

6 СИМЕТРИЧНІ КОЛА ТРИФАЗНОГО СТРУМУ

6.1 Трифазні електричні кола

Трифазне електричне коло може бути подано як сукупність трьох однофазних кіл (кіл однофазного струму) в яких діють е.р.с. однієї і тієї ж частоти, зсунуті одна відносно одної на одну третину періоду (на кут $2\pi/3$).

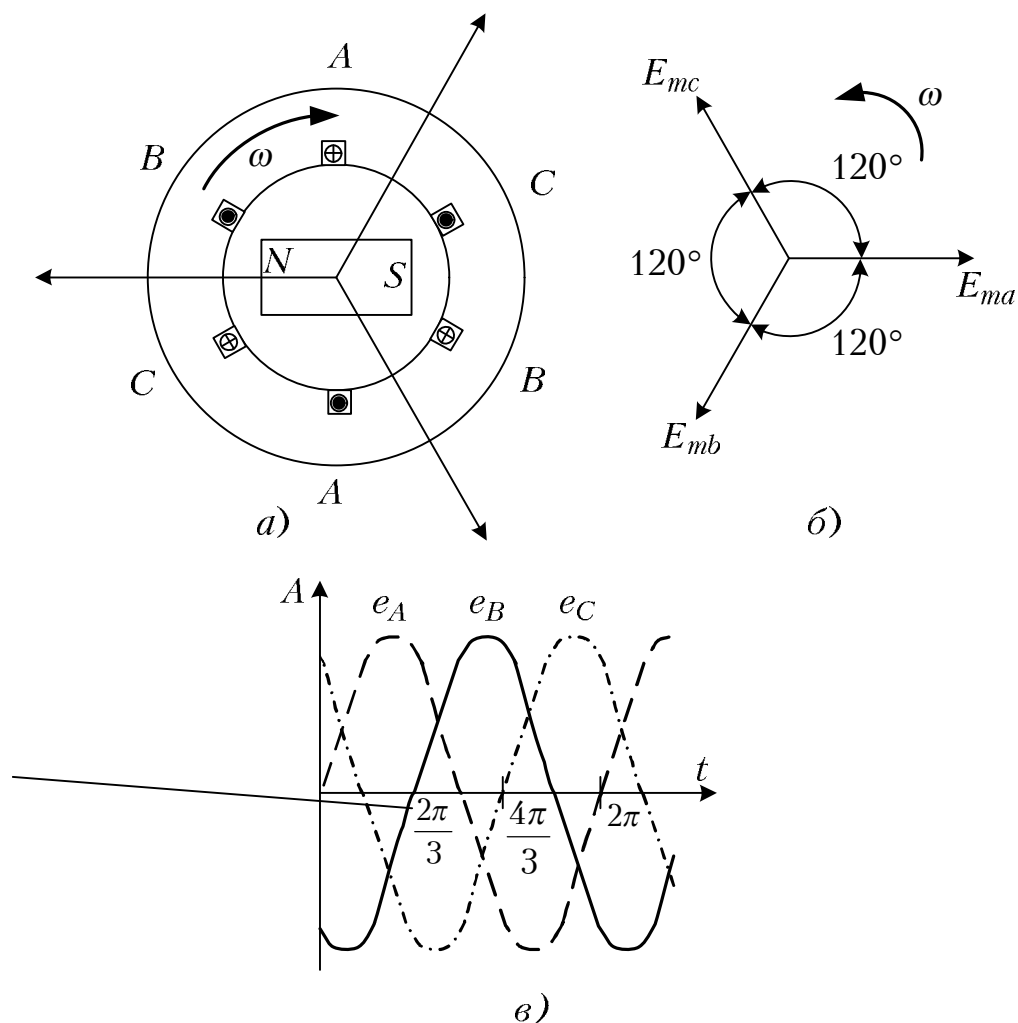


Рис 6.1 – Схема трифазного генератора (а), векторна діаграма е.р.с. (б), часові діаграми е.р.с. (в)

Ці три складові частини трифазного кола називаються фазами, які надалі будемо позначати літерами А, В, С. Схематично це показано на рис. 6.1.

