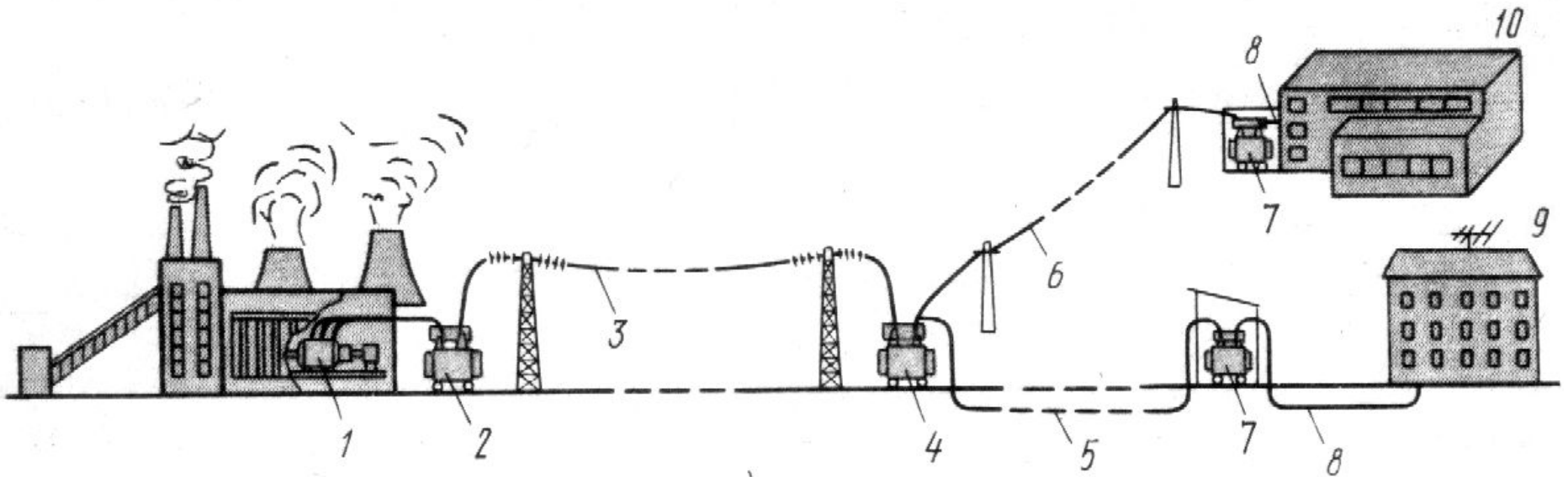


# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

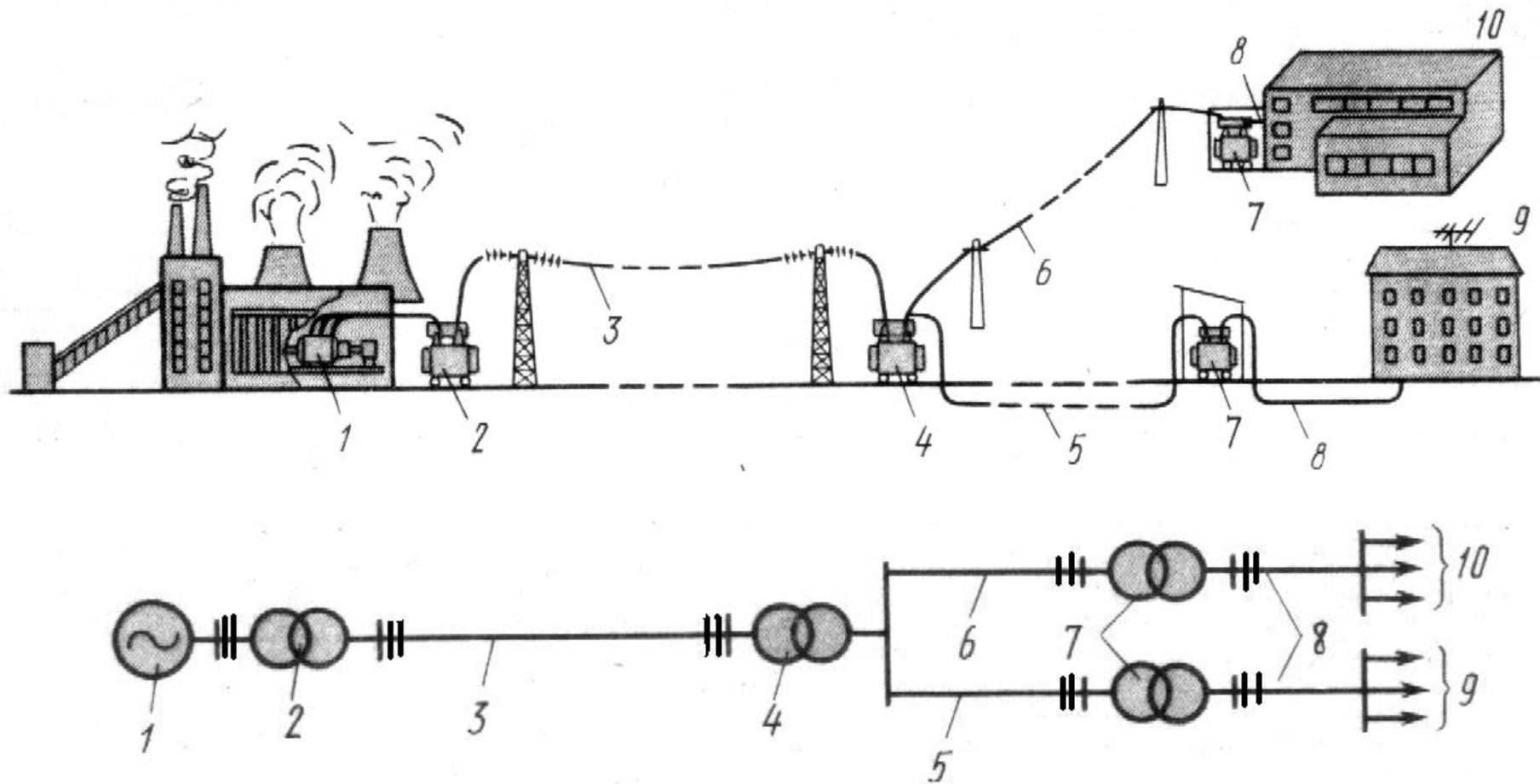
Трехфазные цепи

Трехфазная цепь является частным случаем многофазных систем, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, различающиеся по фазе и создаваемые общим источником энергии.

Трехфазные цепи — наиболее распространенные в современной электроэнергетике. Это объясняется рядом их преимуществ по сравнению как с однофазными, так и с другими многофазными цепями (экономичность передачи энергии, возможность сравнительно простого получения кругового вращающегося магнитного поля, а также двух различных эксплуатационных напряжений в одной установке: фазного и линейного).

