

Раздел 4. Трехфазные цепи.

План

4.1. Основные понятия и соотношения (многофазная система, фаза, симметричные и несимметричные системы). Трехфазные электрические цепи. Элементы трехфазных цепей, способы соединения источников и потребителей.

4.2. Анализ трех- и четырехпроводных систем (симметричная и несимметричная нагрузки). Трехфазная система с источником конечной мощности.

4.1. В системах электропитания и энергоснабжения, генераторных датчиках и других широкое распространение получили трехфазные и многофазные системы токов и напряжений.

Трехфазной называют цепь с трехфазной системой периодических токов (напряжений, ЭДС) имеющих кратные сдвиги начальных фаз при одном и тем же периоде (рис.1).

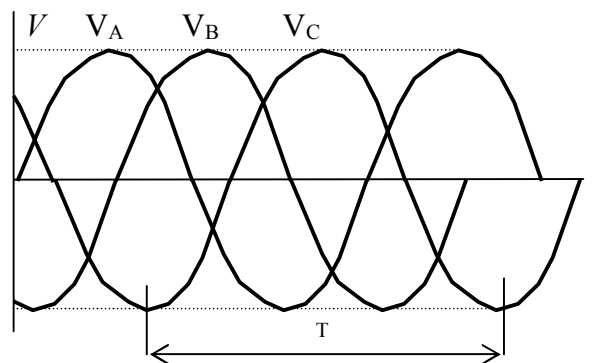
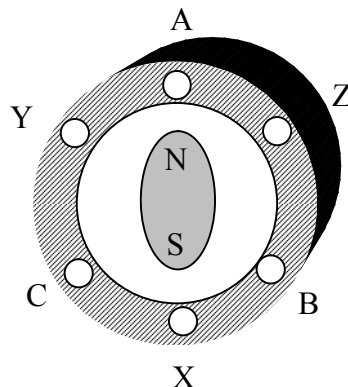


Рис.1 Трехфазная система напряжений.

Получения системы трехфазных источников напряжения можно проиллюстрировать на примере трехфазного генератора (рис.2а).



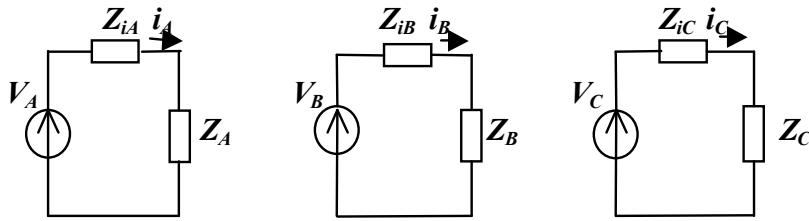


Рис. 2 Структура трехфазного генератора (а) и эквивалентная схема (б).

Обмотки статора A -х, B -у и C -z в пространстве расположены одна относительно другой под углом 120° . При равномерном вращении ротора его магнитное поле наводит в обмотках статора ЭДС, сдвинутые во времени на интервал $T/3$, которые записывают в виде

$$V_A = V_{mA} \sin \omega t, \quad V_B = V_{mB} \sin(\omega t - 2\pi/3), \quad V_C = V_{mC} \sin(\omega t - 4\pi/3)$$

Подключив к каждой обмотке нагрузочное сопротивление, получим эквивалентную схему генератора (рис.2,б).

Фазой называется часть цепи с источником фазного напряжения, по которой идет ток одной и той же фазы. В несвязной системе фазы не связаны между собой (рис.2,б). Практическое применение нашли связанные трехфазные системы в силу их экономических преимуществ (снижение числа проводов).

При анализе цепей с синусоидальными источниками перейдем к комплексным величинам

$$\dot{V}_A = V; \quad \dot{V}_B = V e^{-j2\pi/3}; \quad \dot{V}_C = V e^{-j4\pi/3} = V e^{j2\pi/3}.$$

В связанной системе обмотки генератора могут быть соединены «звездой» (рис.3,а) или «треугольником» (рис.3,б).

