ТЕМА 3. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

3.1. Галузі застосування трифазного змінного струму. Найпростіший трифазний генератор. Система трьох ЕРС

Однофазні генератори змінної напруги, однофазні лінії електропередачі та однофазні двигуни є економічно невигідними порівняно з такими самими трифазними. Тому в електроенергетиці сьогодні найбільше застосовуються трифазні системи (генератори, лінії електропередач, двигуни та інші приймачі). Багатофазним називають електричне коло, в якому міститься **m** – джерел живлення, що працюють з однаковою частотою, але **ЕРС** яких зміщені за фазою одна відносно одної на кут $\varphi = 3600/m$.

Трифазним електричним колом називають сукупність трьох електричних кіл з трьома синусоїдними ЕРС однакової амплітуди і частоти, що зсунуті між собою за фазою на 120^0.

Фазами називають незалежні електричні кола з незалежними джерелами живлення, що об'єднуються в одну систему.

Фазами також називаються незалежні джерела живлення кожного кола, що об'єднуються.

Фазами ще називаються приймачі електричної енергії в кожному колі, що об'єднуються.

За визначенням трифазної системи миттєві значення фазних ***ЕРС*** є:

$$e_A = E_m \sin\omega t, \tag{3.1}$$

$$e_A = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3), \tag{3.2}$$

$$e_A = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3), \tag{3.3}$$

де початкова фаза ***ЕРС*** e_A, $\varphi_A = 0$.

Три однакові за частотою і амплітудою, зсунуті за фазою на 120^0 ***ЕРС*** генеруються одним джерелом енергії - **трифазним генератором**. Трифазний генератор складається з статора (нерухомої частини генератора), ротора (обертової частини) (рис.3.1). В пазах статора розташовані три обмотки, осі яких

зсунуті (розташовані) просторово одна відносно одної на кут $\mathbf{120^0}$ (буквами ***A, B, C*** позначені початки фазних обмоток генератора, а ***X, Y, Z*** – кінці). Ротор використовується для створення магнітного поля. В якості ротора застосовують магніт або електромагніт. Вал ротора зв'язаний з первинним двигуном, який обертає його. При обертанні ротора в фазних обмотках статора індуктуються синусоїдальні фазні ***EPC*** (e_A , e_B , e_C).

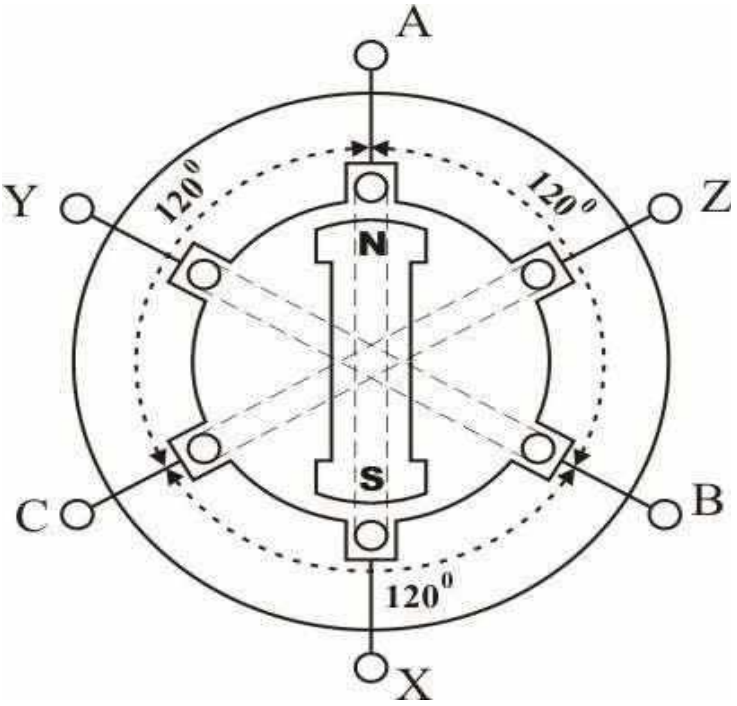


Рисунок 3.1 - Трифазний генератор

На рис.3.2 приведені миттєві значення ***EPC*** трифазної системи e_A, e_B, e_C. Кожна ***EPC*** зсунута за фазою відносно двох інших на 120^0.

Порядок, в якому ***EPC*** проходять через однакові значення, називається **порядком чергування фаз.**

Послідовність чергування фаз ***A - B – C*** називається прямою послідовністю чергування фаз.

