



ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Трифазні система ЕРС

Багатофазне електричне коло – це сукупність однофазних кіл, у яких діють кілька ЕРС однакової частоти, зсунутих по фазі на певний кут. Окремі електричні кола, що входять до багатофазного кола, називають фазами.

Найбільшого поширення набули трифазні електричні кола.

У порівнянні з однофазною трифазна система електричних кіл має важливі техніко-економічні переваги:

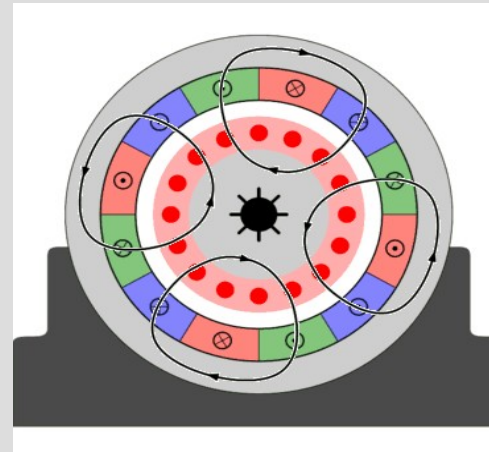
1. Трифазні генератори, електродвигуни та трансформатори на ту ж потужність компактніше, більш легкі (вимагають менше метала – міді та сталі) та дешевше у виготовленні.
2. Від одного джерела електроенергії в трифазній мережі можна отримати для споживачів дві напруги (лінійну та фазну), які відрізняються в $\sqrt{3}$ раз.
3. Значно (до 30%) економляться кольорові метали (мідь, алюміній) та залізо в дротах електричних мереж.
4. Трифазною системою струмів легко утворюється обертове магнітне поле, яке використовується в найбільш простих, дешевих та надійних в роботі трифазних асинхронних електродвигунах та в інших електричних машинах.



Трифазний трансформатор

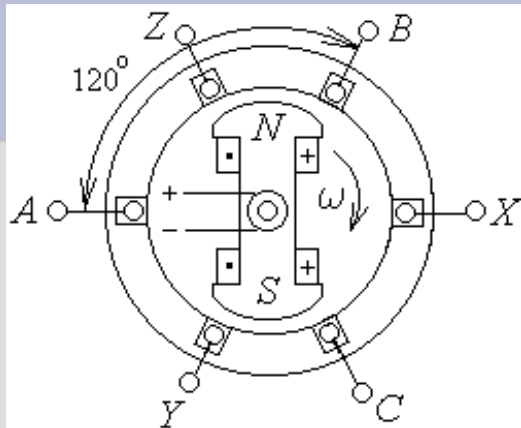


Трифазна двоколока лінія електропередач



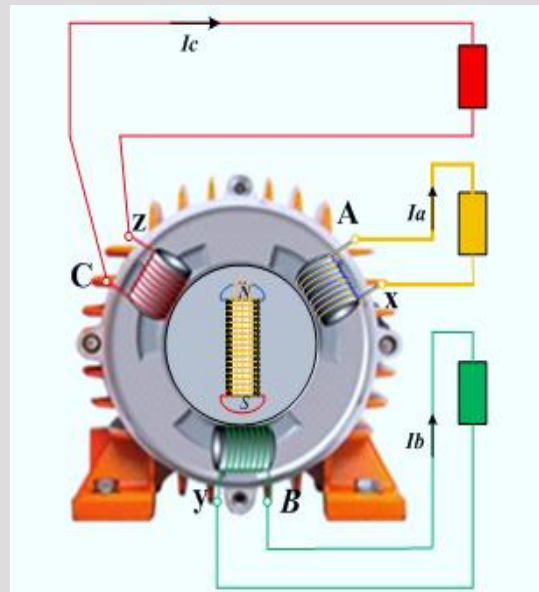
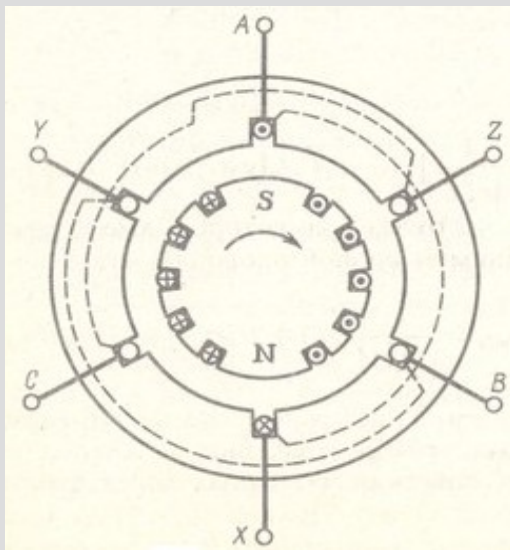
Трифазний асинхронний двигуна

