

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до проведення практичних занять

з дисциплін

«Електротехніка» та «Електротехніка в будівництві»

*(для студентів заочної форми навчання
за напрямами підготовки 6.060101 «Будівництво»,
6.060103 «Гідротехніка (Водні ресурси)»)*

Харків
ХНАМГ
2011

Методичні вказівки до проведення практичних занять з дисциплін «Електротехніка» та «Електротехніка в будівництві» (для студентів заочної форми навчання за напрямками підготовки 6.060101 «Будівництво», 6.060103 «Гідротехніка (Водні ресурси)») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: О. В. Дорохов, Д. В. Тугай. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 45 с.

Укладачі: доц., к.т.н. О. В. Дорохов,
доц., к.т.н. Д. В. Тугай

Рецензент: доц., к.т.н. О. Ф. Білоусов

Рекомендовано кафедрою теоретичної та загальної електротехніки,
протокол № 1 від 30.08.2011 р.

ЗМІСТ

Вступ	4
ТЕМА 1. ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	5
ТЕМА 2. ОДНОФАЗНІ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	10
ТЕМА 3. ТРИФАЗНІ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	16
ТЕМА 4. ТРАНСФОРМАТОРИ	23
ТЕМА 5. ТРИФАЗНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ	29
ТЕМА 6. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	36
ТЕМА 7. ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В БУДІВНИЦТВІ. ВИБІР ПРОВОДУ	41
РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА	45

Вступ

Методичні вказівки підготовлені на основі робочих програм дисциплін «Електротехніка» і «Електротехніка в будівництві» й призначені для студентів, що навчаються за напрямом підготовки 6.060101 «Будівництво», 6.060103 «Гідротехніка (Водні ресурси)».

Електротехнікою називається широка галузь практичного застосування електромагнітних явищ. Електротехніка – дисципліна, що займається питаннями розрахунку та вивчення явищ, що характеризуються поняттями електричних струмів, напружень, потужностей, магнітних потоків, а також поняттями напруженості електричного та індукцією магнітного полів. Широке використання електротехнічних пристроїв у промисловості робить необхідним приділити увагу вивченню основних засобів їх застосування інженерами не тільки електричних спеціальностей.

Студенти будівельних спеціальностей «Промислове і цивільне будівництво», «Міське будівництво і господарство», «Технічне обслуговування і ремонт та реконструкція будівель», «Теплогазопостачання і вентиляція», «Водопостачання і водовідведення» повинні вміти використовувати основні досягнення електротехніки й забезпечити в практичних умовах разом із колегами електриками високоекономічну та продуктивну роботу різноманітних технічних об'єктів, використовувати досягнення електрифікації для подальшого розвитку близької їм галузі техніки. Знання, здобуті при вивченні курсів «Електротехніка» і «Електротехніка в будівництві», повинні допомогти студентам цих спеціальностей грамотно вибирати й експлуатувати електротехнічне устаткування, що використовується на будівництві.

Ці методичні вказівки призначені для проведення практичних занять за сімома темами, що охоплюють основні положення курсів «Електротехніка» і «Електротехніка в будівництві».

Доступні й детальні приклади, наведені у методичних вказівках, допоможуть студентам не тільки заочної, але й очної форм навчання, освоїти матеріал вказаних курсів і виконати індивідуальні завдання.

ТЕМА 1. ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Загальні відомості

Електричне коло – сукупність пристроїв, призначених для передачі, розподілу й взаємного перетворення електромагнітної та інших видів енергії та інформації, якщо процеси, що відбуваються у пристроях, можуть бути описані за допомогою понять про електрорушійну силу (ЕРС), струм і напругу.

Основні елементи електричного кола:

- джерела електричної енергії – пристрої, що перетворюють механічну, теплову, хімічну та інші види енергії в електромагнітну (генератор, акумуляторна батарея тощо);
- перетворювачі електромагнітної енергії (трансформатори, перетворювачі частоти тощо);
- пристрої передачі електромагнітної енергії (лінії передачі);
- споживачі електромагнітної енергії, яку перетворюють в механічну, теплову, хімічну та інші види (двигуни, лампи розжарювання, резистори тощо).

Кола, в яких процеси отримання електричної енергії в джерелах, передача та перетворення в споживачах відбуваються при незмінних у часі струмах і напругах, називаються *колами постійного струму*.

У дисципліні ТОЕ електричне коло замінюють моделлю (графічним зображенням), яка називається *електричною схемою*. Елементами електричної схеми є *активні* й *пасивні* елементи.

До пасивних елементів (аналог споживачів електромагнітної енергії) відносять (рис. 1.1):

- опір [Ом] - ідеалізований елемент, що приблизно замінює резистор, в якому відбувається перетворення електричної енергії в теплову;
- ємність [Ф] - ідеалізований елемент, що приблизно замінює конденсатор, в якому накопичується енергія електричного поля;
- індуктивність [Гн] - ідеалізований елемент, що приблизно замінює котушку індуктивності, в якій може накопичуватися енергія магнітного поля.

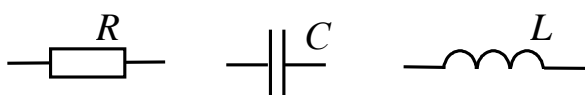


Рис. 1.1

До активних елементів (аналог джерел електромагнітної енергії) відносять джерела електрорушійної сили і джерела струму.