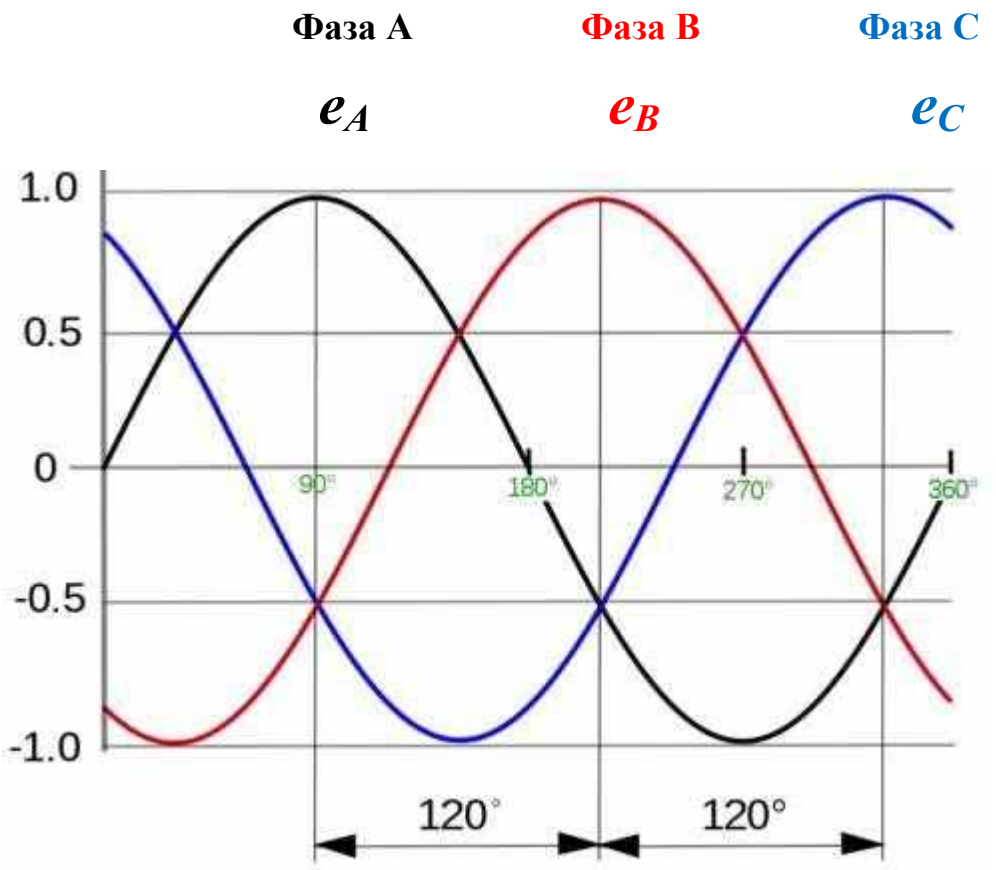


Рисунок 3.2 - Миттєві значення ЕРС трифазної системи

3.2. З'єднання обмоток генератора зіркою і трикутником

Існують два способи сполучення окремих фаз (обмоток) трифазного генератора – з'єднання **зіркою** (**Y**) і **трикутником** (Δ).

Розглянемо основні способи з'єднання.

З'єднання обмоток генератора «зіркою». Розглянемо рис.3.3.

При з'єднанні обмоток трифазного генератора «зіркою» кінці кожної з трьох обмоток з'єднуються між собою, створюючи так звану **нульову точку** або **нейтраль генератора**, а початки обмоток підключаються до трьох проводів, що називаються **«фазними».** Нульові точки генератора і споживача будемо позначати, відповідно, **«0»** й **«0^1»** .

Умовно позитивний напрям ***ЕРС*** приймають від кінця обмотки до її початку (рис.3.3).

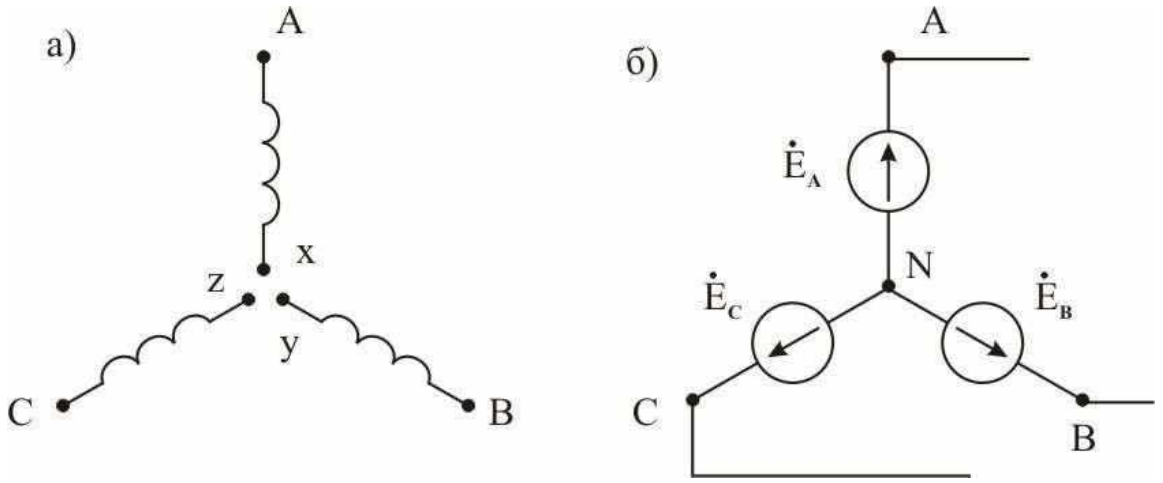


Рисунок 3.3 - З'єднання обмоток генератора «зіркою.