Принципи отримання та форми подання трифазної системи ЕРС



Статор і ротор виготовлені з листів електротехнічної сталі. На статорі розташовані три однакові мідні обмотки – фази: $A-X$, $B-Y$, $C-Z$, вісі яких зсунуті у просторі на кут 120° . Активні частини обмоток закріплені в пазах сталевого осердя, а їх торцеві частини відгинаються, щоб вони не заважали вільному обертанню ротора.

При обертанні ротора по годинниковій стрілці магнітні силові лінії, які замикаються крізь статор, перетинають активні ділянки фазних котушок статора і індукують в них синусоїдальні ЕРС, що зсунуті друг відносно друга по фазі на одну третину періоду, тобто на 120° .

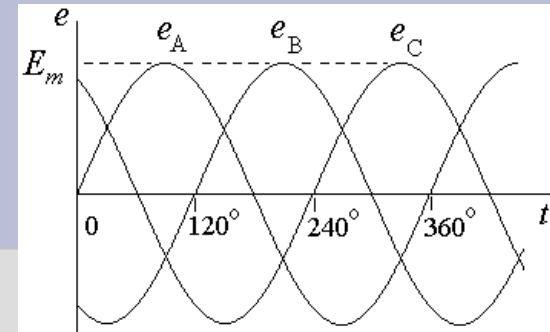


Візьмемо за момент відліку часу такий момент, коли ЕРС у фазі А дорівнює нулю, тобто:

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

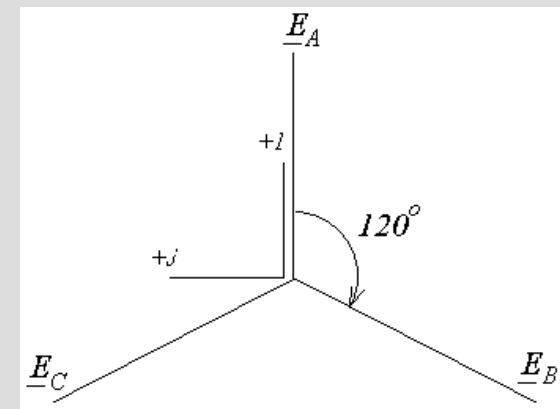


Внаслідок симетрії амплітудні значення ЕРС усіх трьох фаз рівні і симетрична трифазна система ЕРС генератора може бути записана в комплексній формі для діючих значень:

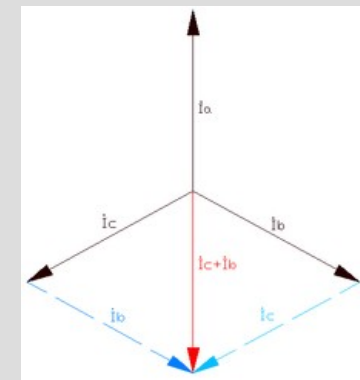
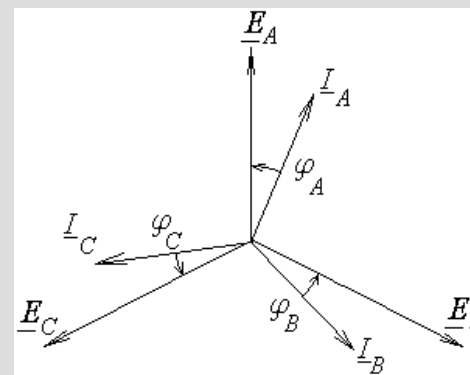
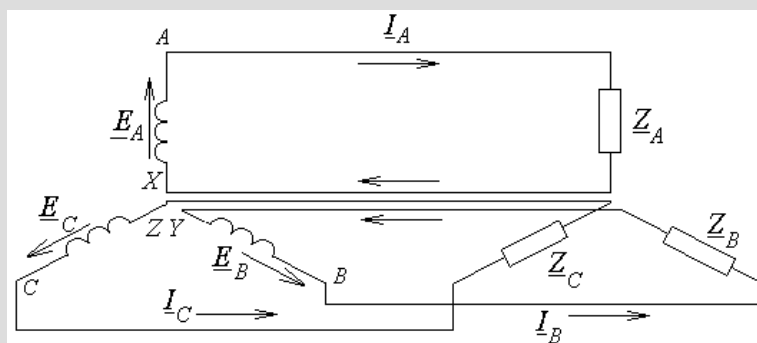
$$\underline{E}_A = E e^{j0^\circ}; \quad \underline{E}_B = E e^{-j120^\circ}; \quad \underline{E}_C = E e^{j120^\circ} = \underline{E}_C = E e^{-j240^\circ};$$

