

## Трёхфазные цепи переменного тока

### Соединение обмоток трёхфазных источников электрической энергии

#### Вопросы:

1. Генерирование трёхфазной э.д.с.
2. Соединение обмоток источника в звезду. Соединение обмоток источника в треугольник



Русский электротехник **Михаил Осипович ДОЛИВО-ДОБРОВОЛЬСКИЙ** (02.01.1862, Гатчина – 15.11.1919, Гейдельберг) изобрел систему трёхфазного тока, фазометр (1892) и стрелочный частотомер (1897), построил трёхфазный трансформатор.

Чсть создания генераторов переменного тока, совершивших революцию в электротехнике, принадлежит Доливо-Добровольскому и Николе Тесле. В 1889 г. Доливо-Добровольский построил трёхфазный двигатель и первую в мире трёхфазную электрическую систему, по которой передавался трёхфазный ток напряжением 8500 В мощностью 220 кВт на расстояние 175 км.

Сделав обмотку статора распределенной по всей его окружности и заменив кольцевую обмотку статора барабанной, Михаил Осипович придал асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором современный вид.

В 1891 г. во Франкфурте-на-Майне во время проведения международной выставки, демонстрирующей электротехнические достижения, перед главным входом на выставку был построен искусственный водопад и установлен мощный асинхронный двигатель Доливо-Добровольского на 100 л. с., который приводил в движение насос, подававший воду к водопаду.

Небольшая гидроэлектростанция с трёхфазным синхронным генератором, которая с помощью трансформаторов передавала электроэнергию на невиданное в те времена расстояние в 170 км, была построена на р. Неккар в местечке Лауфен.

Выставка имела грандиозный успех. Именно с этого момента берет свое начало современная электрификация.

Вынужденный эмигрировать из России, Доливо-Добровольский жил в Германии, но от русского подданства не отказался.

## Генерирование трехфазной э.д.с.

Трехфазные электрические цепи представляют собой частный случай многофазных цепей.

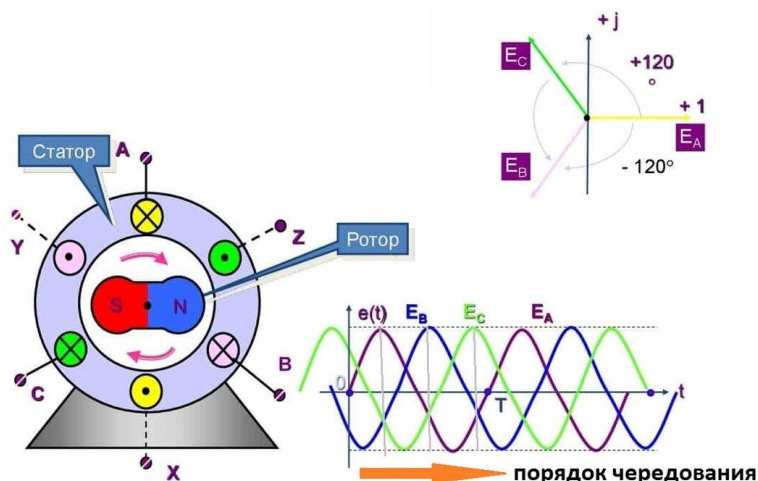
Многофазная система электрических цепей есть совокупность нескольких однофазных электрических цепей, в каждой из которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, создаваемые общим источником энергии и сдвинутые друг относительно друга по фазе на один и тот же угол. Термин «фаза» применяется для обозначения угла, характеризующего стадию периодического процесса, а также для названия однофазной цепи, входящей в многофазную цепь.

Обычно применяют симметричные многофазные системы, у которых амплитудные значения ЭДС одинаковы, а фазы сдвинуты друг относительно друга на один и тот же угол  $2\pi/m$ , где  $m$  — число фаз. Наиболее часто в электротехнике используют двухфазные, трехфазные, шестифазные цепи. В электроэнергетике наибольшее практическое значение имеют трехфазные системы.

**Трехфазные цепи** — это совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга на угол  $2\pi/3$  ( $120^\circ$ ).

Преимущество трехфазного тока, заключается в экономичности передачи энергии на большие расстояния, возможность простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для работы электрических двигателей.

