

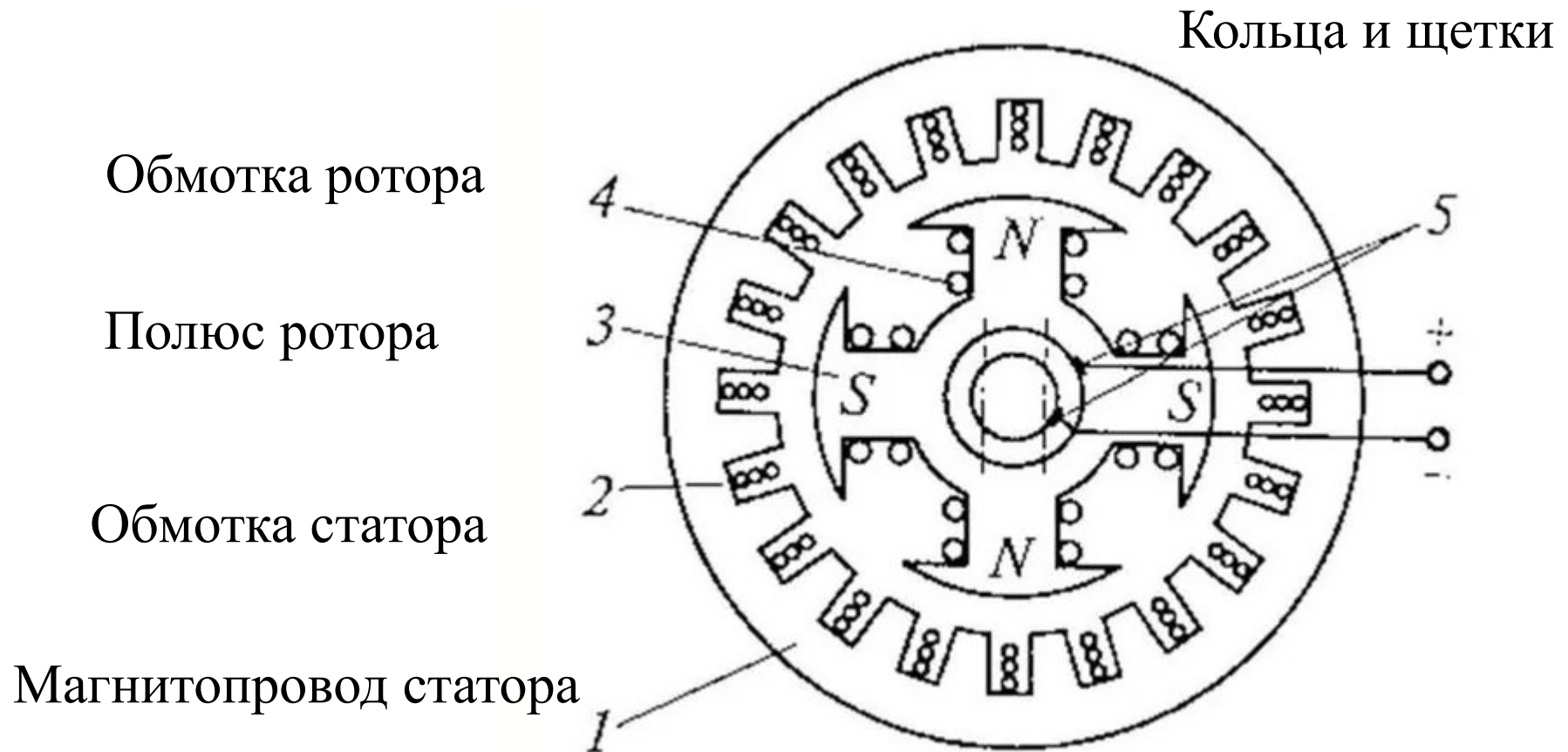
Трехфазные цепи

образуются тремя электрически связанными фазами (цепями) А, В, С, в каждой из которых действуют одинаковые ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга на 120^0 . К фазам подключаются нагрузки, соединенные звездой или треугольником

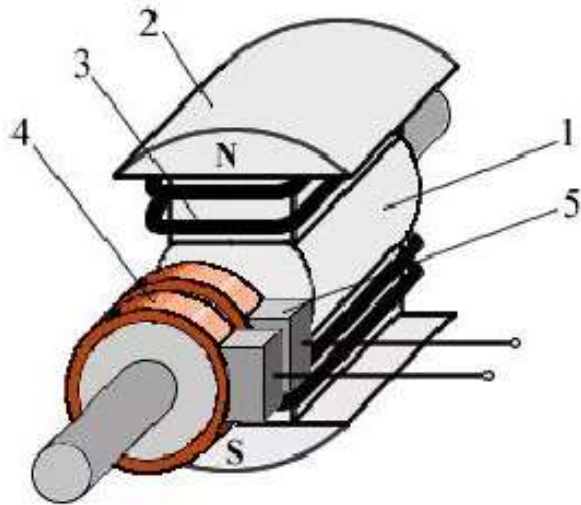
Преимущества:

- экономичность передачи электроэнергии на большие расстояния;
- возможность сравнительно простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для работы как асинхронного, так и синхронного двигателя;
- возможность получения в одной установке двух эксплуатационных напряжений – фазного и линейного.

Источником трехфазного напряжения является трехфазный синхронный генератор

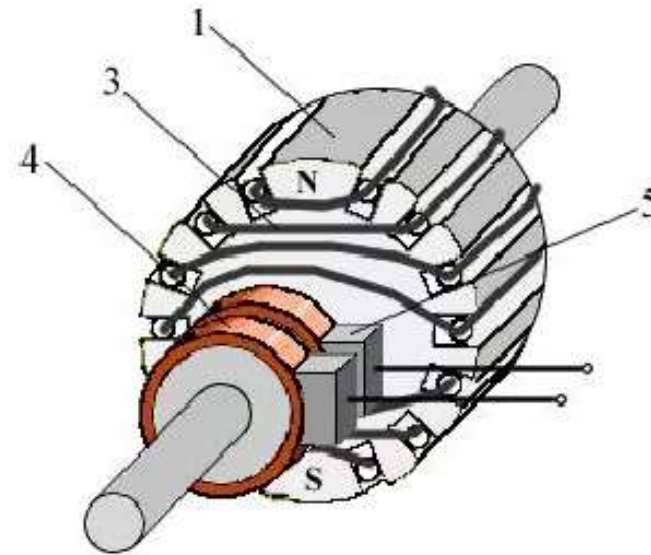


Ротор синхронной машины



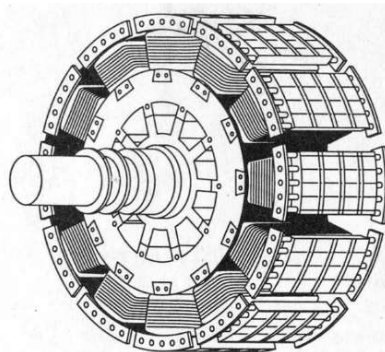
Явнополюсный ротор синхронной машины ($p=1$)

1 - магнитопровод; 2 - полюса; 3 - обмотка возбуждения; 4 - контактные кольца; 5 - электрические щетки