Система ЕРС, в якій ЕРС окремих фаз рівні за значеннями і зсунуті відносно один одного на однаковий кут (120° у трифазному колі), називають *симетричною*.

$$\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0 \quad e_A + e_B + e_C = 0$$



Електрична незв'язана трифазна система



Навантаження називають *симетричним*, якщо комплексні опори фаз споживачів однакові

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

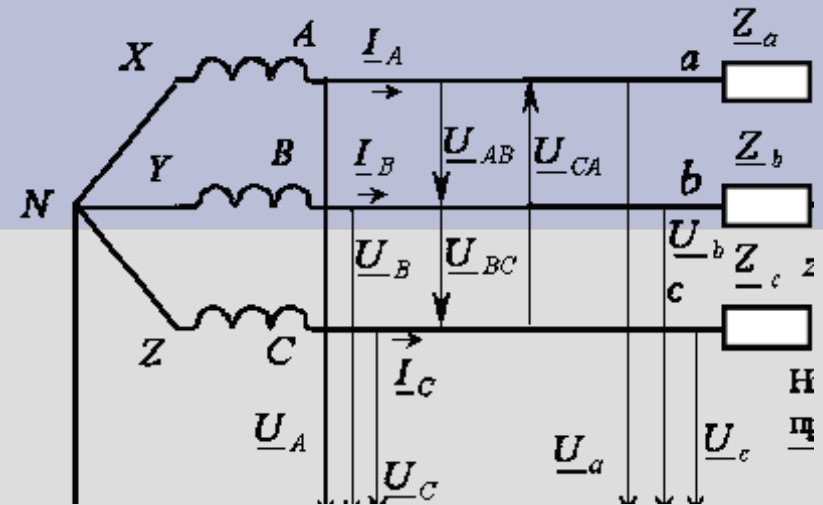
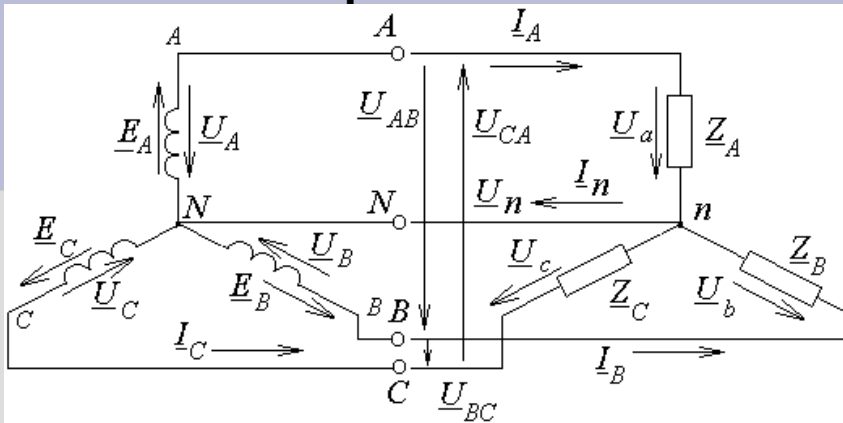
$$\underline{Z} = Z e^{j\varphi}$$

$$Z_A = Z_B = Z_C$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$$

$$I_A = I_B = I_C$$

З'єднання фаз генератора і приймачів зіркою



Фазна напруга – це напруга між початком і кінцем фази. На лінії – це напруга між лінійним і нейтральним провідниками: U_A, U_B, U_C . Це фазні напруги джерела. На джерелі фазні напруги приймають рівними ЕРС.

Лінійна напруга – це напруга між фазами або лінійними провідниками: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} .

Струми у фазах називають фазними. Струми у лінійних провідниках називають лінійними: I_A, I_B, I_C .

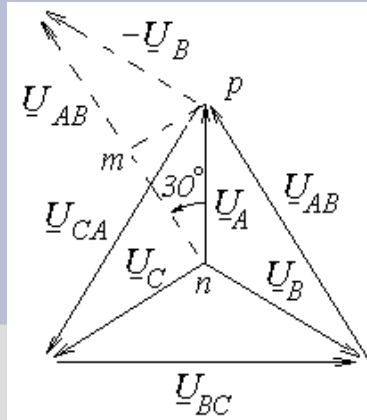
$$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$$

Так як струм у нейтральному проводі I_n завжди набагато менший за струми I_A, I_B, I_C в лінійних проводах чотирьохпровідної системи, то його поперечний перетин вибирають у два – три рази меншим, ніж у лінійних проводах.

