



**Электротехника и электроника
для заочников
Лекция 3
Трехфазные цепи**

**Мириленко Андрей Петрович, к.т.н.
кафедра Электротехники**

Основные понятия

Трёхфазная цепь — совокупность трех однофазных цепей, в каждой из которых действуют три синусоидальные ЭДС

- ✓ создаваемые одним источником;
- ✓ одной и той же частоты;
- ✓ одной и той же амплитуды;
- ✓ сдвинутые по фазе друг относительно друга на 120° .

Фаза (первое значение) — часть многофазной цепи, связанная с одной из ЭДС.

Фаза (второе значение) — аргумент синусоидальной величины

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi) \quad (\omega t + \Psi) - \text{фаза}$$

Почему применяют трехфазные цепи

- ✓ экономичность передачи электроэнергии на большие расстояния;
- ✓ мощность не зависит от времени, нет пульсаций мощности;
- ✓ возможность получения с помощью неподвижных обмоток вращающегося магнитного поля, на чем основана работа синхронного и асинхронного двигателей, а также ряда других электротехнических устройств;
- ✓ самым надежным и экономичным, удовлетворяющим требованиям промышленного электропривода является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Михаил Осипович Доливо-Добровольский

Большой вклад в разработку трехфазных систем внес выдающийся русский ученый-электротехник М.О.Доливо-Добровольский, создавший трехфазные асинхронные двигатели, трансформаторы, предложивший трех- и четырехпроводные цепи, в связи с чем по праву считающийся основоположником трехфазных систем.



В 1887 году М. О. Доливо-Добровольский приглашён в фирму АЕГ (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft), где в 1909 году был назначен директором и проработал в этой должности до конца жизни.

Источник трехфазного напряжения

Трехфазный генератор, на статоре которого размещена трехфазная обмотка. Фазы этой обмотки располагаются таким образом, чтобы их магнитные оси были сдвинуты в пространстве друг относительно друга на 120° .

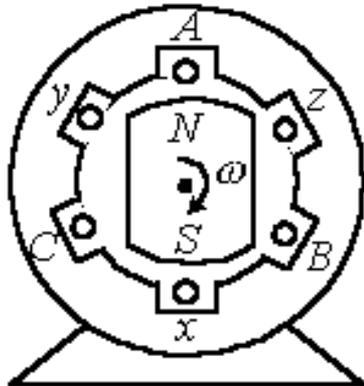


Рис.1

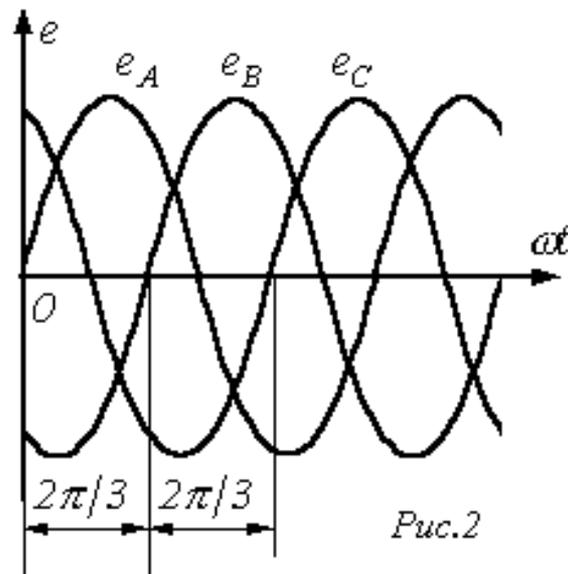


Рис.2

Начала обмоток принято обозначать заглавными буквами A, B, C, а концы — соответственно прописными x, y, z.