Для отримання трифазного струму використовують трифазний генератор, схема конструкції якого подана на рис. 6.1,а. Обмотки, в яких наводяться е.р.с., розміщуються у пазах статора. Обмотки фаз зсунуті відносно одна одної на кут 120° . При обертанні ротора (магніту) через ідентичність трьох обмоток генератора в них наводяться е.р.с., які мають однакову амплітуду і частоту, причому ці е.р.с. зсунуті за фазою відносно

одна до одної на одну третину періоду. Вектори, що зображають ці е.р.с., рівні за довжиною і складають між собою кут 120° (рис. 6.1,б).

Миттєве значення е.р.с. трифазного генератора (рис. 6.1,в) виражаються аналітично таким чином:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin (\omega t - 2\pi/3); \\ e_C &= E_m \sin (\omega t - 4\pi/3) = E_m \sin (\omega t + 2\pi/3). \end{aligned}$$

Миттєве значення е.р.с. дорівнює відповідним проекціям трьох векторів E_{mA} , E_{mB} , E_{mC} (рис. 6.1,б), які обертаються у додатному напрямку з кутовою швидкістю ω , на вісь ou . На рис. 6.1, а положення ротора (магніту) відповідає моменту $t=0$.

На схемах заміщення обмотки трифазного генератора позначають як показано на рис. 6.2 і умовно приймають напрямок е.р.с. від кінця до початку обмотки додатним.

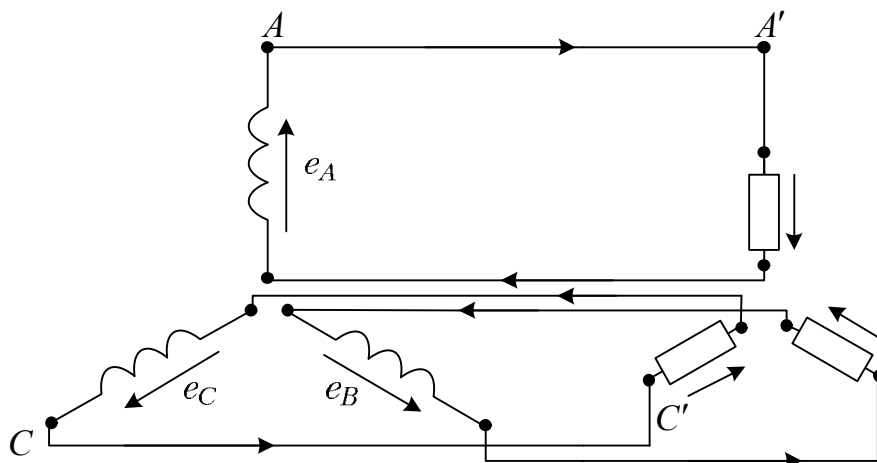


Рисунок 6.2 – Незв'язане трифазне коло

Якщо кожен обмотку трифазного генератора з'єднати зі своїм приймачем, утворяться три незалежних кола, кожне зі своїм струмом.

В незв'язаній трифазній системі генератор з приймачем енергії з'єднуються шістьма проводами. Велика кількість з'єднувальних проводів – основний недолік незв'язаних систем, які тому сьогодні і не застосовуються. Скорочення числа з'єднувальних проводів досягається в з'єднаній системі, вперше запропонованій М.Н. Даліво-Добровольським у 1889 році. Він запропонував дві схеми з'єднання: зіркою і трикутником, які застосовуються і сьогодні.

6.2 З'єднання зіркою

На рис. 6.3 показана зв'язана система при з'єднанні фаз джерела енергії і споживача зіркою. Таку систему легко отримати з незв'язаної системи.