Источником электрической энергии в трехфазной цепи является синхронный генератор, в трех обмотках которого, конструктивно сдвинутых друг относительно друга на угол  $2\pi/3$  и называемых фазами, индуцируются три ЭДС в свою очередь, также сдвинуты относительно друг друга на угол  $2\pi/3$ . Устройство трехфазного синхронного генератора схематически показано на рис. 1.



В пазах сердечника статора расположены три одинаковые обмотки. На переднем торце статора витки обмоток оканчиваются зажимами А, В, С (начало обмоток) и соответственно зажимами Х, Y, Z (концы обмоток). Начала обмоток смещены относительно друг друга на угол  $2\pi/3$ , и соответственно их концы также сдвинуты относительно друг друга на угол  $2\pi/3$ .

ЭДС в обмотках статора индуцируются в результате пересечения их витков магнитным полем, которое возбуждается постоянным током, проходящим по обмотке вращающегося ротора, которая называется обмоткой возбуждения. При равномерной частоте вращения ротора в обмотках статора индуцируются синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол  $2\pi/3$ .

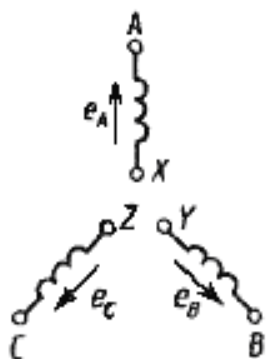
Трехфазная система ЭДС, индуцируемых в статоре синхронного генератора, обычно представляет собой симметричную систему.

На рисунке показано изменение мгновенных значений ЭДС трехфазного генератора и его векторные диаграммы для прямой последовательности чередования фаз.

Последовательность, с которой ЭДС в фазных обмотках генератора принимает одинаковые значения, называют **порядком чередования фаз или последовательностью фаз**.

Если ротор генератора вращать в направлении, указанном на рис., то получается последовательность чередования фаз АВС, т. е. ЭДС фазы В отстает по фазе от ЭДС фазы А, и ЭДС фазы С отстает по фазе от ЭДС фазы В.

На электрических схемах обмотки статора трехфазного генератора условно изображают так, как показано на рисунке. За условное положительное направление ЭДС в каждой фазе генератора принимают направление от конца к началу обмотки.

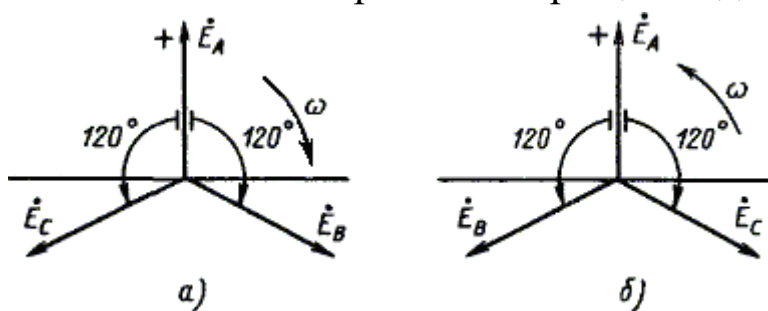


Такую систему ЭДС называют **системой прямой последовательности**. Если изменить направление вращения ротора генератора на противоположное, то последовательность чередования фаз будет обратной.

У генераторов роторы всегда вращаются в одном направлении, вследствие чего последовательность чередования фаз никогда не изменяется.

На практике у генераторов обычно применяется прямая последовательность чередования фаз. От последовательности чередования фаз зависит направление вращения трехфазных синхронных и асинхронных двигателей.

Достаточно поменять местами две любые фазы двигателя, как возникает обратная последовательность чередования фаз и, следовательно, противоположное направление вращения двигателя.

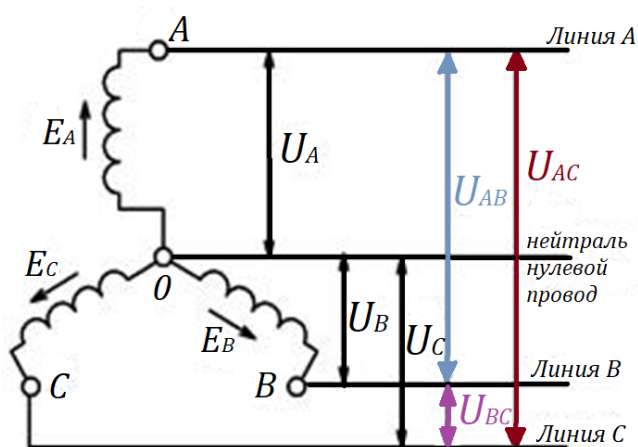


Последовательность фаз необходимо также учитывать при параллельном включении трехфазных генераторов.