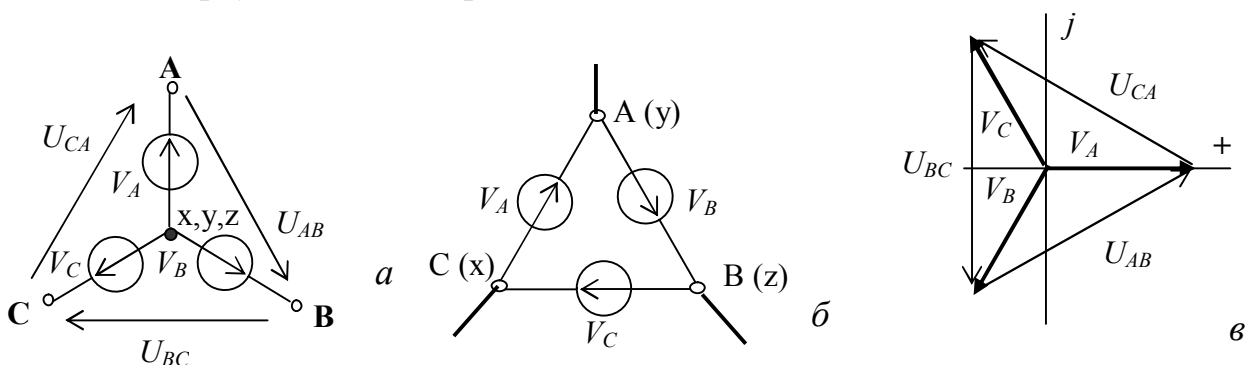


Рис.3 Соединения обмоток звездой (а), треугольником (б), векторная диаграмма (в)

В полученной системе можно выделить различные последовательности напряжений. Например, в соединении «звездой» имеется последовательность фазных \dot{V}_A , \dot{V}_B , \dot{V}_C и линейных \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} напряжений. Линейные напряжения также имеют относительные фазовые сдвиги на $2\pi/3$: $\dot{U}_{AB} = V\sqrt{3}e^{j\pi/6}$; $\dot{U}_{BC} = V\sqrt{3}e^{-j\pi/2}$; $\dot{U}_{CA} = V\sqrt{3}e^{-j7\pi/6}$.

Симметричной называются последовательность, в которой все фазные (линейные) напряжения имеют равные амплитуды и фазовые сдвиги между ними точно кратны $2\pi/3$. В симметричной системе амплитуды линейных напряжений в $\sqrt{3}$ раз превышают амплитуды фазных напряжений. Очевидно, что в симметричной системе $\dot{V}_A + \dot{V}_B + \dot{V}_C = 0$.

Трехфазные цепи в общем случае представлены сложными электрическими схемами с синусоидальными источниками одной частоты. Расчет трехфазных систем выполняют с применением комплексных амплитуд.

4.2. В общем случае трехфазные цепи имеют весьма сложные разветвленные электрические схемы с различными соединениями множества нагрузок. Токи и напряжения трехфазной цепи зависят от типа соединения (звезда или треугольник), вида нагрузки (резистивная, индуктивная, емкостная) и ее номинала.

В несимметричной системе возможны существенные различия фазных напряжений и, связанных с ними мощностей

$$P_A = U_A I_A \cos \varphi_A = U_A^2 / R_A, \quad P_B = U_B^2 / R_B, \quad P_C = U_C^2 / R_C.$$

Проиллюстрируем это на примере простой трехфазной цепи с соединением генератора и нагрузки типа “звезда” - “звезда” (рис4), в которой сопротивления Z_L объединяют выходные сопротивления фаз источника и соединительных проводов, Z_N - сопротивление провода, соединяющего нулевую точку источника и общую точку (нейтраль) нагрузки.