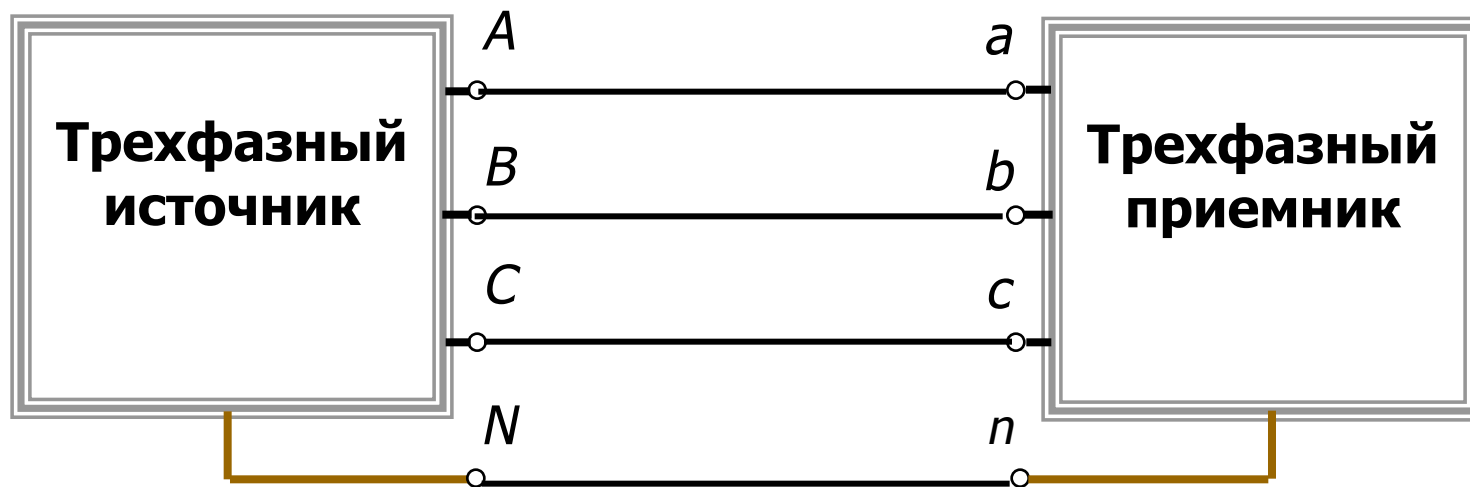


Трехфазная цепь состоит из трех основных элементов (частей): трехфазного генератора (1), в котором механическая энергия преобразуется в электрическую с трехфазной системой ЭДС, линии передачи (3, 5, 6, 8) и приемников (потребителей) (9,10), которые могут быть как трехфазными (например, электродвигатели), так и однофазными (например, лампы освещения).



Кроме этого в трехфазную систему при передаче на большие расстояния входят повышающие (2) и понижающие (4, 7) трансформаторы .

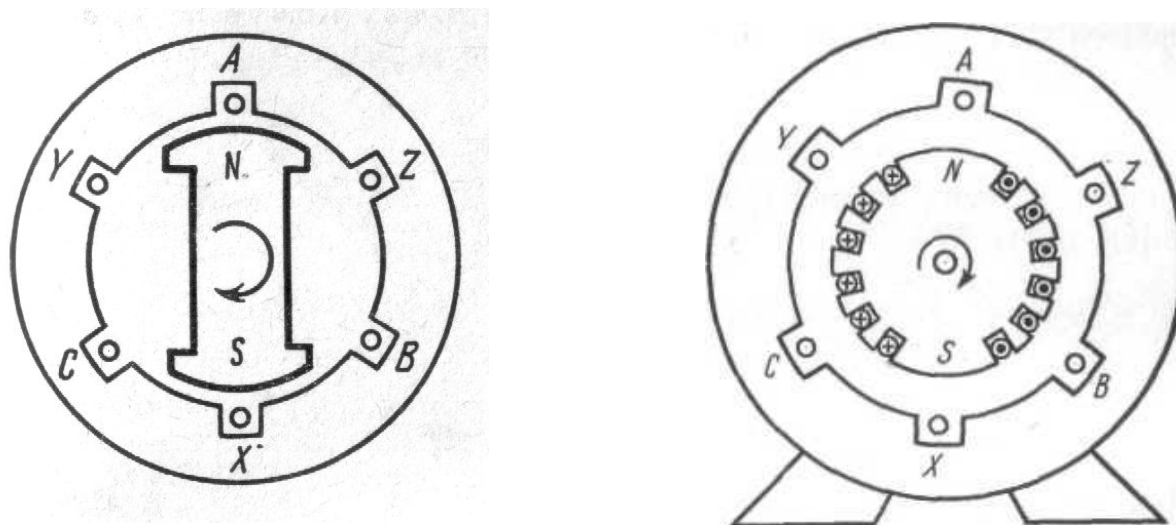
Каждый из трех источников (потребителей) вместе с соединительными проводами принято называть *фазой*. Таким образом, понятие «фаза» имеет в электротехнике два значения: 1) аргумент синусоидально изменяющейся величины; 2) часть многофазной системы электрических цепей. Цепи в зависимости от числа фаз называют двухфазными, трехфазными, шестифазными.



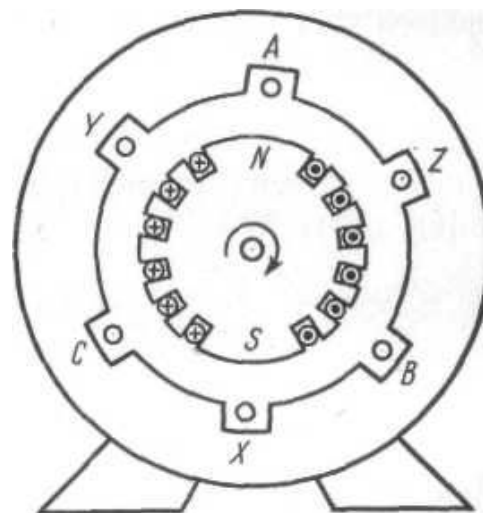
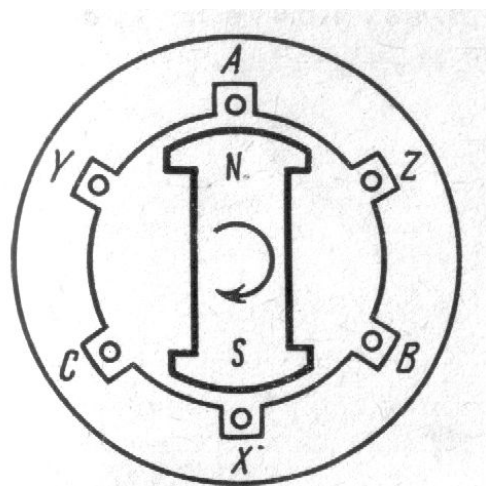
**Функциональная схема трехфазной цепи**

Трехфазный переменный электрический ток получают в трехфазных генераторах. Это устройство преобразующее механическую энергию вращения в электрическую (турбогенератор, гидрогенератор или др.). На рисунке схематически изображена модель трехфазного генератора. Каждая фаза обмотки условно изображена одним витком, витки сдвинуты относительно друг друга на угол  $120^\circ$ .

Начала фаз обозначены  $A, B, C$ , а концы —  $X, Y, Z$ .