Фазний провід - провід, що підводить електричну енергію від початку обмотки генератора до споживача. Фазні проводи позначаються **L1, L2, L3.** Обмотки генератора позначаються великими літерами **A, B, C**, споживача - маленькими літерами **a, b** та **c**. Кінці обмоток генератора позначаються, відповідно, літерами **X, Y**, **Z**, споживача - **x, y, z**.

Нульовий (або нейтральний) провід - провід, що підключається до нульової точки генератора. Нульовий робочий провід позначається літерою **N.** Нульовий провід може бути:

- незаземлений – мережа з ізольованою нейтраллю ;
- заземлений – мережа з заземленою нейтраллю.

Нульовий провідник може бути відсутній – трипровідні системи.

Фазна напруга - напруга між фазним та нульовим проводами. Фазні напруги позначаються літерами U_A , U_B , U_C, а в загальному випадку - $U_Ф$.

Лінійна напруга - напруга між фазними проводами. Позначається літерами U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , а в загальному випадку буквою $U_Л$. Порядок індексів вказує позитивний напрямок напруги у зовнішньому колі. Встановимо співвідношення між лінійними і фазними напругами при з'єднанні обмоток генератора «зіркою». Для цього побудуємо векторну діаграму напруг. Побудову починаємо з відкладення векторів фазних напруг $\vec{U}_A$, $\vec{U}_B$, $\vec{U}_C$ (рис.3.4).

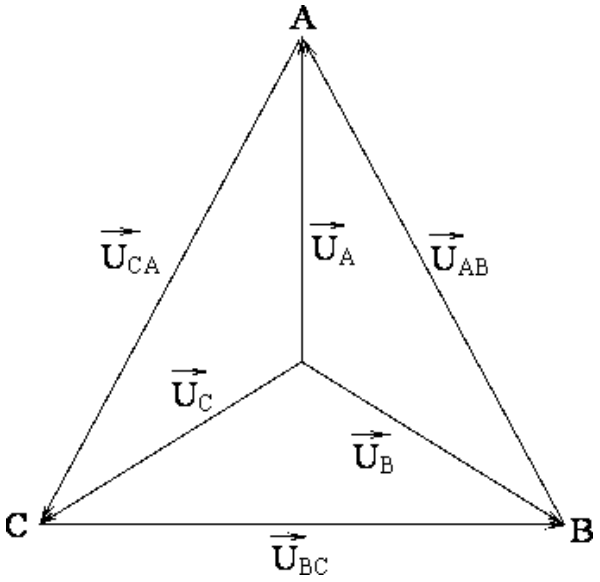


Рисунок 3.4 - Векторна діаграма напруг при з'єднанні обмоток генератора «зіркою»

Як правило, на електростанціях обмотки генераторів з'єднують «зіркою» з заземленою нейтраллю.

З'єднання обмоток трифазного генератора «трикутником».

При з'єднанні обмоток генератора «трикутником» кінець першої обмотки «**X**» з'єднують із початком другої обмотки «**B**», кінець другої обмотки «**Y**»- з початком третьої обмотки «**C**», кінець третьої обмотки «**Z**» - з початком першої обмотки «**A**». При цьому три обмотки створюють замкнуте коло – «**трикутник**» (рис.3.5).

При цьому способі з'єднання обмоток фазні напруги дорівнюють лінійним напругам:

$$\boldsymbol{U_Л = U_Ф}. \qquad (3.4)$$

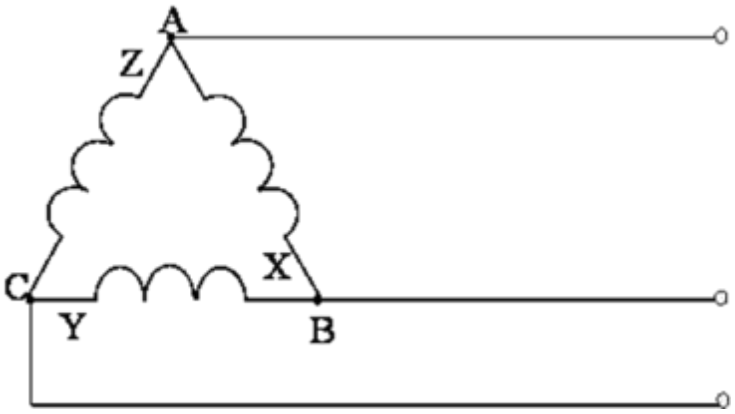


Рисунок 3.5 - З'єднання обмоток генератора «трикутником»

Векторна діаграма має вигляд, зображений на рис.3.6.

