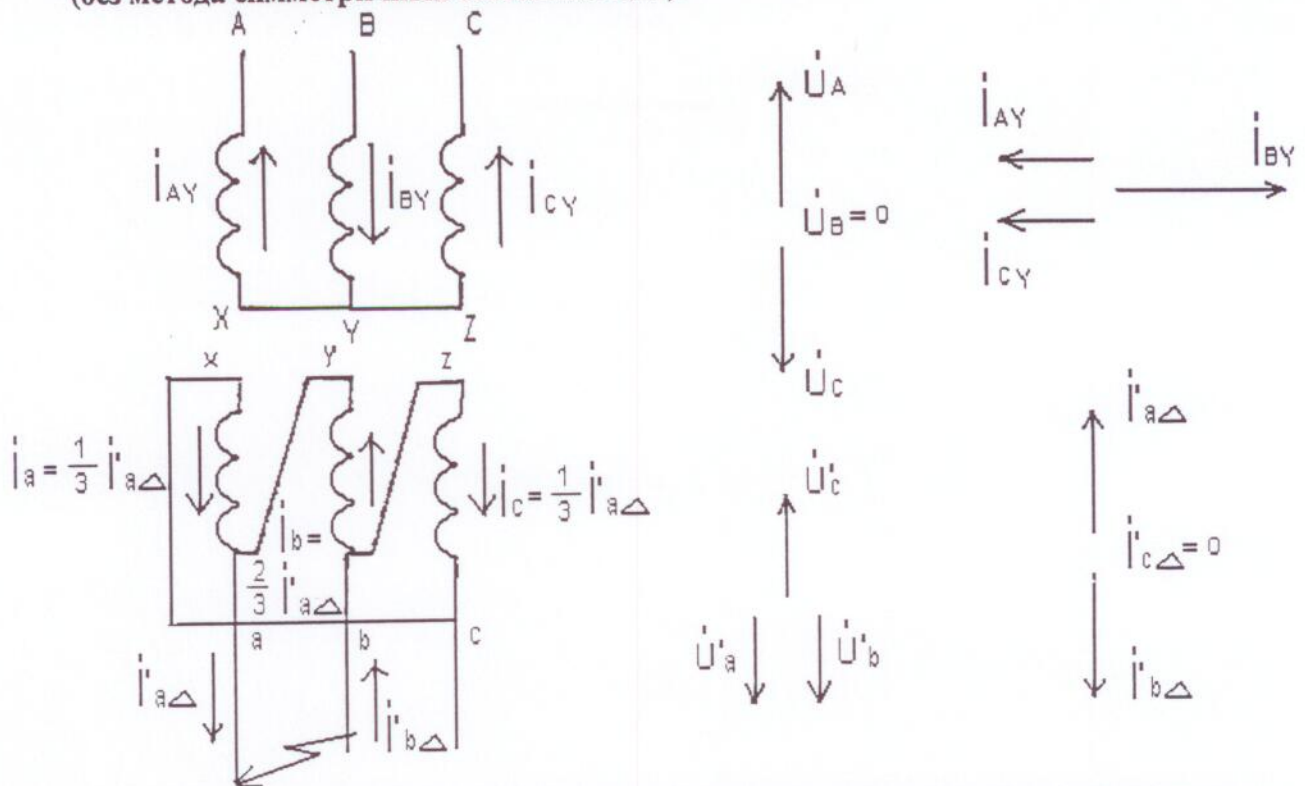


Рис. 30. Векторная диаграмма 2-х фазного КЗ а' в' на низкой стороне трансформатора Y/Δ - 11 за Δ (без метода симметричных составляющих).