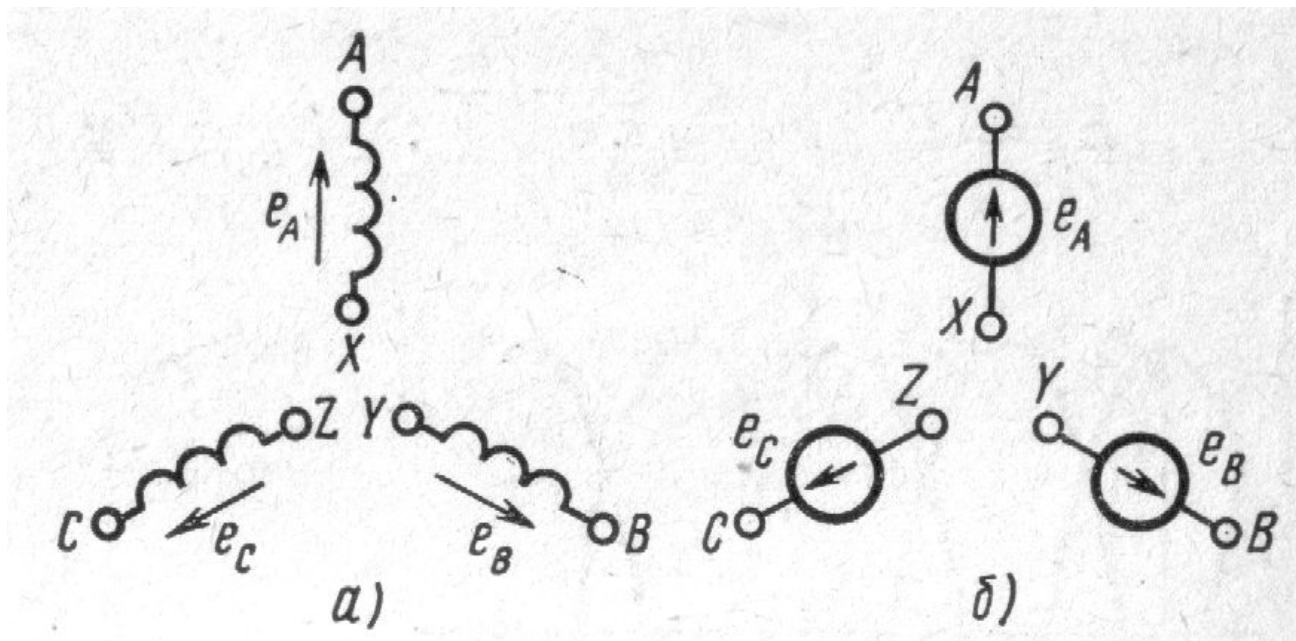


При вращении ротора, представляющего собой электромагнит (многовитковый проволочный), возбуждаемый постоянным током, в неподвижных обмотках статора наводятся ЭДС, имеющие одинаковые амплитуды и сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол  $120^\circ$ .



На схемах обмотку (или фазу) источника переменного ЭДС обозначают как показано ниже. За условное положительное направление ЭДС в каждой фазе принимают направление от конца к началу.

Система ЭДС с равными амплитудами и сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол  $120^\circ$  называется *симметричной*. Если хоть одно из условий не выполняется, то система будет *несимметричной*.





Вся история развития трехфазных цепей — наглядная иллюстрация постоянно возникающих технико-экономических противоречий и изыскания путей их разрешения.

В начале 70-х годов XIX в., когда был создан экономичный генератор постоянного тока и началось массовое применение электрической энергии для целей освещения (свеча Яблочкова и др.) возникла проблема централизованного производства и распределения энергии.

Первые электростанции вырабатывали постоянный ток. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что экономичность передачи электроэнергии возрастает при повышении напряжения.

Но постоянный ток, нельзя было трансформировать (повысить с помощью трансформатора), поэтому применение высокого постоянного напряжения было ограниченным. Естественной была попытка использовать переменный однофазный ток, который легко трансформировался (уже были созданы простейшие трансформаторы).

Но возникло другое противоречие: однофазные двигатели переменного тока имели малый начальный пусковой момент, следовательно, они не удовлетворяли требованиям промышленного электропривода. Поэтому применение однофазного тока в 70—80-х годах 19 века было ограничено лишь областью электрического освещения.

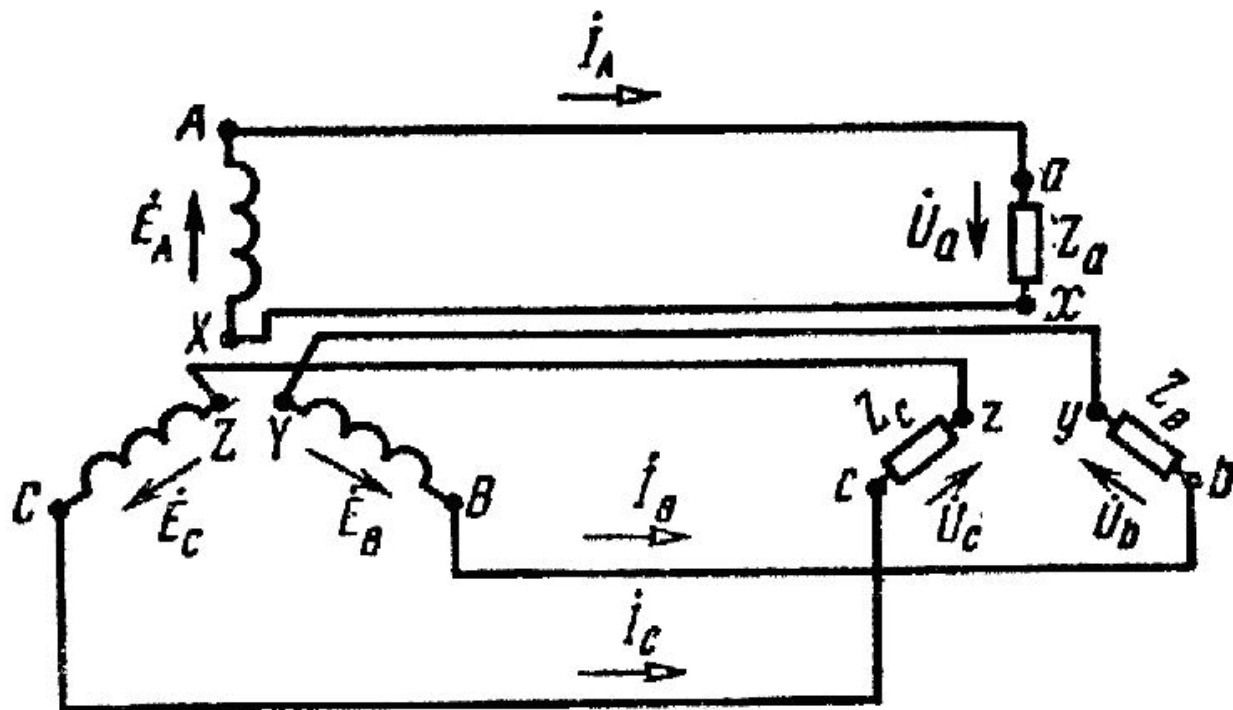
Важнейшей предпосылкой разработки многофазных систем явилось открытие явления вращающегося магнитного поля (Г. Феррарис и Н. Тесла, 1888). Первые электрические двигатели были двухфазными, но они имели плохие рабочие характеристики. Наиболее рациональной оказалась трехфазная система.

В разработку трехфазных систем большой вклад внесли ученые и инженеры разных стран: Н. Тесла, М. О. Доливо-Добровольский, Ф. Хазельвандер, М. Депре, Ч. Бредли. Наибольшая заслуга среди них принадлежит выдающемуся русскому электротехнику М. О. Доливо-Добровольскому, сумевшему придать своим работам практический характер, создавшему трехфазные двигатели, трансформаторы, разработавшему четырехпроводную и трехпроводную цепи.

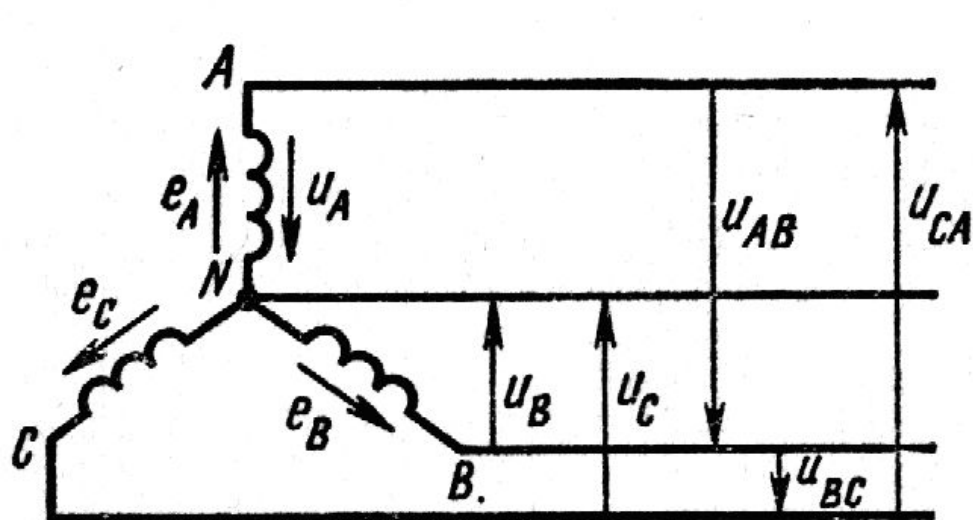
Убедительной демонстрацией преимуществ трехфазных цепей была знаменитая Лауфен-Франкфуртская электропередача (1891 г., длина 170 км, напряжение  $U = 15$  кВ), сооруженная при активном участии М. О. Доливо-Добровольского. С этого времени начинается бурное развитие электрификации.

