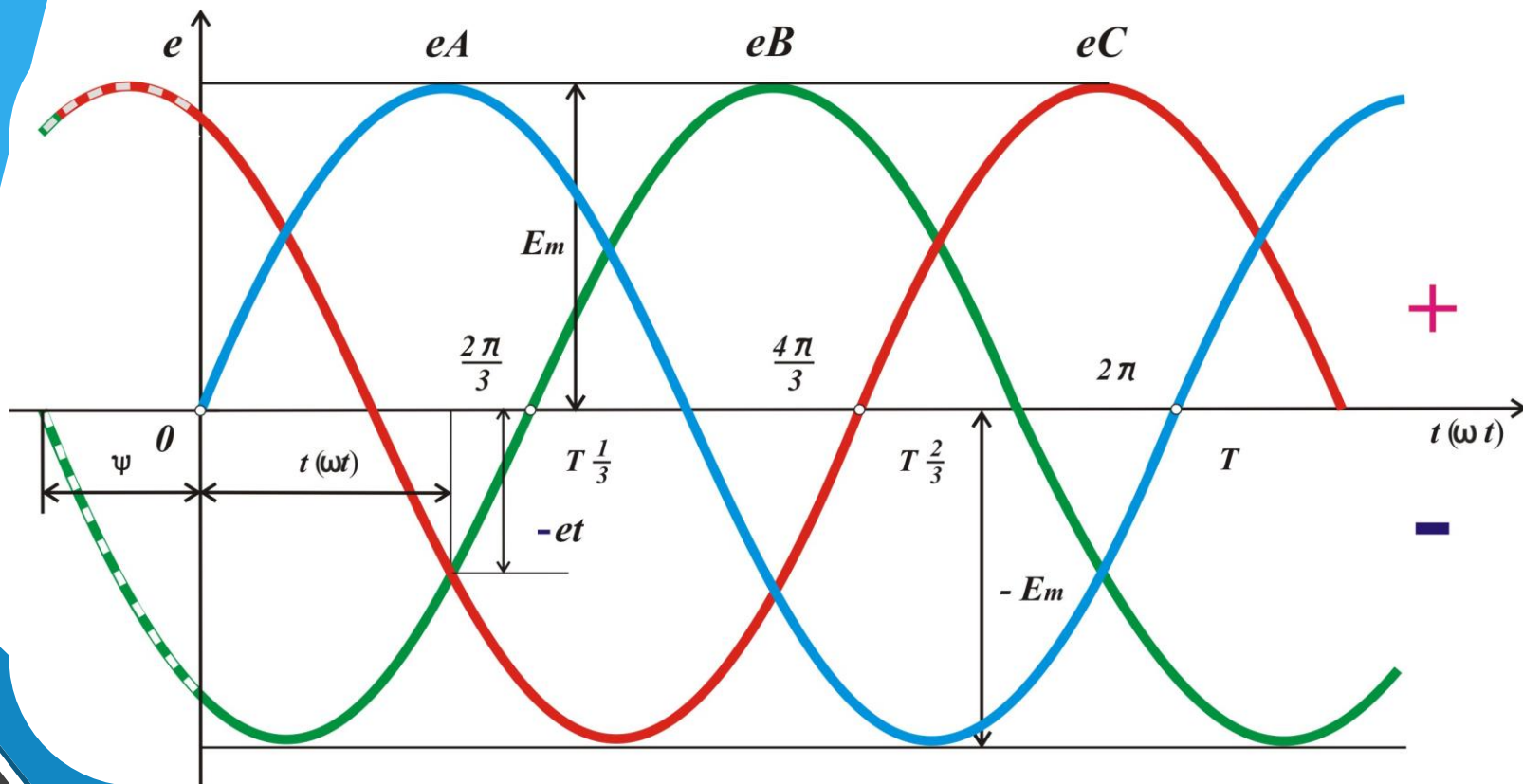


# Электрические цепи трехфазного тока



Разработал: к.т.н., доцент Пузаков А.В.  
кафедра ТЭРА, ОГУ

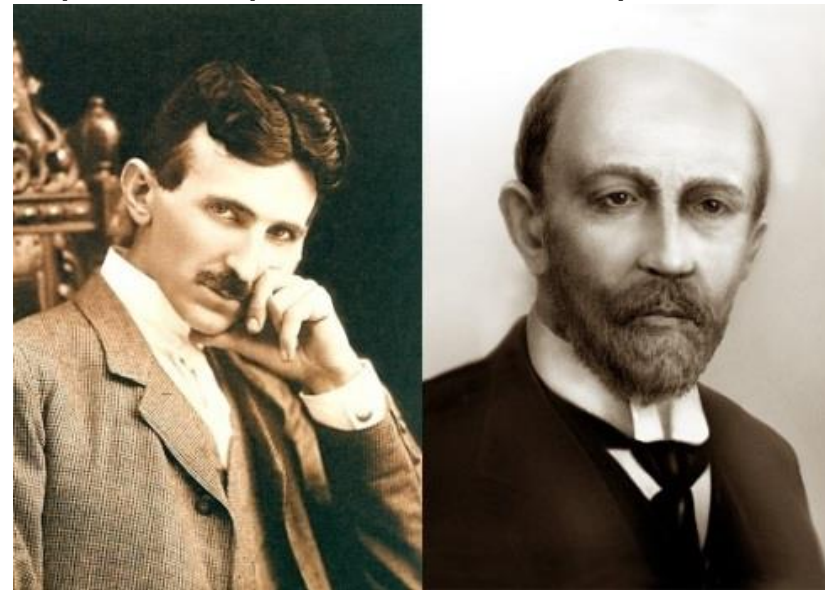
## Содержание раздела

1. Краткая историческая справка
2. Основные определения
3. Соединение фаз генератора
4. Соединение фаз приемников
5. Соединение фаз звездой
6. Соединение фаз треугольником
7. Мощности трехфазной системы
8. Заключение
9. Вопросы для самоконтроля
10. Литература по разделу

## Краткая историческая справка

Исторически первым явление вращающегося магнитного поля описал **Никола Тесла**, и датой этого открытия принято считать 12 октября 1887 года, - момент подачи ученым заявок на патенты. 1 мая 1888 года в США, Тесла получит свои главные патенты - на изобретение многофазных электрических машин (в том числе на асинхронный электродвигатель) и на системы передачи электрической энергии посредством многофазного переменного тока.

На европейском континенте, параллельно изобретательской деятельности Тесла, аналогичную задачу решал **Михаил Осипович Доливо-Добровольский**.