ЭДС трехфазного генератора

Примем, что начальная фаза для фазы А равна нулю $\Psi_A = 0$

$$e_A = E_{mA} \sin(\omega t)$$

$$e_B = E_{mB} \sin(\omega t - 120^\circ)$$

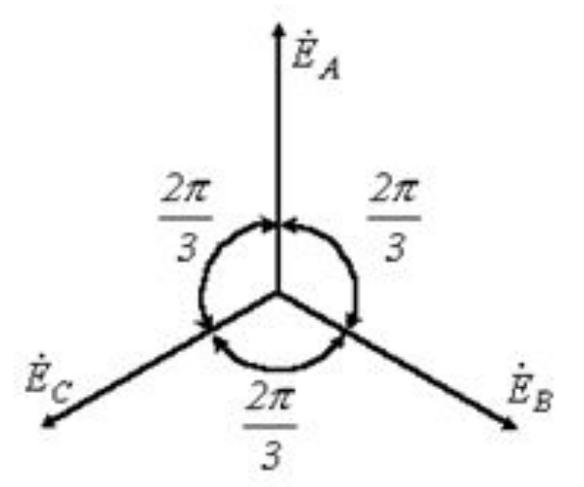
$$e_C = E_{mC} \sin(\omega t - 240^\circ) = E_{mC} \sin(\omega t + 120^\circ)$$

или в комплексном виде действующие значения:

$$\dot{E}_A = E_A$$

$$\dot{E}_B = E_B e^{-j120^\circ}$$

$$\dot{E}_C = E_C e^{+j120^\circ}$$



Последовательность фаз (порядок чередования фаз)

порядок, в котором ЭДС в фазных обмотках генератора проходят через одинаковые значения (например, максимумы).

Прямая последовательность фаз — последовательность фаз ABC.

Обратная последовательность фаз — последовательность фаз ACB.

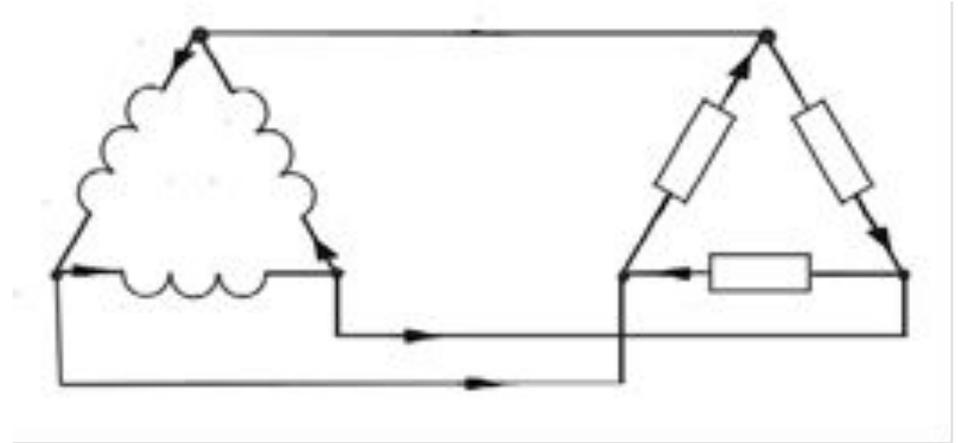
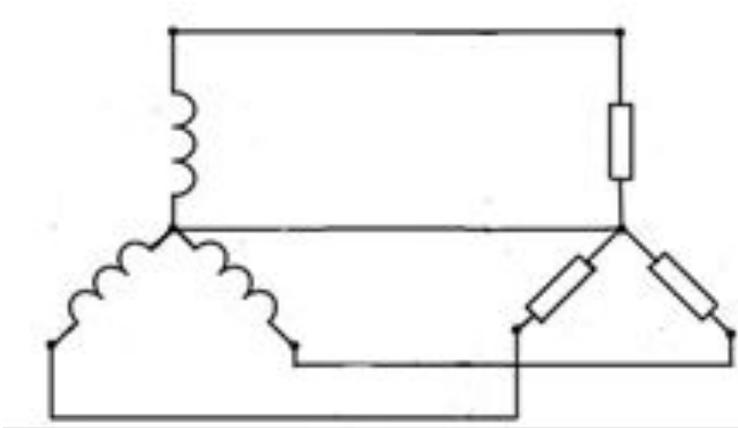
Симметрия в цепях трёхфазного тока

Симметричная система ЭДС (токов, напряжений) — совокупность ЭДС (токов, напряжений), равных по амплитуде и отстающих по фазе относительно друг друга на 120° .