Подавляющее большинство дальних и сверхдальних линий электропередач в нашей стране осуществляется при переменном трехфазном напряжении 110—750 кВ.

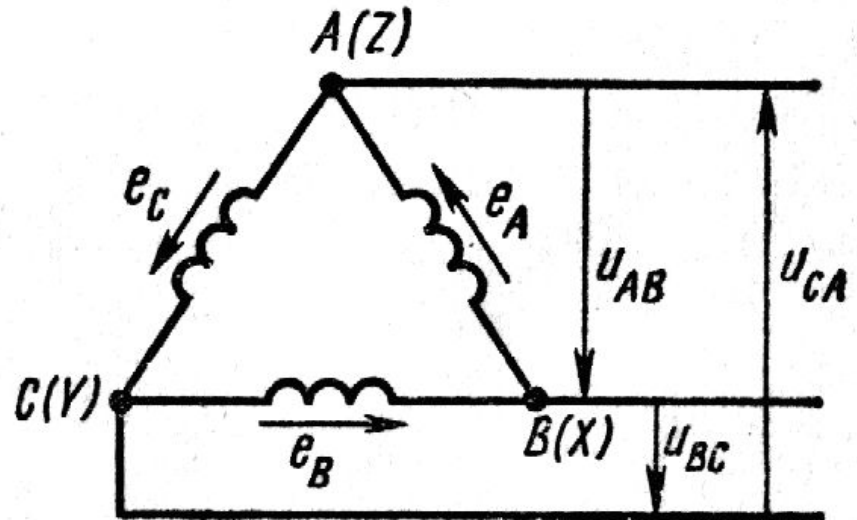
Если фазы обмотки генератора не соединены между собой, то они образуют **несвязанную** трехфазную систему цепей. В этом случае каждая из фаз должна соединяться со своим приемником двумя проводами. Несвязанные системы не получили применения вследствие их неэкономичности, вызванной большим числом проводов, соединяющих источник питания и приемники. В схеме представленной ниже таких проводов будет шесть.



Более совершенными и экономичными являются **связанные** цепи, в которых фазы обмоток соединены между собой. Основные схемы соединения трехфазных цепей: соединение **звездой** (а) и **треугольником** (б), разработанные и внедренные в практику М.О. Доливо-Добровольским в начале 90-х годов 19 века.



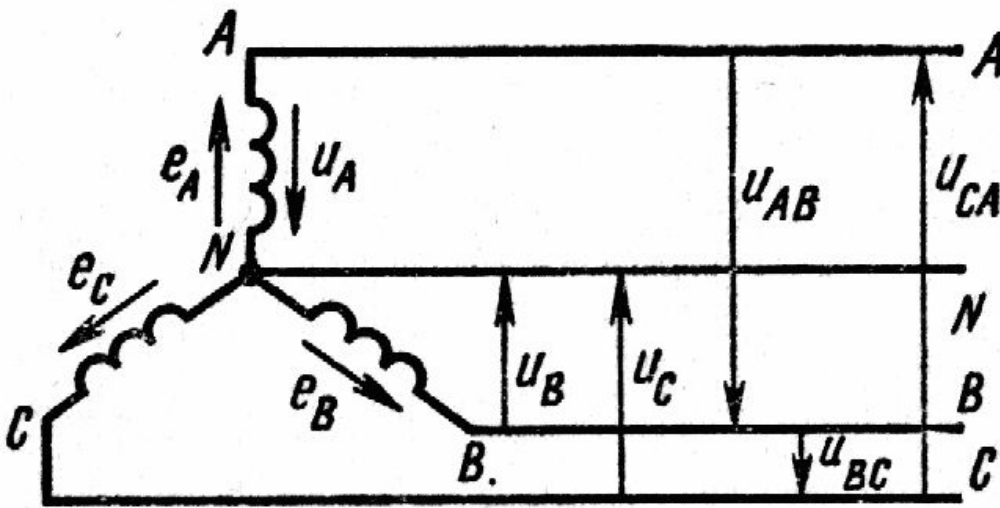
а)



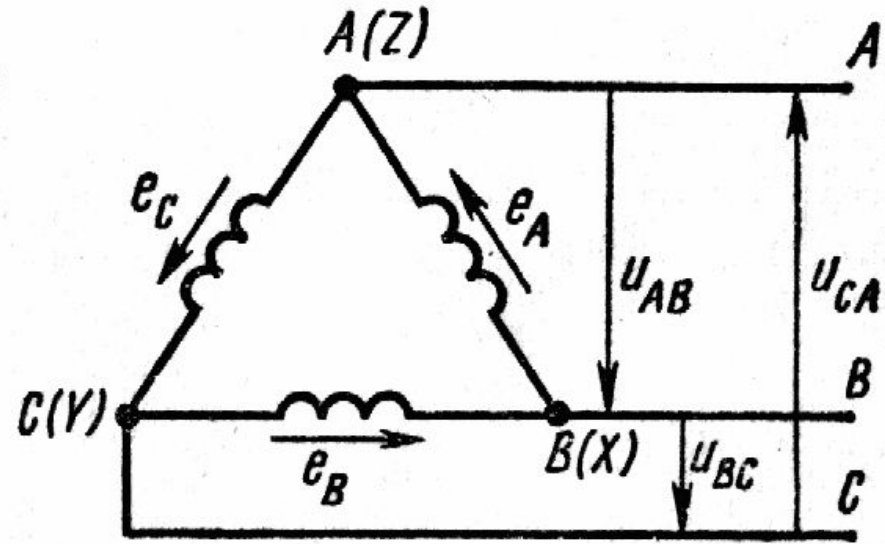
б)

В схеме соединения звездой концы всех фаз ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) соединяют в одну точку  $N$ , а к началам ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) подключают провода, идущие к потребителям (рис. а).

Схема соединения треугольником образуется последовательным подключением трех фаз друг за другом, т.е. к концу  $X$  подключают начало  $B$ , к концу  $Y$  подключают начало  $C$ , к концу  $Z$  подключают начало  $A$  (рис. б)

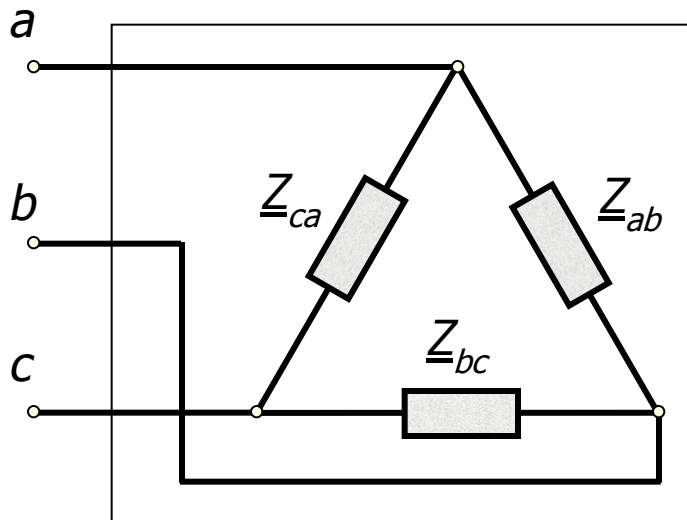


а)