Вітка електричного кола – це ділянка кола, через яку протікає один струм. Вітка може складатися з одного або кількох послідовно з'єднаних елементів.

Вузол – це місце з'єднання трьох і більше віток. Вітки, що приєднуються до однієї пари вузлів, називаються паралельними.

Контур – це будь-який замкнений шлях, що проходить кількома вітками. *Незалежний контур* – це контур, що містить хоча б одну вітку, що не належить іншим контурам.

В електричній схемі, що зображена на рис. 1.2, три вузли ($q=3$), п'ять віток ($p=5$), шість контурів і три незалежних контури ($n=3$). Між вузлами 1 і 3 є дві паралельні вітки з джерелами ЕРС E_1 і E_2 . Між вузлами 2 і 3 теж є дві паралельні вітки з резисторами R_4 і R_5 .

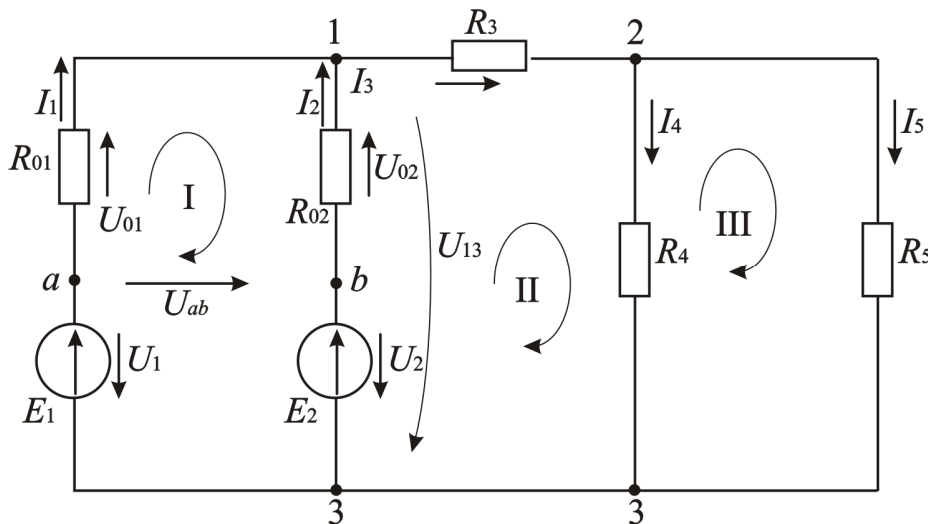


Рис. 1.2

Умовні додатні напрямки ЕРС джерел, струмів у вітках і напруг між вузлами або на затискачах електричного кола необхідно задати для правильного запису рівнянь, що описують процеси електричного кола або його елементів. На електричних схемах їх вказують за допомогою стрілок (див. рис. 1.2):

- для ЕРС джерел – довільно, при цьому полюс (затискач), до якого направлена стрілка, має більш високий потенціал порівняно з другим полюсом (затискача);
- для струмів у вітках, що містять джерела ЕРС – такими, що збігаються з напрямками ЕРС, в інших вітках – довільно;
- для напруг - такими, що збігаються з напрямками струмів у вітках.

Джерело ЕРС на електричній схемі можна замінити джерелом напруги, при цьому умовний додатній напрямок напруги задається протилежним напрямку ЕРС (див. рис. 1.2, напруги U_1 і U_2).

Закон Ома для ділянки кола:

$$I = \frac{U}{R} \text{ або } U = I \cdot R, \quad (1.1)$$

де I – струм, що протікає через ділянку кола; U – напруга на ділянці кола; R – опір ділянки кола.

Для вітки 1-2 (див. рис. 1.2): $U_3 = I_3 \cdot R_3$ – напруга або падіння напруги на резисторі R_3 .

Перший закон Кірхгофа: сума струмів у вузлі дорівнює нулю

$$\sum_{k=1}^m I_k = 0, \quad (1.2)$$

де m – кількість віток, приєднаних до вузла.

При записі рівнянь за першим законом Кірхгофа струми, що направлені до вузла, беруть з додатнім значенням, а струми направлені від вузла – з від’ємним значенням. Наприклад, для вузла 1 (див. рис. 1.2) $I_1 + I_2 - I_3 = 0$.

Другий закон Кірхгофа. Формулювання перше: сума ЕРС в довільному контурі електричного кола дорівнює сумі падінь напруг на всіх елементах цього контуру

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m I_k \cdot R_k = \sum_{k=1}^m U_k, \quad (1.3)$$

де n – кількість джерел ЕРС в контурі, m – кількість елементів з опором R_k в контурі, $U_k = I_k \cdot R_k$ – напруга або падіння напруги на k -му елементі контуру.

Формулювання друге: сума напруг на всіх елементах контуру, включаючи джерела ЕРС, дорівнює нулю

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0. \quad (1.4)$$

При записі рівнянь за другим законом Кірхгофа необхідно:

1. Задати умовні додатні напрямки ЕРС, струмів і напруг.
2. Вибрати напрямок обходу контуру, для якого записується рівняння.
3. Записати рівняння, використавши одне з формулювань, при чому додатки, що входять в рівняння, беруть зі знаком «+», якщо їх умовні додатні

напрямки збігаються з напрямком обходу контуру, і зі знаком «-», якщо вони протилежні.