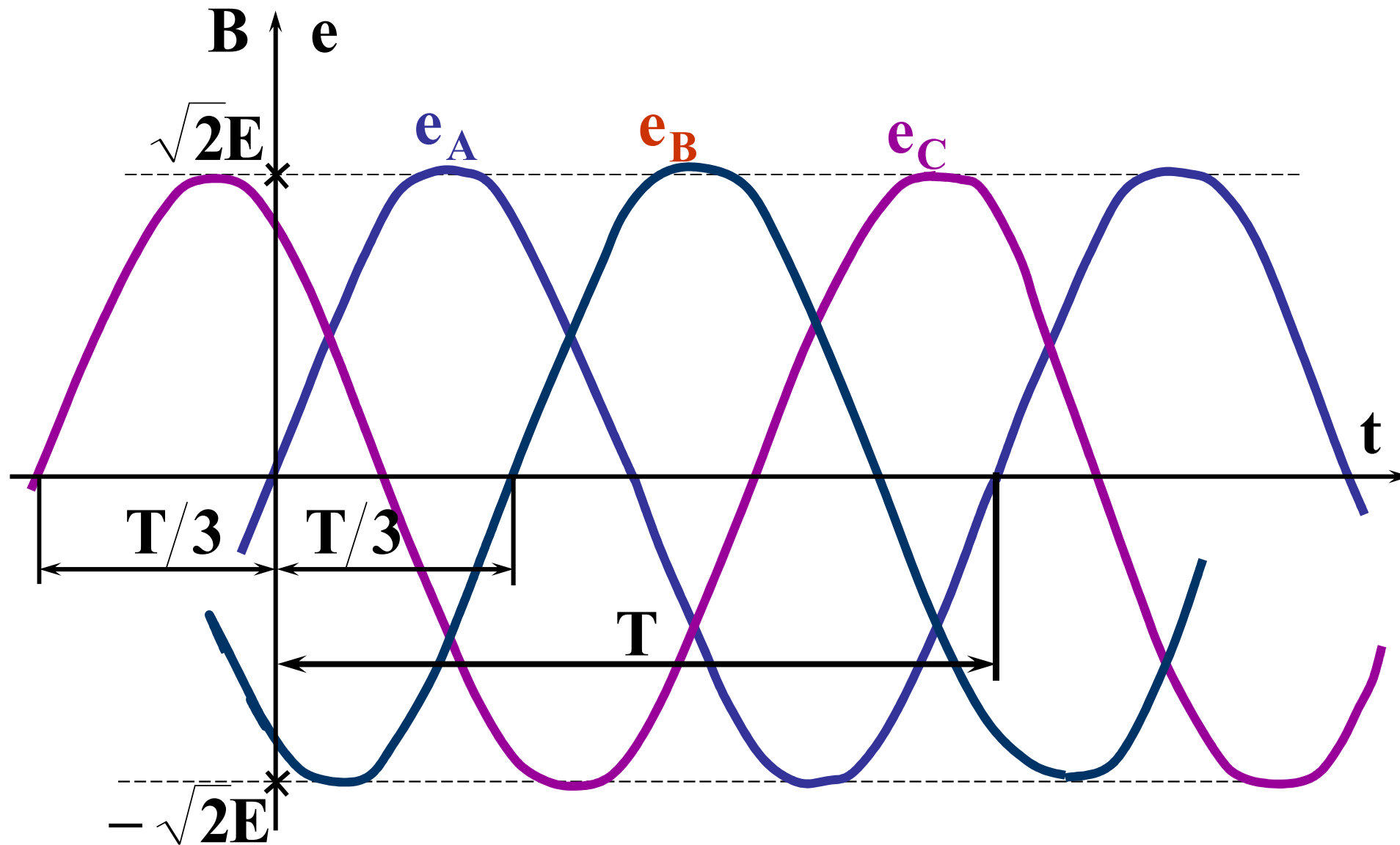
Неявнополюсный ротор синхронной машины

1 - магнитопровод; 3 - обмотка возбуждения; 4 - контактные кольца; 5 - электрические щетки



Общий вид ротора явнополюсной синхронной машины с горизонтальным валом

Режим генератора: двигатель (турбина) вращает ротор, на обмотку которого подается постоянное напряжение → в обмотке ротора возникает ток, который создает постоянное магнитное поле (МП). МП вращается вместе с ротором, пересекает статорные обмотки и наводит в них одинаковые по модулю и частоте ЭДС, сдвинутые на 120° (симметричная трехфазная система).



$$\mathbf{e}_A = \sqrt{2}\mathbf{E} \sin(\omega t)$$

$$\mathbf{e}_B = \sqrt{2}\mathbf{E} \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$\mathbf{e}_C = \sqrt{2}\mathbf{E} \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$\dot{\mathbf{E}}_A = \mathbf{E} \cdot \mathbf{e}^{j0^\circ}$$

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

$$\dot{\mathbf{E}}_C = \mathbf{E} \cdot \mathbf{e}^{j120^\circ}$$

Система ЭДС (напряжений, токов) называется *симметричной*, если она состоит из одинаковых по модулю ЭДС (напряжений, токов) одной и той же частоты, но сдвинутых относительно друг друга на 120° .

Алгебраическая сумма симметричной трехфазной системы равна нулю:

$$\begin{aligned}\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C &= E \cdot (1 + 1e^{-j120} + 1e^{j120}) = \\ &= E \cdot (1 - 0.5 - 0.866j - 0.5 + 0.866j) = 0\end{aligned}$$

**МОЩНОСТЬ - на ГЭС: до 640 МВт,
на ТЭС 800 -1200 МВт**

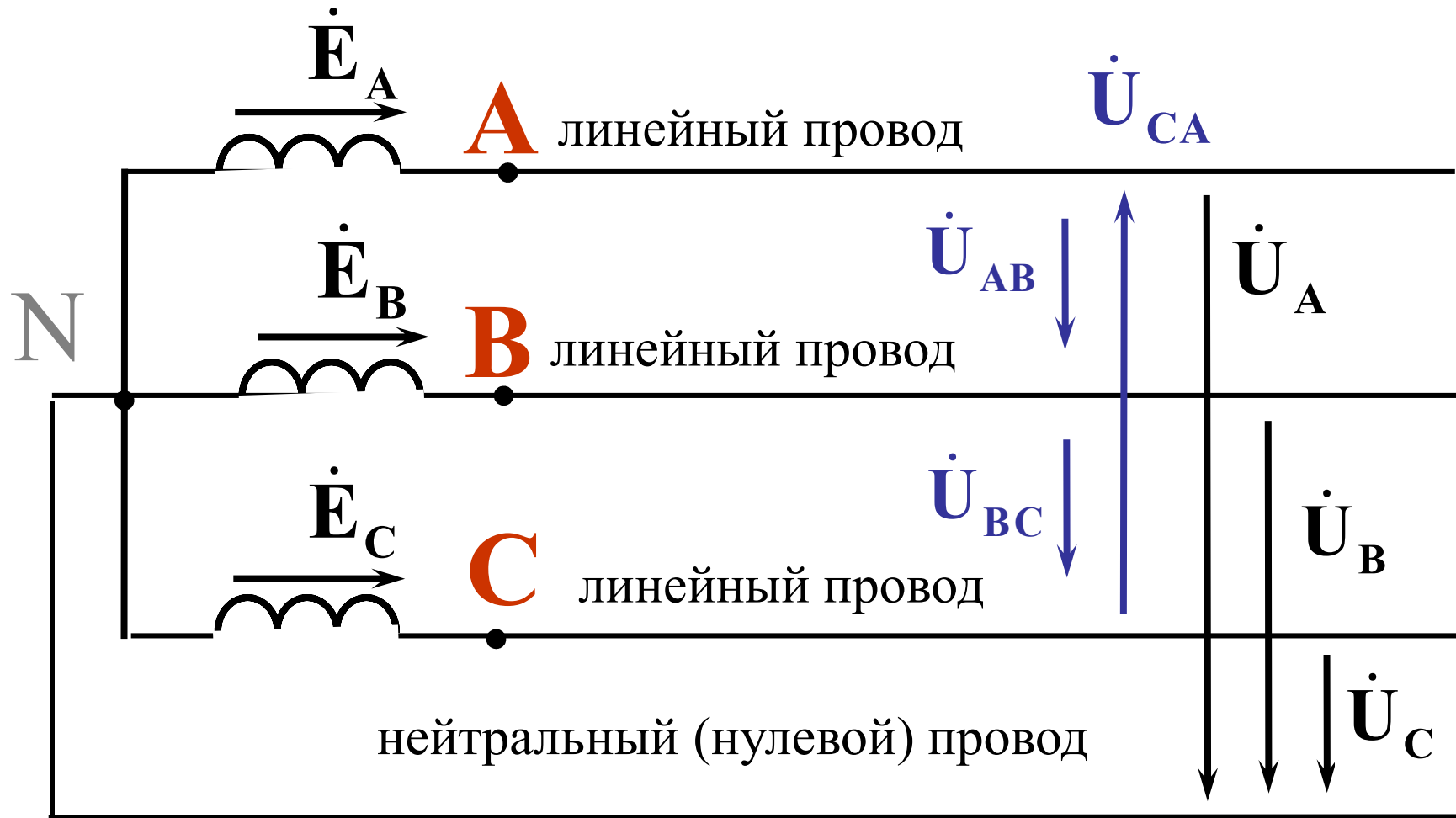






Соединения обмоток генератора

а) звездой:



Линейные провода – это провода, соединяющие генератор с приемниками. *Линейные напряжения* – это напряжения между линейными проводами

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

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

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

одинаковы по модулю и сдвинуты относительно друг друга на 120° .