Каждую фазу генератора можно соединить отдельно со своим потребителем (для этого потребуется 6 проводов), такая система называется несвязной и на практике не применяется. Применяются 2 способа соединения обмоток генератора: звезда и треугольник. Для соединения нагрузки генератора также используется звезда и треугольник.

### Соединение обмоток источника в звезду.

При таком соединении концы фаз соединяются в одну точку, к началам фаз подсоединяются провода.



Напряжение между началом и концом одной фазы или линейным и нулевым проводом называется **фазным напряжением** ( $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ ).

Напряжение между началами двух фаз или двумя линейными проводами называется **линейным напряжением** ( $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{AC}$ ).

В ненагруженном генераторе фазные напряжения равны его ЭДС – следовательно они изменяются по синусоидальному закону одинаковой частоты.

Фазное напряжение представляет собой разность потенциалов двух точек:

$$U_A = \varphi_A - \varphi_0$$

$$U_B = \varphi_B - \varphi_0$$

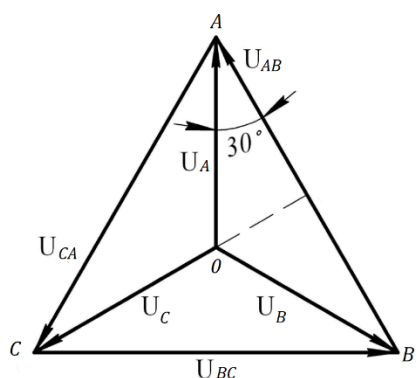
$$U_C = \varphi_C - \varphi_0$$

Линейное напряжение также представляет собой разность потенциалов двух точек:

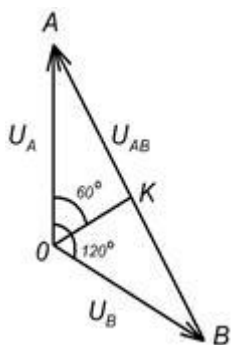
$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = U_A + \varphi_0 - U_B - \varphi_0$$

Линейные напряжения представляют собой разность двух соответствующих фазных напряжений, то есть двух синусоид одинаковой частоты, следовательно изменяются по синусоидальному закону той же частоты.

На векторной диаграмме:



Рассмотрим треугольник АВО:



Проведем перпендикуляр к стороне АВ в точку 0. Угол А0В равен  $120^\circ$  следовательно угол А0К будет равен  $60^\circ$ .

Определим сторону АК:

$$AK = OA \cdot \sin(60^\circ)$$

Сторона АВ будет равна:

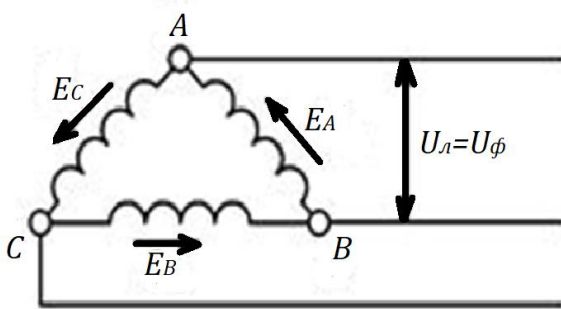
$$AB = 2 \cdot OA \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot OA$$

Следовательно, линейное напряжение:

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi$$

### Соединение обмоток источника в треугольник

При таком соединении начало каждой фазы соединяется с концом предыдущей.