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A$$

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

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



Система напруг джерела завжди симетрична (з трикутника mpn):

$$\frac{U_{\dot{\epsilon}}}{2} = U_{\dot{o}} \cos 30^\circ = U_{\dot{o}} \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$U_{\dot{\epsilon}} = \sqrt{3} \cdot U_{\dot{o}}$$

$$\frac{U_{\dot{\epsilon}}}{U_{\dot{o}}} = \sqrt{3}; \quad \frac{220}{127}; \quad \frac{380}{220}; \quad \frac{660}{380} \hat{A}$$

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C \quad \underline{I}_N = \frac{\underline{U}_N}{\underline{Z}_N} = \underline{U}_N \underline{Y}_N$$

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{Z e^{j\varphi}} = \frac{1}{Z} e^{-j\varphi} = Y e^{-j\varphi}$$

$$\underline{Y}_n = \frac{1}{\underline{Z}_N} \quad \text{— провідність нейтрального провідника}$$

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N$$

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \underline{U}_a \underline{Y}_a$$

$$\underline{I}_A = (\underline{U}_A - \underline{U}_N) \underline{Y}_a$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N$$

$$\underline{I}_B = (\underline{U}_B - \underline{U}_N) \underline{Y}_b$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N$$

$$\underline{I}_C = (\underline{U}_C - \underline{U}_N) \underline{Y}_c$$

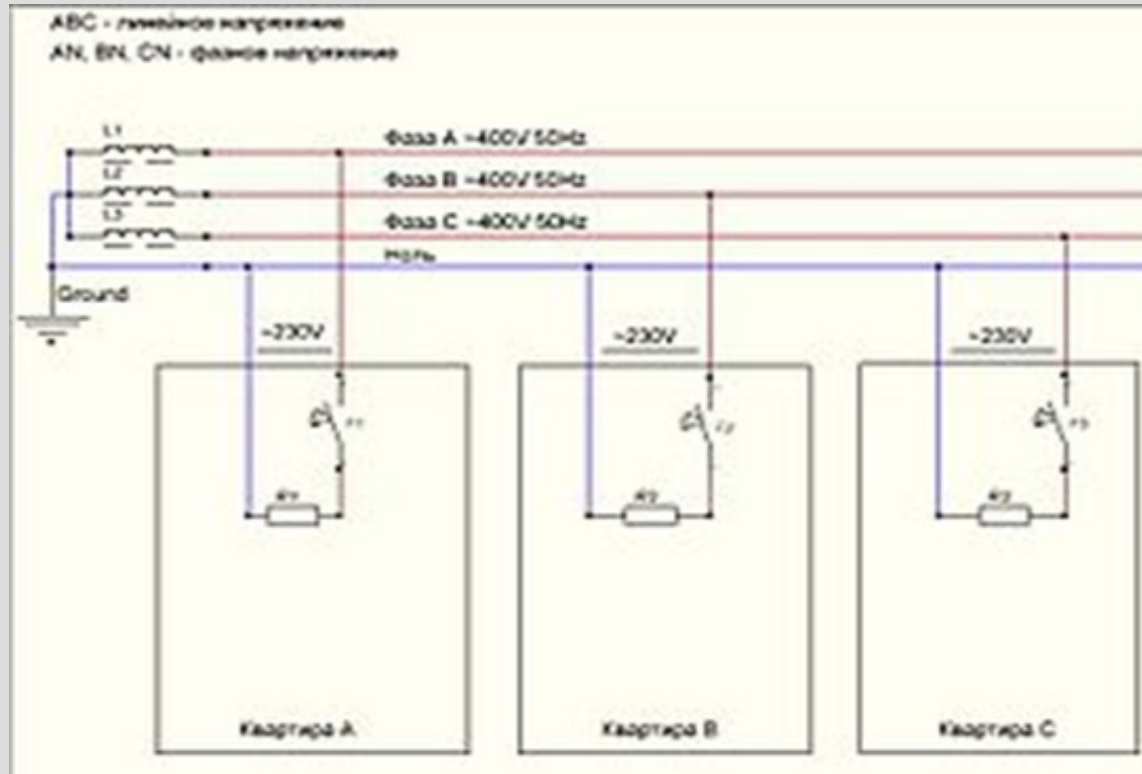
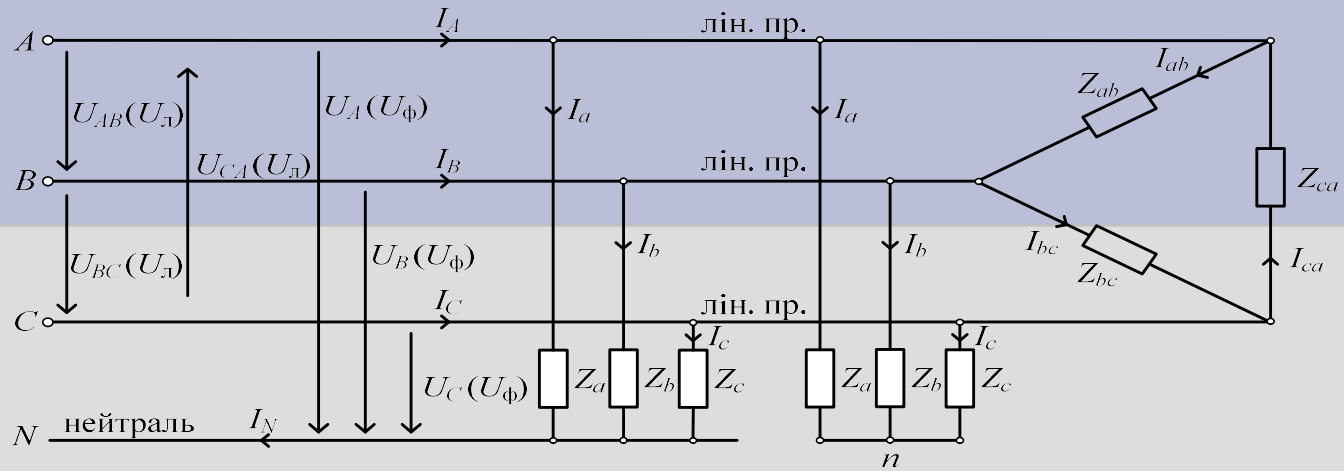
$$\underline{U}_N \underline{Y}_N = (\underline{U}_A - \underline{U}_N) \underline{Y}_a + (\underline{U}_B - \underline{U}_N) \underline{Y}_b + (\underline{U}_C - \underline{U}_N) \underline{Y}_c$$