Наприклад, для контуру II (див. рис. 1.2) при вказаному напрямку обходу рівняння мають вигляд

$$E_2 = I_2 \cdot R_{02} + I_3 \cdot R_3 + I_4 \cdot R_4, \text{ (формулювання 1)}$$

$$-U_2 + U_{02} + U_3 + U_4 = 0. \text{ (формулювання 2)}$$

Другим законом Кірхгофа можна користуватися для визначення напруги між двома довільними точками схеми, для цього в рівняння (1.2) і (1.3) необхідно ввести напругу між цими точками, яка ніби доповнює незамкнений контур до замкненого. Наприклад, для знаходження напруги U_{ab} (див. рис. 1.2) можна записати рівняння $U_{01} - U_{02} - U_{ab} = 0$, звідки $U_{ab} = E_1 - E_2 = U_1 - U_2$.

Порядок розрахунку струмів схеми за законами Кірхгофа.

1. Визначаємо кількість вузлів і віток у схемі, а отже, кількість рівнянь за першим і другим законами Кірхгофа. За першим законом Кірхгофа складається стільки рівнянь, скільки вузлів в схемі мінус 1. За другим законом Кірхгофа складається стільки рівнянь, скільки незалежних контурів у схемі. Загальна кількість рівнянь за обома законами повинна дорівнювати кількості віток у схемі.

2. Довільно вибираємо напрямки струмів у вітках і напрямки обходу контурів.

3. Складаємо і розв'язуємо систему відносно невідомих струмів. Наприклад, для схеми за рис. 1.2

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ I_3 - I_4 - I_5 = 0 \\ I_1 \cdot R_{01} - I_2 \cdot R_{02} = E_1 - E_2 \\ I_2 \cdot R_{02} + I_3 \cdot R_3 + I_4 \cdot R_4 = E_2 \\ -I_4 \cdot R_4 + I_5 \cdot R_5 = 0 \end{cases}$$

Закон Джоуля-Ленца: кількість теплоти, що виділяється в елементі електричного кола, що має опір R , за час t дорівнює:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t = G \cdot U^2 \cdot t = U \cdot I \cdot t = P \cdot t, \quad (1.5)$$

де $G = \frac{1}{R}$ – електрична провідність; $P = U \cdot I$ – електрична потужність.

ЗАДАЧА

Визначення параметрів розгалуженої схеми методом рівнянь Кірхгофа

У схемі рис. 1.3 параметри елементів мають такі значення: $R_1=4$ Ом, $R_3=R_4=R_5=3$ Ом, $R_6=1$ Ом, $R_7=4$ Ом. Відомі струми у вітках: $I_1=5$ А, $I_6=1$ А, $I_7=2$ А (для зазначених на схемі напрямків).

Визначити:

- ЕРС E_1, E_6 ;
- опір R_2 .

Для вирішення задачі необхідно:

- знати закони Кірхгофа та порядок розрахунку за ними;
- вміти складати рівняння балансу потужностей.

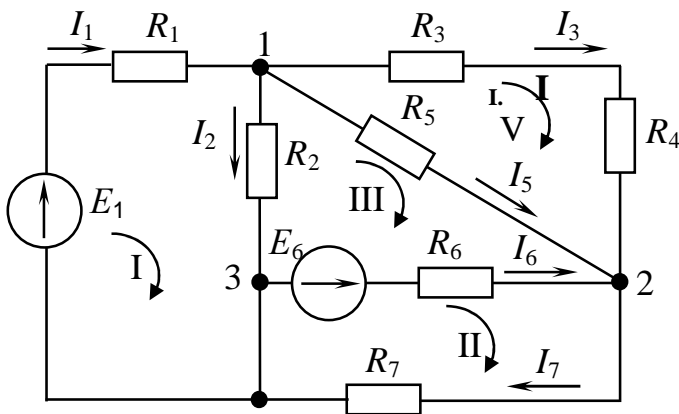


Рис 1.3

Розв'язання

1. Розв'яжемо задачу методом рівнянь Кірхгофа. Позначимо вузли схеми і вкажемо додатні напрямки невідомих струмів. У схемі 3 вузли і 6 віток. За законами Кірхгофа можна скласти шість незалежних рівнянь. Невідомих величин у задачі також шість: $E_1; E_6; R_2; I_1; I_3; I_5$.

За першим законом Кірхгофа треба скласти $n - 1 = 2$ рівняння; за другим - $\kappa = 6 - 2 = 4$ рівняння.

Для першого вузла: $I_1 - I_2 - I_3 - I_5 = 0$.

Для другого вузла: $I_3 + I_5 + I_6 - I_7 = 0$.

2. Запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа для I-IV контурів:

I - $R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 = E_1$;

II - $R_6 \cdot I_6 + R_7 \cdot I_7 = E_6$;

III - $R_5 \cdot I_5 - R_2 \cdot I_2 - R_6 \cdot I_6 = -E_6$;

IV - $(R_4 + R_3) \cdot I_3 - R_5 \cdot I_5 = 0$.

3. Знайдемо E_6 з рівняння для другого контуру:

$E_6 = R_6 \cdot I_6 + R_7 \cdot I_7 = 1 \cdot 1 + 4 \cdot 2 = 9$ В.