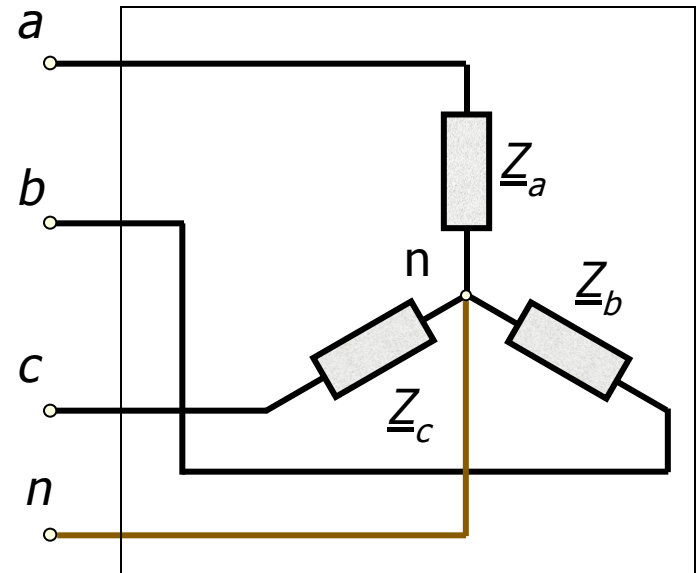


б)

В приемнике (потребителе) энергии начала фаз обозначают малыми буквами (**a**, **b**, **c**), а концы фаз (**x**, **y**, **z**).



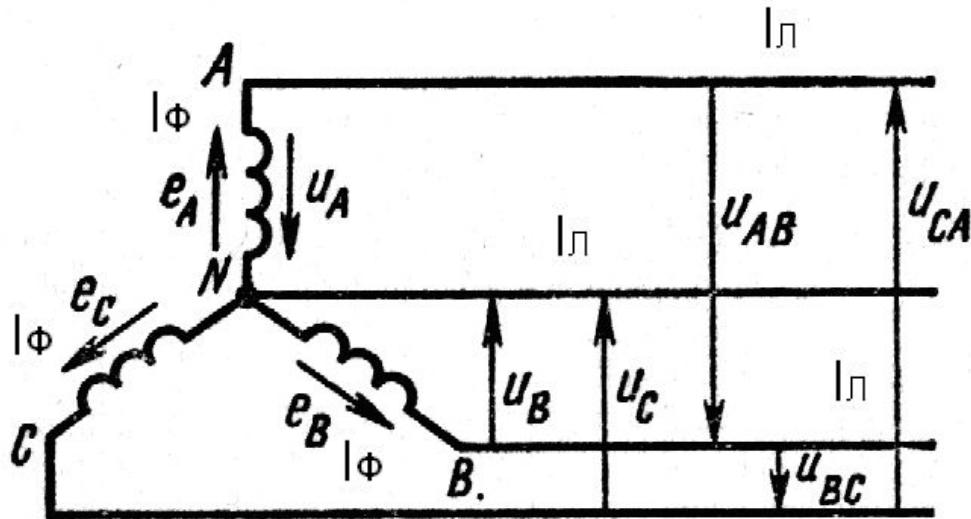
**Соединение фаз приемника треугольником**



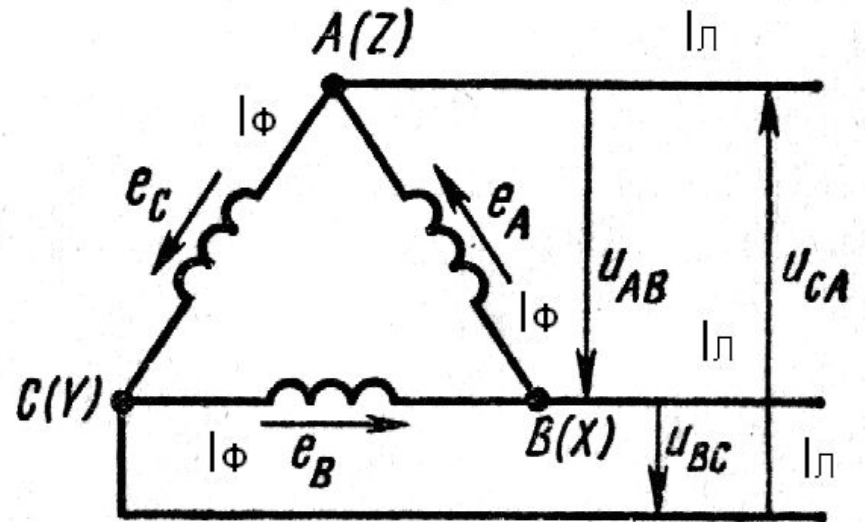
**Соединение фаз приемника звездой**



Начала фаз источника (**А, В, С**) соединяют с началом фаз потребителей (**а, б, с**) с помощью проводов. Данные провода называются **линейными**, а токи протекающие по ним соответственно **линейными** токами ( $I_{л}$ ). Между линейными проводами, т.е. между началами разных фаз измеряют **линейные** напряжения ( $U_{л}$ ) ( $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ ). По обмоткам фаз источников и цепям фаз потребителей протекают **фазные** токи ( $I_{\phi}$ ). А напряжения между началом и концом каждой фазы – **фазными** напряжениями ( $U_{\phi}$ ) ( $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ ).

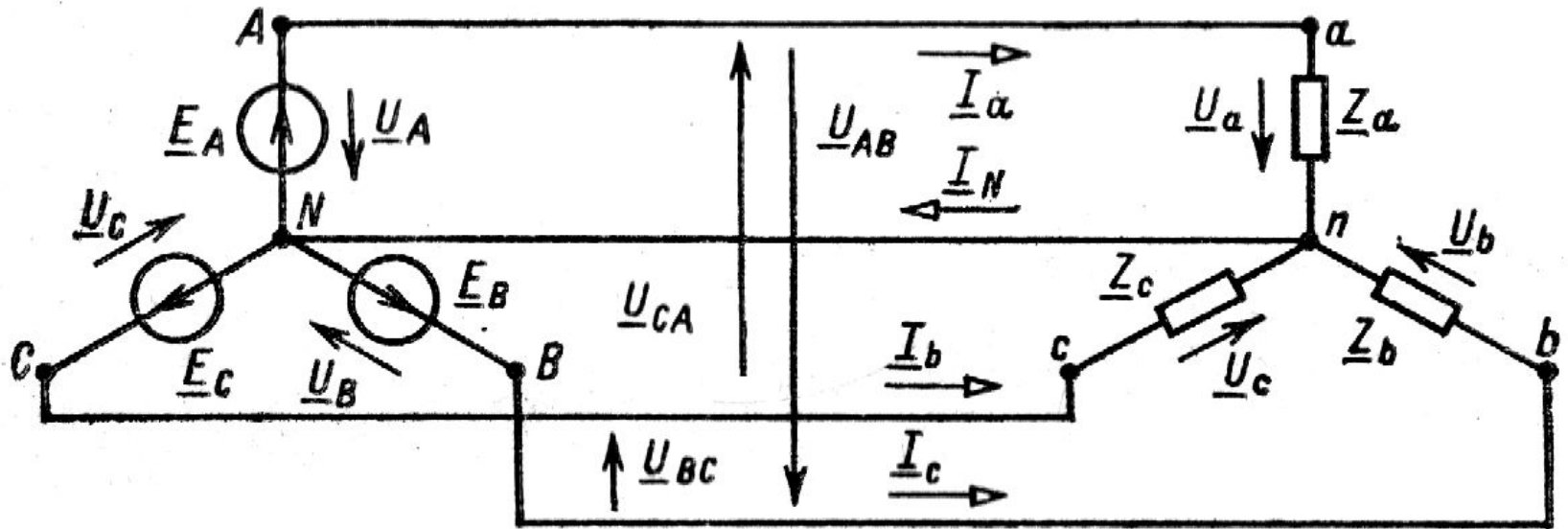


а)