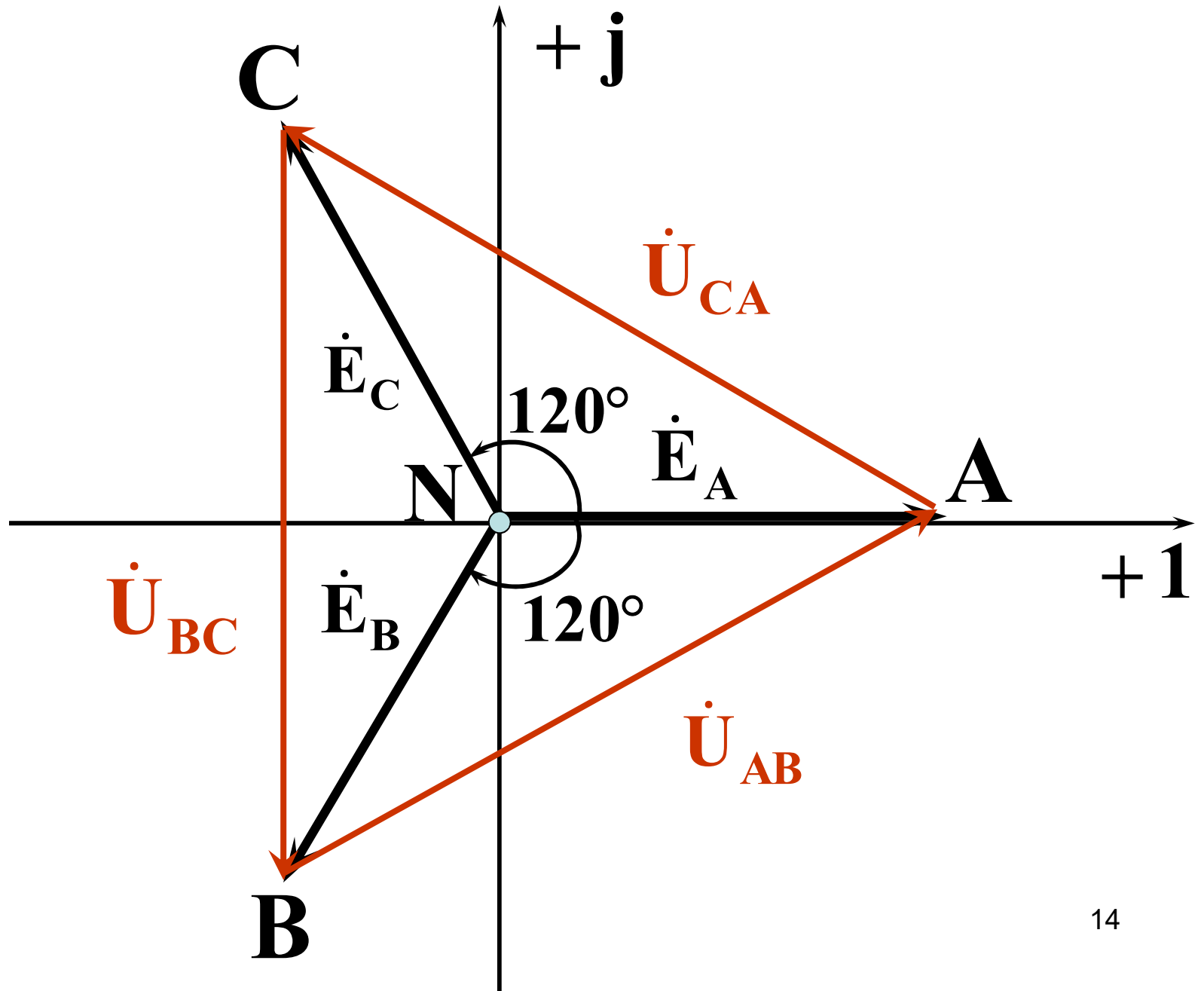
$$\dot{U}_L = \sqrt{3}\dot{E}e^{j30}$$

Фазные напряжения источника – это напряжения между линией и нейтральным проводом

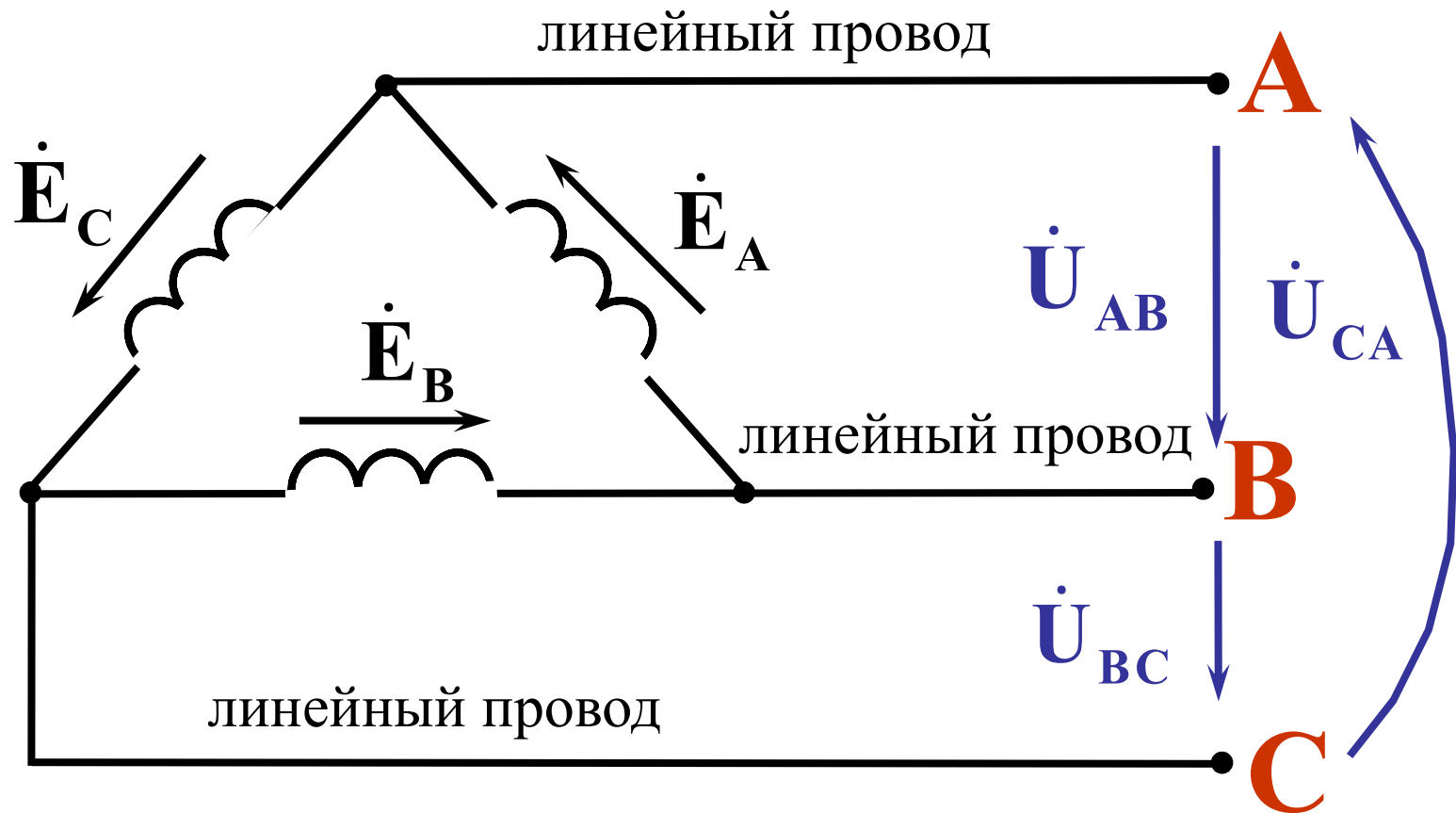
$$\dot{U}_A = \dot{E}_A$$

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

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



б) треугольником:



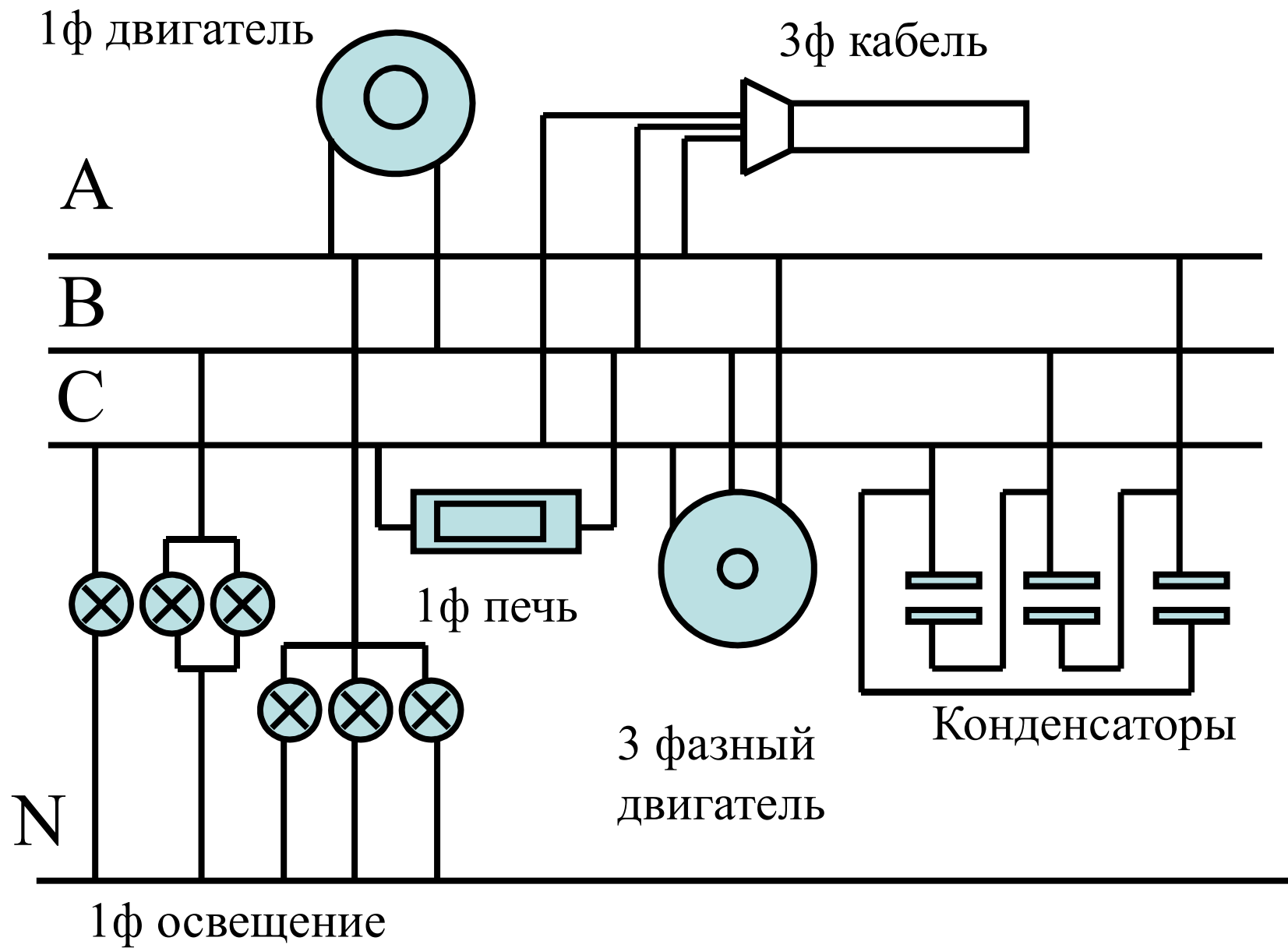
$$\dot{U}_{AB} = \dot{E}_A \quad \dot{U}_{CA} = \dot{E}_C \quad \dot{U}_{BC} = \dot{E}_B$$

Способы соединения потребителей

Симметричный приемник:

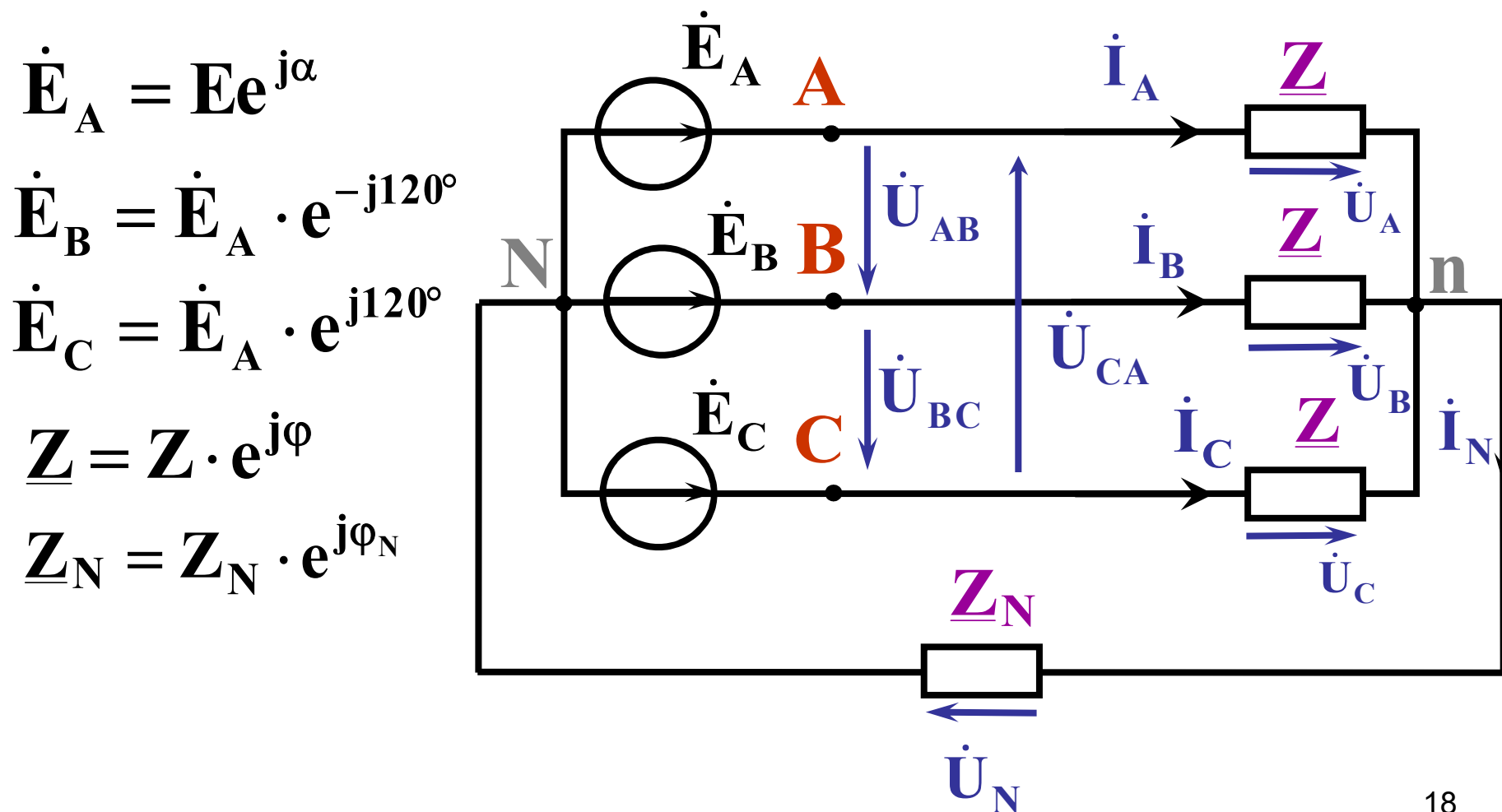
$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z} = Z e^{j\varphi}$$

Если условие не выполняется - **несимметричный**



Соединение звезда-звезда с нулевым проводом

1. Симметричный режим – нагрузка одинакова



\dot{I}_N, \dot{U}_N - ток и напряжение нулевого провода

Линейные токи – это токи, текущие в линейных проводах: $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$

$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – **фазные напряжения приемника**

n – нейтральная точка приемника

Фазные токи – это токи, текущие в нагрузке.

При соединении «звезда» фазные токи равны линейным.

В симметричном режиме ток нулевого провода и напряжение смещения равны нулю, поэтому нейтральные точки могут быть соединены, так как они имеют одинаковые потенциалы

$$\dot{\mathbf{I}}_A = \frac{\dot{\mathbf{E}}_A}{\underline{\mathbf{Z}}}$$

$$\dot{\mathbf{I}}_B = \dot{\mathbf{I}}_A e^{-j120} \quad \dot{\mathbf{I}}_C = \dot{\mathbf{I}}_A e^{j120}$$

$$\dot{\mathbf{U}}_A = \dot{\mathbf{I}}_A \cdot \underline{\mathbf{Z}} = \dot{\mathbf{E}}_A \quad \dot{\mathbf{U}}_B = \dot{\mathbf{U}}_A e^{-j120}$$