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N} \quad \text{— напруга нейтралі}$$

За відсутністю нейтрального провідника $Z_N = \infty \Rightarrow \underline{Y} \rightarrow 0$

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}$$

Підключення споживачів до трифазної лінії електропере



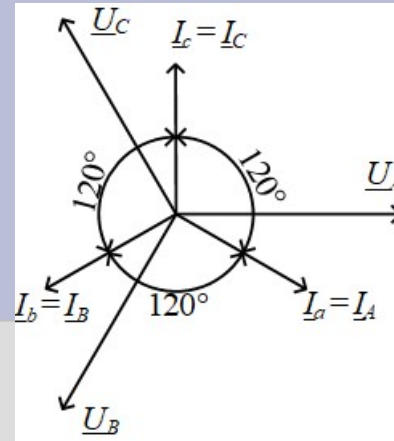
1. Якщо навантаження симетричне $\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c = \underline{Y}$
 то напруга на нейтралі дорівнює нулю $\underline{U}_N = 0$

$$\underline{I}_N = \underline{U}_N \underline{Y}_N = 0 \quad \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$$

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C$$

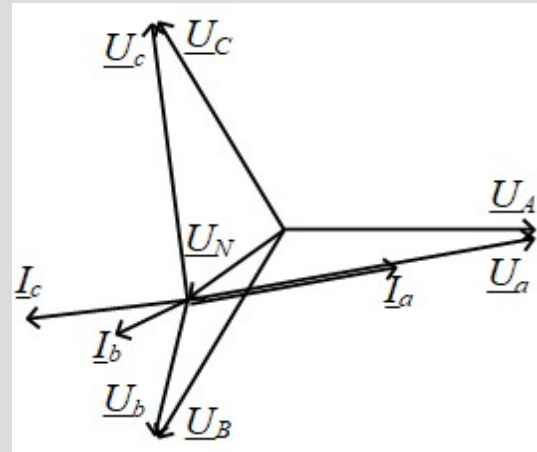


2. При несиметричному навантаженні і за відсутністю нейтрального провідника, тобто

$$\underline{Y}_a \neq \underline{Y}_b \neq \underline{Y}_c \quad \underline{U}_N \neq 0 \quad \underline{U}_a \neq \underline{U}_A \quad \underline{U}_b \neq \underline{U}_B \quad \underline{U}_c \neq \underline{U}_C$$

Отже відбувається перекид фазних напруг споживачів при умові несиметричного навантаження і за відсутності нейтрального провідника.