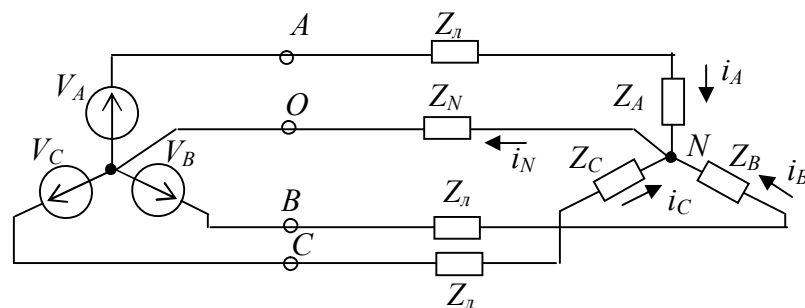


Рис 4 Трехфазная цепь с соединением “звезда” - “звезда”.

В эквивалентной схеме можно выделить два узла и с использованием метода узловых потенциалов записать формулу напряжения между нейтралью нагрузки и нулевой точкой $\varphi_0 = 0$ генератора (смещение нейтрали нагрузки)

$$\dot{U}_N = (\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C) / (Y_A + Y_B + Y_C + Y_N)$$

где $Y_A = 1/(Z_A + Z_n)$, $Y_B = 1/(Z_B + Z_n)$, $Y_C = 1/(Z_C + Z_n)$ - комплексные проводимости ветвей между узлами ON .

Если $Z_A = Z_B = Z_C = Z$ (симметричная нагрузка фаз), то смещение нейтрали нулевое $U_{NO} = 0$ и амплитуды фазных напряжений нагрузки одинаковы.

Иная картина будет при отличающихся сопротивлениях в фазах нагрузки. Например, при $Z_A = R$, $Z_B = Z_C = R/2$, $R_n \ll R$ и **отсутствии нулевого провода** $Y_N = 0$ вычисленное смещение нейтрали будет $\dot{U}_N = -V/5$, что дает следующие значения фазных напряжений нагрузки

$$\dot{U}_{AN} = \dot{V}_A - \dot{U}_N = 1.2V; \dot{U}_{BN} = \dot{V}_B - \dot{U}_N = (-0.3 - j0.87)V; \dot{U}_{CN} = \dot{V}_C - \dot{U}_N = (-0.3 + j0.87)V.$$

Несимметрия нагрузки при отсутствии нулевого провода привела к тому, что напряжение фазы А $U_{\phi A} = 1.2 V$, т.е. на 20% выше номинального, а напряжения фаз В и С $U_{\phi B,C} = 0.9 V$ на 10 % ниже номинального.

При проектировании электрические сети пытаются выровнять нагрузки в фазах, т.е. симметрировать цепь. Так, если в приведенном примере взять сопротивления $Z_B = Z_C = 0.8R$, то при отсутствии нулевого провода смещение нейтрали имеет значение $\dot{U}_N = -0.07V$, которое дает $U_{\phi A} = 1.07 V$; $U_{\phi B,C} = 0.97 V$, т.е. фазные напряжения имеют отличие от номинального значения соответственно на +7% и -3%.

Другим способом снижения несимметрии фазных напряжений нагрузки является **использование четырехпроводной линии связи (с нулевым проводом)**. В этом случае смещение нейтрали нагрузки существенно зависит от сопротивления нулевого провода. Например, при нагрузке фаз $Z_A = R$, $Z_B = Z_C = R/2$, и сопротивлении нулевого провода $R/20$ будет $\dot{U}_N = 0.04V$ и максимальное отклонение фазного напряжения от номинального значения не превысит 4%.

Приведенные примеры могут служить только иллюстрацией способов симметрирования фазных напряжений нагрузки. В реальных системах энергоснабжения и в электрических сетях получение симметричных режимов труднее ввиду сложности схем.

Симметричная трехфазная цепь служит простейшей моделью трехфазных устройств. В силу равнопотенциальности всех нейтралей нагрузок, приведенных к эквивалентным соединениям звездой, их можно объединить и расчет выполнить для отдельной выделенной фазы, затем добавить фазовые сдвиги в других фазах.