$$\dot{\mathbf{U}}_C = \dot{\mathbf{U}}_A e^{j120}$$

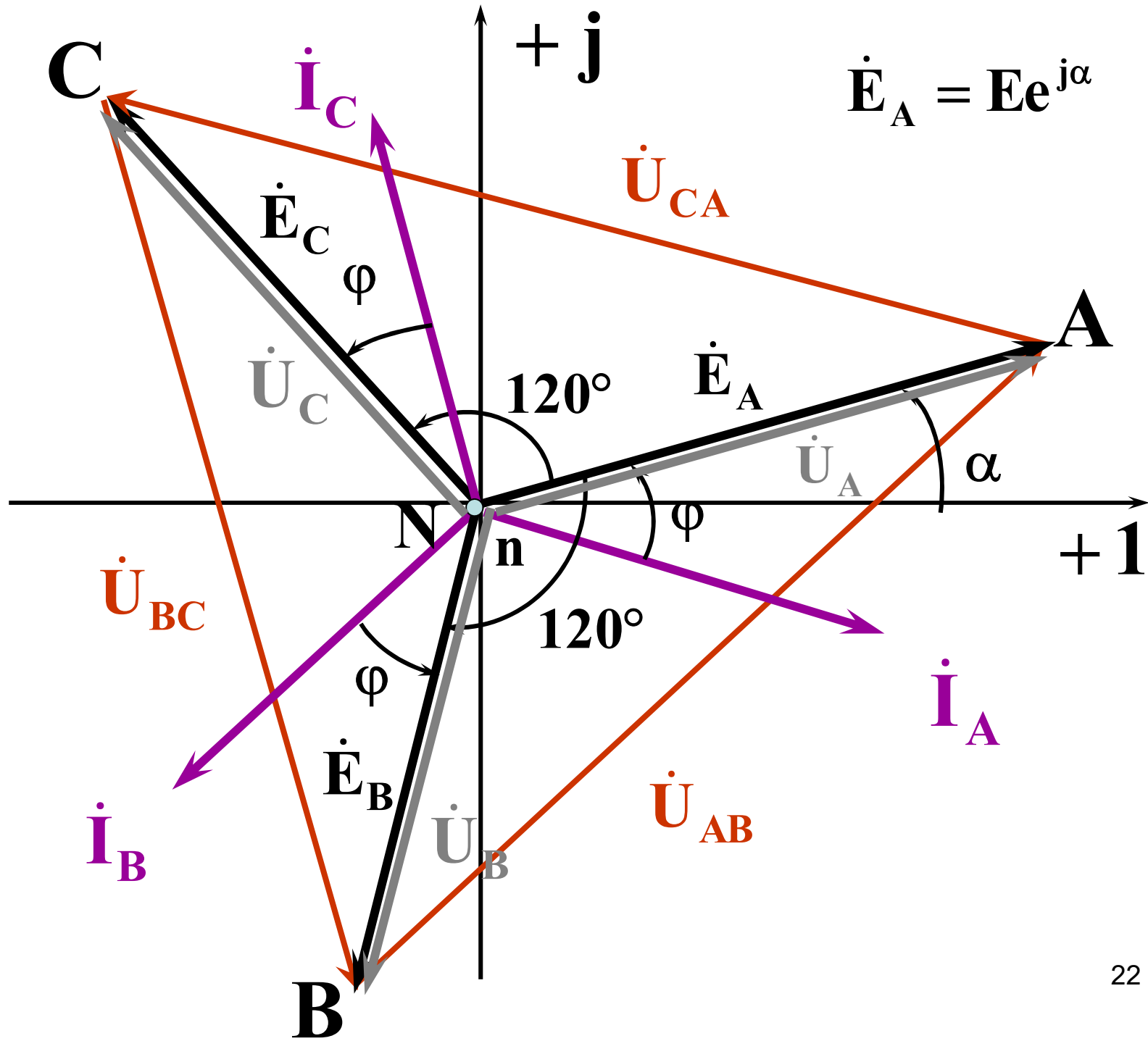
В симметричном режиме

$$\dot{U}_{\text{Л}} = \sqrt{3}\dot{U}_{\text{ф}}e^{j30}$$

$$\dot{U}_{\text{AB}} = \sqrt{3}\dot{U}_{\text{A}}e^{j30} \quad \dot{U}_{\text{BC}} = \sqrt{3}\dot{U}_{\text{B}}e^{j30}$$

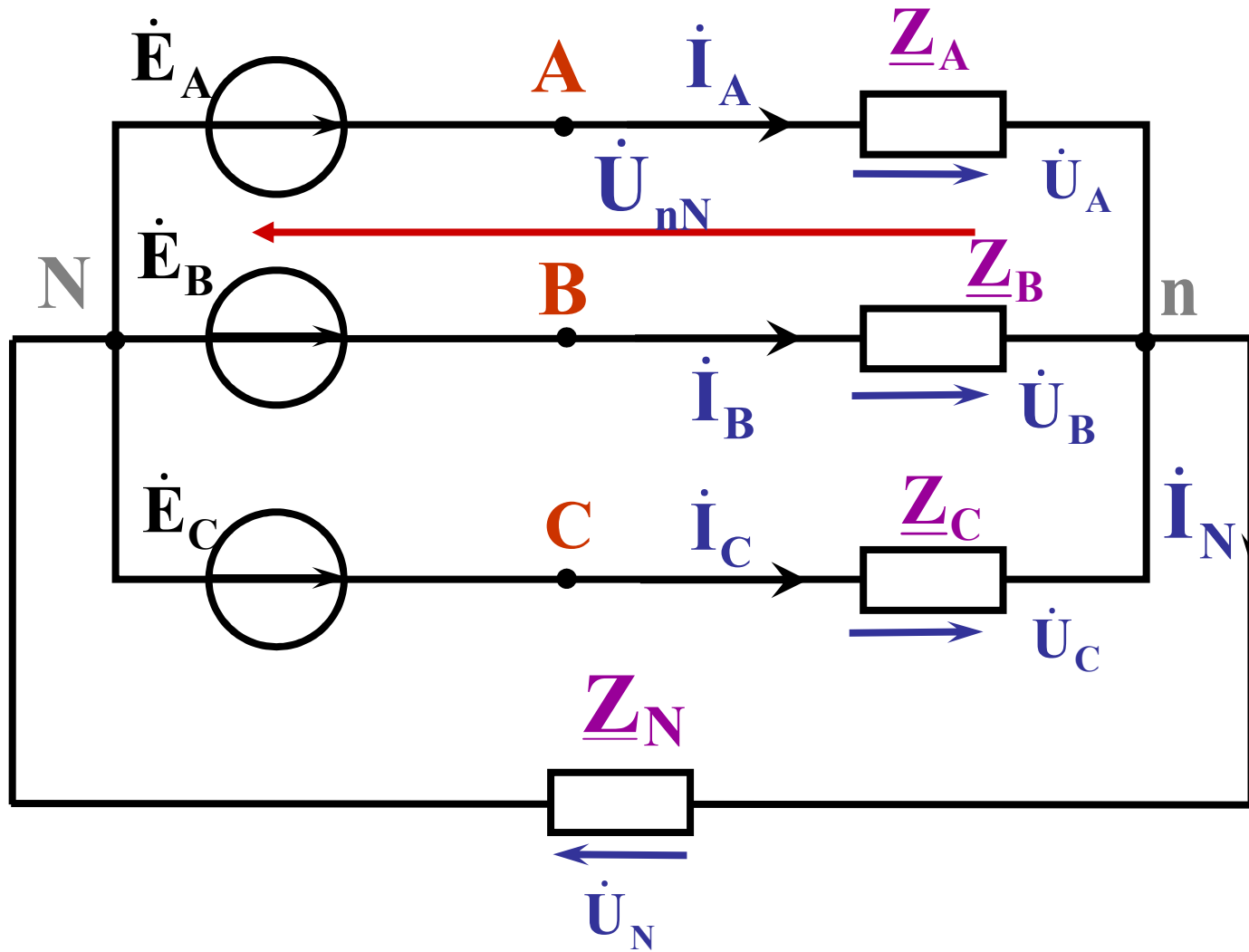
$$\dot{U}_{\text{CA}} = \sqrt{3}\dot{U}_{\text{C}}e^{j30}$$

$$\dot{U}_{\text{CA}} = \dot{U}_{\text{AB}}e^{j120} \quad \dot{U}_{\text{BC}} = \dot{U}_{\text{AB}}e^{-j120}$$



$$\dot{E}_A = E e^{j\alpha}$$

2. Несимметричный режим ($\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$)



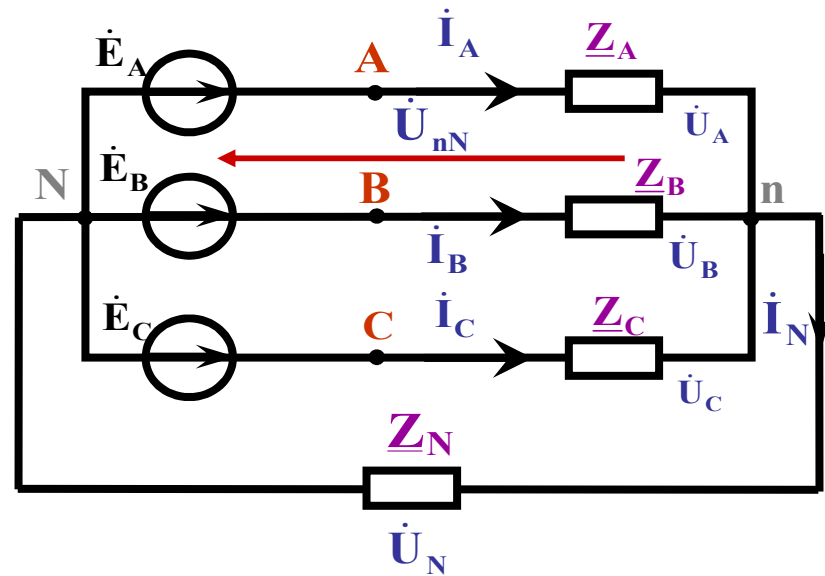
По методу двух узлов

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{E}_A / \underline{Z}_A + \dot{E}_B / \underline{Z}_B + \dot{E}_C / \underline{Z}_C}{1 / \underline{Z}_A + 1 / \underline{Z}_B + 1 / \underline{Z}_C + 1 / \underline{Z}_N}$$