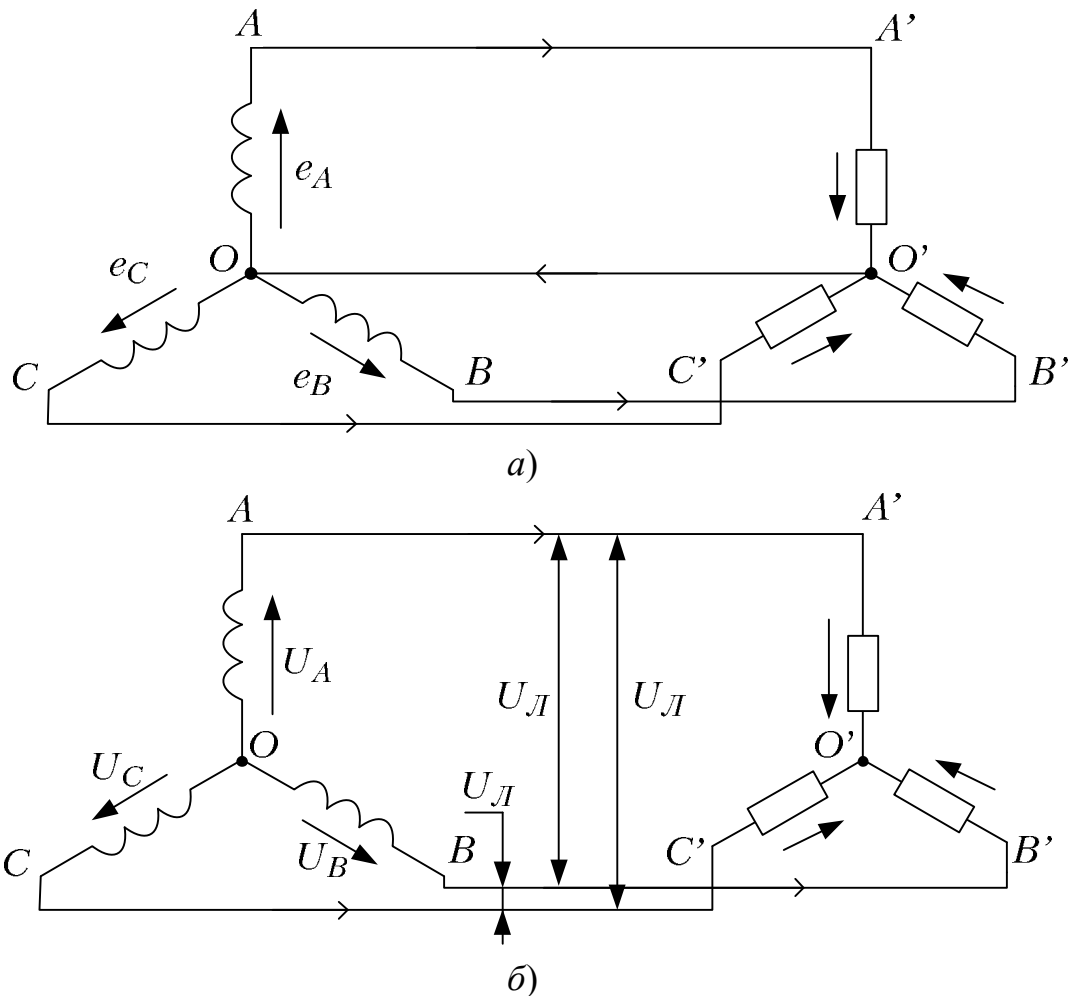


Рисунок 6.3 – Зв'язані трифазні кола при з'єднанні зіркою

Початком обмотки генератора вважається полюс, до якого спрямована додатна е.р.с. (полюси A , B , C). З'єднання зіркою передбачає, що усі кінці фазних обмоток з'єднуються в одну спільну точку O , яку називають нульовою точкою, або нейтраллю. Проводи AA' , BB' , CC' зберігаються, а три проводи, що з'єднують точки OO' замінюються одним проводом, який називається нульовим, або нейтральним. В симетричних трифазних колах загальний струм $\dot{I}_H = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, що дозволяє відмовитись від загального проводу OO' . У такому разі зв'язок між джерелом і споживачем, з'єднаними зіркою, можна здійснювати за трипровідною схемою (рис. 6.3,б).