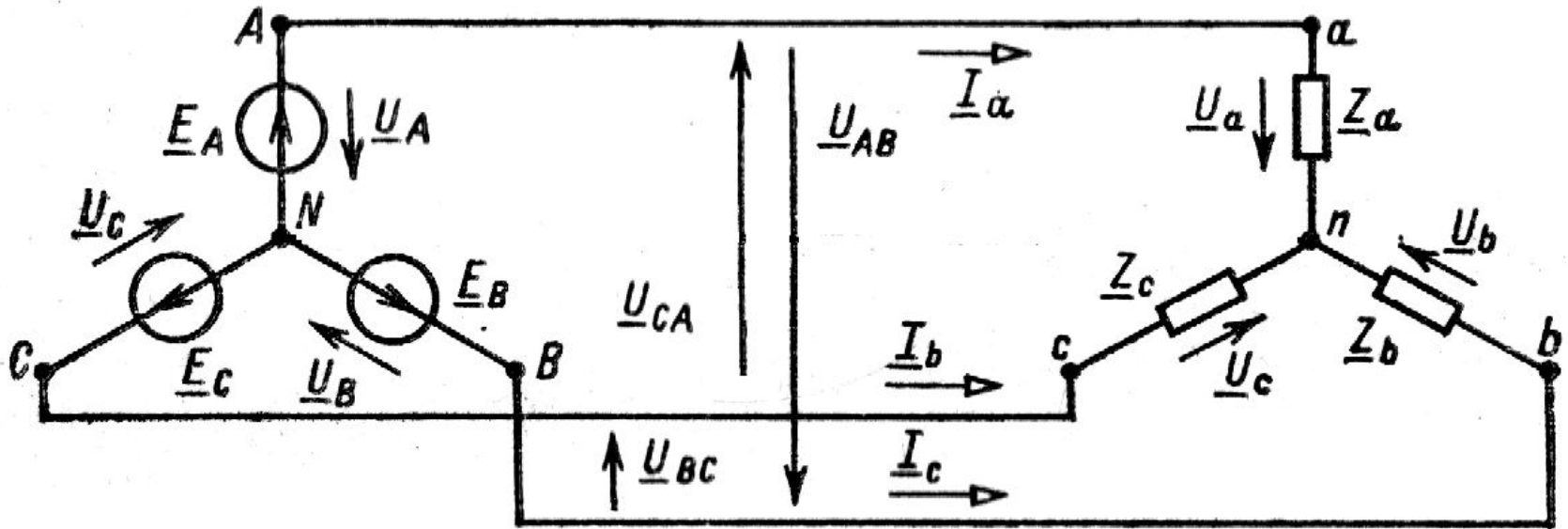


б)

Нейтральные точки может соединять **нейтральный** провод N-n. В данном случае цепь будет четырехпроводной. При отсутствии данного соединительного провода, между нейтралью можно измерить напряжение смещения нейтрали  $U_{Nn}$ . При этом цепь будет трехпроводной. За условное положительное направление фазных напряжений принимают направление от начала к концу фаз обмоток, а линейных напряжений – от начала одной фазы к началу другой.



Нейтральные точки может соединять **нейтральный** провод N-n. В данном случае цепь будет четырехпроводной. При отсутствии данного соединительного провода, между нейтралью можно измерить напряжение смещения нейтрали  $U_{Nn}$ . При этом цепь будет трехпроводной. За условное положительное направление фазных напряжений принимают направление от начала к концу фаз обмоток, а линейных напряжений – от начала одной фазы к началу другой.

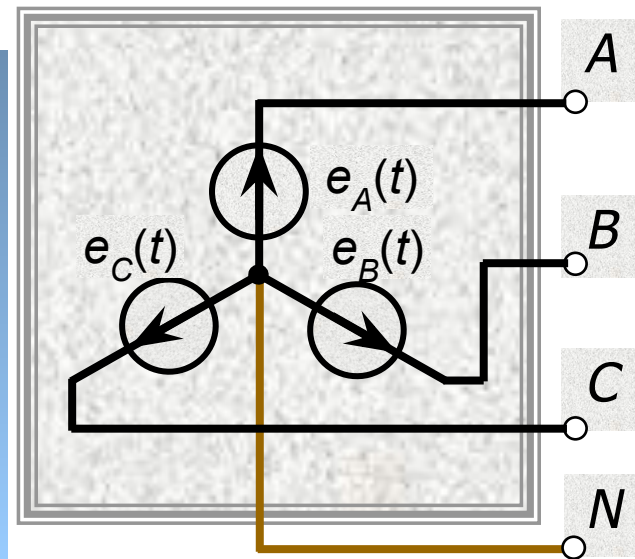
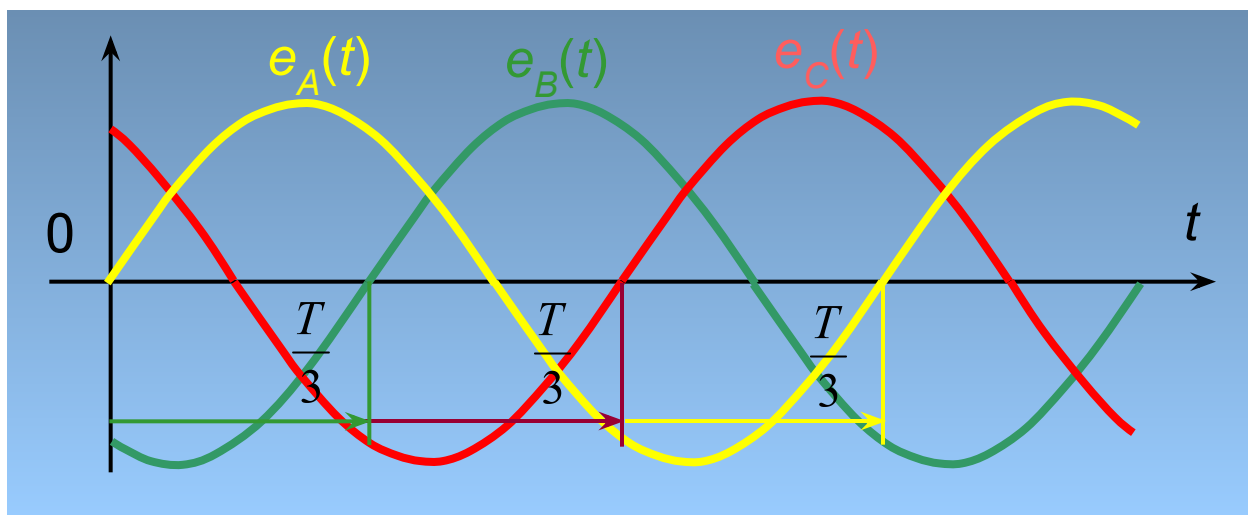


Трехфазная симметричная система ЭДС может изображаться графиками, тригонометрическими функциями, векторами и функциями комплексного переменного.

$$e_A(t) = U_\phi \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$$

$$e_B(t) = U_\phi \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$e_C(t) = U_\phi \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right)$$



Сумма мгновенных ЭДС в симметричной системе равна нулю.