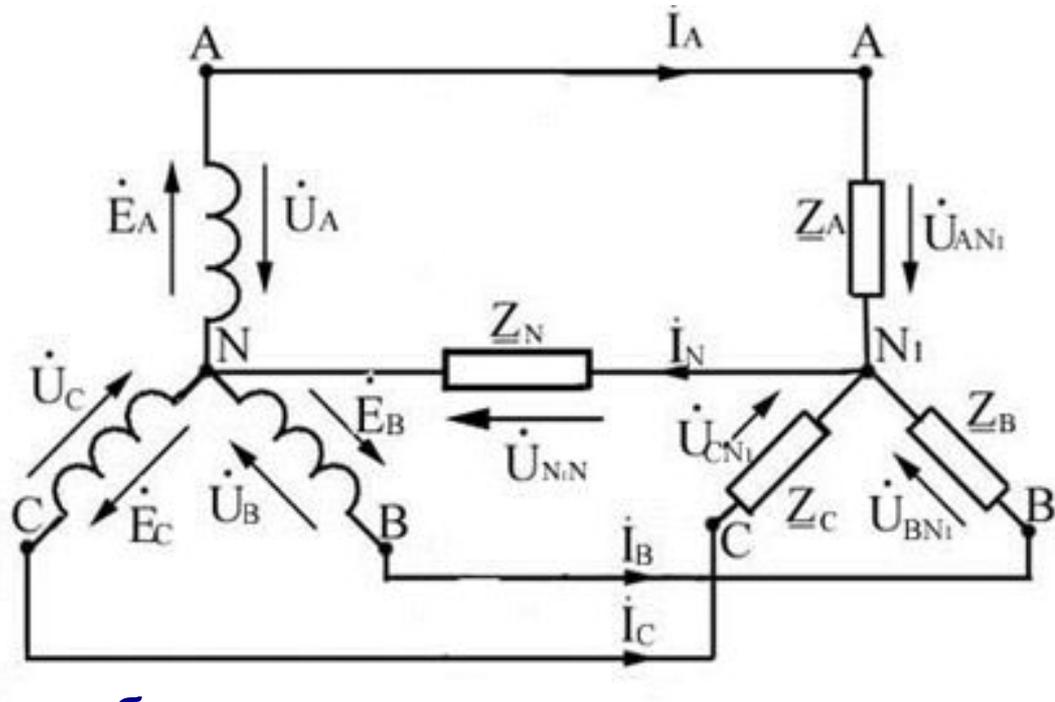
Трёхфазный симметричный приемник — приемник, у которого комплексные (!!!) сопротивления фаз одинаковы.

Способы соединения фаз

Основные способы соединения трехфазных цепей – звездой и треугольником.



Соединение звездой



A, B, C - начала обмоток

x, y, z - концы обмоток

N – точка объединения обмоток называется нейтральной точкой генератора

N1 – точка объединения фаз приемника, соединенного звездой. Индекс указан потому, что приемников может быть много.

Соединение звездой

\dot{E}_A - ЭДС фазы. Принято, что направлена от конца обмотки генератора к началу.

\dot{U}_A - напряжение на фазах генератора называют фазными напряжениями $\dot{U}_\Phi = \dot{U}_A = \dot{U}_{AN}$

\dot{U}_{AN_1} - напряжение на фазах приемника, соединенного звездой.

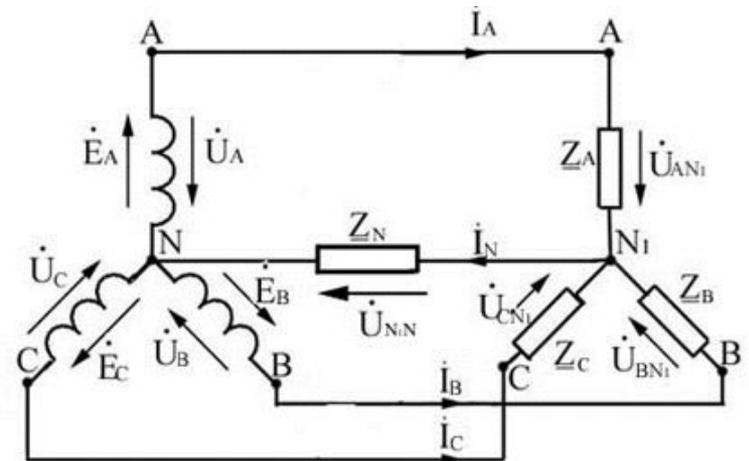
\underline{Z}_{AN_1} - комплексное сопротивление фазы A приемника 1.