4. Розв'язуючи спільно рівняння для IV контуру і 2-го вузла, знайдемо I_3 і I_5 :

$$\begin{cases} (R_3 + R_4) \cdot I_3 - R_5 \cdot I_5 = 0, \\ I_3 + I_5 + I_6 - I_7 = 0, \end{cases} \quad \text{або} \quad \begin{cases} 6 \cdot I_3 - 3 \cdot I_5 = 0, \\ I_3 + I_5 = 1, \end{cases} \quad \text{звідси} \quad I_5 = \frac{2}{3} \text{ А}, \quad I_3 = \frac{1}{3} \text{ А}.$$

5. Із рівняння для контуру III знайдемо R_2 : $R_5 \cdot I_5 - R_2 \cdot I_2 - R_6 \cdot I_6 = -E_6$,
або в числах: $3 \cdot \frac{2}{3} - 1 \cdot 1 - R_2 \cdot 5 = -9$, звідси $R_2 = \frac{10}{5} = 2 \text{ Ом}$.

6. Із рівняння для 1-го вузла знайдемо струм I_1 : $I_1 - I_2 - I_3 - I_5 = 0$, звідки
 $I_1 = 5 + \frac{2}{3} + \frac{1}{3} = 6 \text{ А}$.

7. Рівняння для контуру I дозволяє знайти ЕРС E_1 : $E_1 = 4 \cdot 6 + 2 \cdot 5 = 34 \text{ В}$.

8. Перевірка розрахунку за рівнянням балансу потужностей:

$$E_1 \cdot I_1 + E_6 \cdot I_6 = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + (R_3 + R_4) \cdot I_3^2 + R_5 \cdot I_5^2 + R_6 \cdot I_6^2 + R_7 \cdot I_7^2$$

$$34 \cdot 6 + 9 \cdot 1 = 4 \cdot 6^2 + 2 \cdot 5^2 + 6 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^2 + 1 \cdot 1^2 + 4 \cdot 2^2.$$

$$213 \text{ Вт} \approx 213,2 \text{ Вт}.$$

ТЕМА 2. ОДНОФАЗНІ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Загальні відомості

Електричне коло синусоїдного струму – електричне коло, в якому діють ЕРС, напруги і струми, що змінюються в часі за законом синусу, наприклад,

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \sin(\omega t + \varphi_i), \\ u(t) &= U_m \sin(\omega t + \varphi_u). \end{aligned} \tag{2.1}$$

Синусоїдний або гармонічний процес характеризується трьома параметрами:

- амплітудою (I_m, U_m, E_m, J_m), що завжди є додатньою величиною;
- кутовою (круговою, циклічною) частотою $\omega = \frac{2\pi}{T}$,

де T – період гармонічного коливання. Величина $f = \frac{1}{T}$ називається просто частотою, $\omega = 2\pi f$;

- початковою фазою φ , що вимірюється в радіанах чи у градусах.

Величина $\varphi(t) = \omega t + \varphi$ називається повною фазою.

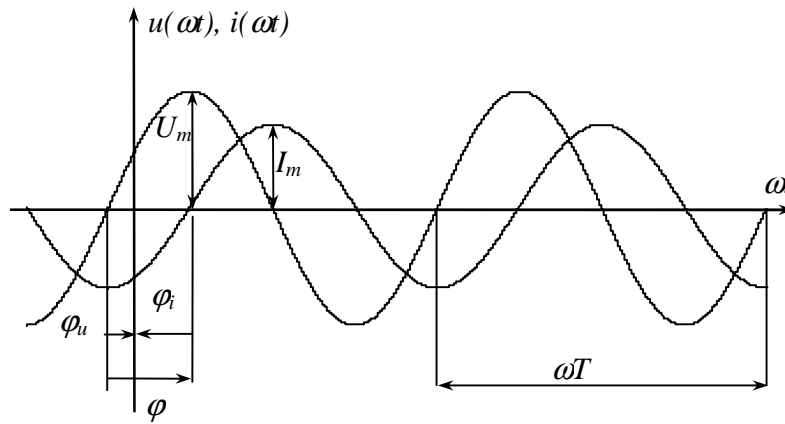


Рис. 2.1

У цій темі вивчаються процеси в лінійних електричних колах із гармонічними джерелами однакової частоти. У таких колах усі струми й напруги змінюються за гармонічним законом з тією ж частотою, що і джерела. Тому струми й напруги в колі відрізняються лише амплітудами (I_m , U_m) і початковими фазами (φ_i , φ_u). На рис. 2.1 зображено часові графіки гармонічного струму й напруги в колі.

Різниця початкових фаз напруги й струму має назву кута зсуву фаз $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$.

При розрахунках кіл змінного струму використовують поняття діючого (ефективного) значення струму, напруги, ЕРС, СРС. Це середньоквадратична величина за період. Наприклад, для гармонічного струму

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.2)$$

Коефіцієнти, що характеризують синусоїдну функцію:

- коефіцієнт амплітуди $k_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2}$;
- коефіцієнт форми $k_\phi = \frac{I}{I_{cp}} = \frac{I_m / \sqrt{2}}{2 / \pi \cdot I_m} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}}$.

Для миттєвих значень закони Кірхгофа формулюються так:

- алгебраїчна сума миттєвих струмів у вузлі електричного кола дорівнює нулю ($\sum i_k = 0$);

- алгебраїчна сума миттєвих ЕРС у замкненому контурі дорівнює алгебраїчній сумі миттєвих напруг на всіх його елементах ($\sum e_k = \sum u_k$).