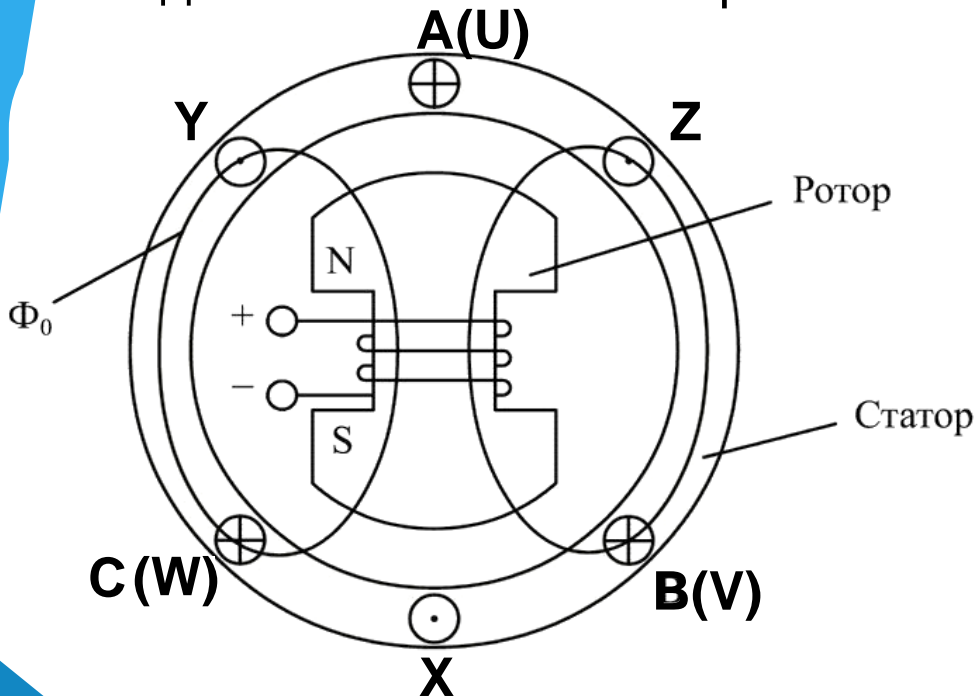


На основе технологии двухфазного тока Николы Тесла, Михаил Осипович самостоятельно разработал *трёхфазную* электрическую систему и асинхронный электродвигатель совершенной конструкции — с ротором типа «беличья клетка». Патент на двигатель Михаил Осипович получил 8 марта 1889 года в Германии.

## Основные определения

Трёхфазная цепь представляет собой совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют три одинаковых синусоидальных ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но отличающиеся по фазе на 120 градусов.

Часть такой электрической системы, характеризующуюся одним и тем же током принято называть **фазой**.



**A, B, C (U, V, W) – начала фаз**

**X, Y, Z – концы фаз**

Источником электроэнергии в трехфазных цепях является трехфазный синхронный генератор. Он состоит из двух частей: статора и ротора. На статоре размещены три одинаковые обмотки, смещенные друг относительно друга на 120 градусов.

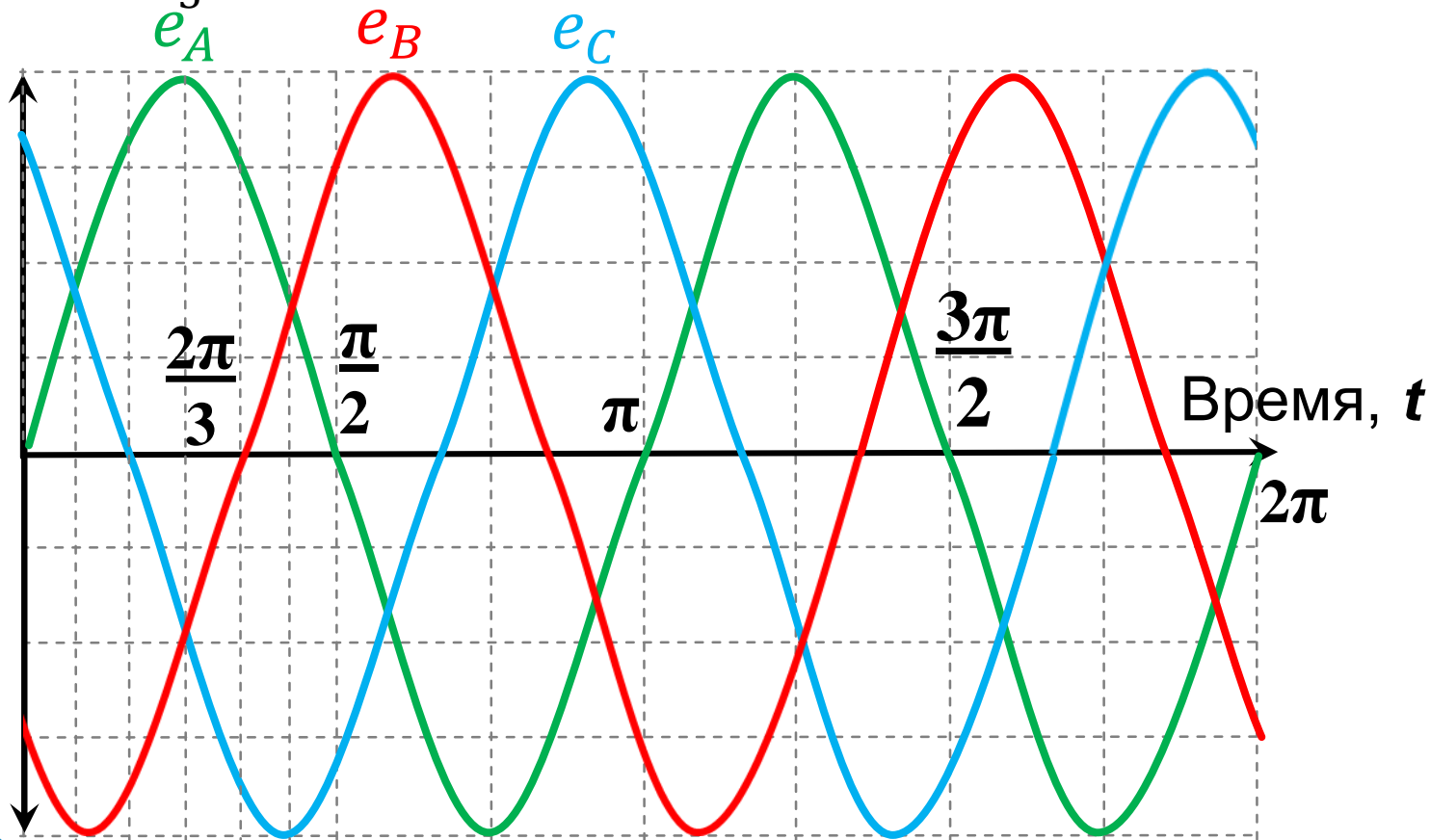
Подвижная часть генератора – ротор – является электромагнитом.