$$\dot{I}'_{c\Delta} = 0$$

$$\dot{I}'_{a\Delta} + \dot{I}'_{b\Delta} + \dot{I}'_{c\Delta} = 0$$

$$\dot{I}'_{a\Delta} + \dot{I}'_{b\Delta} = 0 \quad \dot{I}'_{a\Delta} = -\dot{I}'_{b\Delta}$$

$$\dot{I}_{AY} = \dot{I}_{a\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = -\frac{1}{3} \cdot \dot{I}'_{a\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = -\frac{\dot{I}'_{a\Delta}}{\sqrt{3}K_T}$$

$$\dot{I}_{BY} = \dot{I}_{b\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = \frac{2}{3} \cdot \dot{I}'_{a\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = \frac{2\dot{I}'_{a\Delta}}{\sqrt{3}K_T}$$

$$\dot{I}_{CY} = \dot{I}_{c\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = -\frac{1}{3} \cdot \dot{I}'_{a\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = -\frac{\dot{I}'_{a\Delta}}{\sqrt{3}K_T}$$

$$\dot{U}'_{a\Delta} + \dot{U}'_{b\Delta} + \dot{U}'_{c\Delta} = 0$$

$$\dot{U}'_{c\Delta} = -(\dot{U}'_{a\Delta} + \dot{U}'_{b\Delta}) = -2\dot{U}'_{a\Delta} = -2\dot{U}'_{b\Delta}$$

$$\dot{U}_{AY} = \frac{\dot{U}_{a\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}_{a\Delta} - \dot{U}_{c\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}'_{a\Delta} - 2\dot{U}'_{a\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = -\dot{U}'_{a\Delta} \cdot \sqrt{3} \cdot K_T$$

$$\dot{U}_{BY} = \frac{\dot{U}_{b\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}_{b\Delta} - \dot{U}_{a\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}'_{b\Delta} - \dot{U}'_{a\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = 0$$

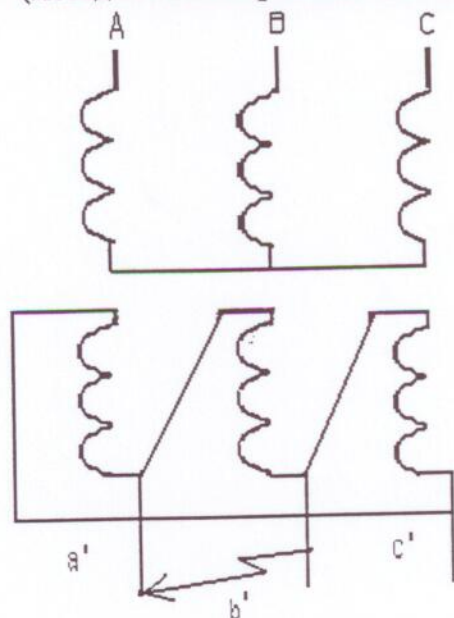
$$\dot{U}_{CY} = \frac{\dot{U}_{c\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}_{c\Delta} - \dot{U}_{b\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{-2\dot{U}'_{b\Delta} - \dot{U}'_{b\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = -\dot{U}'_{b\Delta} \cdot \sqrt{3} \cdot K_T$$

$$\dot{I}_{a\Delta} = -\frac{1}{3} \cdot \dot{I}_{K\Delta}^{(2)} = -\frac{1}{3} \cdot \dot{I}'_{a\Delta}$$

$$\dot{I}_{b\Delta} = \frac{2}{3} \cdot \dot{I}_{K\Delta}^{(2)} = \frac{2}{3} \cdot \dot{I}'_{a\Delta}$$

$$\dot{I}_{c\Delta} = -\frac{1}{3} \cdot \dot{I}_{K\Delta}^{(2)} = -\frac{1}{3} \cdot \dot{I}'_{a\Delta}$$

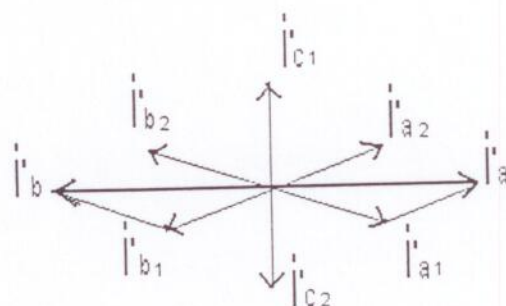
6.2. 2-х фазное КЗ а' в' на низкой стороне трансформатора Y/Δ - 11 за Δ (методом симметричных составляющих) – векторная диаграмма токов.



$$\dot{I}'_{c0} = \dot{I}'_{c1} + \dot{I}'_{c2} + \dot{I}'_{c0} = \dot{I}'_{c1} + \dot{I}'_{c2} + 0 = 0$$

$$\dot{I}'_{c0} = 0; \quad \dot{I}'_{c1} = -\dot{I}'_{c2}; \quad \dot{I}'_a = -\dot{I}'_b$$