Если генератор вырабатывает симметричные ЭДС и обмотки соединены правильно, то в замкнутом контуре генератора тока не будет, так как сумма симметричных ЭДС равна нулю:

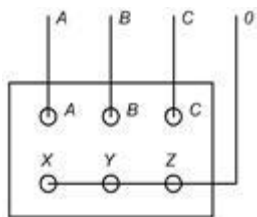
$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$$

$$\begin{aligned} \bar{E}_A + \bar{E}_B + \bar{E}_C &= E e^{j0^\circ} + E e^{-j120^\circ} + E e^{j120^\circ} = \\ &= E(\cos(0^\circ) + j\sin(0^\circ)) + E(\cos(-120^\circ) + j\sin(-120^\circ)) + \\ &+ E(\cos(120^\circ) + j\sin(120^\circ)) = E \left( 1 + 0 - 0.5 - \frac{\sqrt{3}}{2} - 0.5 + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 0 \end{aligned}$$

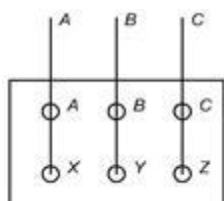
Если неправильно подсоединить одну из фаз генератора (поменять местами начало и конец), то генератор выходит из строя.

Соединение обмоток генератора треугольником применяется очень редко, на всех электростанциях обмотки генераторов соединяются звездой.

Подсоединение проводов к колодке генератора при соединении обмоток звездой:



Подсоединение проводов к колодке генератора при соединении обмоток треугольником:



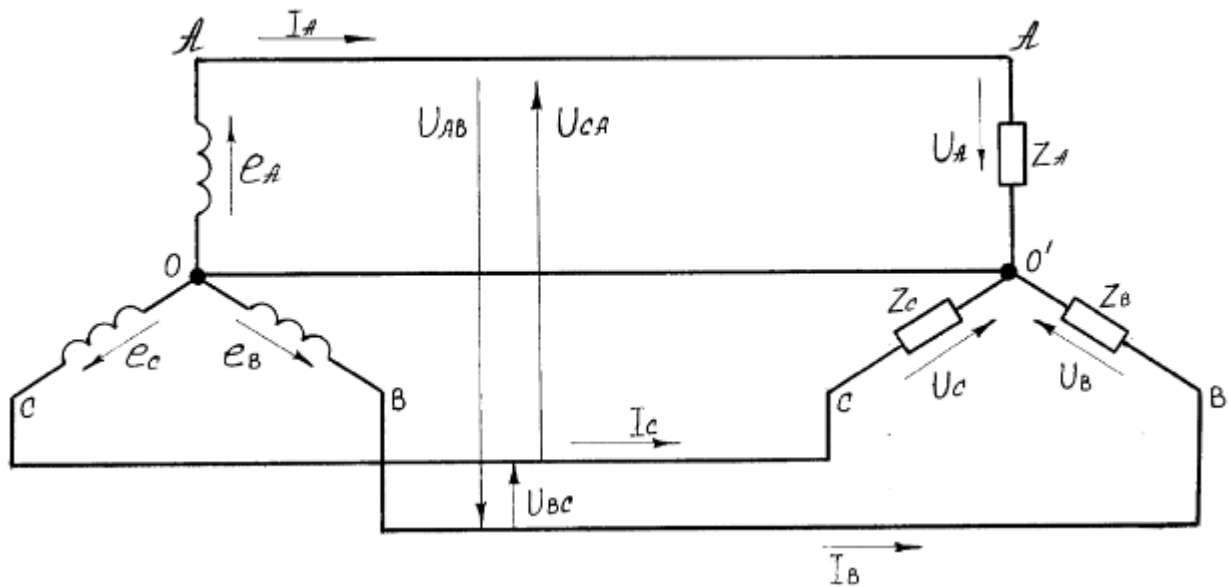


## Включение нагрузки в цепь трехфазного тока

### Вопросы:

1. Соединение потребителей энергии в звезду
2. Соединение потребителей энергии в треугольник

### Соединение потребителей энергии в звезду



Токи  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  можно назвать и линейными и фазными одновременно.  $I_0$  – ток в нулевом проводе.

В данном случае возможны несколько случаев, в зависимости от нагрузки:

#### **а) Нагрузка фаз равномерная** (одинаковая по величине и характеру)

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = Z \cdot e^{\pm j\varphi}$$

Если генератор вырабатывает симметричные ЭДС и нагрузка фаз равномерная, то вся трехфазная система считается равномерной и ее расчет производится на одну фазу.