## Основные определения

При вращении ротора в обмотках статора наводится ЭДС одинаковой амплитуды и частоты, но сдвинутые по фазе на  $120^\circ$

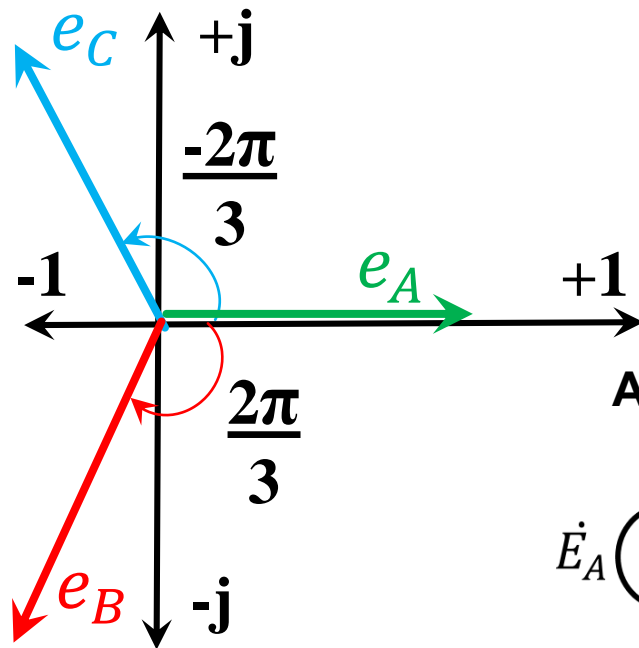
Принимая за начало отсчета момент времени, когда ЭДС в обмотке А-Х равна нулю можно записать

$$e_A = E_m \cdot \sin \omega t$$
$$e_B = E_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$
$$e_C = E_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = E_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

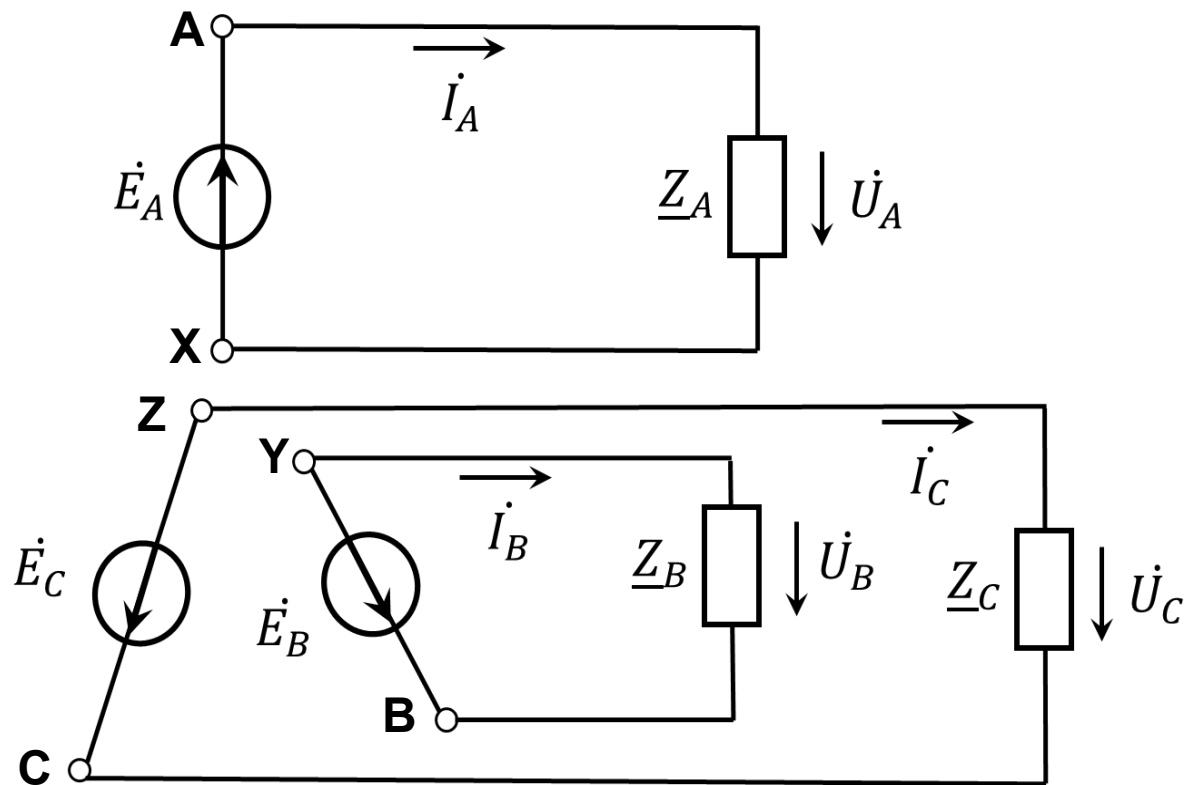


# Основные определения

Последовательность чередования фаз **A, B, C** называют прямой последовательностью.



Фазные обмотки трехфазного генератора можно соединить с тремя приемниками энергии шестью проводами и получить три независимые фазные цепи.