Таким чином, відсутність або обрив нейтрального проводу в трифазному колі при несиметричному навантаженні, з'єднаному зіркою, являє собою аварійний режим. Він призводить до небажаних явищ: різкій несиметрії фазних напруг і струмів навантаження, тобто до порушення нормального режиму роботи приймачів. Тому в нейтральний провід чотирьохпровідної системи забороняється ставити вимикачі та запобіжники.



Реле напруги – це прилад, який контролює рівень напруги в мережі і не допускає перевантаження працюючих електроприладів при надто високій або надто низькій напрузі

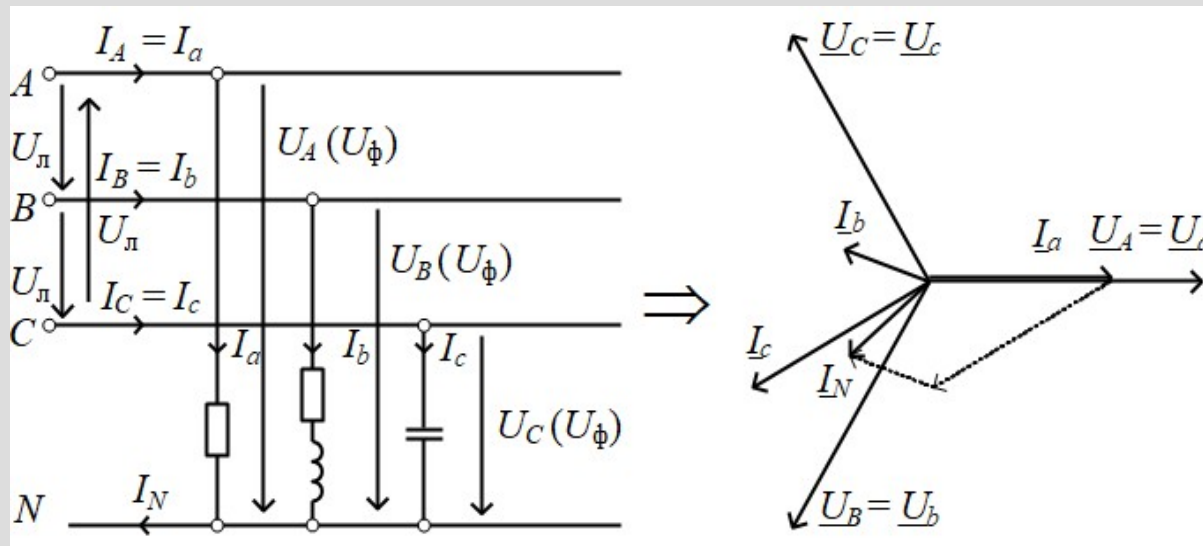


3. При **несиметричному навантаженні і наявності нейтрального провідника** зберігається рівність фазних напруг споживачів і джерела, оскільки $Z_N \approx 0 \quad \underline{U}_N = \underline{I}_N Z_N = 0$

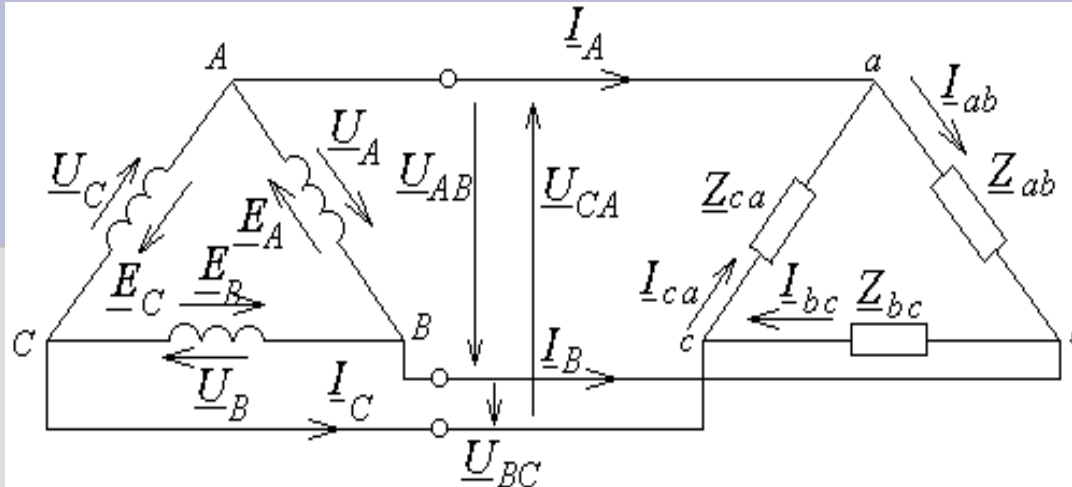
$$\underline{U}_a = \underline{U}_A \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C$$

Нульовий провідник забезпечує рівність фазних напруг джерела і споживачів при несиметричному навантаженні.

