

16 Переменный электрический ток. Трёхфазная система

Для передачи электроэнергии на расстояние требуется повышать напряжение при подаче в линию электропередачи и понижать у потребителя до безопасного и удобного для потребления значения. Для постоянного тока это сложнейшая техническая задача, а на переменном токе это легко делается с помощью простейшего устройства – трансформатора. Когда в конце XIX века понадобилось передавать электроэнергию на сотни километров, электротехника постоянного тока зашла в тупик, и началось бурное развитие электротехники переменного тока. В настоящее время электроснабжение производится переменным током по трёхфазной системе.

Однофазный переменный ток, который используется для подключения бытовых электрических приборов, изменяется по синусоидальному закону:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

где I_m , U_m – амплитудные значения тока и напряжения;

ω – угловая частота, $\omega = 2\pi f$;

f – частота;

ψ_i , ψ_u – значения начальных фаз тока и напряжения.

Промежуток времени T , в течение которого происходит полный цикл изменения тока по величине и направлению, называется периодом переменного тока, а число периодов в единицу времени – частотой переменного тока

$$f = 1 / T.$$

За единицу измерения частоты переменного тока принят герц (Гц).

В нашей стране для электрических сетей установлена стандартная частота переменного тока, равная 50 Гц (50 периодов в секунду), которую называют промышленной частотой. Длительность периода T при этом составляет 0,02 с.

В США и некоторых других странах принята промышленная частота 60 Гц.

Угловая частота ω связана с частотой f , Гц, соотношением

$$\omega = 2\pi f.$$

Для промышленной частоты $f = 50$ Гц угловая частота

$$\omega \approx 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \approx 314 \text{ с}^{-1}.$$

Синусоидальную величину удобно представить как проекцию вращающегося вектора на неподвижную вертикальную ось. Отсюда следует, что мгновенные значения синусоидальной величины равны проекции радиус-вектора, изображающего ее амплитудное значение, на ось ординат. Совокупность нескольких векторов, изображающих синусоидальные величины (токи, напряжения, ЭДС) одной частоты, называют векторной диаграммой (рисунок 29).

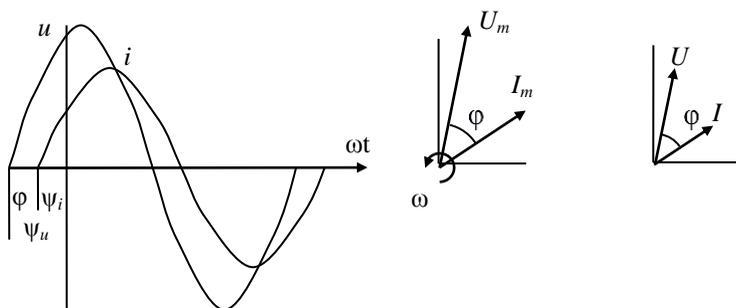


Рисунок 29 – Изображение переменных токов и напряжений вращающимися векторами:

φ – угол сдвига фаз между током и напряжением

При построении диаграммы векторы одноимённых величин изображаются в одном и том же масштабе, и их взаимное расположение не изменяется, так как они вращаются с одинаковой угловой скоростью. Начало отсчёта времени для периодической кривой можно выбрать произвольно, поэтому один из векторов на векторной диаграмме тоже располагают произвольно, однако прочие векторы располагают по отношению к нему под углами, определяемыми разностью (т. е. сдвигом) фаз.

Векторные диаграммы позволяют наглядно изобразить соотношения между синусоидальными величинами по значению и по фазе. Они позволяют также легко складывать или вычитать напряжения или токи.

В расчётах и на векторных диаграммах используют действующие значения переменного тока и напряжения. Действующим значением переменного синусоидального тока называют такую его величину, которая численно равна величине постоянного тока, протекающего через то же сопротивление и вызывающего выделение такого же количества тепла за равное время (период). Действующие значения меньше амплитудных в $\sqrt{2}$ раз:

$$I = I_m / \sqrt{2}; \quad U = U_m / \sqrt{2}.$$

На векторной диаграмме токи и напряжения показывают в виде векторов, длина которых равна в соответствующем масштабе действующему значению, а направление соответствует начальной фазе.