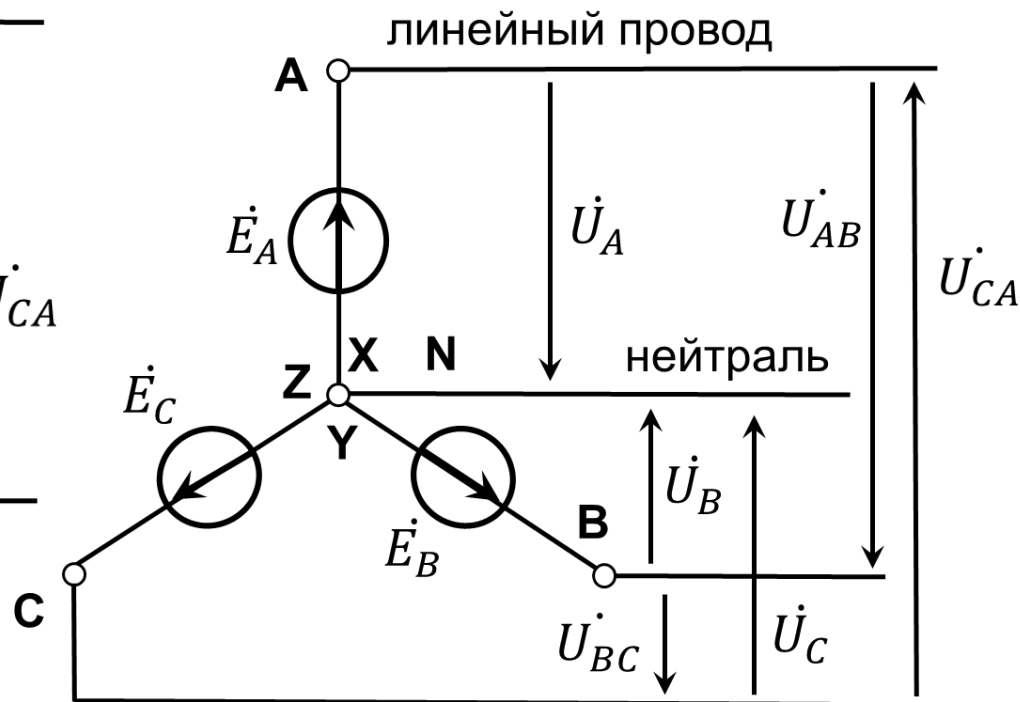
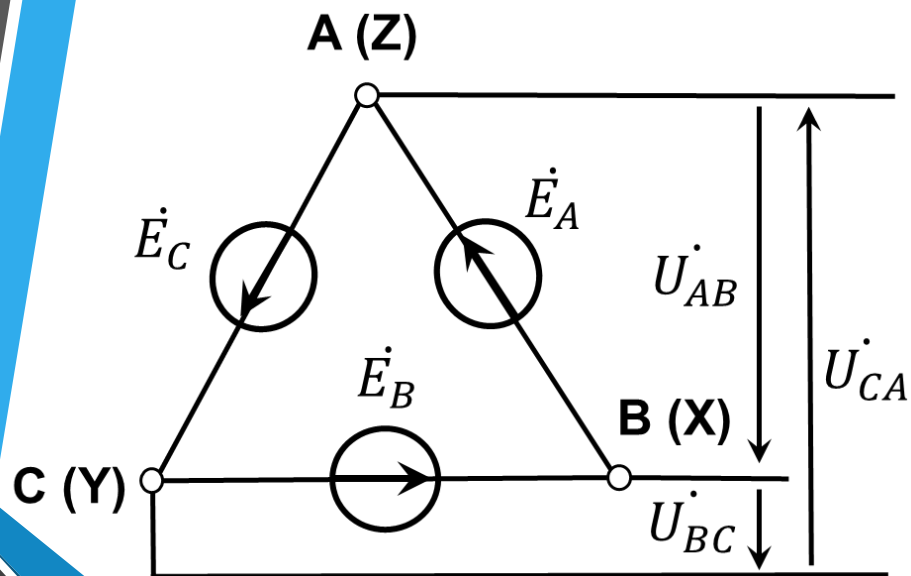


# Соединение фаз генератора

Существует два способа соединения фаз обмоток генератора – **звездой** (Y) и **треугольником** ( $\Delta$ ).

При соединении фаз генератора **звездой** концы обмоток **X, Y, Z** соединяют в общий узел – нейтраль генератора.

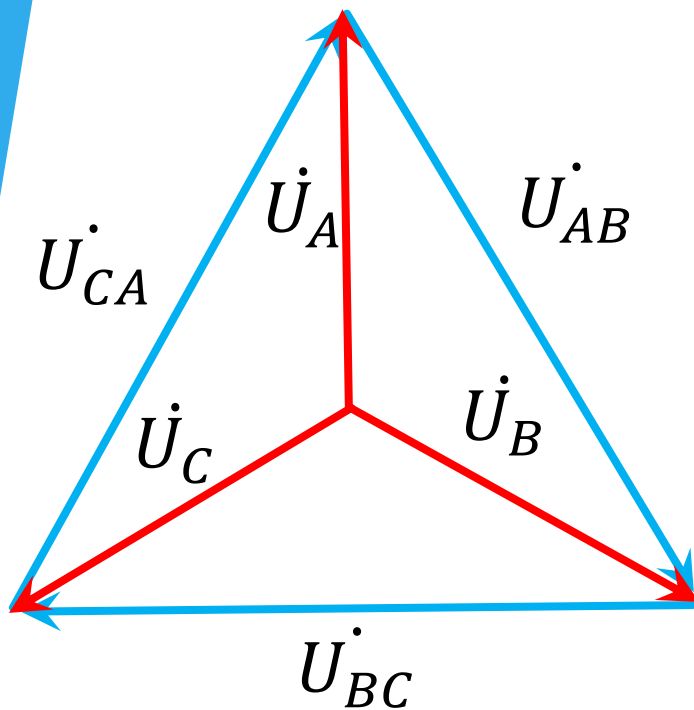
При соединении фаз генератора **треугольником** конец одной фазы соединяется с началом второй и т.д. образуя замкнутый контур.



## Соединение фаз генератора

Напряжение между линейными проводами называется **линейным** ( $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ ).

Напряжение между началом и концом одной фазы называется **фазным** ( $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ ).



Из векторной диаграммы фазных и линейных напряжений следует, что при включении фаз генератора звездой линейное напряжения в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного.

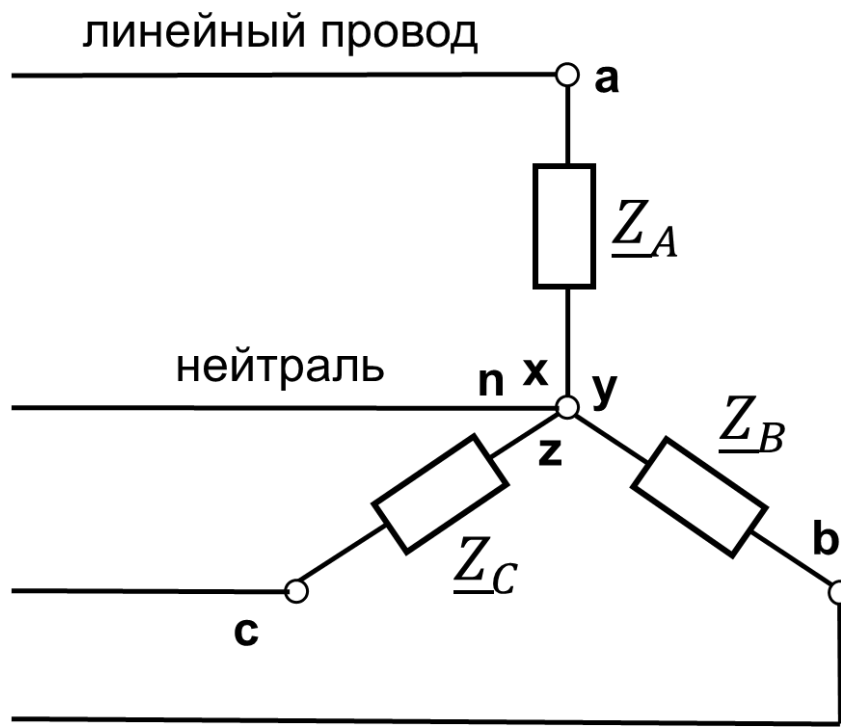
$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi$$

## Соединение фаз приемников

Приемники, включенные в трехфазную цепь могут быть как однофазными, так и трехфазными. Как правило комплексные сопротивления фаз равны между собой, такие приёмники называют **симметричными**.

