

87-88 Расчёт несимметричной трёхфазной цепи при соединении источника и приёмника звездой

Рассмотрим расчет токов в трехфазной четырехпроводной цепи (рис. 14.1).

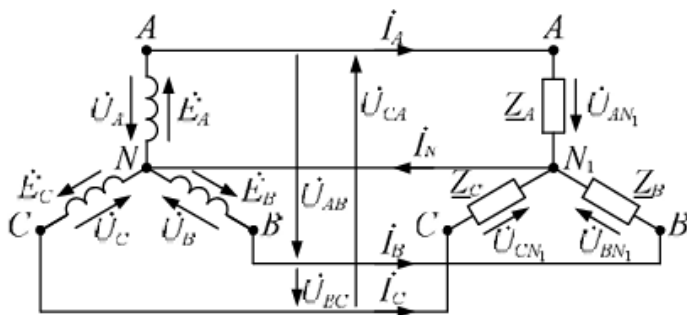


Рис. 14.1. Трёхфазная четырехпроводная цепь

Допустим, $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$, т. е. приемник несимметричный. Сопротивление нейтрального провода мало и им можно пренебречь: $Z_N = 0$.

По второму закону Кирхгофа для контура AN_1NA (см. рис. 14.1) составим уравнение: $-\dot{U}_A + \dot{U}_{AN_1} = 0$, откуда $\dot{U}_{AN_1} = \dot{U}_A$. Аналогично $\dot{U}_{BN_1} = \dot{U}_B$, $\dot{U}_{CN_1} = \dot{U}_C$, т. е. напряжения на фазах приемника равны напряжениям на фазах генератора.

Токи в фазах приемника определяем по закону Ома:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN_1}}{Z_A} = \frac{\dot{U}_A}{Z_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BN_1}}{Z_B} = \frac{\dot{U}_B}{Z_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CN_1}}{Z_C} = \frac{\dot{U}_C}{Z_C}.$$

Ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

Анализируя трехфазную цепь при соединении звездой с нейтральным проводом, приходим к выводу, что изменение нагрузки в любой фазе приводит к изменению тока в данной фазе и тока в нейтральном проводе. Приемники работают по этой схеме независимо друг от друга, как и в схемах с электрически несвязанными фазами.

Пример 14.1. Определить токи в трехфазной цепи (см. рис. 14.1), если фазное напряжение генератора $U_\phi = 220$ В, сопротивления фаз приемника: $Z_A = 10$ Ом, $Z_B = j10$ Ом, $Z_C = -j10$ Ом, сопротивление нейтрального провода $Z_N = 0$ Ом. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов.

Решение. Если $Z_N = 0$, то фазные напряжения генератора равны фазным напряжениям приемника:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{AN_1} = U_\phi = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{BN_1} = \dot{U}_A e^{-j120^\circ} = 220 (-0,5 - j0,866) = -110 - j190 \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{CN_1} = \dot{U}_A e^{j120^\circ} = 220 (-0,5 + j0,866) = -110 + j190 \text{ В}.$$

Токи в фазах приемника находим по закону Ома:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN_1}}{Z_A} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А, действующее значение } I_A = 22 \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BN_1}}{Z_B} = \frac{-110 - j190}{j10} = -19 + j11 \text{ А, } I_B = \sqrt{19^2 + 11^2} = 22 \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CN_1}}{Z_C} = \frac{-110 + j190}{-j10} = -19 - j11 \text{ А, } I_C = \sqrt{19^2 + 11^2} = 22 \text{ А}.$$

Ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 22 - 19 + j11 - 19 - j11 = -16 \text{ А, } I_N = 16 \text{ А}.$$

При построении топографической диаграммы напряжений и векторной диаграммы токов (рис. 14.2) на комплексной плоскости в масштабе откладывают векторы напряжений ($\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$, $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$, $\dot{U}_{CA}$) и токов ($\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$, $\dot{I}_N$).