Фазні та лінійні напруги. Різниці потенціалів між точками $AO(U_A)$, $BO(U_B)$, $CO(U_C)$ називаються фазними напругами. Фазні напруги джерела – напруги між початками і кінцями фаз, які відрізняються від е.р.с. на величину спаду напруги в обмотках. В симетричній системі вони зображаються також трьома рівними за величиною векторами, зсунутими за фазою на 120° (рис. 6.4).

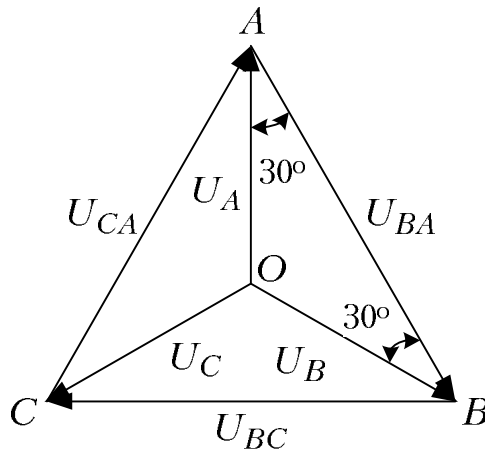


Рисунок 6.4 – Векторна діаграма напруг при з'єднанні обмоток джерела зіркою

Різниця потенціалів між кожною парою лінійних проводів називається лінійною напругою (U_{AB} , U_{BC} , U_{AC}).

Якщо прийняти потенціал нульової точки O за нуль, то потенціали лінійних полюсів $V_A=U_A$, $V_B=U_B$, $V_C=U_C$.

Лінійні напруги:

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = V_A - V_B = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_{AC} = V_B - V_C = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \\ \dot{U}_{CA} = V_C - V_A = \dot{U}_C - \dot{U}_A; \end{cases} \quad (6.1)$$

Потенціали лінійних полюсів кожної миті відрізняються один від одного через наявність зсуву фаз між фазними напругами, а значить лінійні напруги не дорівнюють нулю. Їх можна визначити аналітично з рівнянь (6.1) або графічно з векторної діаграми рис. 6.4. Наприклад, значення лінійної напруги U_{AB} знайдемо з трикутника AOB :

$$U_{AB} = 2 \cdot U_A \cos 30^\circ = \sqrt{3} \cdot U_A,$$

тобто:

$$U_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_{\Phi}. \quad (6.2)$$

Фазні і лінійні струми. Кожна фаза трифазної системи являє собою замкнуте коло. У відповідності з додатним напрямком е.р.с. в обмотках джерела додатні напрямки струмів в лінійних проводах є від джерела до споживача, а в нульовому провіднику – від споживача до джерела.

Струми у фазах джерела і споживача називають фазними (I_A , I_B , I_C або взагалі I_{Φ}). Струми в лінійних провідниках називають лінійними I_A , I_B , I_C або взагалі I_L).

При з'єднанні зіркою в точках переходу від джерела в лінію і з лінії в приймач немає розгалужень, а тому фазні та лінійні струми однакові між собою у кожній фазі:

$$I_L = I_{\Phi}. \quad (6.3)$$

6.3 З'єднання трикутником

При з'єднанні обмоток трифазного генератора трикутником (рис. 6.5) початок однієї фазної обмотки з'єднується з кінцем наступної за порядком фазної обмотки так, що усі три обмотки утворюють замкнутий трикутник, причому напрямки е.р.с. у контурі трикутника збігаються і сума е.р.с. дорівнює нулю (рис. 6.5,б). Загальні точки з'єднаних обмоток генератора виводяться на затискачі, до яких приєднується через лінійні проводи трикутник навантаження.