$$e_A(t) + e_B(t) + e_C(t) = 0$$

Если ЭДС какой-либо отдельной фазы трехфазной обмотки, например фазы А, принять за исходную и считать ее начальную фазу равной нулю, то выражения для мгновенных значений ЭДС можно записать в виде:

$$e_A(t) = E_m \cdot \sin(\omega t)$$

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

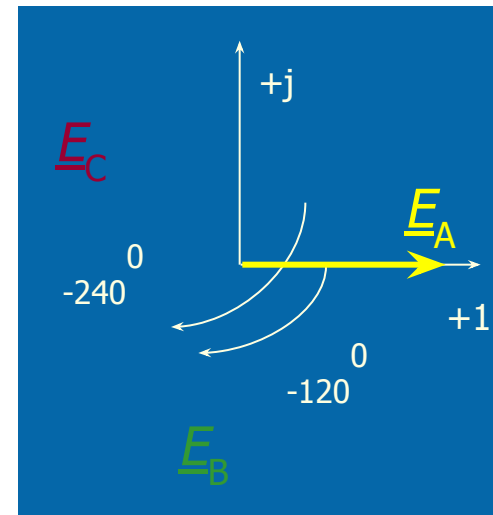
$$e_C(t) = E_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) = E_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right)$$

Выражения для ЭДС каждой фазы в комплексном виде можно записать:

$$\underline{E}_A = E_m \cdot e^{j \cdot 0} = E_m$$

$$\underline{E}_B = E_m \cdot e^{-j \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi}$$

$$\underline{E}_C = E_m \cdot e^{-j \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi} = E_m \cdot e^{j \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi}$$

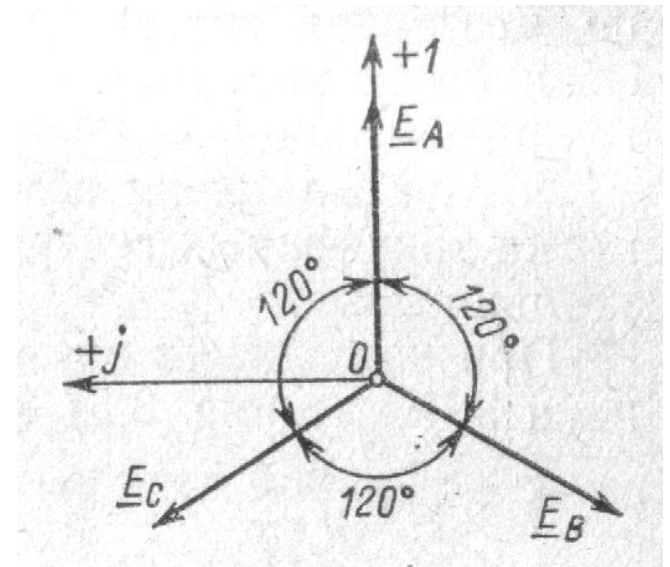


Выражения для ЭДС каждой фазы в комплексном виде можно записать:

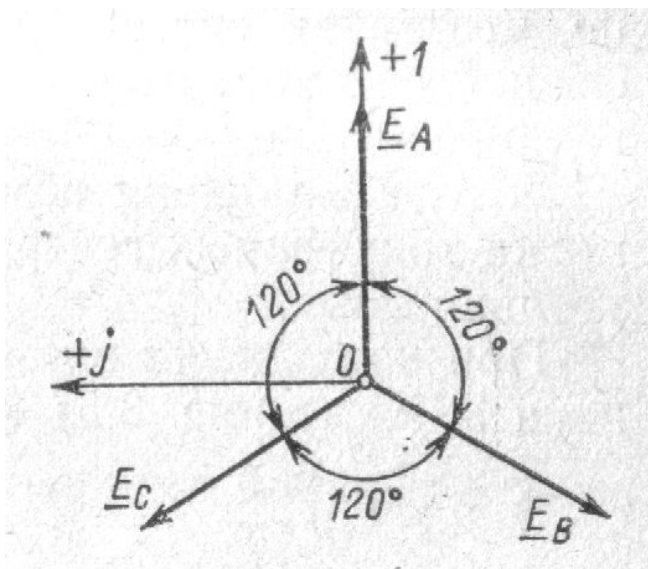
$$\underline{E}_A = E_m \cdot e^{j \cdot 0} = E_m$$

$$\underline{E}_B = E_m \cdot e^{-j \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi}$$

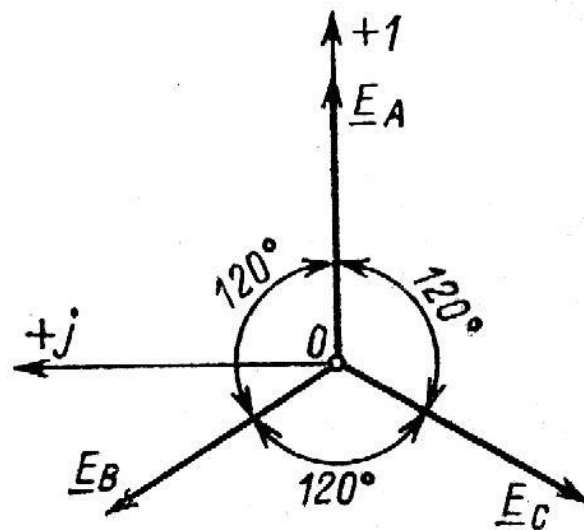
$$\underline{E}_C = E_m \cdot e^{-j \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi} = E_m \cdot e^{j \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi}$$



Систему ЭДС в которой ЭДС фазы С отстает от ЭДС фазы В, а в свою очередь ЭДС фазы В отстает от ЭДС фазы А, называют системой **прямой** последовательности (рис. а). Если изменить направление вращения ротора генератора, то последовательность фаз измениться и ее называют системой **обратной** последовательности (рис. б). На практике применяется прямая последовательность фаз, т.е. А – В – С.



а)



б)

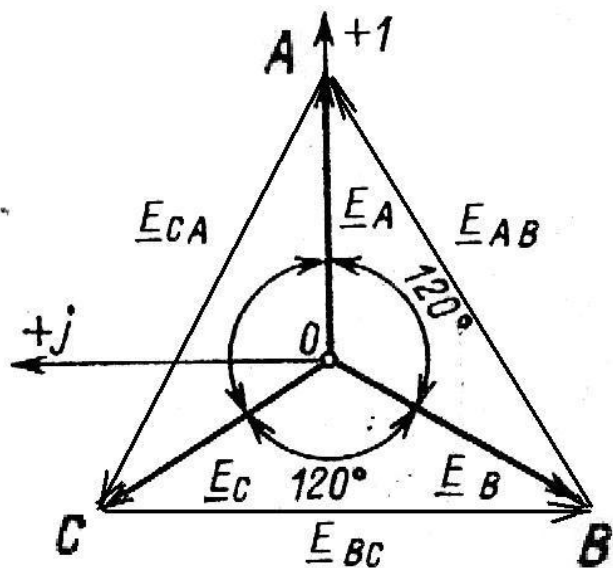


Мгновенные значения ЭДС источников различают на фазные  $e_A, e_B, e_C$  и линейные  $e_{AB}, e_{BC}, e_{CA}$ . Между собой они связаны выражениями напряжений в комплексном виде.

$$\underline{E}_{AB} = \underline{E}_A - \underline{E}_B \qquad \underline{E}_{BC} = \underline{E}_B - \underline{E}_C$$

$$\underline{E}_{CA} = \underline{E}_C - \underline{E}_A$$

В соответствии с этими уравнениями построена векторная диаграмма фазных и линейных ЭДС генератора при соединении его фаз в звезду.



При построении диаграмм векторы линейных напряжений направляют противоположно индексам, т.е. вектор  $\underline{E}_{AB}$  будет направлен от B к A и т.д.