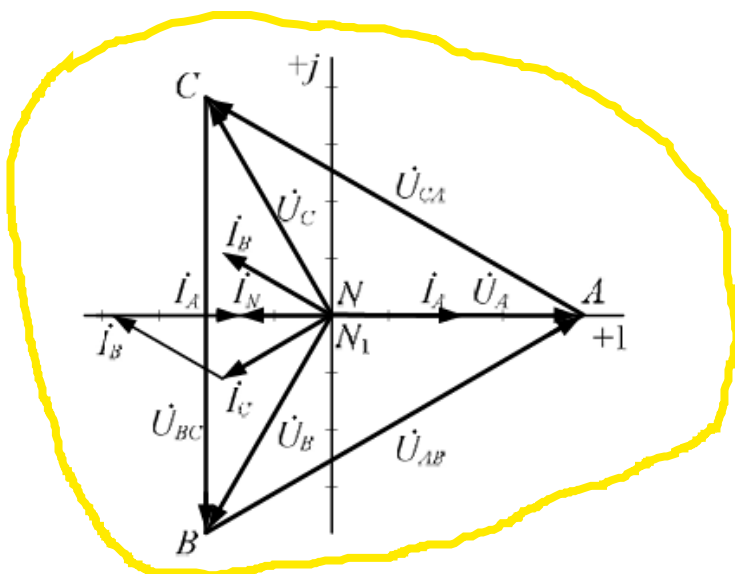


Рис. 14.2. Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов

Рассмотрим трехфазную цепь, приемник и генератор которой соединены звездой без нейтрального провода при несимметричной нагрузке фаз приемника: $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$ (рис. 14.3).

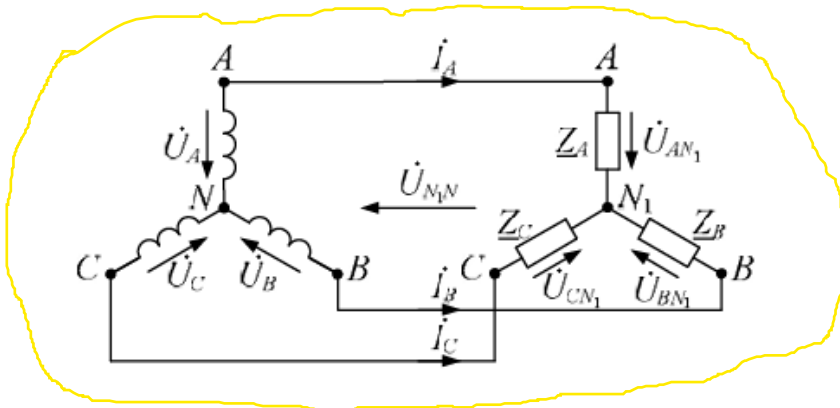


Рис. 14.3. Трехфазная цепь при соединении фаз генератора и приемника звездой без нейтрального провода

При неравномерной нагрузке фазные напряжения приемников для цепи (см. рис. 14.3) будут отличаться от фазных напряжений генератора, так как между нейтральными точками существует напряжение $\dot{U}_{N_1N}$, называемое напряжением смещения нейтрали.

По второму закону Кирхгофа для контура AN_1NA (см. рис. 14.3)

$$-\dot{U}_A + \dot{U}_{AN_1} + \dot{U}_{N_1N} = 0,$$

откуда

$$\dot{U}_{AN_1} = \dot{U}_A - \dot{U}_{N_1N}. \quad (14.1)$$

Аналогично для других фазных напряжений

$$\dot{U}_{BN_1} = \dot{U}_B - \dot{U}_{N_1N}; \quad (14.2)$$

$$\dot{U}_{CN_1} = \dot{U}_C - \dot{U}_{N_1N}. \quad (14.3)$$

Очевидно, что, определив напряжение смещения нейтрали, можно определить фазные напряжения приемника.