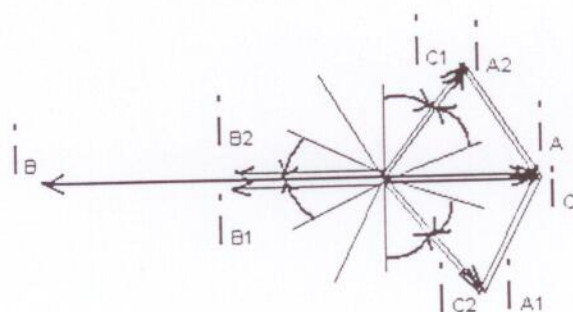
$$\dot{U}'_c = \dot{U}'_{c1} + \dot{U}'_{c2} + \dot{U}'_{c0} = \dot{U}'_{c1} + \dot{U}'_{c2} + 0 = \dot{U}'_{c1} + \dot{U}'_{c2}; \quad \dot{U}'_{c1} = \dot{U}'_{c2} = \frac{\dot{U}'_c}{2}$$



на низкой стороне - стороне Δ:

$$\dot{I}'_a = -\dot{I}'_b$$

$$\dot{I}'_c = 0$$



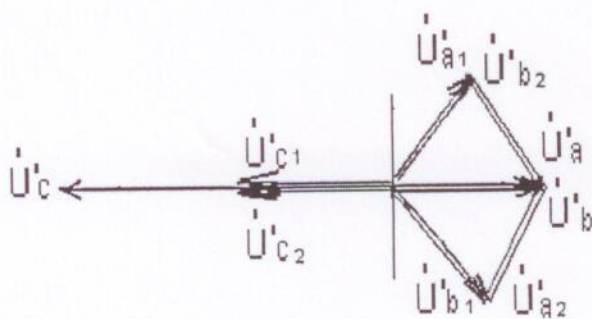
на высокой стороне - стороне Y:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_C = \frac{\dot{I}_B}{2}$$

Векторную диаграмму токов на стороне Y: $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ получим разворотом векторов токов прямой последовательности за Δ на 30 градусов по часовой стрелке, а токов обратной последовательности - на 30 градусов против часовой стрелки.

Рис. 31. Векторная диаграмма токов на стороне Y и Δ при 2-х фазном КЗ а' в' на низкой стороне трансформатора за Δ (методом симметричных составляющих).

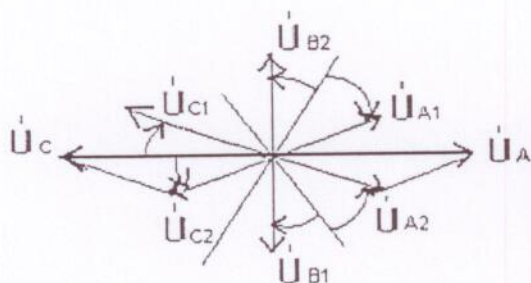
6.3. 2-х фазное КЗ а' в' на низкой стороне трансформатора Y / Δ - 11 за Δ
(методом симметричных составляющих) – векторная диаграмма напряжений.



на низкой стороне - стороне Δ :

$$\dot{U}'_c = \dot{U}'_{c1} + \dot{U}'_{c2}$$

Чтобы была согласованность с диаграммой токов в месте КЗ,
 \dot{U}'_{c1} направляем ← , опережающим \dot{I}_{c1} на 90 градусов



на высокой стороне - стороне Y:

$$\dot{U}_A = -\dot{U}'_c$$

$$\dot{U}_B = 0$$

Для получения векторной диаграммы напряжения на высокой стороне разворачиваем вектора напряжений прямой и обратной последовательностей аналогично токам: прямую - по часовой стрелке на 30 градусов, обратную - против часовой стрелки на 30 градусов.

Рис. 32. Векторная диаграмма напряжений на стороне Y и Δ при 2-х фазном КЗ а' в' на низкой стороне трансформатора за Δ (методом симметричных составляющих).

7. 2-х фазное КЗ а'с' на низкой стороне трансформатора за Δ.