Линейные провода - провод, соединяющий начала фазы генератора и приемника называется линейным. В линейных проводах текут линейные токи, которые принято обозначать в направлении от генератора к потребителю

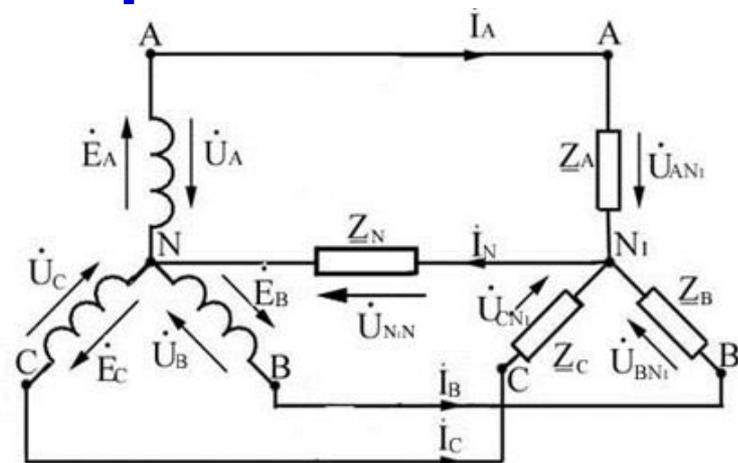
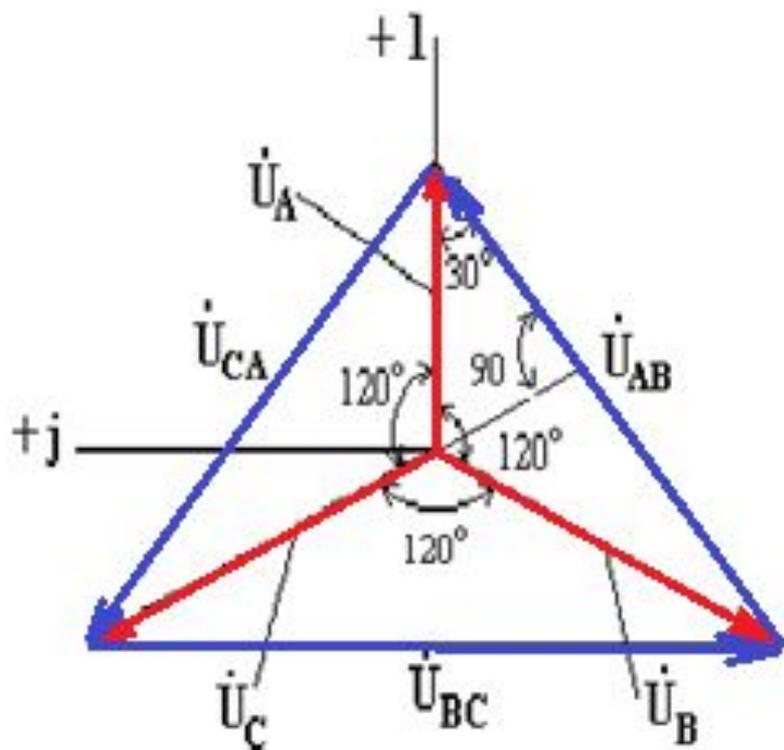
При соединении звездой ток в фазе равен линейному току

Нейтральный провод

Нейтральный провод соединяет точки N и N1. Ток в нем принято обозначать от потребителя к генератору.