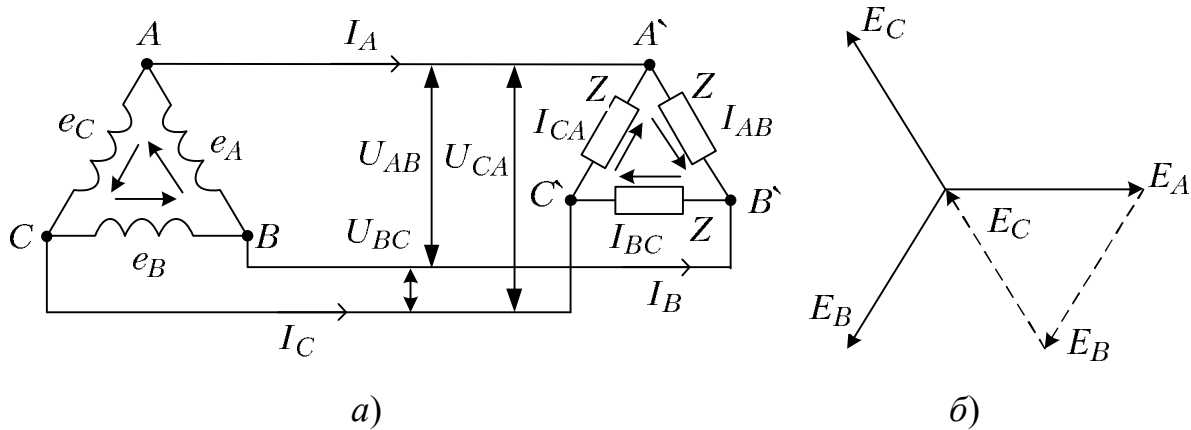


Рисунок 6.5 – Схема трифазної системи при з'єднанні трикутником (а), векторна діаграма е.р.с. (б)

Фазні та лінійні напруги. Зі схеми рис. 6.5,а видно, що фазні та лінійні напруги збігаються, бо кінець однієї фази з'єднаний з початком другої, кінець другої – з початком третьої:

$$U_L = U_\phi. \quad (6.4)$$

Векторну діаграму напруг можна побудувати у вигляді зірки або трикутника векторів (рис. 6.6).

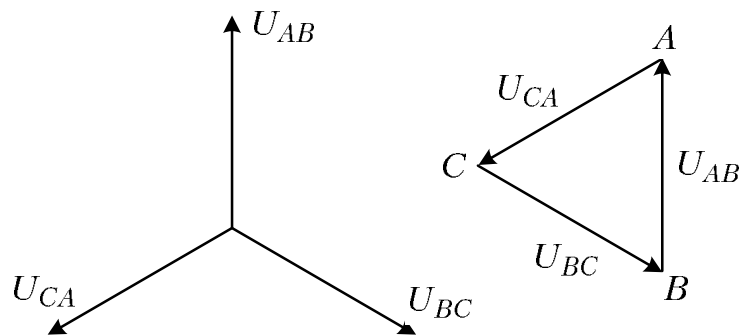


Рисунок 6.6 – Векторні діаграми напруг при з'єднанні обмоток джерела трикутником

В симетричній трифазній системі е.р.с., що діють в контурі, мають суму, рівну нулю (рис. 6.5,б): $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$.

При відсутності навантаження ($Z = \infty$) струм в обмотках джерела відсутній. Але так буває лише при наявності симетрії в системі, а в

протилежному випадку сума е.р.с. не дорівнює нулю і в обмотках джерела утворюється струм, який може бути значним навіть при малій асиметрії, бо опір самих обмоток незначний.

Фазні та лінійні струми. При з'єднанні трикутником кожна фаза навантаження знаходиться під лінійною напругою. Цим обумовлено наявність в навантаженні фазних струмів I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} , додатний напрямком яких на схемі рис. 6.5 вибрано відповідно додатному напрямку е.р.с. у фазах джерела.

Точки A , B , C , A' , B' , C' є електричними вузлами, а тому фазні струми відрізняються від лінійних I_A , I_B , I_C . За першим законом Кірхгофа для вузлових точок A , B , C можна написати:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \quad (6.5)$$