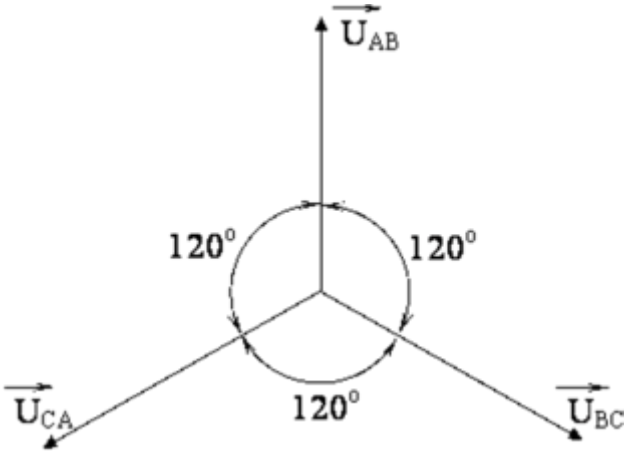


Рисунок 3.6 - Векторна діаграма напруг при з'єднанні обмоток генератора «трикутником»

Сума векторів лінійних напруг утворює замкнутий трикутник, отже:

$$\vec{U}_{AB} + \vec{U}_{BC} + \vec{U}_{CA} = 0 \qquad (3.5)$$

При неправильному вмиканні кінців і початків обмоток рівняння (3.5) не буде виконуватися, і у контурі, складеному з обмоток, буде проходити струм, що перевищує номінальний у два рази, тому що в контурі буде діяти подвійна напруга за дуже малих опорів обмоток, що призведе до виходу з ладу генератора і до створення умов для виникнення пожежонебезпечної ситуації.

Щоб виключити небезпеку появи такого струму, перевіряють відсутність напруги на холостому ході генератора за допомогою вольтметра.

Таким же чином можуть бути з'єднаними між собою споживачі.

3.3. З'єднання фаз джерела й приймача зіркою. Основні поняття. Види навантаження

Розглянемо випадок, коли і обмотки генератора, і три споживача з'єднані за схемою зірка (рис.3.7). Всі кінці фазних обмоток з'єднані в загальний вузол ***N***, який ***називається нейтраллю генератора***. Такий же вузол ***n*** утворюють з'єднання трьох фаз споживача, який називають ***нейтраллю споживача***. Точками ***a, b, c*** позначені фази приймачів (***A, B, C*** – фази джерел).