Векторная диаграмма генератора



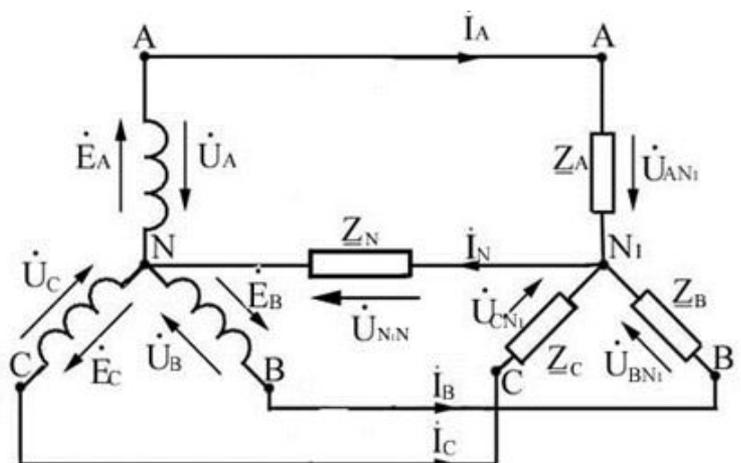
Линейные напряжения это напряжения между двумя началами фаз.

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

$$\frac{1}{2} \frac{U_{AB}}{U_A} = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow U_{AB} = \sqrt{3} U_A \quad U_{\text{Л}} = \sqrt{3} U_{\Phi}$$

Расчет цепей, соединенных по схеме звезды

I. Сопротивление нейтрального провода равно нулю. $\underline{Z}_N = 0$



1. Определить фазные напряжения
По 2-му закону Кирхгофа составим уравнение для одной из фаз

$$-\dot{U}_A + \dot{U}_{AN_1} + \dot{U}_{N_1N} = 0$$

$$\dot{U}_{N_1N} = 0 \Rightarrow \dot{U}_{AN_1} = \dot{U}_A$$

3. Найти ток нейтрального провода по 1-му закону Кирхгофа

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

4. Найти углы сдвига фаз по параметрам сопротивления приемника

$$\varphi_A = \arctg \frac{X_A}{R_A}; \quad \varphi_B = \arctg \frac{X_B}{R_B}; \quad \varphi_C = \arctg \frac{X_C}{R_C}$$

2. Найти фазные токи по закону Ома

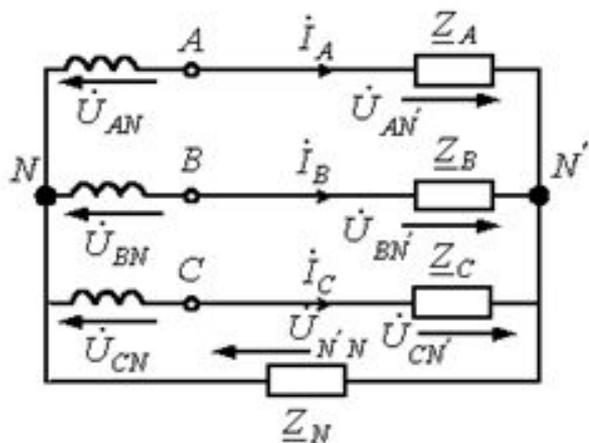
$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{U_A \cdot e^{-j120^\circ}}{\underline{Z}_B};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{U_A \cdot e^{+j120^\circ}}{\underline{Z}_C}$$

Расчет цепей, соединенных по схеме звезды

2. Сопротивление нейтрального провода не равно нулю. $\underline{Z}_N \neq 0$



1. Записать фазные напряжения генератора

2. Определить напряжение между нейтральными точками потребителя и генератора

Напряжение определяют по методу двух узлов.

$$\dot{U}_{N1N} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}$$

$\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C, \underline{Y}_N$

комплексные проводимости фаз и нейтрального провода.

3. Определить напряжения на фазах потребителя

$$\dot{U}_{AN1} = \dot{U}_A - \dot{U}_{N1N}; \quad \dot{U}_{BN1} = \dot{U}_B - \dot{U}_{N1N}; \quad \dot{U}_{CN1} = \dot{U}_C - \dot{U}_{N1N}$$