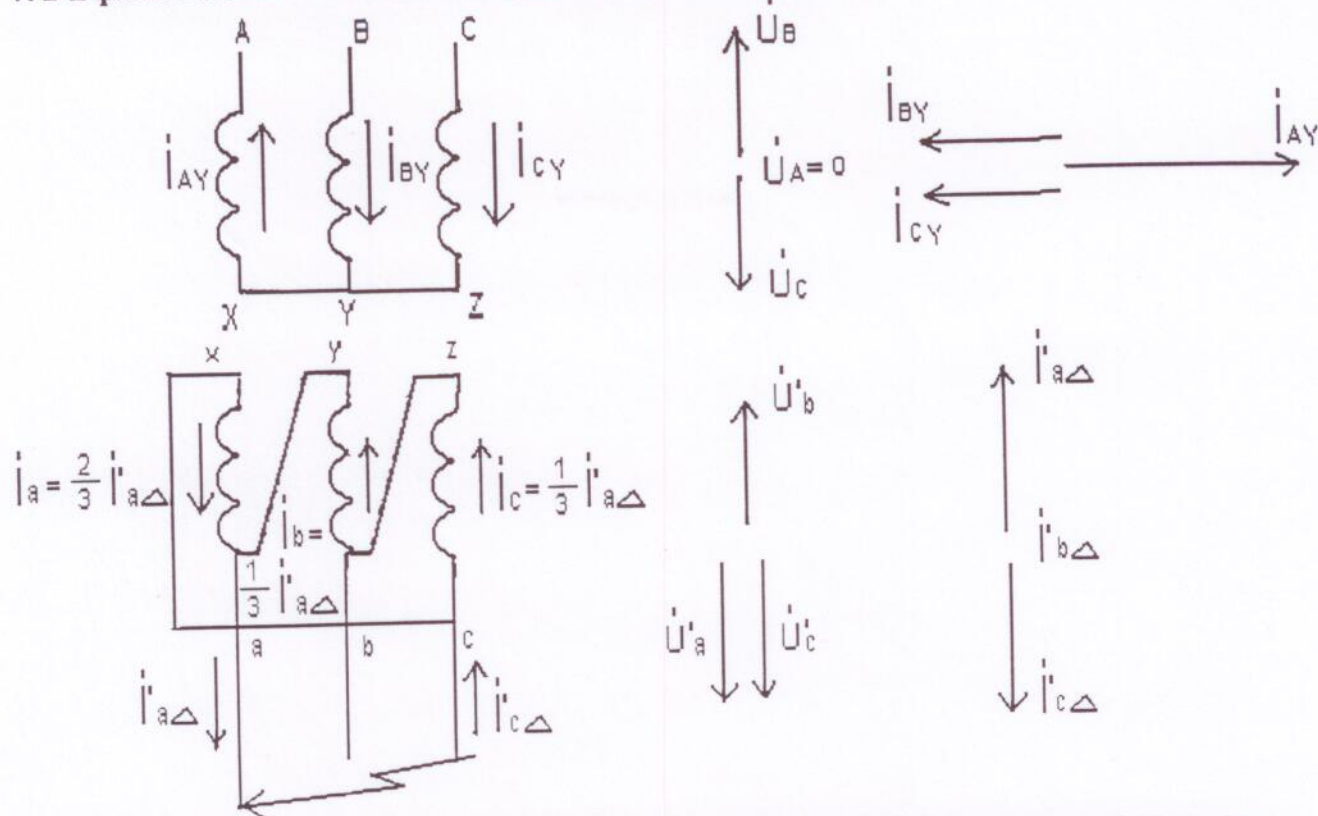


Рис. 33. Векторная диаграмма 2-х фазного КЗ а'с' на низкой стороне трансформатора Y / Δ - 11 за Δ (без метода симметричных составляющих).