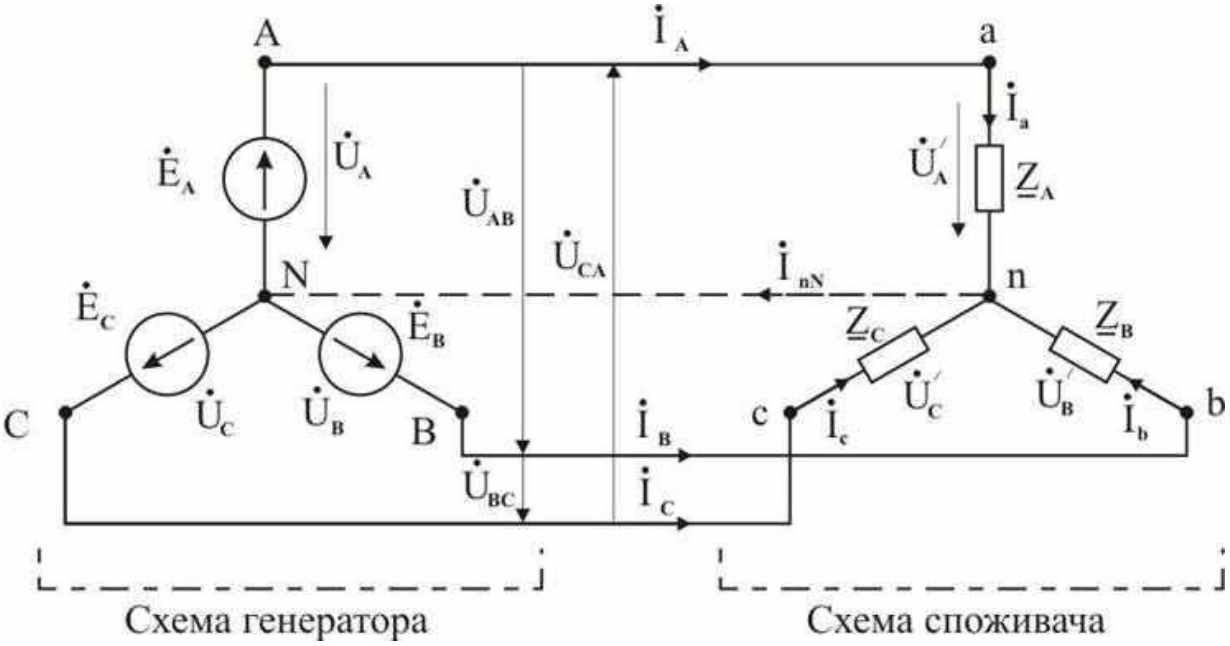


Рисунок 3.7 - З'єднання фаз генератора й споживача зіркою

Кожна фаза трифазного генератора повинна сполучатися з кожною фазою трифазного приймача двома проводами. Але для досягнення економії провідникових матеріалів і зменшення втрат енергії три зворотні проводи, що з'єднують приймачі з фазами генератора, «*зливаються*» в один провід, який називається **нейтральним** (***Nn***). *Таким чином, замість шостипровідної системи одержують чотирьохпровідну.*

Провід, що з'єднує фазу генератора з фазою споживача, називається ***лінійним***, або ***лінією*** (проводи ***Aa, Bв, Cc***); струм у лінійних проводах - ***лінійним струмом*** Iл (I_A, I_B, I_C). Напруга на затискачах фаз

генератора (або споживача) називається фазною напругою $U_ф$. Струм в обмотках фаз або фазних навантаженнях – це фазний струм $I_ф$ (наприклад, I_a , I_b , I_c). Напруга між лінійними проводами – лінійна напруга $U_л$ (U_{AB} ,U_{BC} ,U_{CB}).

Види навантаження

1) ***Випадок симетричного навантаження*** ($Z_A=Z_B=Z_C$) з нейтральним проводом:

а) лінійні струми дорівнюють фазним $I_л = I_ф$ (тобто, $I_A = I_a$; $I_B = I_в$; $I_C = I_c$);

б) діючі значення фазних напруг на споживачах однакові між собою і дорівнюють діючим значенням фазних напруг генератора ($U_{ф\ ген} = U_{ф\ сп}$);

в) оскільки при симетричному навантаженні фазні напруги однакові і утворюють симетричну систему напруг, то струми у всіх трьох фазах будуть теж однаковими ($I_a = I_в = I_c$) й зсуненими на 120^0 між собою, тобто утворюють симетричну систему.

в) фазні струми знаходимо за законом Ома:

$$I_a = U_A^1 / Z_A ; \quad I_в = U_B^1 / Z_B ; \quad I_c = U_C^1 / Z_C , \tag{3.6}$$

де $Z_A = Z \cdot e^{j\varphi_a}$, $Z_B = Z \cdot e^{j\varphi_в}$, $Z_C = Z \cdot e^{j\varphi_c}$ — комплексні повні опори споживачів фази; φ_A , φ_B , φ_C − кути зсуву фаз між фазними напругами і фазними струмами на навантаженні, які визначаються із трикутників опорів відповідних фаз ($\cos \varphi_A = R_a / Z_a$, $\cos_B = R_в / Z_в$, $\cos \varphi_C = R_c / Z_c$).

г) при наявності нейтрального проводу nN перший закон Кірхгофа для вузла n:

$$I_{nN} = I_a + I_в + I_c = I(1 + e^{-j1200} + e^{j1200}) = I_a \cdot 0 = 0. \tag{3.7}$$

Із наведеної суми випливає, що при симетричному навантаженні внаслідок створення симетричної системи фазних (чи лінійних) струмів струм у нейтральному провіднику відсутній. Тому ***при симетричному навантаженні нейтрального проводу не встановлюють.***

Таким чином, приймачі електричної енергії, що мають гарантоване симетричне навантаження, вмикають за ***трипровідною*** схемою (тобто без нульового проводу).

д) зв'язок між лінійною і фазною напругами при з'єднанні трифазного генератора і приймачів за схемою зірка визначають за формулою:

$$\boldsymbol{Uл = \sqrt{3} \cdot Uф .} \qquad (3.8)$$

2) Випадок несиметричного навантаження ($\boldsymbol{Z_A \neq Z_B \neq Z_C}$)

а) *випадок без нейтрального проводу*

Робота несиметричного приймача, з'єднаного зіркою, без нульового провідника є аварійним режимом, і для його уникнення необхідно застосовувати нейтральний провід.

в) *випадок з нейтральним проводом*

Введення нейтрального проводу дозволяє зрівноважити фазну напругу на несиметричному навантаженні.