3. Найти токи в фазах по закону Ома

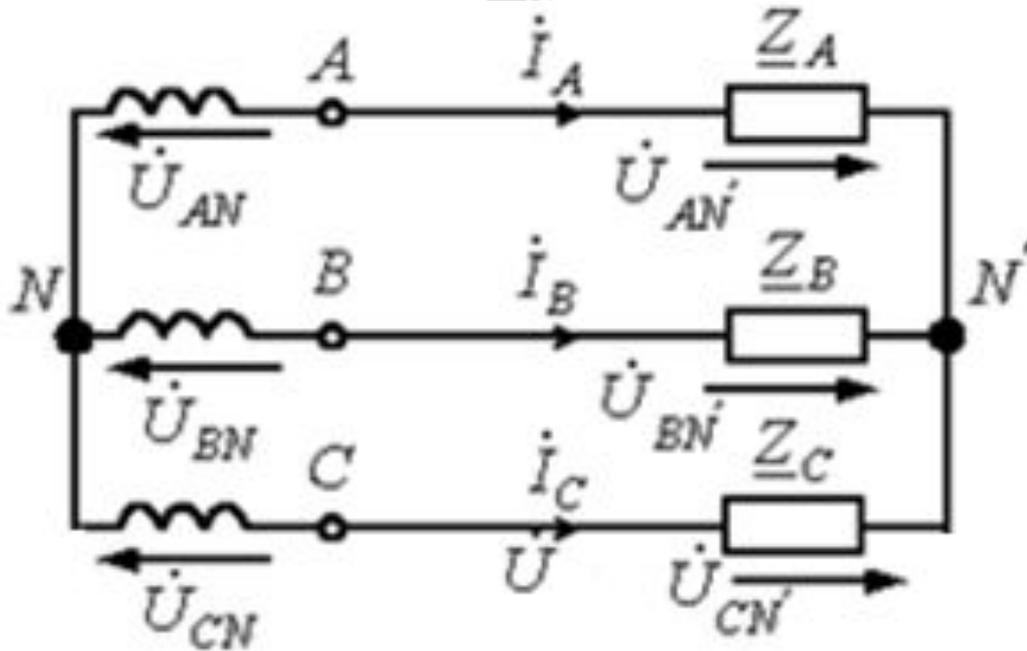
$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN1}}{\underline{Z}_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BN1}}{\underline{Z}_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CN1}}{\underline{Z}_C}$$

4. Найти ток нейтрального провода по 1-му закону Кирхгофа

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

Расчет цепей, соединенных по схеме звезды

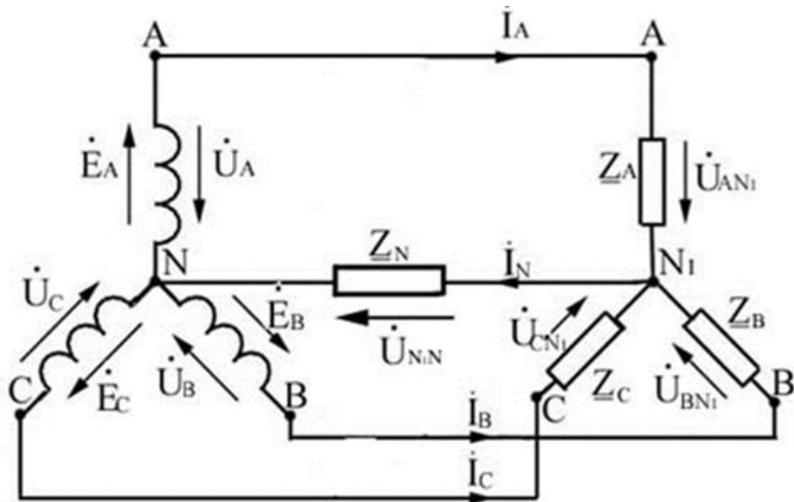
3. Сопротивление нейтрального провода равно бесконечности.
(обрыв провода) $\underline{Z}_N = \infty$



Расчет проводят по схеме как и для второго случая, только с учетом того, что проводимость нейтрального провода равна нулю.

$$\dot{U}_{N1N} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}$$

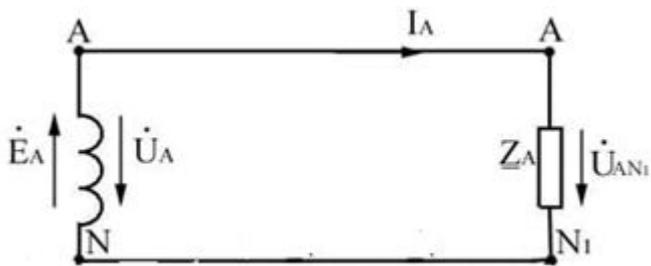
Симметричный потребитель



Симметричный, значит все величины численно одинаковые, и сдвинуты ровно на 120° .