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A - U_{nN}}{\underline{Z}_A} = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A}$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B - U_{nN}}{\underline{Z}_B} = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B}$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C - U_{nN}}{\underline{Z}_C} = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C}$$



По первому закону Кирхгофа:

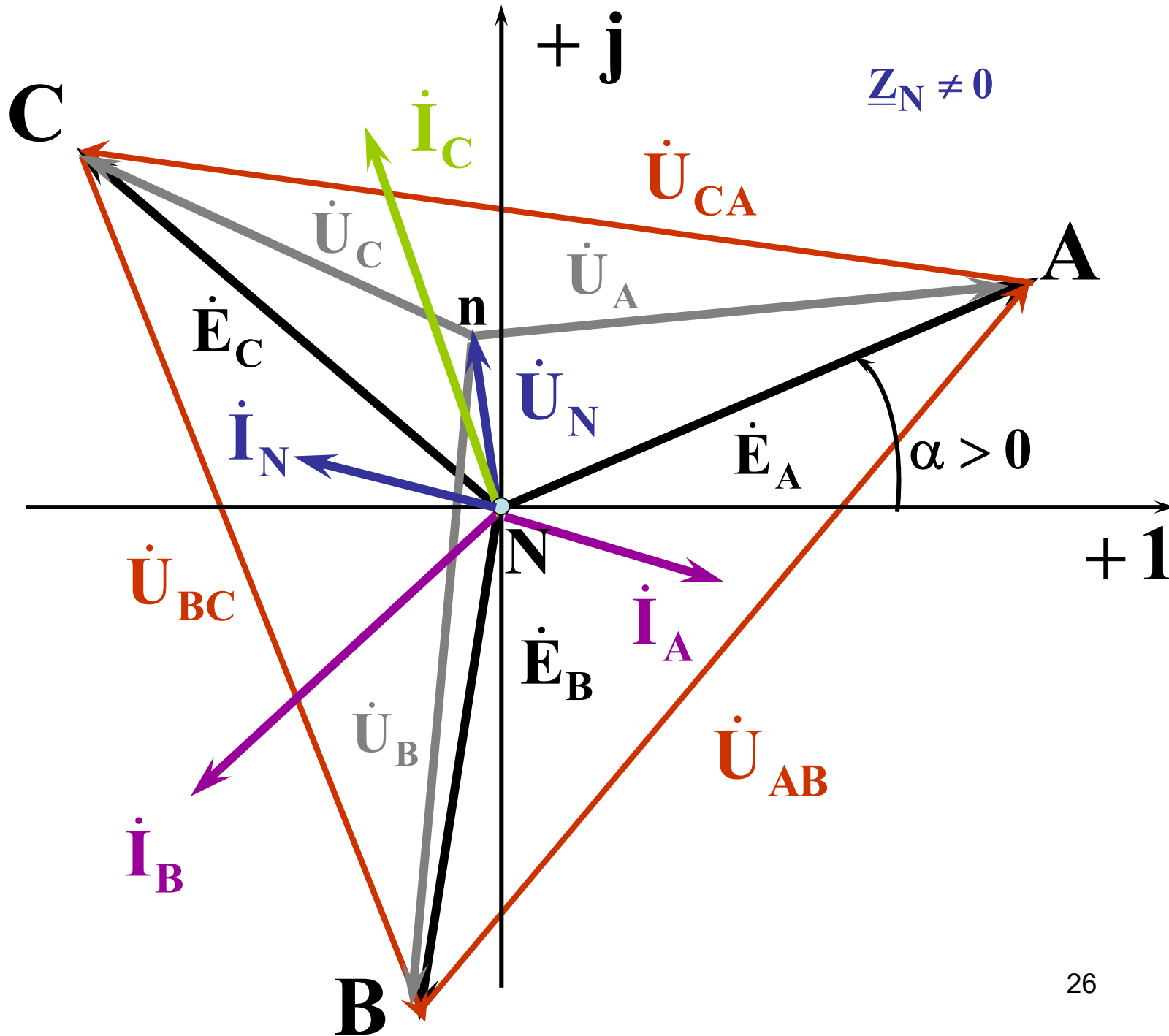
$$\dot{\mathbf{I}}_N = \dot{\mathbf{I}}_A + \dot{\mathbf{I}}_B + \dot{\mathbf{I}}_C$$

Примечание:

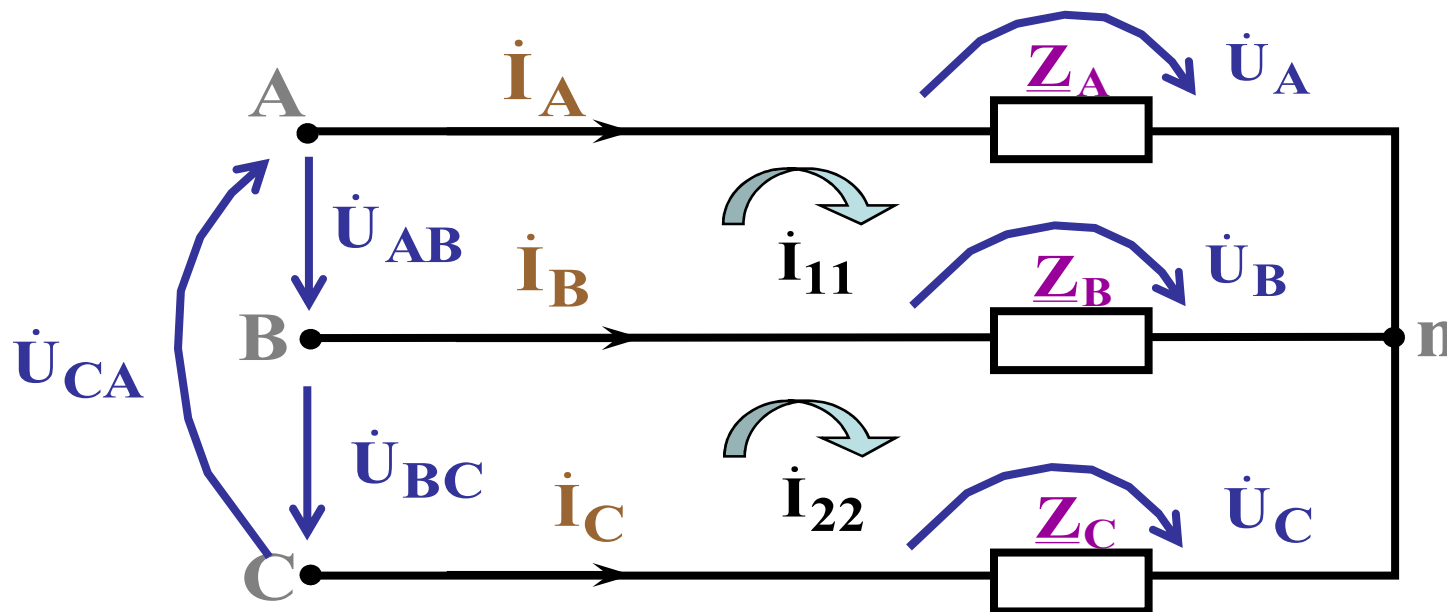
$$\underline{\mathbf{Z}}_N = \mathbf{0} \quad \text{тогда} \quad \dot{U}_{nN} = \mathbf{0} \quad \text{и}$$

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A; \quad \dot{U}_B = \dot{E}_B; \quad \dot{U}_C = \dot{E}_C$$

Нулевой провод выравнивает величины фазных напряжений нагрузки, что используется в бытовых электрических сетях