Для підвищення надійності нормальної роботи несиметричного споживача при сполученні його фаз зіркою в коло нейтрального провідника захисних пристроїв, наприклад, запобіжників не ставлять. В протилежному випадку перегоряння запобіжника викличе відсутність нульового провідника в трифазному несиметричному колі, а звідси й всі негативні наслідки. **Запобіжники зазвичай ставлять на фазах споживачів**

3.4. З'єднання споживачів трикутником, симетричне та несиметричне навантаження

1. При з'єднанні фаз джерела й приймача трикутником (рис.3.8,а) лінійна напруга дорівнює фазній на навантаженні споживачів

$$U_Л = U_Ф \text{ (тобто, } U_{AB} = U_{ав},\ U_{BC} = U_{вс},\ U_{CA} = U_{са}\text{).} \qquad (3.9)$$

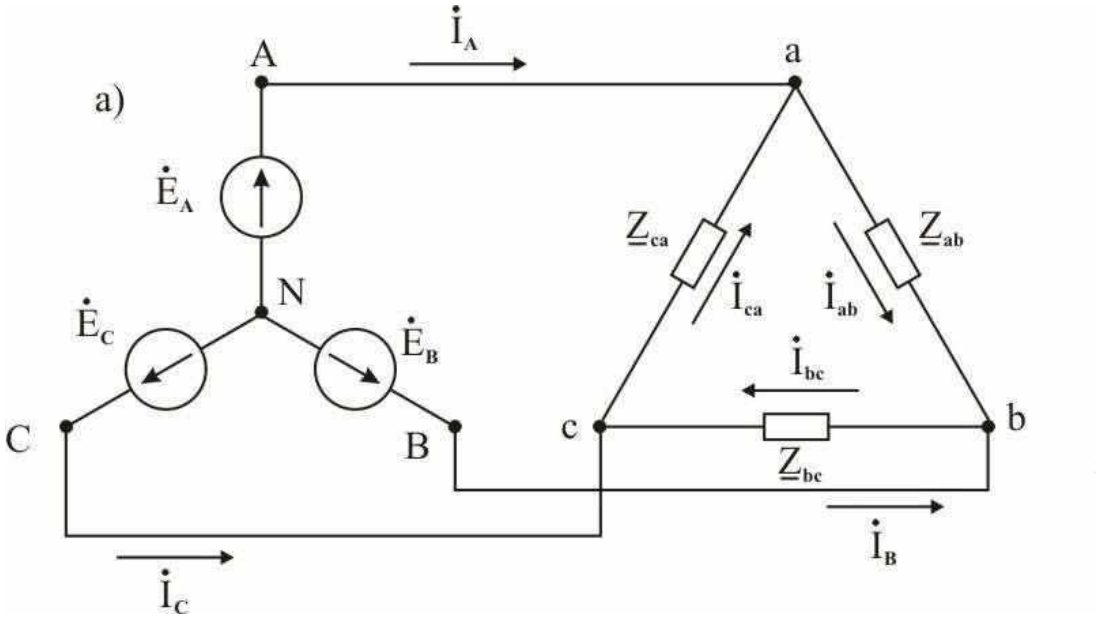


Рисунок 3.8 - З'єднання споживачів трикутником

2. Фазні струми визначаються за допомогою фазних напруг:

$$Iab = Uab / Zab,\ Ibc = Ubc / Zbc,\ Iac = Ucb / Zac. \qquad (3.10)$$

3. Лінійні струми обчислюються за допомогою основних співвідношень струмів щодо з'єднання трикутником:

$$I_A = Iab - Ica,\quad I_B = Ibc - Iав,\quad I_C = Ica - Ibc. \qquad (3.11)$$

4. Незалежно від характеру навантаження завжди

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \qquad (3.12)$$

5. При симетричному навантаженні ($Z ab = Z bc = Z ca$) фазні струми рівні за величиною і кути зсуву фаз струмів по відношенню до відповідних фазних напруг однакові.

При з'єднанні трикутником у випадку симетричного навантаження лінійний струм кола в $\sqrt{3}$ разів більше фазного струму приймача.

6. При несиметричному режимі роботи, наприклад при зміні опору однієї з

фаз, режим роботи інших двох фаз не змінюється, так як лінійні напруги генератора залишаються незмінними. Змінюється лише струм цієї фази та лінійні струми у проводах, що з'єднані з цією фазою. Тому схему з'єднання трикутником дуже зручно використовувати при несиметричному навантаженні. Явище "перекосу фаз" принципово не може виникати.

Що стосується симетричних трифазних приймачів, то їх можна вмикати в трьохпровідне коло або зіркою, або трикутником.

3.5. Активна, реактивна та повна потужності трифазного кола

1) ***Комплексною потужністю*** трифазної системи називається сума комплексних потужностей всіх фаз джерела енергії, яка, згідно з балансом потужності, дорівнює сумі комплексних потужностей всіх фаз приймача:

для зірки $$\boldsymbol{S = S_A + S_B + S_C};$$ (3.13)

для трикутника $$\boldsymbol{S = Sab + Sbc + Sca}.$$ (3.14)

Так як комплексна потужність кожної фази споживача при з'єднанні зірка дорівнює

$$\boldsymbol{S_A = P_A + j\,Q_A},$$ (3.15)

$$\boldsymbol{S_B = P_B + j\,Q_B},$$ (3.16)

$$\boldsymbol{S_C = P_C + j\,Q_C},$$ (3.17)