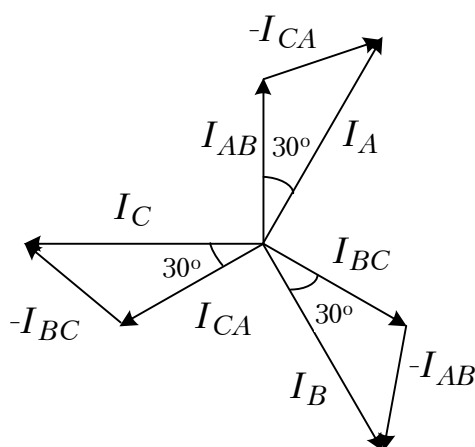


Рисунок 6.7 – Векторні діаграми струмів при з'єднанні трикутником

При симетричному навантаженні струми в усіх фазах однакові. На рис. 6.7 подана векторна діаграма струмів. З верхнього, наприклад, трикутника маємо:

$$I_A = 2I_{AB} \cos 30^\circ = \sqrt{3} \cdot I_{AB}.$$

Позначивши усі лінійні струми $I_A = I_B = I_C$ через I_L , усі фазні $I_{AB} = I_{BC} = I_{CA}$ – через I_ϕ , отримаємо загальне співвідношення між лінійними і фазними струмами у симетричній системі:

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi. \quad (6.6)$$

Визначення потужності. Потужність у кожній фазі трифазного кола визначається за формулами, які застосовувались для однофазних кіл.

При симетричному навантаженні фазні напруги однакові, а тому при визначенні потужності будуть справедливими такі загальні рівняння:

$$P = 3 \cdot U_\phi I_\phi \cos \varphi; \quad Q = 3 \cdot U_\phi I_\phi \sin \varphi; \quad S = 3 \cdot U_\phi I_\phi \quad (6.7)$$

Оскільки при з'єднанні зіркою

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}}; \quad I_\phi = I_L.$$

а при з'єднанні трикутником

$$I_{\phi} = \frac{I_{Л}}{\sqrt{3}}; \quad U_{\phi} = U_{Л}.$$

потужності можна визначати через лінійні величини напруг та струмів:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{Л} I_{Л} \cos \varphi; \quad Q = \sqrt{3} \cdot U_{Л} I_{Л} \sin \varphi; \quad S = \sqrt{3} \cdot U_{Л} I_{Л}. \quad (6.8)$$

При розв'язуванні задач символічним методом потужність визначається, так само як і в однофазних колах, добутком відповідного комплексу напруги і спряженого комплексу струму.

Е.р.с, що наводиться в обмотках трифазного генератора, однакові за амплітудою і зсунуті одна відносно одної на фазовий кут 120° .

При з'єднанні зіркою лінійні напруги у $\sqrt{3}$ рази більші за фазні, а струми однакові:

$$U_{\phi} = \frac{U_{Л}}{\sqrt{3}}; \quad I_{\phi} = I_{Л}.$$

При з'єднанні трикутником струми у $\sqrt{3}$ рази більші за фазні, а напруги однакові:

$$I_{\phi} = \frac{I_{Л}}{\sqrt{3}}; \quad U_{\phi} = U_{Л}.$$

Активна потужність всього кола при *несиметричному* (нерівномірному) навантаженні ($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$) дорівнює сумі активних потужностей окремих фаз і нейтрального проводу:

$$P = P_A + P_B + P_C + P_N,$$

де P – активна потужність усього кола, Вт; P_A, P_B, P_C, P_N – активні потужності фаз А, В, С і нейтрального проводу, Вт:

$$P_A = U_A I_A \cos \varphi_A; \quad P_B = U_B I_B \cos \varphi_B; \quad P_C = U_C I_C \cos \varphi_C;$$

$$P_N = U_N I_N \cos \varphi_N,$$

де U_N – напруга зсуву нейтралі.

Реактивна потужність усього кола при нерівномірному навантаженні дорівнює алгебраїчній сумі реактивних потужностей окремих фаз і нейтрального проводу, а саме:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C + Q_N,$$

де Q – реактивна потужність усього кола, вар; Q_A, Q_B, Q_C – реактивна потужність фаз А, В, С, Q_N – реактивна потужність нейтрального проводу вар, які визначаються таким чином:

$$Q_A = U_A I_A \sin \varphi_A; \quad Q_B = U_B I_B \sin \varphi_B; \quad Q_C = U_C I_C \sin \varphi_C;$$

$$Q_N = U_N I_N \sin \varphi_N.$$