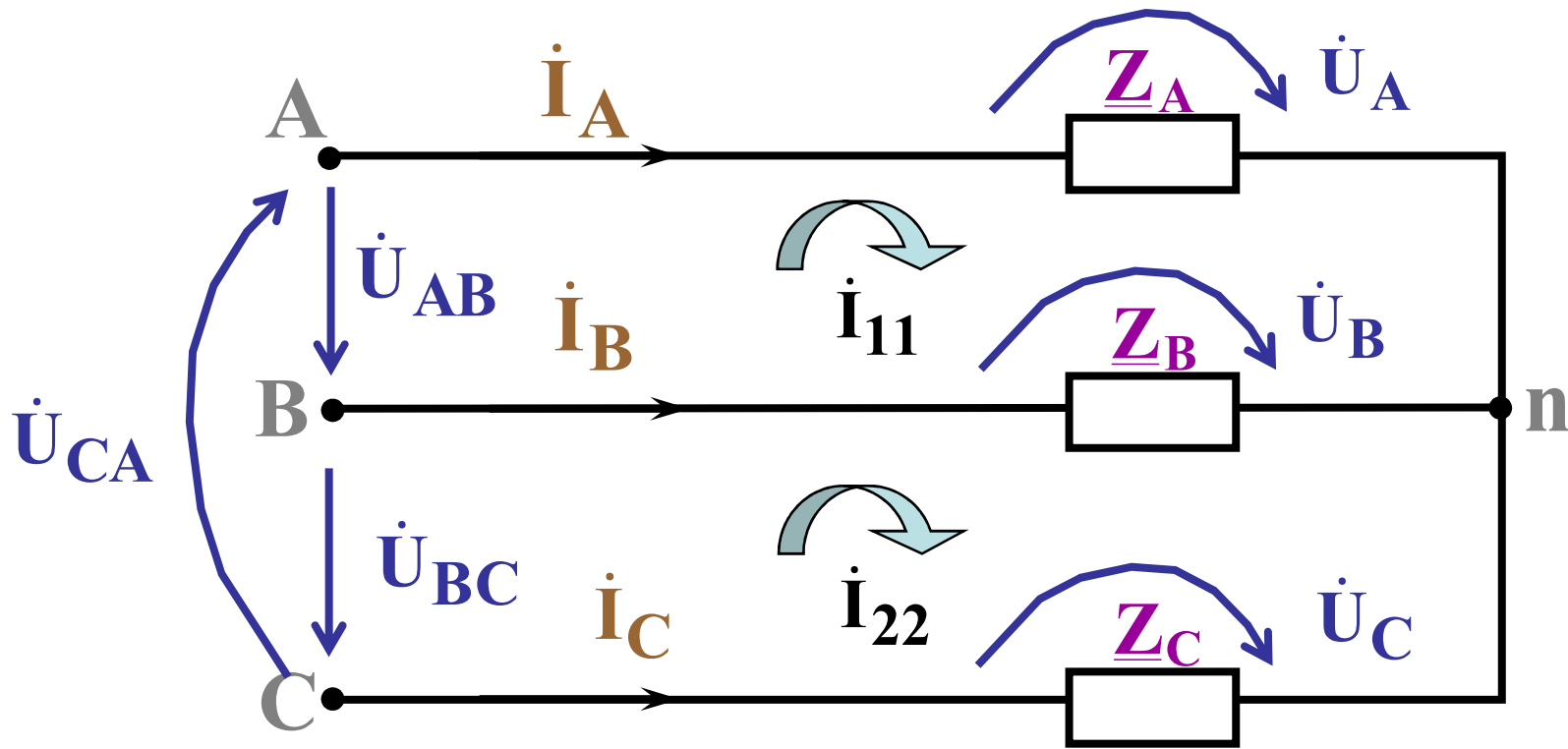


Соединение несимметричной нагрузки звездой без нулевого провода при заданных линейных напряжениях



По методу контурных токов:

$$\begin{cases} \dot{i}_{11}(\underline{Z}_A + \underline{Z}_B) - \dot{i}_{22}\underline{Z}_B = \dot{U}_{AB} \\ \dot{i}_{22}(\underline{Z}_B + \underline{Z}_C) - \dot{i}_{11}\underline{Z}_B = \dot{U}_{BC} \end{cases}$$



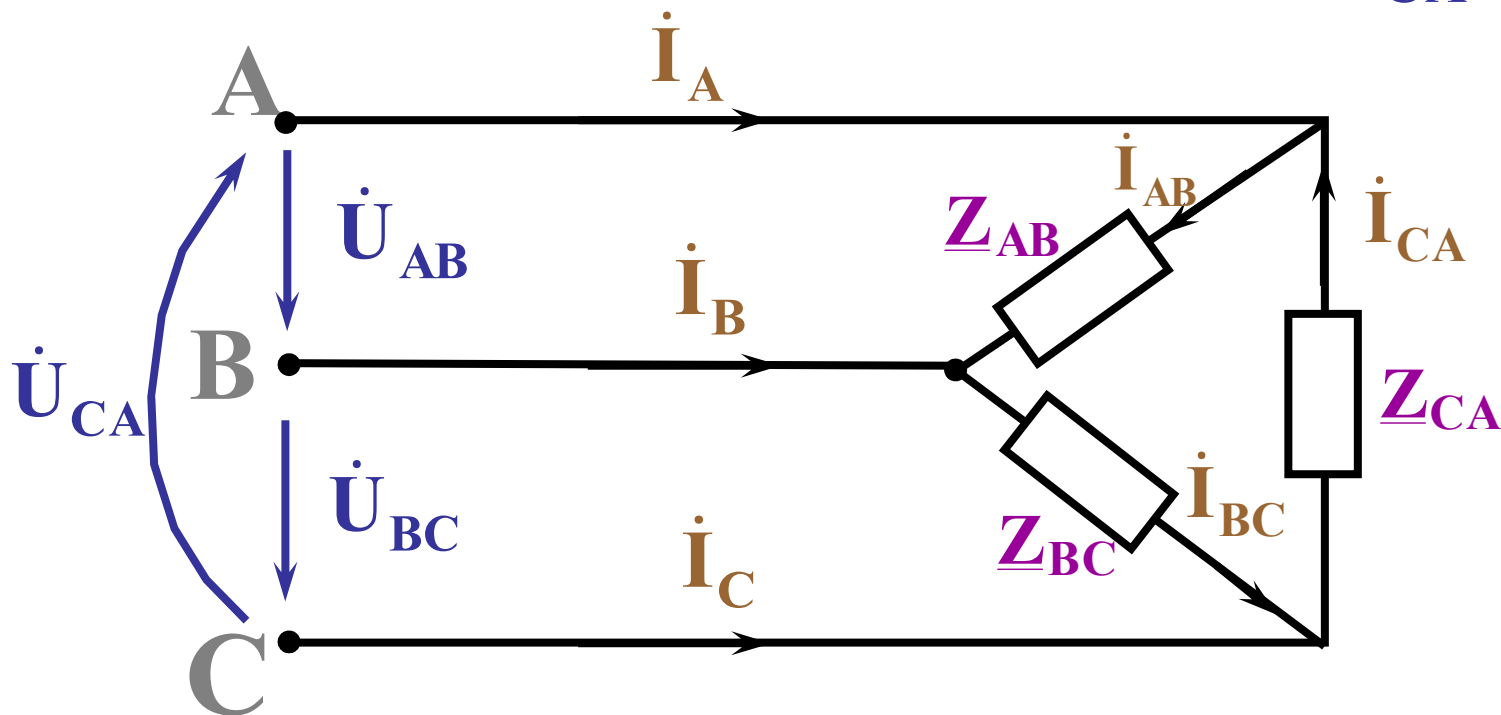
$$\dot{I}_A = \dot{I}_{11}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{22} - \dot{I}_{11}; \quad \dot{I}_C = -\dot{I}_{22}$$

$$\dot{U}_A = \underline{Z}_A \dot{I}_A; \quad \dot{U}_B = \underline{Z}_B \dot{I}_B; \quad \dot{U}_C = \underline{Z}_C \dot{I}_C$$

Соединение несимметричной нагрузки треугольником

По закону Ома:

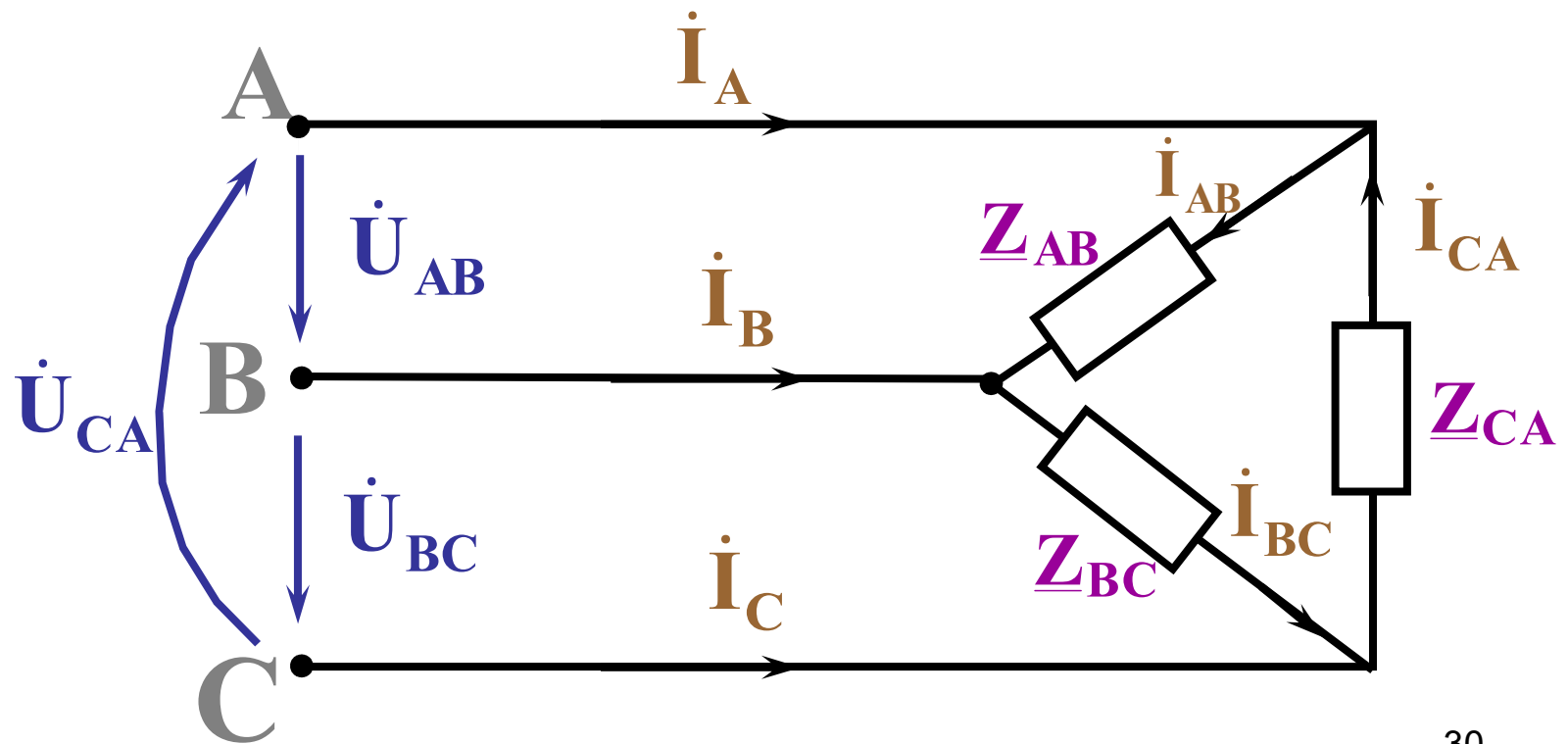
$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}} \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}} \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}$$



По первому закону Кирхгофа:

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

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$$



Если нагрузка симметричная, то расчет
можно вести на одну фазу

$$\dot{I}_{AB} = \dot{U}_{AB} / \underline{Z} \quad \dot{I}_{BC} = \dot{I}_{AB} e^{-j120}$$
$$\dot{I}_{CA} = \dot{I}_{AB} e^{j120}$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} \quad \dot{I}_B = \dot{I}_A e^{-j120}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_A e^{j120}$$

$$\dot{I}_L = \sqrt{3} \dot{I}_\Phi e^{-j30}$$

Мощность в трехфазных цепях

Активная мощность симметричного трехфазного приемника

$$\begin{aligned} P_{\Pi} &= 3U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cos \varphi = \\ &= 3 \cdot I_{\Phi}^2 \cdot [\operatorname{Re}(\underline{Z})], \text{ (Вт)} \end{aligned}$$

Реактивная мощность симметричного трехфазного приемника

$$\begin{aligned} Q_{\Pi} &= 3U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin \varphi = \\ &= 3 \cdot I_{\Phi}^2 \cdot [\operatorname{Im}(\underline{Z})], \text{ (вар)} \end{aligned}$$

Полная мощность

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

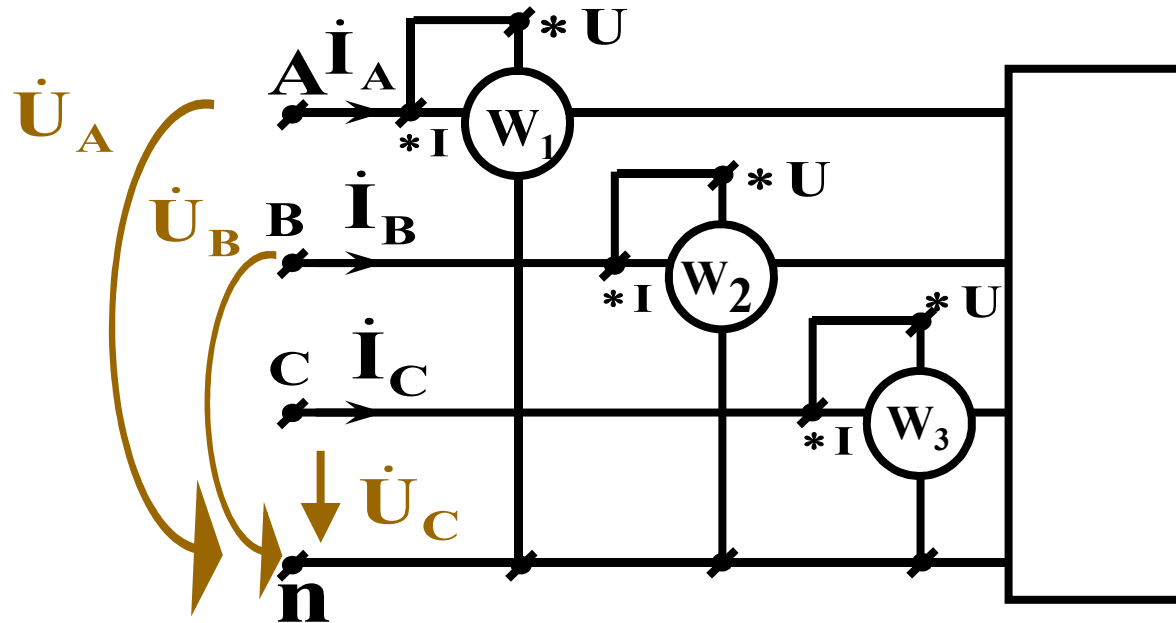
Комплексная мощность источников

$$\begin{aligned}\dot{S}_{И} &= \dot{E}_A I_A^* + \dot{E}_B I_B^* + \dot{E}_C I_C^* = \\ &= \dot{U}_{AC} I_A^* + \dot{U}_{BC} I_B^* = P_{И} + jQ_{И}\end{aligned}$$

В несимметричном режиме мощность
приемников

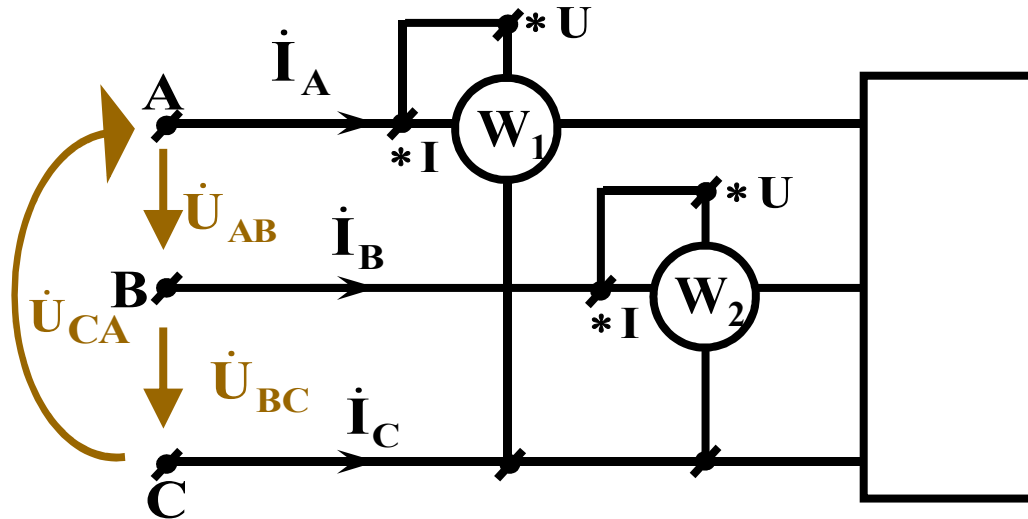
$$P_{П} = \sum_k I_k^2 R_k \quad Q_{П} = \sum_i I_i^2 X_{Li} - \sum_k I_k^2 X_{Ck}$$

1. Измерение суммарной активной мощности трехфазной цепи с нулевым проводом



$$\begin{aligned}
 P &= P_A + P_B + P_C = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} = \\
 &= U_A I_A \cos(\dot{U}_A \hat{\dot{i}}_A) + U_B I_B \cos(\dot{U}_B \hat{\dot{i}}_B) + U_C I_C \cos(\dot{U}_C \hat{\dot{i}}_C)
 \end{aligned}$$

2. без нулевого провода



$$\begin{aligned}
 P = P_{w_1} + P_{w_2} = & U_{AC} I_A \cos(\dot{U}_{AC} \overset{\wedge}{\dot{I}}_A) + \\
 & + U_{BC} I_B \cos(\dot{U}_{BC} \overset{\wedge}{\dot{I}}_B), \text{ Вт} \quad \dot{U}_{AC} = -\dot{U}_{CA}
 \end{aligned}$$