Формулы потерь напряжения и мощности в однофазной линии переменного тока приведём без вывода:

$$\Delta u_{\%} \approx 2l \frac{r_0 P + x_0 Q}{U^2} \cdot 100 \% ; \quad \Delta p_{\%} \approx 2l \frac{r_0 P}{U^2 \cos^2 \phi} \cdot 100 \%.$$

По сравнению с формулами для линии постоянного тока в числителе формулы потерь напряжения справа появилось дополнительно произведение индуктивного километрического сопротивления линии на реактивную мощность, а в формуле потерь мощности в знаменателе – квадрат коэффициента мощности, но левые части формул остались прежними.

Однофазный ток не может создать вращающееся магнитное поле, необходимое для двигателя – преобразователя электрической энергии в механическую. Для этого нужно как минимум два тока, сдвинутых по фазе на четверть периода, а лучше – три тока сдвинутых по фазе на треть периода.

Трёхфазная система питающих напряжений представляет собой три источника одинаковой частоты с одинаковым значением электродвижущих сил, сдвинутых по фазе на треть периода или 120° (рисунок 30):

$$e_A = E_M \sin \omega t; \quad e_B = E_M \sin(\omega t - 120^\circ); \quad e_C = E_M \sin(\omega t + 120^\circ).$$

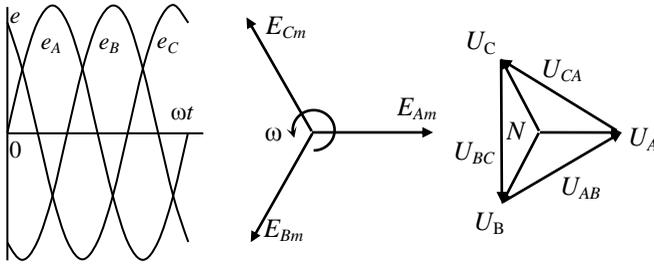


Рисунок 30 – Система из трёх ЭДС и создаваемые ими напряжения

Один из выводов каждого из источников подключён к линейному проводу соответствующей фазы $A(L1)$, $B(L2)$ и $C(L3)$.

Вторые выводы всех трёх источников объединены в нейтраль, соединённую с нейтральным проводом $N(PEN)$ (рисунок 31).

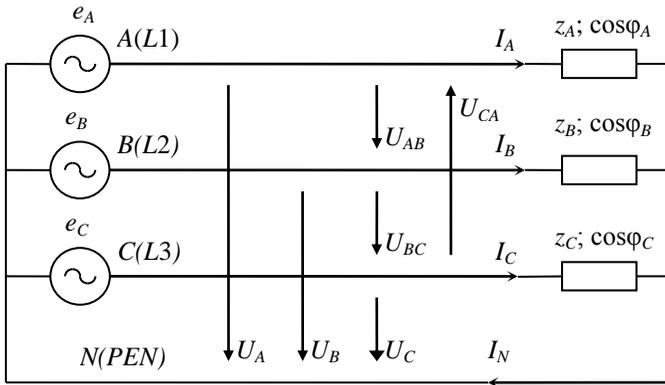


Рисунок 31 – Трёхфазная цепь с подключением нагрузки звездой

Напряжения линейных проводов относительно нейтрали U_A , U_B и U_C называются фазными, а напряжения между линейными проводами питающей линии U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} называются линейными. Линейные напряжения больше фазных: $U = \sqrt{3}U_{\phi}$. В обычной распределительной сети линейное напряжение $U = 380$ В, а фазное $U_{\phi} = 220$ В. При обозначении применяется запись 380/220 В. Иногда

с целью уменьшения опасности поражения электрическим током применяют трёхфазную сеть пониженного напряжения 220/127 В (линейное напряжение равно 220 В, а фазное – 127 В).