В чотирьохпровідній системі напруги навантаження практично симетричні, тому ця мережа, наприклад система 380/220 В застосовується для живлення освітлювального або змішаного (освітлювального та силового) несиметричного навантаження. При повному розвантаженні однієї або двох фаз і навіть в аварійних режимах (при обриві одного або двох лінійних проводів) залишені під напругою однофазні приймачі будуть працювати нормально.



З'єднання фаз генератора і приймачів трикутником



Фазні струми за законом Ома можуть бути визначені через фазні напруги

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}} \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}} \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_A + \underline{I}_{ca} &= \underline{I}_{ab} & \underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} \\ \underline{I}_B + \underline{I}_{bc} &= \underline{I}_{ab} & \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} \\ \underline{I}_C + \underline{I}_{ca} &= \underline{I}_{bc} & \underline{I}_C &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} \end{aligned}$$

Якщо навантаження симетричне, тобто їх повні комплексні опори рівні

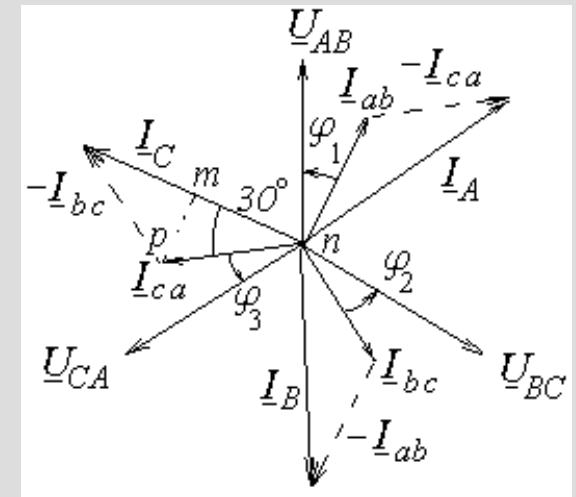
$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$$

$$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ca} \quad \underline{I}_A = \underline{I}_B = \underline{I}_C$$