Напряжение между нейтральными точками $\dot{U}_{N_1N}$ можно определить, используя метод двух узлов. Поскольку фазные напряжения генератора равны фазным ЭДС, получим следующее выражение:

$$\dot{U}_{N_1N} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}. \quad (14.4)$$

Напряжения на фазах приемника определяем по выражениям (14.1)–(14.3). После этого по закону Ома находим токи:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN_1}}{\underline{Z}_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BN_1}}{\underline{Z}_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CN_1}}{\underline{Z}_C}.$$

В связи с отсутствием нейтрального провода

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

Построим топографическую диаграмму напряжений трехфазной цепи (рис. 14.4).

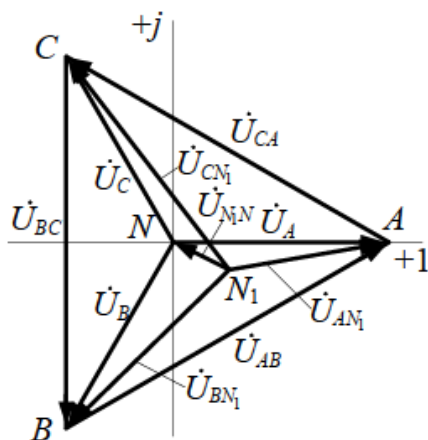


Рис. 14.4. Топографическая диаграмма напряжений цепи, изображенной на рисунке 14.3

Положение точки N_1 на диаграмме (см. рис. 14.4) определяется значением вектора $\dot{U}_{N_1N}$. На топографической диаграмме видно, что напряжения на фазах приемника $\dot{U}_{AN_1}$, $\dot{U}_{BN_1}$, $\dot{U}_{CN_1}$ различны по величине из-за наличия напряжения $\dot{U}_{N_1N}$. Поскольку все приемники рассчитаны на стандартное (номинальное) напряжение, их эксплуатация в этом случае невозможна.

Пример 14.2. Определить токи в трехфазной цепи. Приемник и генератор соединены звездой без нейтрального провода ($Z_N = \infty$). Фазное напряжение генератора $U_\phi = 220$ В, сопротивления фаз $Z_A = 10$ Ом, $Z_B = j10$ Ом, $Z_C = -j10$ Ом.

Решение. Поскольку нагрузка несимметрична, отсутствует нейтральный провод, появляется напряжение между нейтральными точками приемника и генератора, которое определяется по выражению

$$\dot{U}_{N_1N} = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} =$$

$$= \frac{220 \frac{1}{10} + (-110 - j190) \frac{1}{j10} + (-110 + j190) \frac{1}{(-j10)}}{\frac{1}{10} + \frac{1}{j10} - \frac{1}{j10}} = \underline{-160 \text{ В.}}$$

Напряжения на фазах приемника равны:

$$\underline{\dot{U}_{AN_1}} = \dot{U}_A - \dot{U}_{N_1N} = 220 + 160 = \underline{380 \text{ В;}}$$

$$\underline{\dot{U}_{BN_1}} = \dot{U}_B - \dot{U}_{N_1N} = -110 - j190 + 160 = \underline{50 - j190 \text{ В;}}$$

$$\underline{\dot{U}_{CN_1}} = \dot{U}_C - \dot{U}_{N_1N} = -110 + j190 + 160 = \underline{50 + j190 \text{ В.}}$$

Фазные токи равны:

$$\underline{\dot{I}_A} = \frac{\underline{\dot{U}_{AN_1}}}{\underline{Z_A}} = \frac{380}{10} = \underline{38 \text{ А}}, \text{ действующее значение } \dot{I}_A = 38 \text{ А;}$$

$$\underline{\dot{I}_B} = \frac{\underline{\dot{U}_{BN_1}}}{\underline{Z_B}} = \frac{50 - j190}{j10} = \underline{-19 - j5 \text{ А}}, I_B = \sqrt{19^2 + 5^2} = 19,6 \text{ А;}$$

$$\underline{\dot{I}_C} = \frac{\underline{\dot{U}_{CN_1}}}{\underline{Z_C}} = \frac{50 + j190}{-j10} = \underline{-19 + j5 \text{ А}}, I_C = \sqrt{19^2 + 5^2} = 19,6 \text{ А.}$$