1. Генератор симметричен всегда. Напряжения обмоток равны и сдвинуты на 120°
2. Потребитель симметричен, если в каждой фазе одинаковое комплексное сопротивление.

Можно решить для одной фазы и распространить решение на другие



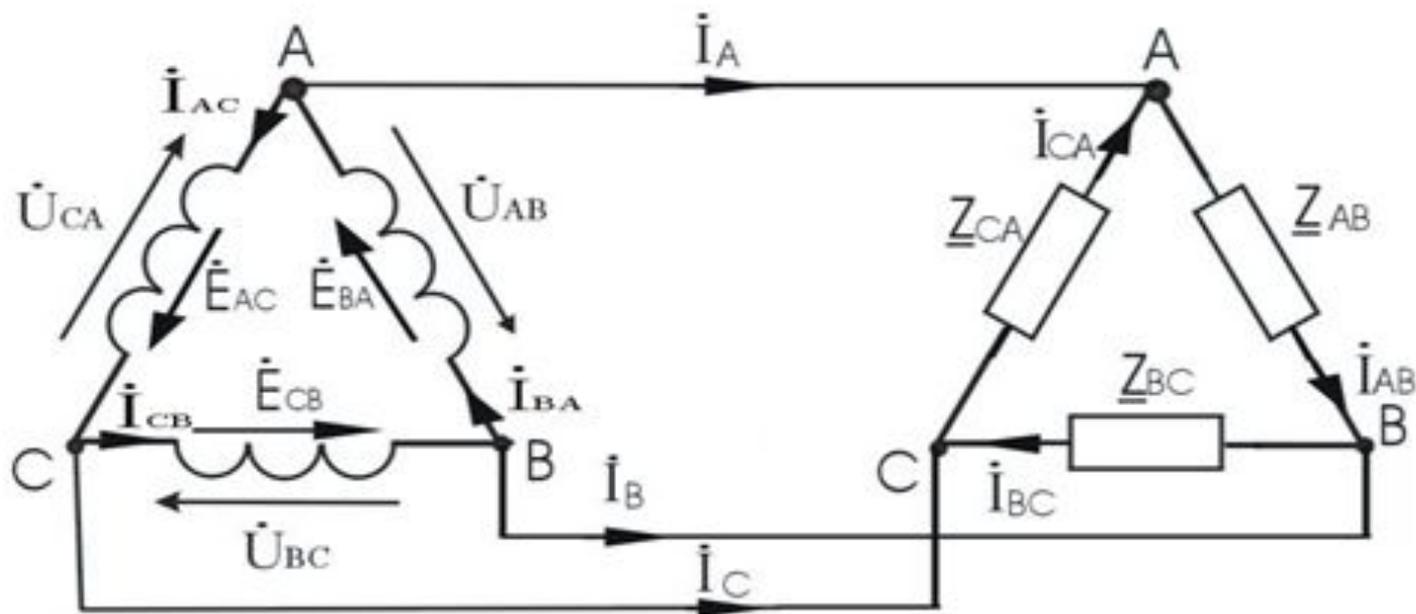
$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN_1}}{Z_A} \quad \dot{I}_B = I_A \cdot e^{-j120^\circ}$$

$$\dot{I}_C = I_A \cdot e^{+j120^\circ}$$

Ток в нейтральном проводе согласно первому закону Кирхгофа равен нулю:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_A (1 + e^{-j120^\circ} + e^{+j120^\circ}) = \dot{I}_A (1 - 0,5 - j0,865 - 0,5 + j0,865) = 0.$$