Правило знаків і запис рівнянь цілком аналогічні колам постійного струму. За додатній напрямок струму (напруги) беруть напрямок додатньої півхвилі. Наприклад, для послідовного з'єднання R, L, C (послідовний контур), яке показано на рис. 1.2, другий закон Кірхгофа для миттєвих значень має вигляд

$$u = u_R + u_L + u_C = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t idt. \quad (2.3)$$

Якщо у цьому колі протікає струм $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, то напруга на резистивному елементі збігається за фазою зі струмом:

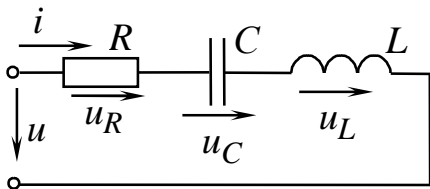


Рис. 2.2

$$u_R = Ri = RI_m \sin(\omega t + \varphi_i) = U_{Rm} \sin(\omega t + \varphi_{u_R}), \quad (2.4)$$

де $U_{Rm} = RI_m$ - амплітуда напруги на резистивному елементі; $\varphi_{u_R} = \varphi_i$ - початкова фаза напруги на резистивному елементі, що збігається з початковою фазою струму.

Напруга на індуктивному елементі випереджає струм за фазою на кут $\frac{\pi}{2}$:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega LI_m \sin\left(\omega t + \varphi_i + \frac{\pi}{2}\right) = U_{Lm} \sin(\omega t + \varphi_{u_L}), \quad (2.5)$$

де $U_{Lm} = \omega LI_m = X_L I_m$ - амплітуда напруги на індуктивному елементі; $X_L = \omega L$ - індуктивний опір; $\varphi_{u_L} = \varphi_i + \frac{\pi}{2}$ - початкова фаза напруги на індуктивному елементі.

Напруга на ємнісному елементі відстає від струму на кут $\frac{\pi}{2}$:

$$u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt = \frac{1}{\omega C} I_m \sin\left(\omega t + \varphi_i - \frac{\pi}{2}\right) = U_{Cm} \sin(\omega t + \varphi_{u_C}), \quad (2.6)$$

де $U_{Cm} = \frac{1}{\omega C} I_m = X_C I_m$ - амплітуда напруги на ємнісному елементі;

$X_C = \frac{1}{\omega C}$ - ємнісний опір; $\varphi_{u_C} = \varphi_i - \frac{\pi}{2}$ - початкова фаза напруги на ємнісному елементі.

Таким чином, математична модель даного кола описується тригонометричним рівнянням. Розв'язок цього рівняння має вигляд:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U_m}{Z}, \quad (2.7)$$

$$\varphi_i = \varphi_u - \varphi,$$

$$\text{де } \varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R};$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ - повний опір кола;}$$

R - активний опір;

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = X_L - X_C \text{ - реактивний опір.}$$

Зв'язок між активним і реактивним опором виникає з прямокутного трикутника, де один з катетів – це активний опір, інший катет реактивний опір, а гіпотенуза – повний опір: $R = Z \cos \varphi$, $X = Z \sin \varphi$, $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$.

Реактивний опір X - алгебраїчна величина. Якщо $X_L > X_C$, то $X > 0$, $\varphi > 0$ і коло має індуктивний характер (напруга випереджає за фазою струм); якщо $X_L < X_C$, то $X < 0$, $\varphi < 0$ і коло має ємнісний характер (струм випереджає за фазою напругу).

Величина, зворотна повному опору, називається повною провідністю кола

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}}.$$

Для паралельного з'єднання R , L і C (паралельний контур) провідності

визначають таким чином: $G = \frac{1}{R}$ - активна провідність; $B_L = \frac{1}{\omega L}$ - індуктивна

провідність; $B_C = \omega C$ - ємнісна провідність; $B = B_L - B_C$ - реактивна провідність.

Повна провідність $Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = \sqrt{G^2 + B^2}$.

З А Д А Ч А

Розрахунок нерозгалуженого кола синусоїдного струму
тригонометричним методом

Електрична схема, зображена на рис. 2.2, живиться від джерела синусоїдної напруги: $u(t) = 100\sqrt{2} \sin(\omega t - 90^\circ)$ В. Параметри кола: $R = 20$ Ом, $L = 200$ мГн, $C = 22$ мкФ, кутова частота $\omega = 314$ рад/с.

Визначити:

- діючі значення струму й напруг на елементах;
- кут зсуву фаз між струмом і напругою на вході кола;
- миттєві значення струму та напруг.

Переконайтеся в тому, що другий закон Кірхгофа не виконується для діючих значень напруг.

Для розв'язання задачі необхідно:

- знати визначення миттєвих, амплітудних, діючих напруги і струму;
- вміти визначати напругу та струм нерозгалуженого кола тригонометричним методом.

Розв'язання

1. У колі струм і напруги на елементах змінюються за гармонічним законом з кутовою частотою $\omega = 314$ рад/с: $i(t) = I_m \sin(314t + \varphi_i)$,

$$u_R(t) = U_{Rm} \sin(314t + \varphi_{u_R}), \quad u_L(t) = U_{Lm} \sin(314t + \varphi_{u_L}),$$

$$u_C(t) = U_{Cm} \sin(314t + \varphi_{u_C}).$$

Необхідно визначити амплітуди та початкові фази величин.