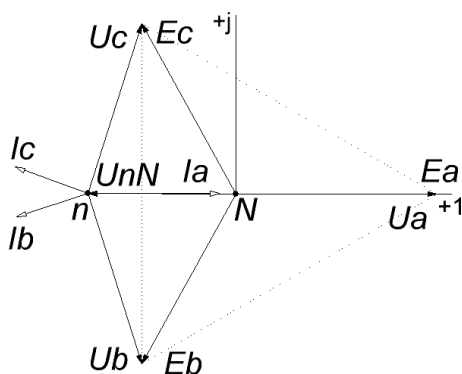
Проверку расчета токов проводят согласно первому закону Кирхгофа:

$$\underline{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0; 38 - 19 - j5 - 19 + j5 = 0.}$$

Рассмотрим топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для приведенной схемы.

Ток протекает по всем источникам, но мощность выделяется только в нагрузке источника E_a резисторе R . Энергия источников E_b и E_c переносится туда.

На векторной диаграмме видно, что точка n смещена влево от начала координат, напряжение U_a совпадает по фазе с ЭДС E_a и больше него на величину UnN , напряжение U_b меньше чем ЭДС E_b и имеет другую фазу, напряжение U_c меньше чем ЭДС E_c и имеет другую фазу.



Таким образом, приведенная схема позволяет перевести энергию трёхфазного источника в одну фазу нагрузки. Также эта схема отличается тем, что ток в нагрузке R не зависит от её сопротивления, и неизменен от режима короткого замыкания $R = 0$, до режима, близкого к холостому ходу $R = \infty$. Эти свойства используются при создании источников питания для дуговых сталеплавильных печей, где режимы изменяются от нормального горения дуги с расплавлением конца плавящегося стержня до перехода расплавленной капли металла в ванну, с закорачиванием дугового промежутка и наступающим после этого увеличением сопротивления дуги.

Если трехфазная цепь четырехпроводна с ощутимым сопротивлением нейтрального провода ($\underline{Z}_N \neq 0$) и несимметричным приемником, то порядок расчета такой же, как и для случая $\underline{Z}_N = \infty$, т. е. при отсутствии нейтрального провода согласно выражениям (14.1)–(14.3). Отличие – в формуле определения напряжения $\dot{U}_{N_1N}$ (14.4) в том, что в формуле (14.5) учитывается комплексная проводимость нейтрального провода:

$$\dot{U}_{N_1N} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_{N_1}}. \quad (14.5)$$

Из рассмотренных примеров расчета трехфазных цепей при соединении фаз звездой можно сделать некоторые выводы: из равен-

ства $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, справедливого для трехпроводной цепи (соединение звездой без нейтрального провода), следует, что изменение сопротивления в какой-либо фазе приведет к изменению тока в двух других фазах, при которых сумма векторов трех токов будет равна нулю. Это изменение токов происходит за счет изменения фазных напряжений или, как говорят, перекоса фазных напряжений, причем на фазе с меньшей нагрузкой действует повышенное напряжение, а на фазах с большей нагрузкой – пониженное, что нежелательно. Значительный перекося напряжений наблюдается при неоднородной нагрузке (сопротивления фаз различны по характеру), при этом фазные напряжения могут превышать по значению линейные.

Соединение приемников звездой без нейтрального провода применяется только тогда, когда заведомо известно, что приемник симметричный, например трехфазный электродвигатель.

Для обеспечения симметричной системы фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке используют нейтральный провод, который служит для уравнивания потенциалов нейтральной точки генератора с нейтральной точкой приемника, обеспечивая тем самым генераторное напряжение на нагрузке. Система фазных напряжений генератора симметрична при любой нагрузке. Сопротивление нейтрального провода должно быть весьма малым, так как при его наличии возможно появление напряжения смещения нейтрали ($\dot{U}_{N_1N} = \dot{I}_N \underline{Z}_N$).

В нейтральном проводе запрещена установка предохранителей или выключателей, чтобы избежать его отключения.