Начала и концы фаз приемников обозначают соответственно **a – x, b – y, c – z**.

Подобно фазам генератора приемники также могут соединяться звездой или треугольником, причем возможны любые сочетания **Y/Y, Y/Δ, Δ/Δ** и **Δ/Y**.

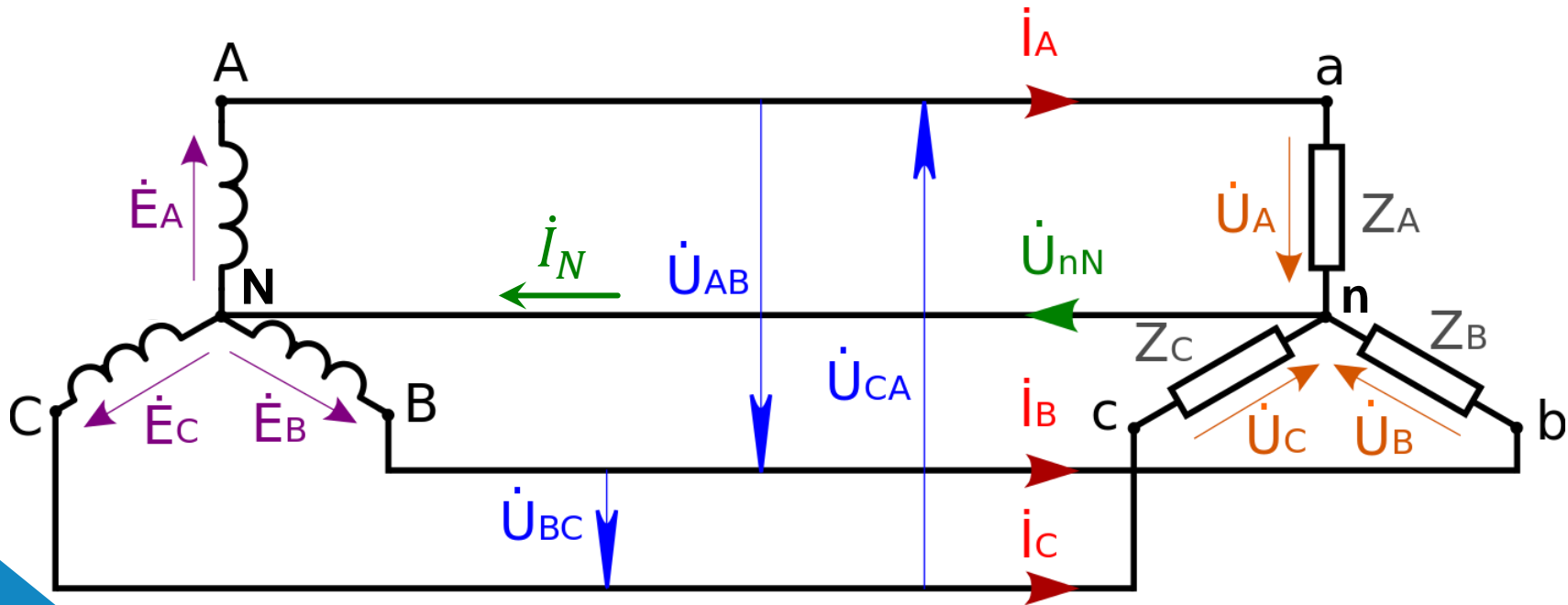


# Соединение фаз звездой

Рассмотрим схему четырехпроводной цепи, в которой фазы генератора и приемника соединены звездой с нулевым проводом (нейтралью)  $Y_0/Y_0$ .

$$i_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} \quad i_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} \quad i_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C}$$

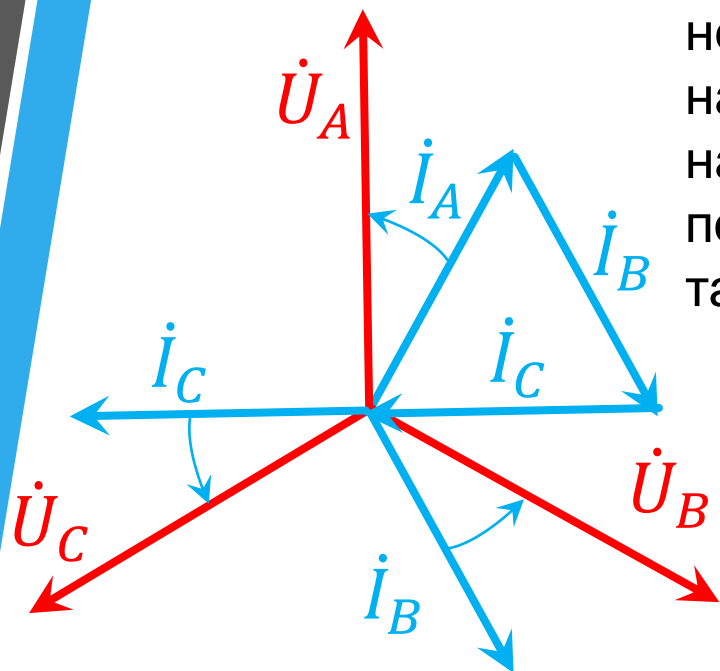
Согласно первого закона Кирхгофа  $i_N = i_A + i_B + i_C$