$$\dot{I}'_{b\Delta} = 0 ;$$

$$\dot{I}'_{a\Delta} + \dot{I}'_{b\Delta} + \dot{I}'_{c\Delta} = 0 ;$$

$$\dot{I}'_{a\Delta} + \dot{I}'_{c\Delta} = 0 ; \quad \dot{I}'_{a\Delta} = -\dot{I}'_{c\Delta} .$$

$$\dot{I}_{AY} = \dot{I}_{a\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = \frac{2}{3} \cdot \dot{I}'_{a\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = \frac{2\dot{I}'_{a\Delta}}{\sqrt{3}K_T}$$

$$\dot{I}_{BY} = \dot{I}_{b\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = -\frac{1}{3} \cdot \dot{I}'_{a\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = -\frac{\dot{I}'_{a\Delta}}{\sqrt{3}K_T}$$

$$\dot{I}_{CY} = \dot{I}_{c\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = -\frac{1}{3} \cdot \dot{I}'_{a\Delta} \cdot \frac{\sqrt{3}}{K_T} = -\frac{\dot{I}'_{a\Delta}}{\sqrt{3}K_T}$$

$$\dot{U}'_{a\Delta} + \dot{U}'_{b\Delta} + \dot{U}'_{c\Delta} = 0$$

$$\dot{U}'_{b\Delta} = -(\dot{U}'_{a\Delta} + \dot{U}'_{c\Delta}) = -2\dot{U}'_{a\Delta} = -2\dot{U}'_{c\Delta}$$

$$\dot{U}_{AY} = \frac{\dot{U}_{a\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}_{a\Delta} - \dot{U}_{c\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}'_{a\Delta} - 2\dot{U}'_{a\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = 0$$

$$\dot{U}_{BY} = \frac{\dot{U}_{b\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}_{b\Delta} - \dot{U}_{a\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{-2\dot{U}'_{a\Delta} - \dot{U}'_{a\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = -\dot{U}'_{a\Delta} \cdot \sqrt{3} \cdot K_T$$

$$\dot{U}_{CY} = \frac{\dot{U}_{c\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}_{c\Delta} - \dot{U}_{b\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \frac{\dot{U}'_{a\Delta} + 2\dot{U}'_{a\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T = \dot{U}'_{a\Delta} \cdot \sqrt{3} \cdot K_T$$

8. 3-х фазное КЗ на низкой стороне за Δ.