то комплексна повна потужність трифазної системи для з'єднання зірка

$$\boldsymbol{S = (P_A + P_B + P_C) + j\,(Q_A + Q_B + Q_C)},$$ (3.18)

аналогічно одержуємо вираз для трикутника

$$\boldsymbol{S = (P\,ab + P\,bc + P\,ca) + j\,(Q\,ab + Q\,bc + Q\,ca)}.$$ (3.19)

Дійсна частина комплексної потужності називається ***активною потужністю трифазної системи***, уявна частина - ***реактивною потужністю трифазної системи.***

2) ***Активна потужність*** трифазної системи є сумою активних потужностей всіх фаз джерела енергії, яка, згідно з балансом потужності, дорівнює сумі активних потужностей окремих фаз приймача:

для зірки $$P = P_A + P_B + P_C \,, \tag{3.20}$$

для трикутника $$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}. \tag{3.21}$$

При ***симетричному навантаженні,*** як для зірки, так і для трикутника, потужності трьох фаз $P_Ф$ рівні. Отже, сумарна потужність трифазного приймача, з'єднаного зіркою, або трикутником:

$$P = 3P_Ф = 3\ U_Ф\ I_Ф\ \cos\varphi\ , \tag{3.22}$$

де $P_Ф = U_Ф\ I_Ф\ \cos\varphi$ - активна потужність однієї фази споживача.

3) ***Реактивна потужність*** трифазної системи є сумою реактивних потужностей всіх фаз джерела енергії, яка, згідно з балансом потужності, дорівнює сумі реактивних потужностей фаз приймача:

для зірки: $$Q = Q_A + Q_B + Q_C\,, \tag{3.23}$$

для трикутника: $$Q = Qab + Qbc + Qca\,. \tag{3.24}$$

Реактивна потужність ***симетричної трифазної системи, як для зірки, так і для трикутника:***

$$Q = 3\ Q_Ф = 3\ U_Ф\ I_Ф \sin\varphi, \tag{3.25}$$

де $Q_Ф = U_Ф\ I_Ф \sin\varphi$ - реактивна потужність однієї фази споживача.

4) Модуль повної потужності трифазної системи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3\ U_Ф\ I_Ф\,. \tag{3.26}$$

5) Вирази для потужності можна записати також за допомогою лінійних величин.

Для з'єднання зіркою: $I_Л = U_Ф$, $U_Л = \sqrt{3}\ U_Ф$, (3.27)

а також $$P = \sqrt{3}\ U_Л \cdot I_Л \cos\varphi, \tag{3.28}$$

$$Q = \sqrt{3}\ U_Л \cdot I_Л \sin\varphi, \tag{3.29}$$

$$S = \sqrt{3}\, U_Л\, I_Л \quad . \tag{3.30}$$

Для з’єднання трикутником: $U_Л = U_Ф$, $I = \sqrt{3}\, I_Ф$, (3.31)

а також $$P = \sqrt{3}\, U_Л \cdot I_л \cos\varphi, \tag{3.32}$$

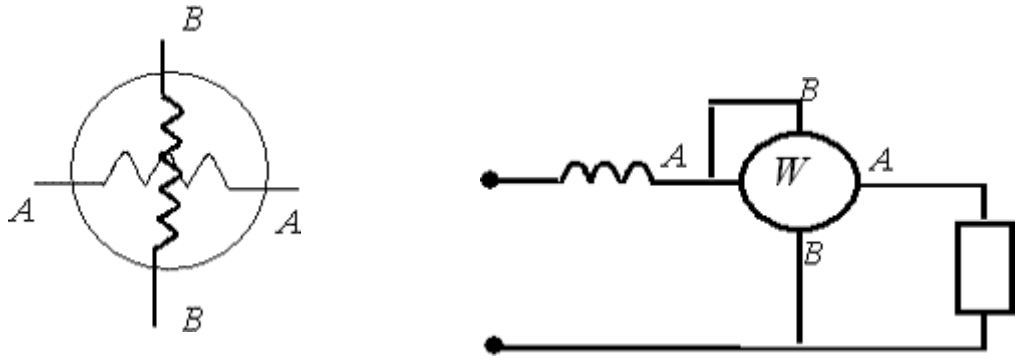
$$Q = \sqrt{3}\, U_Л \cdot I_л \sin\varphi, \tag{3.33}$$

$$S = \sqrt{3}\, U_Л\, I_Л\,. \tag{3.34}$$

Таким чином, співвідношення для потужності (активної, реактивної, повної) не залежить від виду з’єднань.

3.6. Вимірювання активної потужності

Потужність вимірюється ватметром. Ватметр містить дві котушки: нерухому струмовий А - А, яка включається в ланцюг послідовно, і рухому котушку напруги В - В, яка включається в ланцюг паралельно.



а б

Рисунок 3.9 - Позначення ватметра (а) і включення його в ланцюг (б)

Для вимірювання активної потужності всієї трифазного ланцюга в залежності від схеми з'єднання фаз навантаження і її характеру застосовуються різні схеми включення вимірювальних приладів.