## Соединение фаз звездой

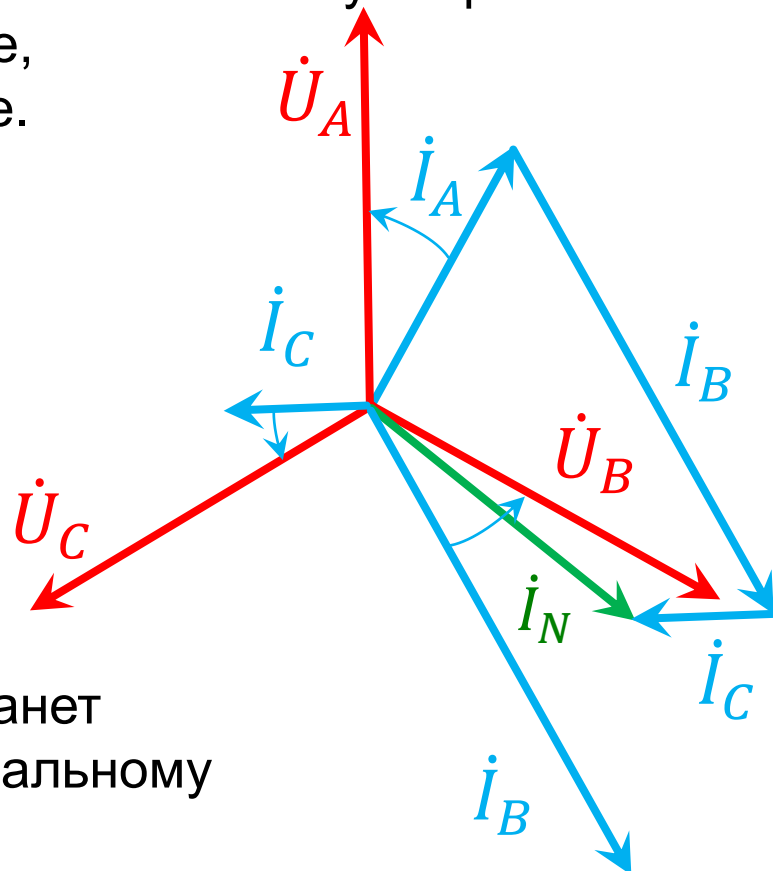
Представим векторную диаграмму фазных напряжений и токов. Из нее следует, что для симметричного приемника ток в нейтральном проводе равен **нулю** и необходимость в нем отпадает.

Если в четырехпроводную цепь включить несимметричный приемник, то благодаря наличию нейтрального провода напряжения на фазах приемника останутся равными как по амплитуде, так и по фазе.



$$\underline{Z}_A; \underline{Z}_B = \frac{\underline{Z}_A}{2}; \underline{Z}_C = 2 \cdot \underline{Z}_A$$

Сумма токов при этом станет отличной от нуля и по нейтральному проводу потечет ток.



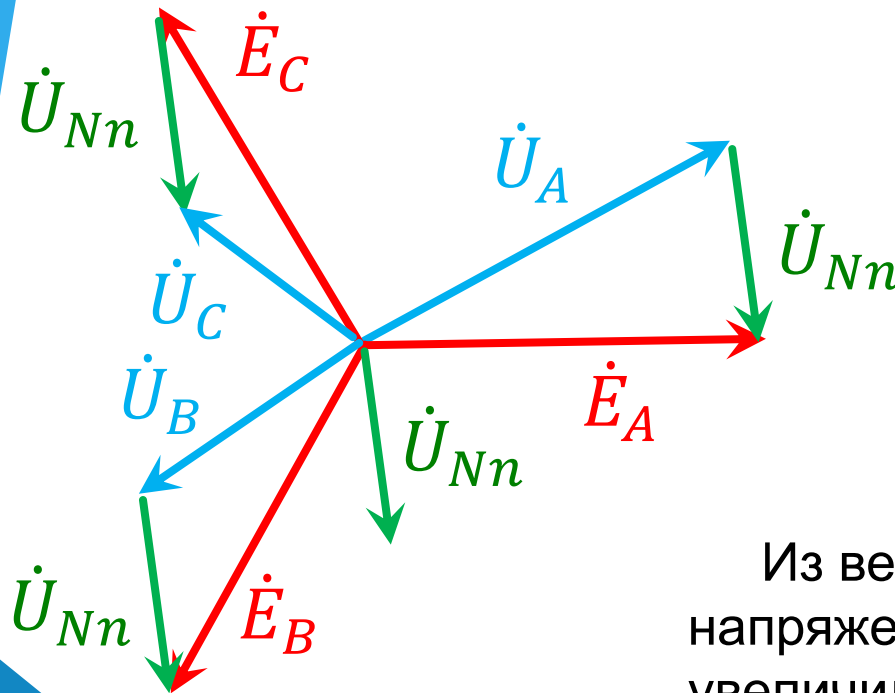
## Соединение фаз звездой

Если несимметричный приемник соединенный звездой окажется включенным в трехпроводную цепь, то между нейтралью приемника и генератора возникнет напряжение  $U_{Nn}$ , называемое **напряжением смещения** нейтрали.

$$\dot{I}_A = \underline{Y}_A \cdot \dot{U}_A \quad \dot{U}_A = \dot{E}_A - \dot{U}_{Nn}$$

$$\dot{I}_B = \underline{Y}_B \cdot \dot{U}_B \quad \dot{U}_B = \dot{E}_B - \dot{U}_{Nn}$$

$$\dot{I}_C = \underline{Y}_C \cdot \dot{U}_C \quad \dot{U}_C = \dot{E}_C - \dot{U}_{Nn}$$



$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\underline{Y}_A \cdot \dot{E}_A + \underline{Y}_B \cdot \dot{E}_B + \underline{Y}_C \cdot \dot{E}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}$$

Из векторной диаграммы следует, что напряжение фазы **A** приемника увеличилось, а напряжение в фазах **B** и **C** значительно уменьшилось по сравнению с напряжением фаз генератора.

# Соединение фаз треугольником

Токи  $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$  называют **фазными токами**.

Линейные токи  $\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}$   $\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}$   $\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$   
в  $\sqrt{3}$  раз больше фазных.