2. Знайдемо індуктивний і ємнісний опори:

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 200 \cdot 10^{-3} = 61,4 \text{ Ом}, \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = 147,7 \text{ Ом}.$$

3. Реактивний опір кола

$$X = X_L - X_C = 61,4 - 147,7 = -86,3 \text{ Ом}.$$

4. Повний опір кола $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{20^2 + 86,3^2} = 88,6 \text{ Ом}.$

5. Кут зсуву фаз між струмом і напругою $\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{-86,3}{20} = -77^0.$

6. За законом Ома амплітуда струму $I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{100\sqrt{2}}{88,6} = 1,13\sqrt{2} \text{ А}.$

7. Початкова фаза струму $\varphi_i = \varphi_u - \varphi = -90^0 - (-77^0) = -13^0.$

Миттєвий струм $i(t) = 1,13\sqrt{2} \sin(314t - 13^0) \text{ А}.$

8. Амплітуди напруг на елементах кола:

$$U_{Rm} = RI_m = 20 \cdot 1,13\sqrt{2} = 22,6\sqrt{2} \text{ В}, \quad U_{Lm} = X_L I_m = 61,4 \cdot 1,13\sqrt{2} = 69,38\sqrt{2} \text{ В},$$

$$U_{Cm} = X_C I_m = 147,7 \cdot 1,13\sqrt{2} = 166,9\sqrt{2} \text{ В}.$$

9. Початкові фази напруг на елементах: $\varphi_{u_R} = \varphi_i = -13^0,$

$$\varphi_{u_L} = \varphi_i + \frac{\pi}{2} = -13^0 + 90^0 = 77^0, \quad \varphi_{u_C} = \varphi_i - \frac{\pi}{2} = -13^0 - 90^0 = -103^0.$$

10. Миттєві значення напруг на елементах: $u_R(t) = 22,6\sqrt{2} \sin(314t - 13^0) \text{ В},$
 $u_L(t) = 69,38\sqrt{2} \sin(314t + 77^0) \text{ В}, \quad u_C(t) = 166,9\sqrt{2} \sin(314t - 103^0) \text{ В}.$

11. Діючі значення величин: $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 1,13 \text{ А}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 100 \text{ В}, \quad U_R = 22,6 \text{ В}$

$$U_L = 69,38 \text{ В}, \quad U_C = 166,9 \text{ В}.$$

12. Для миттєвих значень другий закон Кірхгофа має вигляд $u = u_R + u_L + u_C.$

Для діючих значень другий закон Кірхгофа не виконується $100 \neq 22,6 + 69,38 + 166,9.$

ТЕМА 3. ТРИФАЗНІ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Загальні відомості

Трифазна симетрична система електрорушійних сил – сукупність трьох синусоїдних ЕРС однієї частоти, що мають однакові амплітуди й зсунуті між собою на 120° . Графік миттєвих значень ЕРС e_A, e_B, e_C зображений на рис. 3.1, а векторні діаграми – на рис. 3.2.

Чергування фаз – послідовність проходження ЕРС через однакові значення (наприклад, через нуль). Таке чергування фаз, коли початкова фаза ЕРС e_A дорівнює нулю, початкова фаза ЕРС e_B дорівнює “ -120° ”, а початкова фаза ЕРС e_C дорівнює “ $+120^\circ$ ”, називається *прямим*; миттєві значення фазних ЕРС при цьому:

$$e_A = E_m \cdot \sin \omega \cdot t; \quad e_B = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ); \quad e_C = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ) \quad (3.1)$$

Трифазне коло – сукупність трифазної системи ЕРС, трифазного навантаження чи навантажень і з'єднуючих проводів.

Фаза – ділянка трифазного кола, якою протікає один і той же струм.

Основні схеми з'єднання у трифазних колах – це схеми з'єднання *зіркою* і

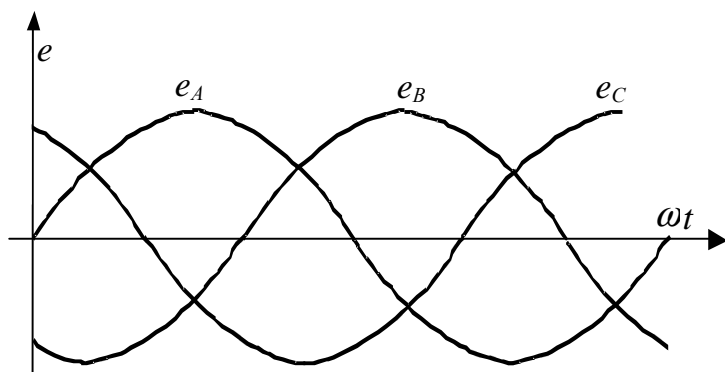


Рис. 3.1

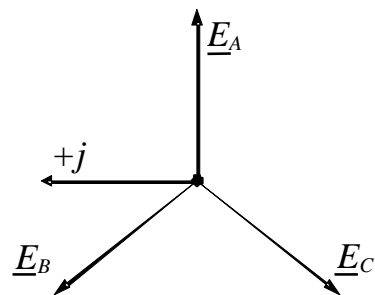


Рис. 3.2

трикутником.

Трифазне коло є різновидом кіл синусоїдного струму, тому його розрахунок і дослідження здійснюють за допомогою методів, що розглядалися раніше. Вважаємо, що трифазна ЕРС симетрична.

Коло “зірка-зірка”

I. Симетричне навантаження ($\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$)

За симетричного навантаження в усіх випадках, що відповідають схемам рис. 3.3, рис. 3.4, рис. 3.5, потенціали точок O і O_1 дорівнюють один одному.