В данной цепи  $I_\Phi = I_L$ :

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}$$

$$I_B = \frac{U_B}{Z_B}$$

$$I_C = \frac{U_C}{Z_C}$$

Из формул видно, что токи одинаковы по величине и сдвинуты между собой на одинаковые углы в  $120^\circ$  (как действующие на нагрузках фазные



напряжения), а относительно своих напряжений на одинаковые углы  $\varphi$ , определяемые нагрузкой. Токи  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  — являются симметричными (одинаковыми по величине и сдвинуты на  $120^\circ$ ), следовательно:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$$

Ток  $I_0$  равняется сумме  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , следовательно,  $I_0=0$ . Значит, нулевой провод можно не проводить, но при этом нужно обязательно заземлить “0” нагрузки и “0” генератора на случай аварийного режима.

Заземление — электрическое соединение предмета из проводящего материала с землёй. Заземление применяется для защиты человека от поражения электрическим током.

Опасным уровнем напряжения для жизни можно назвать величину в **50 Вольт**, а при дополнительных условиях, например, влажности, эта цифра может опуститься до 12 Вольт.

#### **б) Нагрузка фаз неравномерная и нет нулевого провода ф**

$$\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$$

Такую цепь можно рассматривать как цепь с двумя узлами и тремя ветвями, в каждой из которых есть ЭДС. Для расчета такой цепи можно применить метод узлового напряжения. Согласно этому методу между узлами  $O$  и  $O_1$  есть некоторое узловое напряжение, рассчитываемое по формуле:

$$U_{OO'} = \frac{E_A \cdot Y_A + E_B \cdot Y_B + E_C \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

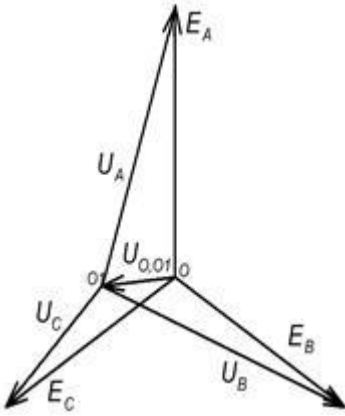
$$\underline{y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}; \underline{y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}; \underline{y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C};$$

Определим токи в ветвях цепи:

$$I_A = (E_A - U_{OO'}) \cdot Y_A$$

$$I_B = (E_B - U_{OO'}) \cdot Y_B$$

$$I_C = (E_C - U_{OO'}) \cdot Y_C$$



В формулах токов выражение в скобках – это напряжение, действующее на фазах нагрузки, из формул и векторной диаграммы видно, что эти напряжения становятся разными по величине (перекос фаз), что недопустимо.

Для устранения этого необходим нулевой провод, если это сделать, то в формулу узлового напряжения добавляется проводимость нулевого провод, так как проводимость провода в идеале равна бесконечности, то:

$$\underline{U_{0,01}} = \frac{\underline{E_A} \cdot \underline{y_A} + \underline{E_B} \cdot \underline{y_B} + \underline{E_C} \cdot \underline{y_C}}{\underline{y_A} + \underline{y_B} + \underline{y_C} + \underline{y_{0,01}}} = 0;$$

Токи в ветвях при этом становятся разными по величине и в сумме не равны 0:

$$\underline{I_0} = \underline{I_A} + \underline{I_B} + \underline{I_C} \neq 0;$$

За счет тока в нулевом проводе выравнивается напряжение на фазах нагрузки.

а) Нулевой провод необходим, чтобы напряжения на фазах нагрузки оставались одинаковыми в случае неравномерной нагрузки (не было перекаса фаз);

б) Нулевой провод необходим на случай аварийного режима:

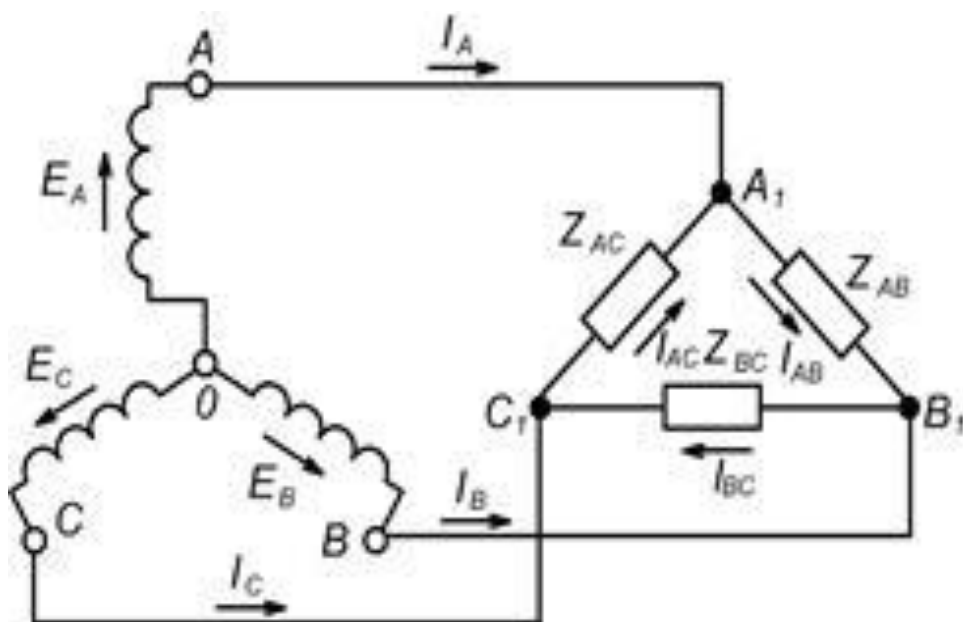
- Короткое замыкание фазы. Если нет нулевого провода, то на оставшихся фазах нагрузки, вместо фазного напряжения будет действовать линейное напряжение (в корень из 3 раз большее), что приведет к выходу оборудования из строя. Если нулевой провод подключен, напряжение на нагрузках не изменится.

- Обрыв фазы. При отсутствии нулевого провода оставшиеся фазы оказываются соединены последовательно и включены на линейное напряжение, следовательно, напряжение на них уменьшится. Если нулевой провод подключен, напряжение на нагрузках не изменится.

Практически ток в нулевом проводе в 2 – 3 раза меньше тока в линейных проводах, поэтому нулевой провод выполняется меньшим сечением. Обрыв нулевого провода крайне нежелателен, поэтому предохранители в него не ставят.

### Соединение потребителей энергии в треугольник

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = Z \cdot e^{\pm j\varphi}$$



Токи  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  протекают в линейных проводах и называются линейными ( $I_L$ ), в фазах нагрузки протекают другие токи  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$ ,  $I_{AC}$  и называются ( $I_\Phi$ ). На фазах нагрузки действуют линейные напряжения генератора.

Если генератор вырабатывает симметричные ЭДС и нагрузка фаз равномерная, то вся трехфазная система считается симметричной и ее расчет производится на одну фазу.

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad \underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}; \quad \underline{I}_{AC} = \frac{\underline{U}_{AC}}{\underline{Z}_{AC}};$$

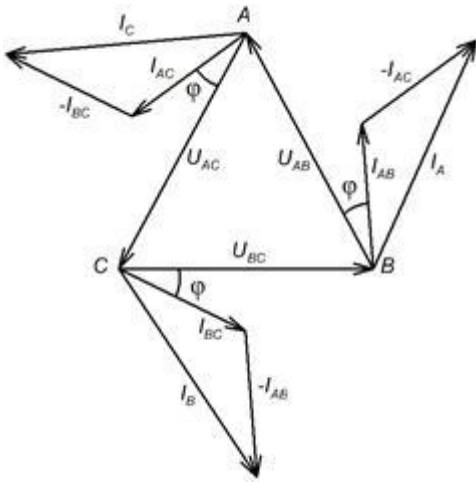
Из формул видно, что фазные токи одинаковы по величине и сдвинуты между собой по фазе на одинаковые углы  $120^\circ$  (как действующие на них линейные напряжения), а относительно своих напряжений на одинаковые

углы  $\varphi$ , определяемые нагрузкой. Линейные токи можно найти с помощью узловых уравнений Кирхгофа и векторной диаграммы:

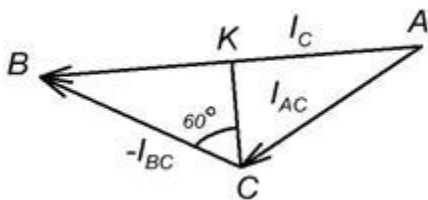
$$\text{Узел A: } \vec{I}_A + \vec{I}_{AC} = \vec{I}_{AB}; \rightarrow \vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{AC};$$

$$\text{Узел B: } \vec{I}_B + \vec{I}_{AB} = \vec{I}_{BC}; \rightarrow \vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB};$$

$$\text{Узел C: } \vec{I}_C + \vec{I}_{BC} = \vec{I}_{AC}; \rightarrow \vec{I}_C = \vec{I}_{AC} - \vec{I}_{BC};$$



Рассмотрим треугольник ABC:



Проведем перпендикуляр к стороне AB в точку O. Угол ACB равен  $120^\circ$  следовательно угол ACK будет равен  $60^\circ$ . Определим сторону BK:

$$BK = BC \cdot \sin(60^\circ);$$

Сторона AB будет равна:

$$AB = 2 \cdot BC \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot BC;$$

Следовательно, линейный ток:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф}};$$

## Тема 4.3 Мощность переменного тока

### Мощность в цепи переменного тока

Внутри схемы переменного тока различается три вида мощностей: активного типа  $P$ , реактивного типа  $Q$ , и полного типа  $S$ .

В первом случае стандартной единицей замеров является Ватт (Вт или W), при этом формула для вычисления активных мощностных параметров:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

**$\cos \varphi$  - коэффициент мощности** — безразмерная физическая величина, характеризующая потребителя переменного электрического тока с точки зрения наличия в нагрузке реактивной составляющей.

Уменьшение  $\cos(\varphi)$  приводит к повышенному износу элементов электрических сетей, дополнительным потерям электроэнергии. Передача электроэнергии в сетях с большой долей реактивной энергии (уменьшенным  $\cos(\varphi)$ ) требует большой мощности питающих трансформаторов, большого сечения проводников, вследствие увеличения рабочего тока, что приводит к дополнительным капитальным и эксплуатационным затратам.

В настоящее время приняты следующие нормативные значения коэффициента мощности:

0,85 – при питании потребителей от генераторов электростанций на генераторном напряжении;

0,93 – при питании потребителей от районных сетей 110 – 220 кВ и от сетей 35 кВ, питающихся от электростанций (две ступени трансформации);

0,95 – при питании потребителей от сетей 35 кВ, питающихся от районных электросетей (три ступени трансформации).

#### **Причины и последствия низкого коэффициента мощности.**

Основными причинами сравнительно большого потребления реактивной мощности, а значит, снижение величины коэффициента мощности являются:

1. Работа асинхронных двигателей и трансформаторов при неполной нагрузке. При этом уменьшается активная мощность электрической машины, тогда как реактивная остается почти без изменений, что ведет к снижению  $\cos(\varphi)$ .

2. Несовершенство конструкции асинхронного двигателя и некачественный ремонт его (наличие большого воздушного зазора между статором и ротором). Магнитное сопротивление воздушного составляет примерно 80% от общего сопротивления магнитной цепи.

3. Повышение напряжения сети. С повышением напряжения у асинхронных двигателей и трансформаторов возрастает магнитный поток, следовательно, и потребляемая реактивная мощность, при этом коэффициент мощности снижается.

4. Снижение скорости электрических машин. Тихоходные асинхронные двигатели имеют более сложную магистральную цепь, потребляют большую реактивную мощность, следовательно, имеют более низкий  $\cos(\varphi)$ , чем быстроходные. Низкие  $\cos(\varphi)$ , предприятия приводит к увеличению мощности и размеров генераторов и трансформаторов.

#### **Способы повышения $\cos(\varphi)$ .**

Повышение  $\cos(\varphi)$  естественным путем предусматривает рациональное использование и качественную эксплуатацию электрооборудования. Последнее может быть достигнуто проведением следующих мероприятий.

1. Повышением загрузки электродвигателей за счет рационального изменения технологического процесса; двигатели, работающие с постоянной недогрузкой, следует заменять менее мощными. Если нагрузка двигателей составляет менее 40%, то их замена обязательна, если нагрузка колеблется в пределах 40 – 70%, необходимость их замены должна быть подтверждена технико-экономическими расчетами.

2. Ограничением времени работы двигателей на холостом ходу.