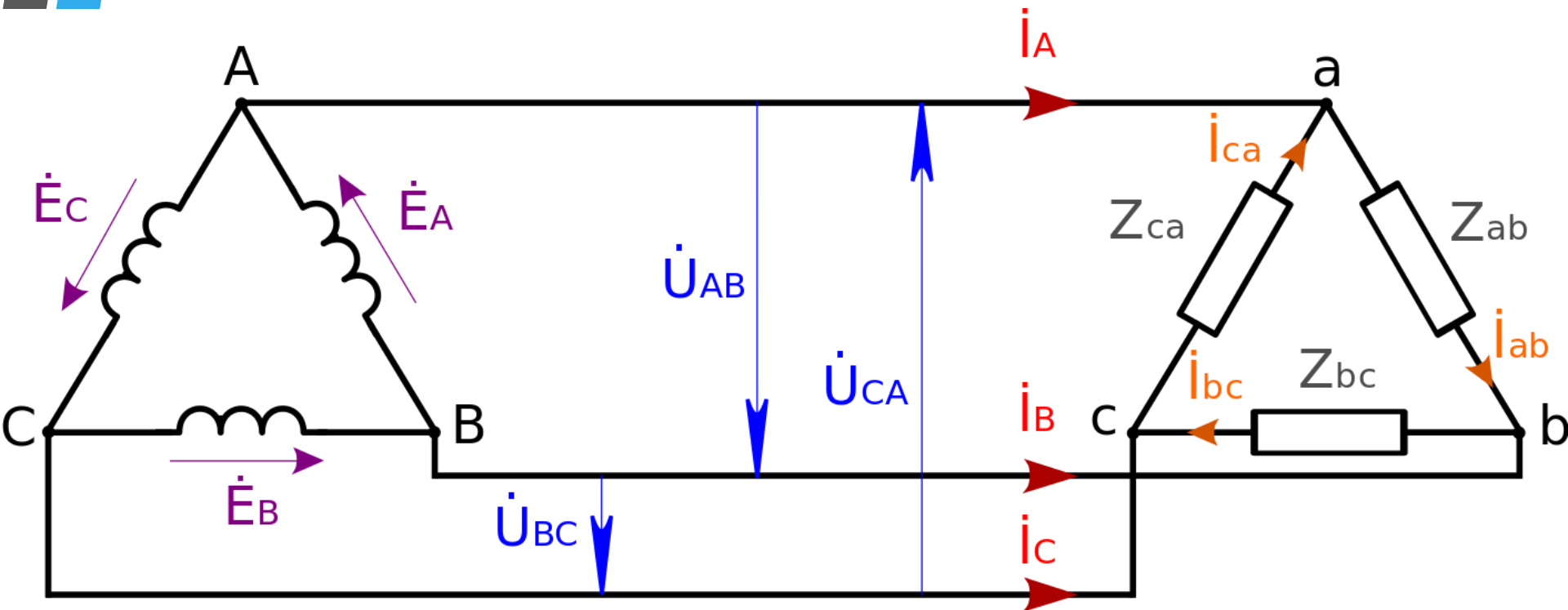
$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_\Phi$$

Линейные напряжения будут равны фазным

$$\dot{U}_{AB} = \dot{E}_A$$

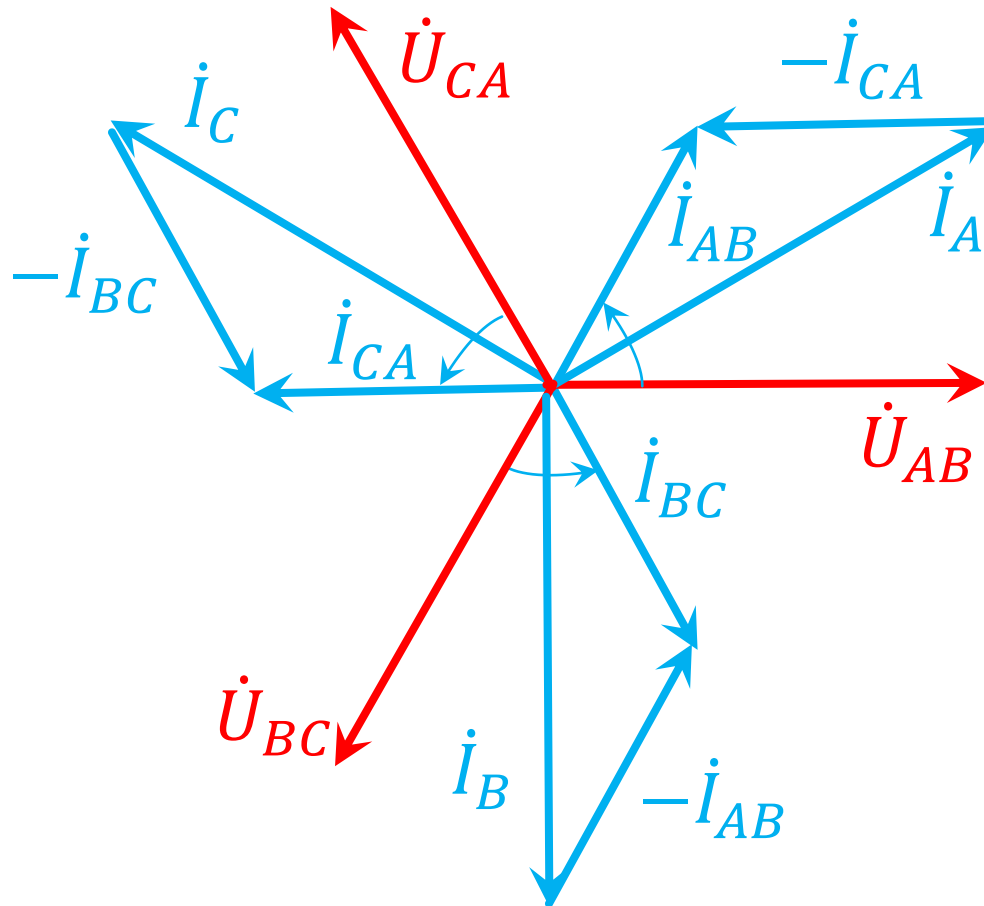
$$\dot{U}_{BC} = \dot{E}_B$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{E}_C$$



## Соединение фаз треугольником

Векторная диаграмма токов и напряжений при симметричном приемнике



## Мощности трехфазной системы

Активной мощностью трехфазной системы называется сумма активных мощностей всех фаз источника энергии, равная сумме активных мощностей всех фаз приемника.

$$P = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л} \cdot \cos \varphi$$

Реактивной мощностью трехфазной системы называется сумма реактивных мощностей всех фаз источника энергии, равная сумме реактивных мощностей всех фаз приемника.

$$Q = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л} \cdot \sin \varphi$$

Полная мощностью трехфазной системы

$$S = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л}$$

У симметричного приемника мощности всех фаз одинаковы, при несимметричном приемнике используют метод двух ваттметров.