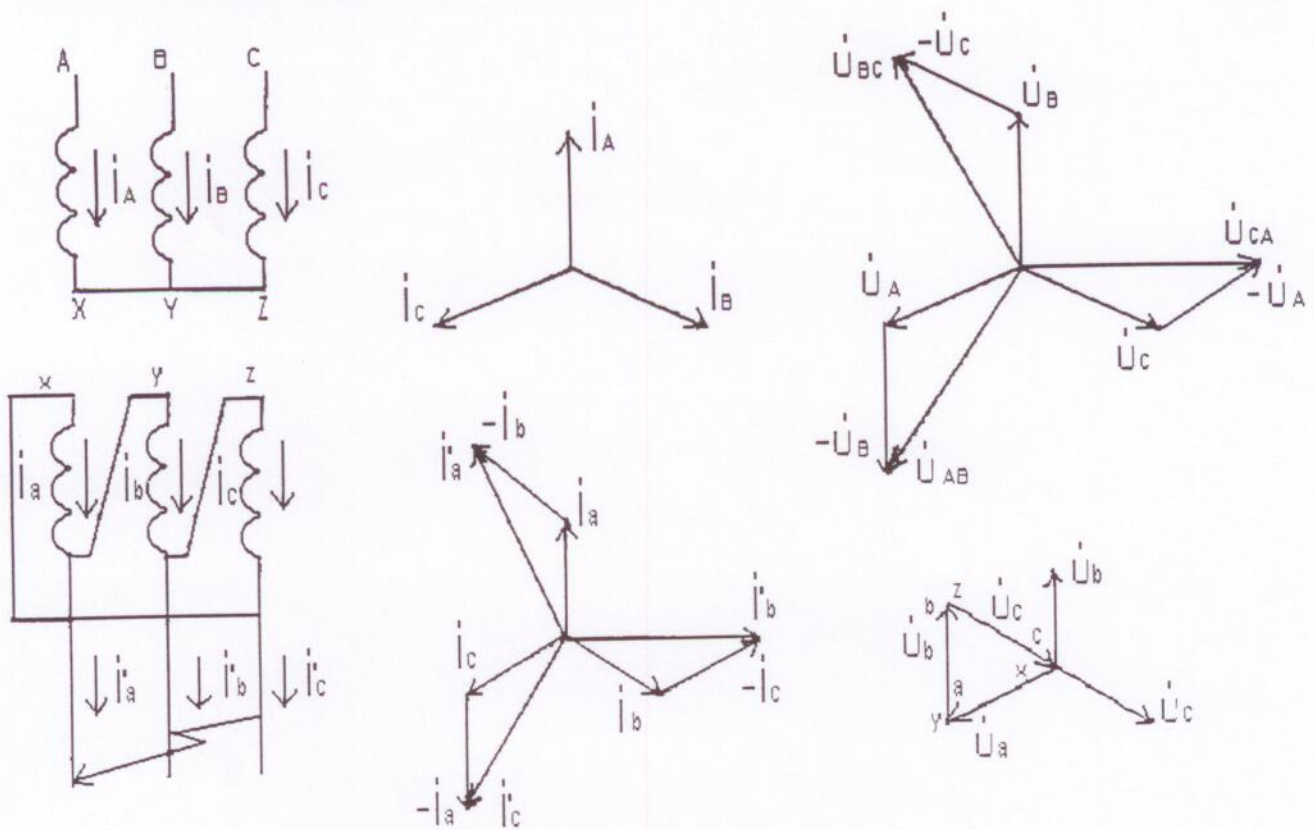


Рис. 34. Векторная диаграмма 3-х фазного КЗ а'б'с' на низкой стороне трансформатора Y / Δ - 11 за Δ.

$$\dot{I}_{a\Delta} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}'_{a\Delta} - \dot{I}'_{c\Delta})$$

$$\dot{I}_{b\Delta} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}'_{b\Delta} - \dot{I}'_{a\Delta})$$

$$\dot{I}_{c\Delta} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}'_{c\Delta} - \dot{I}'_{b\Delta})$$

$$\frac{\dot{I}_{a\Delta}}{\dot{I}_{AY}} = \frac{\dot{I}_{b\Delta}}{\dot{I}_{BY}} = \frac{\dot{I}_{c\Delta}}{\dot{I}_{CY}} = \frac{K_T}{\sqrt{3}}$$

$$\dot{I}_{a\Delta} = \dot{I}_{AY} \cdot \frac{K_T}{\sqrt{3}} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}'_{a\Delta} - \dot{I}'_{c\Delta})$$

Отсюда:

$$\dot{I}_{AY} = \frac{\sqrt{3}}{3 K_T} \cdot (\dot{I}'_{a\Delta} - \dot{I}'_{c\Delta}) = \frac{\dot{I}'_{b\Delta} - \dot{I}'_{c\Delta}}{\sqrt{3} \cdot K_T}$$

$$\dot{I}_{BY} = \frac{\sqrt{3}}{3 K_T} \cdot (\dot{I}'_{b\Delta} - \dot{I}'_{a\Delta}) = \frac{\dot{I}'_{c\Delta} - \dot{I}'_{a\Delta}}{\sqrt{3} \cdot K_T}$$

$$\dot{I}_{CY} = \frac{\sqrt{3}}{3 K_T} \cdot (\dot{I}'_{c\Delta} - \dot{I}'_{b\Delta}) = \frac{\dot{I}'_{a\Delta} - \dot{I}'_{b\Delta}}{\sqrt{3} \cdot K_T}$$

$$\dot{I}'_{a\Delta} = \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_B}{\sqrt{3}} \cdot K_T$$

$$\dot{I}'_{b\Delta} = \frac{\dot{I}_B - \dot{I}_C}{\sqrt{3}} \cdot K_T$$

$$\dot{I}'_{c\Delta} = \frac{\dot{I}_C - \dot{I}_A}{\sqrt{3}} \cdot K_T$$

$$\dot{U}_{AY} = \frac{\dot{U}_{ac\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T$$

$$\dot{U}_{BY} = \frac{\dot{U}_{ba\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T$$

$$\dot{U}_{CY} = \frac{\dot{U}_{cb\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot K_T$$

$$\dot{U}_{ac\Delta} = \frac{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_{AY}}{K_T}$$

$$\dot{U}_{ba\Delta} = \frac{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_{BY}}{K_T}$$

$$\dot{U}_{cb\Delta} = \frac{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_{CY}}{K_T}$$