Для вимірювання активної потужності в симетричному трифазному ланцюзі застосовується схема з одним ватметром, який включається в одну з фаз і вимірює активну потужність тільки цієї фази (рис.3.12). Активна потужність всього ланцюга виходить шляхом множення показання ватметра на число фаз: $P = 3W$

$= 3U_\phi I_\phi \cos\varphi$. Схема з одним ватметром може бути використана тільки для орієнтованої оцінки потужності і непридатна для точних і комерційних вимірювань

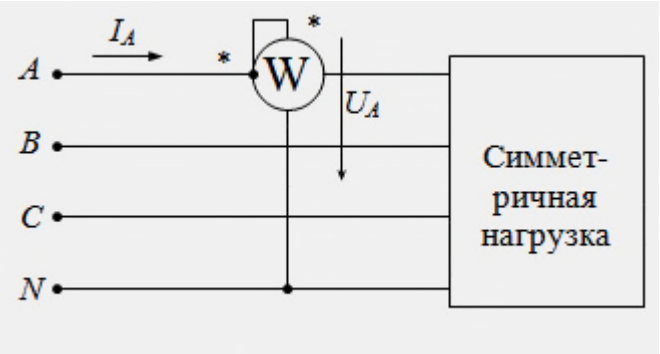


Рисунок 3.10 - Схема визначення потужності методом одного ватметра

Для вимірювання активної потужності в чотирьох провідних трифазних ланцюгах (при наявності нульового проводу) застосовується схема з трьома приладами (рис.3.13), в якій здійснюється вимір активної потужності кожної фази окремо, а потужність всього ланцюга визначається як сума показань трьох ватметрів.

$$P = W_1 + W_2 + W_3 = U_A \cdot I_A \cdot \cos\varphi_A + U_B \cdot I_B \cdot \cos\varphi_B + U_C \cdot I_C \cdot \cos\varphi_C .$$

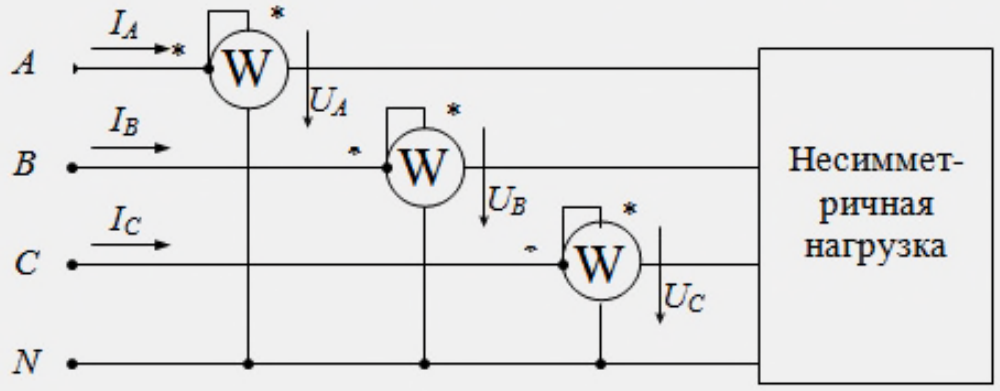


Рисунок 3.11 - Схема визначення потужності методом трьох ватметрів

3.7. Контрольні запитання з теми 3

1. Дати визначення трифазного кола.
2. Пояснити будову трифазного генератора та принцип дії.

3. Пояснити поняття: фазний струм, фазна напруга, лінійний струм, лінійна напруга. Пояснити на схемі, де їх вимірюють.
4. Способи з’єднання окремих фаз (обмоток) трифазного генератора.
5. Чому називається мережа з ізольованою нейтраллю.
6. Чому називається мережа з заземленою нейтраллю.
7. Побудувати векторну діаграму напруг з’єднання обмоток генератора «зіркою».
8. Побудувати векторну діаграму напруг з’єднання обмоток генератора «трикутником».
9. З’єднання фаз джерела й приймача зіркою. Основні поняття.
10. З’єднання споживачів трикутником. Основні поняття.
11. Активна, реактивна та повна потужності трифазного кола.
12. Дати оцінку симетричним режимам трифазних кіл.
13. Навести співвідношення для напруг і струмів при з'єднанні споживачів трикутником при симетричному режимі роботи.
14. Навести співвідношення для напруг і струмів при з'єднанні зіркою і симетричному режимі роботи.
15. Пояснити, до яких наслідків приводить обрив фази для трифазного кола з нейтральним, і без нейтрального проводу у випадку з'єднання споживачів зіркою?
16. Пояснити, до яких наслідків приводить обрив фази для трифазного кола у випадку з'єднання споживачів трикутником?
17. Навести формули для підрахунку активної і реактивної потужності у трифазних колах у випадку симетричного навантаження.