3. Повышением качества ремонта электродвигателей. При ремонтах необходимо выдерживать величину зазора между статором и ротором в соответствии с заводскими требованиями.

4. Улучшением работы трансформаторов, переводя их нагрузки на другие трансформаторы или отключая их во время ее уменьшения. Если трансформатор постоянно работает с недогрузкой и средняя нагрузка его составляет менее 30%, его следует заменить на трансформатор меньшей мощности.

5. Заменой асинхронных двигателей с фазным ротором во всех случаях, когда позволяет технологический процесс, асинхронными короткозамкнутыми двигателями, имеющими, как правило, более высокий  $\cos(\varphi)$ .

6. Заменой, где возможно, асинхронных двигателей на синхронные, работающие с перевозбуждением. При работе с перевозбуждением синхронный двигатель имеет отрицательный сдвиг по фазе (ток опережает напряжение) и становится генератором реактивной энергии. Замена асинхронных двигателей на синхронные значительно улучшает коэффициент мощности предприятия.

Искусственные способы повышения  $\cos(\varphi)$  осуществляется путем установки на предприятиях специального электрооборудования, компенсирующего реактивную мощность. Установка такого оборудования допускается только с разрешения управления энергосистемы.

В качестве специального оборудования, компенсирующего реактивную мощность, применяют статические конденсаторы, синхронные компенсаторы и синхронные электродвигатели большей мощности, чем это требуется для привода рабочей машины или механизма. Синхронные компенсаторы представляют собой синхронные машины специальной конструкции, вращающиеся вхолостую и используемые только как генераторы реактивной мощности.

В отдельных случаях по специальному разрешению управления энергосистемы и при наличии существенных технико-экономических преимуществ допускается применение в качестве синхронных компенсаторов синхронных двигателей и генераторов, а также синхронизированных асинхронных двигателей с нагрузкой на валу не выше 70% от номинальной.

От характеристик коэффициента угла фазового сдвига или последнего показателя напрямую зависят расчёты положительной или отрицательной активной мощности.

**Реактивная мощность** — величина, характеризующая нагрузки, создаваемые в электротехнических устройствах колебаниями энергии электромагнитного поля в цепи переменного тока

Для замеров мощности **реактивного типа** применяется специальный вольтампер с обозначением «ВАр» или VAr. Данной величиной характеризуются нагрузки, которые формируются внутри конструкций электротехнического типа под воздействием колебаний электромагнитных полей в цепях переменного синусоидального тока.

Расчёт осуществляется на базе среднеквадратичных показателей напряжения и токовых параметров, умноженных на угловую синусоиду фазного сдвига, согласно значениям:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi.$$

В условиях значений на уровне  $0/+90^\circ$  синусовая величина будет положительной, а для показателей в пределах  $0/-90^\circ$  — только отрицательной.

**Полная мощность** — величина, равная произведению действующих значений периодического электрического тока  $I$  в цепи и напряжения  $U$  на её зажимах.

Замеры **полной электромощности** осуществляются исключительно в вольт-амперах (ВА или VA). Зависимость мощности от времени для переменного и постоянного тока. Величину, соответствующую произведению стандартного напряжения в зажимной области с показателями электротока периодического типа внутри цепи, целесообразно рассчитывать в соответствии с формулами:



$$S = UI \text{ или } S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

где значение  $P$  представлено активной мощностью; значение  $Q$  — показатель реактивной мощности.

### **Мощность в трёхфазной цепи**

Мощностные показатели переменного тока при равномерной трехфазной нагрузке определяются наличием равноценного тока, протекающего по проводникам фазы.

В этом случае показатели силы тока в условиях использования нулевого проводника составляют 0.

Формула для расчета мощности переменного тока в условиях трехфазной сети:

$$P = 3U_{\phi}I \cos\varphi$$

Протекание внутри фазных проводников различных по величине токов представляет собой несимметричную, или неравномерную нагрузку. При этом именно несимметричная нагрузка сопровождается протеканием тока по нулевым или нейтральным проводам, поэтому уровень мощностных показателей определяется в соответствии со стандартной и общеизвестной формулой:

$$P_{\text{общая}} = U_a \times I_a \times \cos(\varphi_a) + U_b \times I_b \times \cos(\varphi_b) + U_c \times I_c \times \cos(\varphi_c).$$