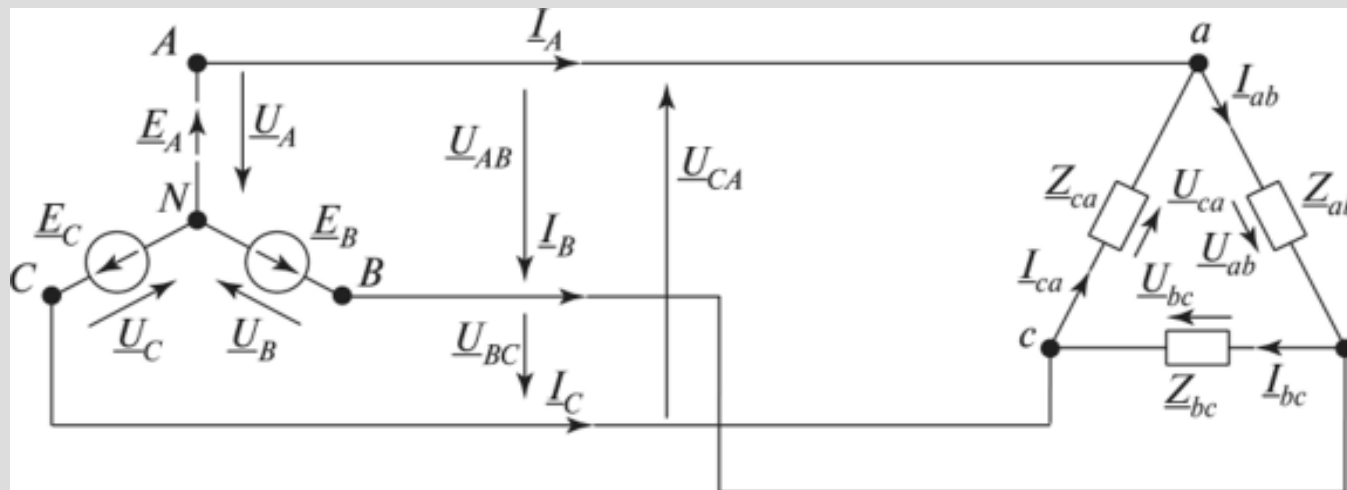
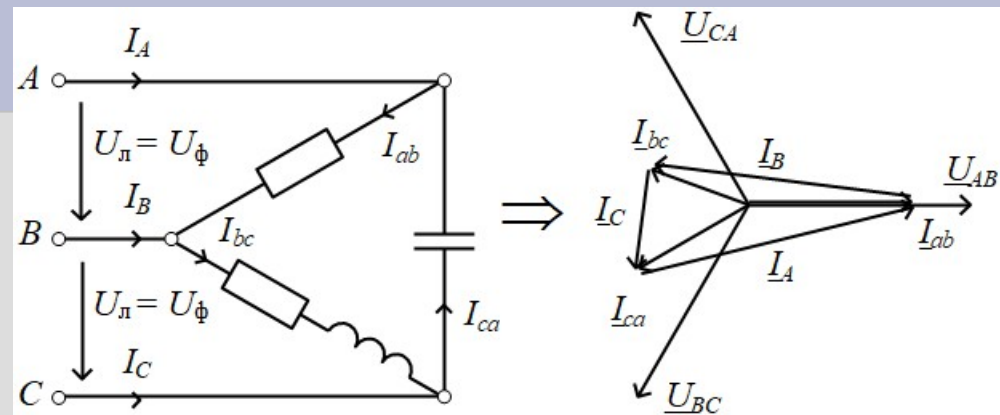
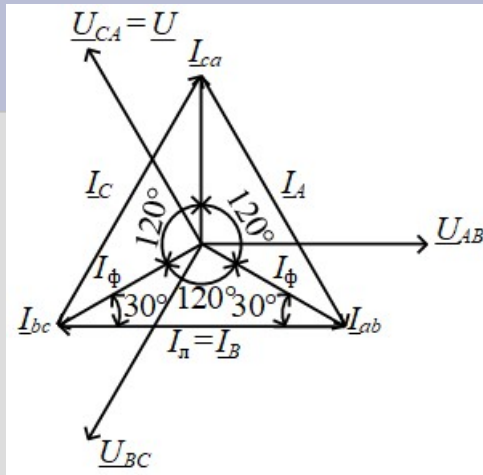
З трикутника *pnm* $\frac{I_{\dot{e}}}{2} = I_{\dot{o}} \cos 30^\circ = I_{\dot{o}} \frac{\sqrt{3}}{2} \quad I_{\dot{e}} = \sqrt{3} I_{\dot{o}}$

Електроенергія від генератора до приймачів передається трьома лінійними проводами.

$$U_n = U_\phi$$



Симетричне (а) і несиметричне (б) навантаження при з'єднанні трикутником



Спосіб з'єднання фаз споживача не залежить від способу з'єднання фаз джерела.

Потужність трифазного електричного кола

У загальному випадку потужність трифазного кола дорівнює сумі потужностей, що споживає кожна фаза:

$$P = P_A + P_B + P_C$$

При симетричному навантаженні фазні напруги, струми та $\cos \varphi$, а відповідно й фазні потужності P_ϕ рівні поміж собою

$$P = 3P_\phi$$

Оскільки фазна потужність $P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$ то потужність всього трифазного кола дорівнює

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$$

При з'єднанні зіркою: $U_\phi = \frac{U_\varepsilon}{\sqrt{3}}$; $I_\varepsilon = I_\phi$

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3 \frac{U_\varepsilon}{\sqrt{3}} I_\varepsilon \cos \varphi = \sqrt{3} U_\varepsilon I_\varepsilon \cos \varphi$$

При з'єднанні трикутником: $I_\phi = \frac{I_\varepsilon}{\sqrt{3}}$; $U_\varepsilon = U_\phi$

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3 \frac{I_\varepsilon}{\sqrt{3}} U_\varepsilon \cos \varphi = \sqrt{3} U_\varepsilon I_\varepsilon \cos \varphi$$

Тому незалежно від способу з'єднання активні потужності електричного кола при симетричному навантаженні дорівнюють

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3} U_\varepsilon I_\varepsilon \cos \varphi$$

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} U_\varepsilon I_\varepsilon \sin \varphi$$

$$S = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3} U_\varepsilon I_\varepsilon$$

Thanks for your attention