Расчет цепей, соединенных треугольником

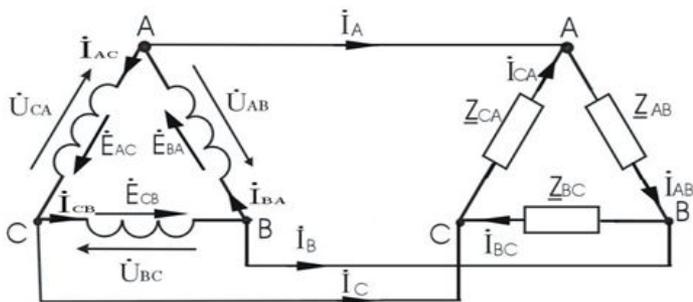


В любой момент сумма напряжений по контуру генератора равна нулю, так что даже при холостом ходе тока нет. Но! Это теоретически, практически ЭДС фаз не могут быть абсолютно равными, поэтому возможен круговой ток внутри генератора и такую схему стараются не применять.

С точки зрения потребителя не важно как соединен генератор, выбор зависит от того, на какое напряжение рассчитан потребитель.

При соединении треугольником $U_{\Phi} = U_{Л}$ (а не $U_{Л} = \sqrt{3} U_{\Phi}$ как в случае звезды)

Расчет цепей, соединенных треугольником



1. Записать систему линейных напряжений

$$\dot{U}_{AB} = U_{л} \quad \dot{U}_{BC} = U_{л} * e^{120^\circ} \quad \dot{U}_{CA} = U_{л} * e^{-120^\circ}$$

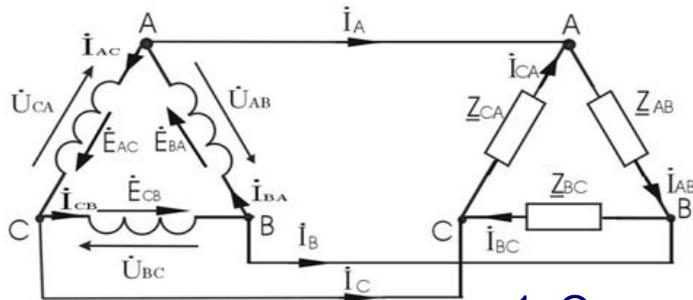
2. Рассчитать фазные токи по закону Ома

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}} \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}} \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}$$

3. Рассчитать линейные токи по 1-му закону Кирхгофа

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$$

Расчет при симметричной нагрузке



Комплексные сопротивления фаз приёмника одинаковые:

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA}$$

1. Определить ток в одной из фаз, например, в фазе AB

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}$$

2. Записать токи в других фазах

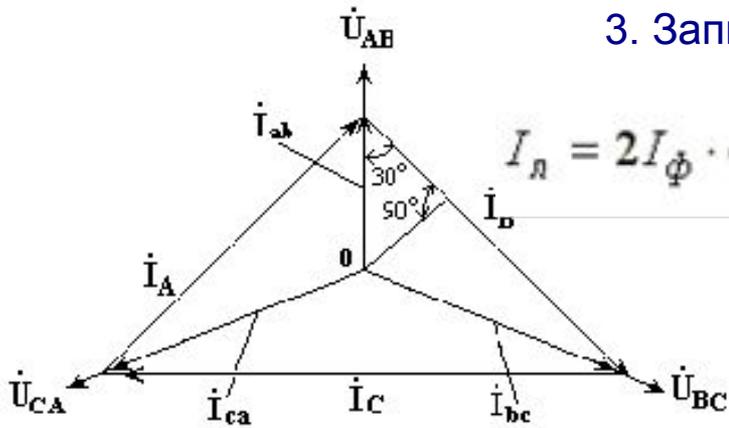
$$\underline{I}_{BC} = \underline{I}_{AB} e^{-j120^\circ}$$

$$\underline{I}_{CA} = \underline{I}_{AB} e^{j120^\circ}$$

3. Записать линейные токи

$$I_L = 2I_\phi \cdot \cos 30^\circ = 2I_\phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot I_\phi$$

$$\underline{I}_A = \sqrt{3} \underline{I}_{AB} e^{-j30^\circ}$$



4. Сдвиг фаз на нагрузке (между током и напряжением)

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \arctg \frac{X_{AB}}{R_{AB}}$$