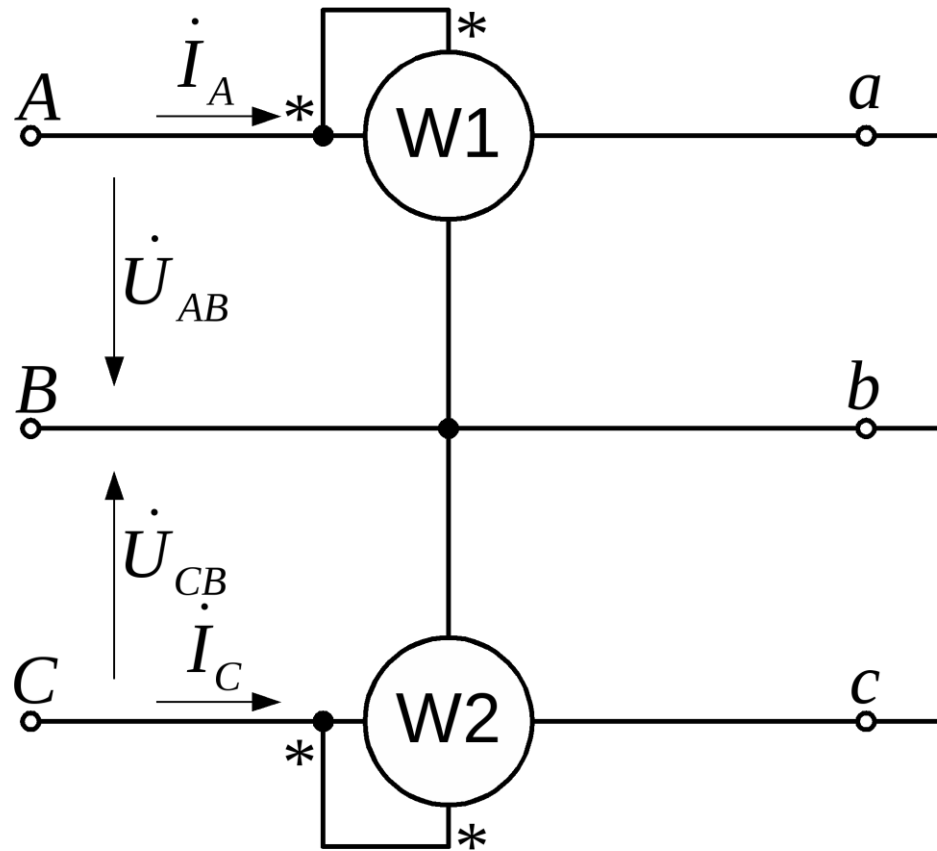
Особенность метода заключается в том, что даже при симметричном приемнике показания ваттметров не совпадают, причем показания одного из них могут быть отрицательными.

В этом случае мощность равна алгебраической сумме показаний ваттметров.

# Мощности трехфазной системы

Следует заметить, что при переключении фаз приемника с  $\Delta$  на  $Y$  мощность уменьшается в *три* раза

$$P_{\Delta} = 3 \cdot P_Y$$



Метод двух ваттметров

## Заключение

Михаил Осипович Доливо-Добровольский в 1891 году разработал трёхфазную электрическую систему и асинхронный электродвигатель.

Трёхфазная цепь представляет собой совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют три одинаковых синусоидальных ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но отличающиеся по фазе на 120 градусов.

Часть такой электрической системы, характеризующуюся одним и тем же током принято называть фазой.

Источником электроэнергии в трехфазных цепях является трехфазный синхронный генератор.

Существует два способа соединения фаз обмоток генератора – звездой (Y) и треугольником (Δ).

При соединении фаз генератора звездой концы обмоток X, Y, Z соединяют в общий узел – нейтраль генератора.

При соединении фаз генератора треугольником конец одной фазы соединяется с началом второй и т.д. образуя замкнутый контур.

Напряжение между линейными проводами называется линейным, а между началом и концом одной фазы – фазным.

## Заключение

Приемники, включенные в трехфазную цепь могут быть как однофазными, так и трехфазными. Если сопротивления фаз равны между собой, такие приёмники называют симметричными.

Если в четырехпроводную цепь включить несимметричный приемник, то благодаря наличию нейтрального провода напряжения на фазах приемника останутся равными как по амплитуде, так и по фазе.

Сумма токов при этом станет отличной от нуля и по нейтральному проводу потечет ток.

Если несимметричный приемник соединенный звездой окажется включенным в трехпроводную цепь, то между нейтральными приемника и генератора возникнет напряжение, называемое напряжением смещения нейтрали.

Мощностью трехфазной системы называется сумма мощностей всех фаз источника энергии, равная сумме мощностей всех фаз приемника.

У симметричного приемника мощности всех фаз одинаковы, при несимметричном приемнике используют метод двух ваттметров.

## Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение трёхфазной системы синусоидального тока.
2. Поясните преимущества трёхфазной системы синусоидального тока в сравнении с одной системой.
3. Укажите способы соединения потребителей электроэнергии в трёхфазной системе.
4. Какая трёхфазная система называется симметричной?
5. Как соединить электроприёмники однофазного тока звездой и треугольником?
6. Какие существуют соотношения между линейными и фазными электрическими величинами при соединении нагрузки звездой и треугольником?
7. В каких случаях можно обойтись без нейтрального провода?
8. Какие существуют способы измерения мощности трёхфазного тока?
9. Почему измерение мощности двумя ваттметрами допускается только при отсутствии нейтрального провода?
10. Как называются провода, отходящие от трёхфазного генератора?

## Вопросы для самоконтроля

12. Как экспериментально определить линейные и нейтральные провода?
13. Как сказывается обрыв линейного провода на работу трёхфазной установки?
14. Как влияет короткое замыкание одной фазы на работу трёхфазной сети: а) при наличии нейтрального провода? б) при отсутствии нейтрального провода?
15. Как сказывается обрыв нейтрального провода на работу трёхфазного приёмника?
16. Как построить векторные диаграммы токов и напряжений при несимметричной нагрузке при: а) нормальном режиме работы приёмника; б) при обрыве линейного провода; в) при коротком замыкании одной фазы.
17. Как рассчитать напряжение смещения нулевой точки?
18. Каким образом можно определить смещение нулевой точки по векторной диаграмме напряжений?
19. Чему равен ток в нулевом проводе: а) при симметричной нагрузке; б) при несимметричной нагрузке.
20. Почему в нейтральный провод не включается плавкий предохранитель?

1. Касаткин, А.С. Электротехника: учеб. для студентов неэлектротехн. специальностей вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 11-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 544 с.
2. Хернер, А. Автомобильная электрика и электроника /А. Хернер, Х-Ю. Риль; перевод с нем. ЧМП РИА «GMM-пресс». – М.: ООО «Издательство «За рулём», 2013. – 624 с.
3. Wyatt, D. Aircraft Electrical and Electronic Systems / D. Wyatt, M. Tooley. – Second Edition – NY, Routledge, 2018 – 439 p.
4. Bell, J.A. Modern Diesel Technology: Electricity & Electronics / J.A. Bell - Second Edition – NY, Delmar, 2014 – 546 p.