Напряжения генератора практически равны ЭДС:

$$\underline{E}_A = \underline{U}_A \quad \underline{E}_B = \underline{U}_B \quad \underline{E}_C = \underline{U}_C$$

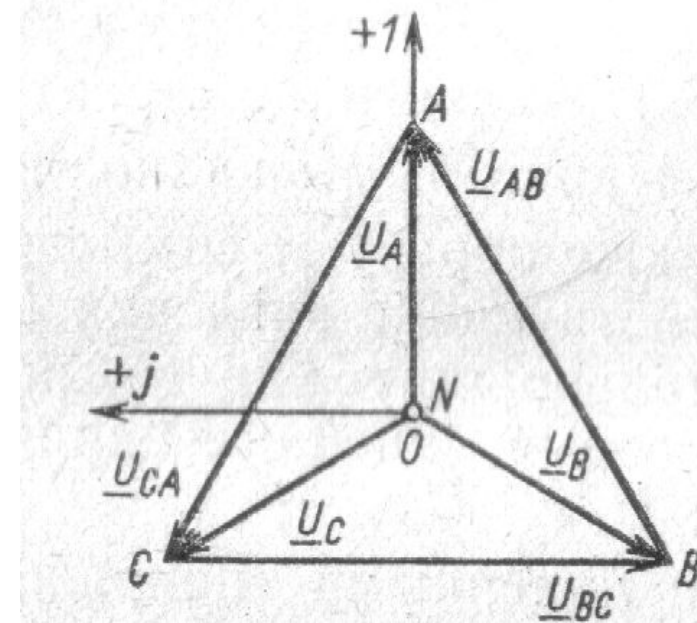
т.к. сопротивлениями обмоток статора можно пренебречь. Тогда комплексные значения линейных и фазных напряжений связаны между собой:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B$$

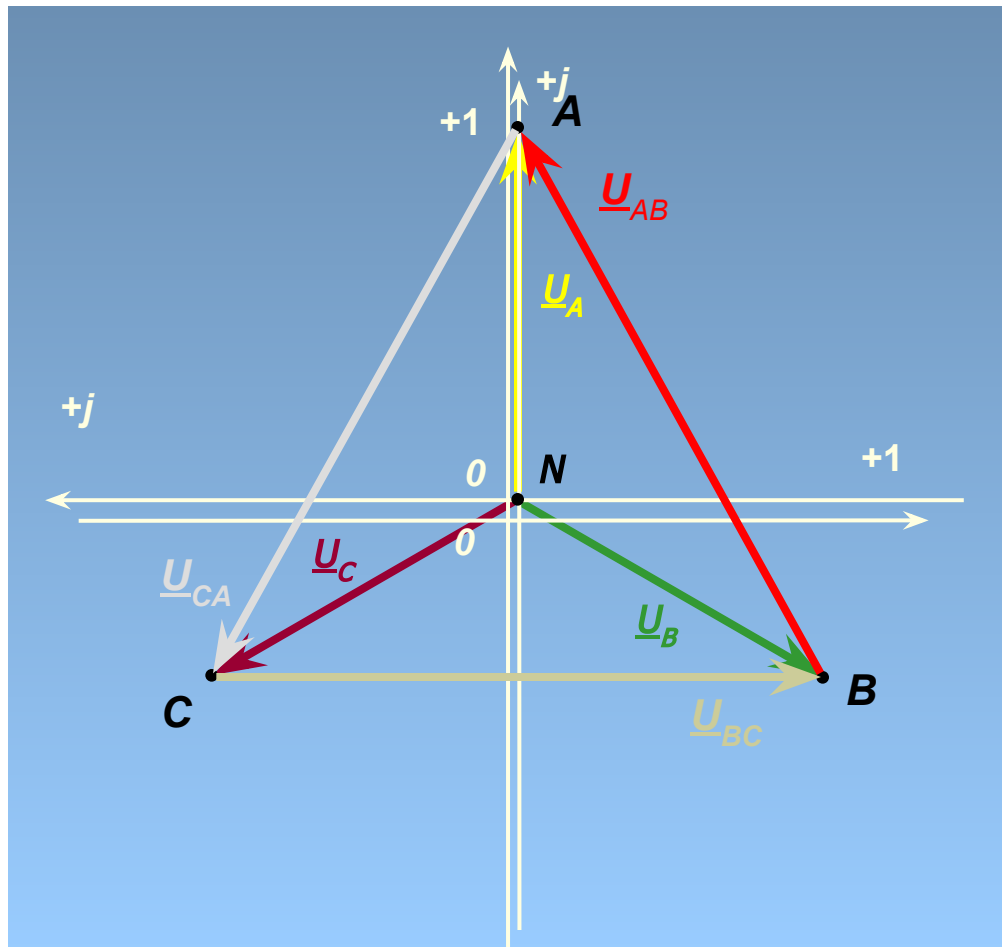
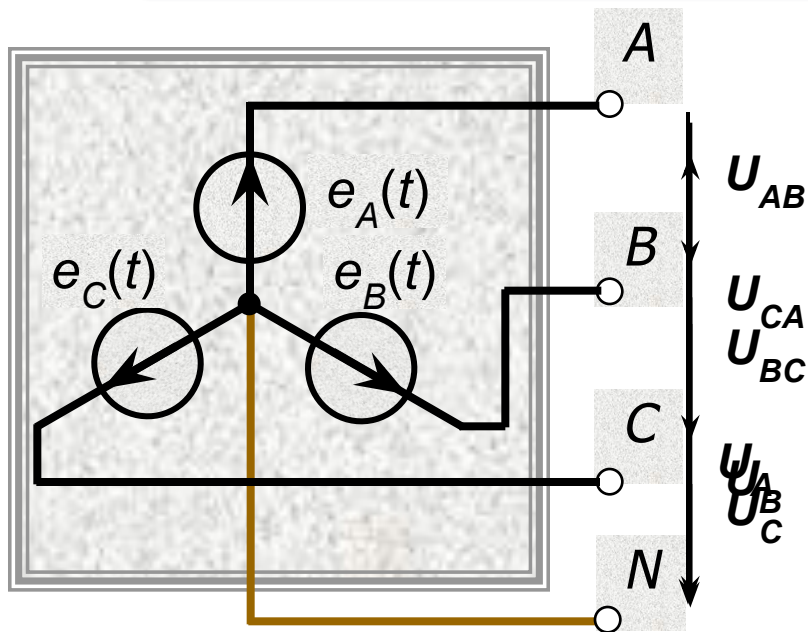
$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A$$

Эти уравнения позволяют определить линейные напряжения по известным фазным напряжениям. Данным уравнениям соответствует векторная диаграмма фазных и линейных напряжений источника при соединении его фаз звездой.



# Векторные диаграммы

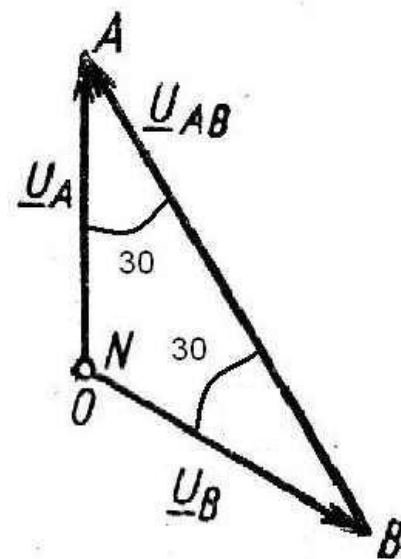


При построении диаграмм векторы линейных напряжений направляют противоположно своим индексам, т.е. вектор  $\underline{U}_{AB}$  будет направлен от B к A.

Рассмотрим один из треугольников в данной векторной диаграмме. В треугольнике  $ABN$  две стороны  $AN$  и  $NB$  равны друг другу и являются фазными напряжениями:

Из данного равнобедренного треугольника следует, что:

$$U_L = 2 \cdot U_\Phi \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} \cdot U_\Phi$$



т.е. линейное напряжение при соединении обмоток генератора звездой в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного. С учетом данного соотношения построена шкала стандартных напряжений трехфазных генераторов:  $220 \setminus 127$ ,  $380 \setminus 220$  и  $660 \setminus 380$  при напряжении до 1000 Вольт.