В схеме подключения нагрузки звездой один из выводов каждой фазы потребителя подключается к линейному проводу питающей линии, а вторые выводы соединяются вместе в нейтраль. В трёхпроводной схеме нейтраль потребителя изолирована, такая схема применяется только при симметричной нагрузке, когда в каждую фазу включены одинаковые потребители. В четырёхпроводной схеме нейтраль потребителя подключается к нулевому проводу *PEN* (*protect electric and neutral*). Этот провод одновременно служит для защитного зануления (защитный) и для выравнивания напряжений на фазах при несимметричной нагрузке (рабочий). В последнее время происходит переход на пятипроводную распределительную сеть, в которой применяют отдельные нулевой рабочий проводник *N* (нейтральный) и нулевой защитный проводник *PE*.

Ток нейтрального провода является суммой фазных токов, $\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$. На векторной диаграмме (рисунок 32, *а*) видно, что при симметричной нагрузке сумма фазных токов равняется нулю.

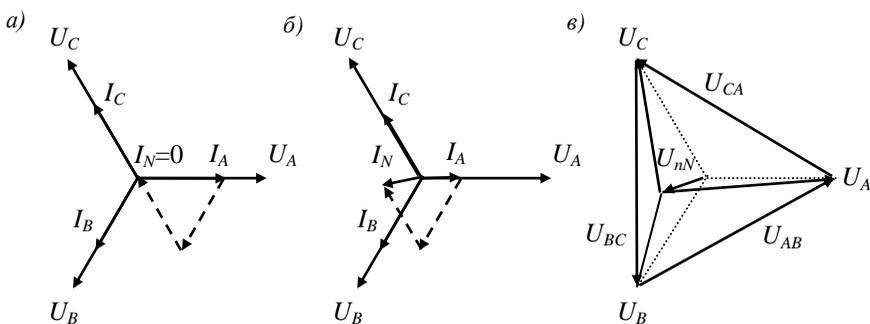


Рисунок 32 – Векторная диаграмма токов при симметричной (*а*) и несимметричной (*б*) нагрузке; перекус фаз (*в*)

Таким образом, при симметричной нагрузке отсутствуют потери в нейтральном проводе и из формул потерь напряжения и мощности, приведенных для однофазной линии переменного тока, исчезает двойка:

$$\Delta u_{\%} \approx l \frac{r_0 P + x_0 Q}{U^2} \cdot 100 \% ; \Delta p_{\%} \approx l \frac{r_0 P}{U^2 \cos^2 \varphi} \cdot 100 \% .$$

Кроме того, в формулах используется линейное напряжение, которое больше фазного: $U = \sqrt{3}U_{\phi}$. Поэтому потери напряжения и мощности в линии при трёхфазном подключении в шесть раз меньше, чем при однофазном подключении потребителей такой же мощности ($2\sqrt{3}^2 = 6$).

При несимметричной нагрузке нейтральный провод необходим, по нему должен проходить выравнивающий ток. На векторной диаграмме (см. рисунок 32, а) видно, что при несимметрии фазных токов появляется ток в нейтральном проводе. Если попытаться включить несимметричную нагрузку без нейтрального провода, получится перекося фаз, при котором на нагруженных фазах напряжение понизится, а на разгруженных появляется перенапряжение (см. рисунок 32, б). Снижение напряжения нарушает работу потребителей, а перенапряжение может вывести их из строя.

Потери энергии в нейтральном проводе снижают коэффициент полезного действия линии и ухудшается качество электроснабжения. Поэтому с целью получения симметричной нагрузки однофазные потребители стараются равномерно распределять по фазам.

Мощность трёхфазного потребителя равна сумме мощностей отдельных фаз. При симметричной нагрузке

$$S = 3U_{\phi} I = \sqrt{3}UI ; \quad P = \sqrt{3}UI \cos \varphi ; \quad Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi .$$

Ток в проводах линии электропередачи при подключении симметричного трёхфазного потребителя

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi} .$$

Студенты исследуют особенности передачи энергии переменным током на макете трёхфазной линии. Сначала измеряют напряжение ненагруженной линии – это напряжение источника. Убеждаются что линейное напряжение больше фазного $U = \sqrt{3}U_{\phi}$. Затем к фазе С и нейтральному проводу подключают 1, 2, 3-ю лампочки и определяют потери напряжения. После этого подключают 3 лампочки к разным

фазам и определяют потери напряжения. Убеждаются, что при трёхфазном подключении потери в 6 раз меньше, чем при однофазном.