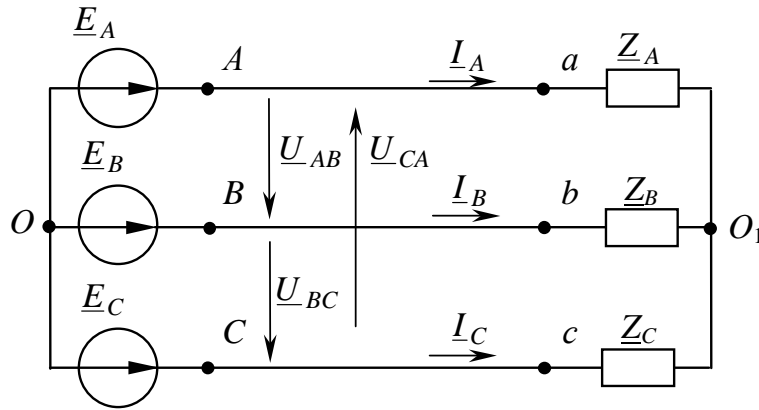


Рис. 3.3

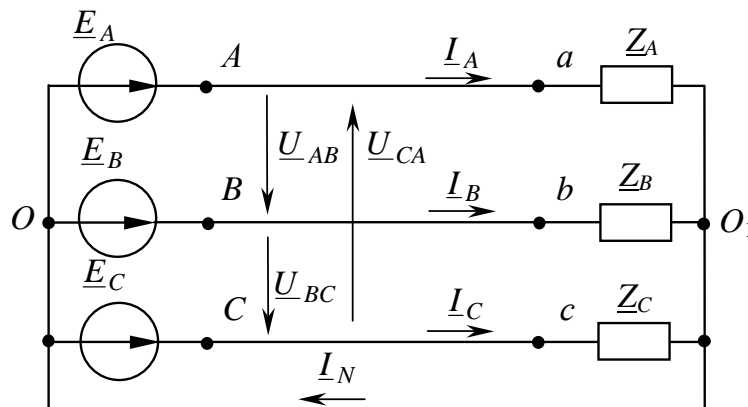


Рис. 3.4

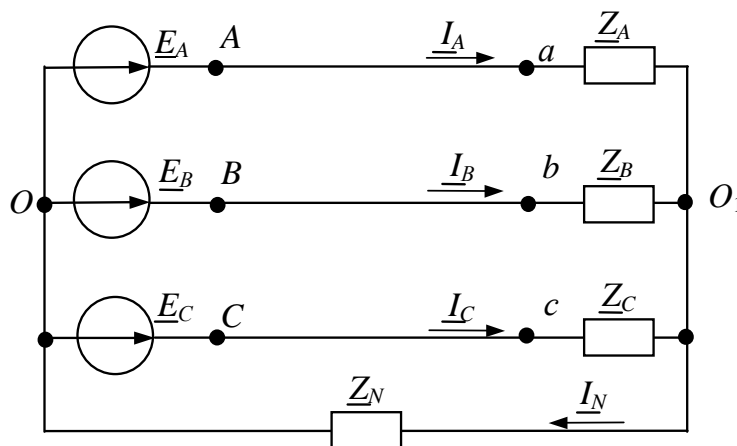


Рис. 3.5

$$\underline{I}_A = \underline{U}_{aO_1} \cdot \underline{Y}_A; \quad \underline{I}_B = \underline{U}_{bO_1} \cdot \underline{Y}_B; \quad \underline{I}_C = \underline{U}_{cO_1} \cdot \underline{Y}_C \quad (3.2)$$

$\underline{U}_{O_1O} = 0$. Тоді фазні струми визначають за виразами (3.2) (з урахуванням того, що $\underline{U}_{aO_1} = \underline{U}_{AO} = \underline{E}_A$; $\underline{U}_{bO_1} = \underline{U}_{BO} = \underline{E}_B$; $\underline{U}_{cO_1} = \underline{U}_{CO} = \underline{E}_C$), вони однакові за модулем і зсунуті за фазою на кут 120° . Струм нульового проводу (для рис. 3.4 і рис. 3.5) – $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$.

Напруги між початком і кінцем обмотки генератора ($\underline{U}_{AO} = \underline{E}_A$, $\underline{U}_{BO} = \underline{E}_B$, $\underline{U}_{CO} = \underline{E}_C$) або на фазних навантаженнях (\underline{U}_{aO_1} , \underline{U}_{bO_1} , \underline{U}_{cO_1} – рис. 3.3) – це фазні напруги.

Лінійні напруги дорівнюють різниці потенціалів між точками A, B, C або різниці фазних напруг:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{AO} - \underline{U}_{BO}; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_{BO} - \underline{U}_{CO}; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_{CO} - \underline{U}_{AO} \quad (3.3)$$

При прямому чергуванні фаз лінійні напруги в $\sqrt{3}$ більші, ніж фазні й випереджають їх на 30° , тобто співвідношення між комплексами лінійних і фазних напруг мають вигляд

$$\underline{U}_{AB} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{AO} \cdot e^{j30^\circ}; \quad \underline{U}_{BC} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{BO} \cdot e^{j30^\circ}; \quad \underline{U}_{CA} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{CO} \cdot e^{j30^\circ} \quad (3.4)$$

II. Несиметричне навантаження ($\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$), коло з нейтральним проводом

За несиметричного навантаження, коли в нейтральному проводі є опір \underline{Z}_N (рис. 3.5), потенціали точок O і O_1 не дорівнюють один одному. Розрахунок кола здійснюють в наступній послідовності:

- визначають напругу зміщення нейтралі, тобто напругу \underline{U}_{O_1O} , за виразом, що впливає з методу двох вузлів:

$$\underline{U}_{O_1O} = \frac{\underline{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \underline{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \underline{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} \quad (3.5)$$

де $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C, \underline{Y}_N$ – комплекси фазних провідностей і провідність нейтрального проводу:

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}, \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}, \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}, \underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}; \quad (3.6)$$

- визначають фазні напруги на навантаженні:

$$\underline{U}_{aO_1} = \underline{E}_A - \underline{U}_{O_1O}; \quad \underline{U}_{bO_1} = \underline{E}_B - \underline{U}_{O_1O}; \quad \underline{U}_{cO_1} = \underline{E}_C - \underline{U}_{O_1O}; \quad (3.7)$$

- за співвідношеннями (3.2) визначають фазні струми:

- струм у нейтральному проводі \underline{I}_N знаходять як векторну суму фазних струмів.

Коли в нейтральному проводі опір \underline{Z}_N відсутній і навантаження несиметричне (рис. 3.4) – $\underline{U}_{O_1O} = 0$, тоді фазні струми:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_{AO} \cdot \underline{Y}_A; \quad \underline{I}_B = \underline{U}_{BO} \cdot \underline{Y}_B; \quad \underline{I}_C = \underline{U}_{CO} \cdot \underline{Y}_C, \quad (3.8)$$

а струм нейтрального проводу визначають, як і в попередньому випадку.

III. Несиметричне навантаження ($\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$), коло без нейтрального проводу.

Якщо навантаження несиметричне і нульовий провід відсутній (рис. 3.3), фазні струми встановлюють таким чином, що їх сума дорівнює нулю. Внаслідок чого відбувається, як і у випадку несиметричного навантаження за наявності в нейтральному проводі опора \underline{Z}_N , викривлення симетрії фазних напруг так, що навантаження опиняється під різними, не рівними один одному (та фазним ЕРС) напругами. Потенціали точок O та O_1 не дорівнюють один одному. Розрахунок кола здійснюють так:

- визначають напругу зміщення нейтралі, тобто напругу \underline{U}_{O_1O} :

$$\underline{U}_{O_1O} = \frac{\underline{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \underline{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \underline{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \quad (3.9)$$

- визначають фазні напруги на навантаженні за виразами (3.5);

- визначають фазні струми за виразами (3.2).

Кола “трикутник-трикутник” і “зірка-трикутник”

I. Кола “трикутник-трикутник” і “зірка-трикутник” без урахування опорів підводячих проводів

Взагалі розрахунки кіл “трикутник-трикутник” (рис. 3.6) і “зірка-трикутник” (рис. 3.7) відрізняються тільки величиною напруги на фазних

навантаженнях ($\underline{U}_{\text{ф. навантаження}}$): у випадку кола “трикутник-трикутник” – $\underline{U}_{\text{ф. навантаження}} = \underline{U}_{\text{ф. генератора}}$, а у випадку кола “зірка-трикутник” – $\underline{U}_{\text{ф. навантаження}} = \underline{U}_{\text{лінійне генератора}} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{\text{ф}} \cdot \angle 30^\circ$. Далі будемо розглядати коло “зірка-трикутник”, розрахунок якого проводять в наступній послідовності:
 - комплекси фазних струмів визначають за виразами:

$$\underline{I}_{a\phi} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{a\phi}} = \underline{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_{a\phi}; \quad \underline{I}_{\phi c} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{\phi c}} = \underline{U}_{BC} \cdot \underline{Y}_{\phi c}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}} = \underline{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_{ca}, \quad (3.10)$$

де \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} – лінійні напруги (3.3);

$\underline{Y}_{a\phi}$, $\underline{Y}_{\phi c}$, \underline{Y}_{ca} – комплекси фазних провідностей:

$$\underline{Y}_{a\phi} = \frac{1}{\underline{Z}_{a\phi}}; \quad \underline{Y}_{\phi c} = \frac{1}{\underline{Z}_{\phi c}}; \quad \underline{Y}_{ca} = \frac{1}{\underline{Z}_{ca}}. \quad (3.11)$$

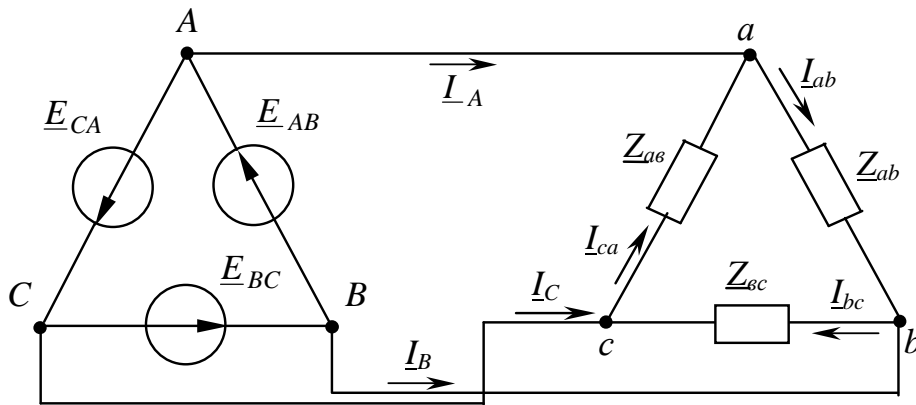


Рис. 3.6

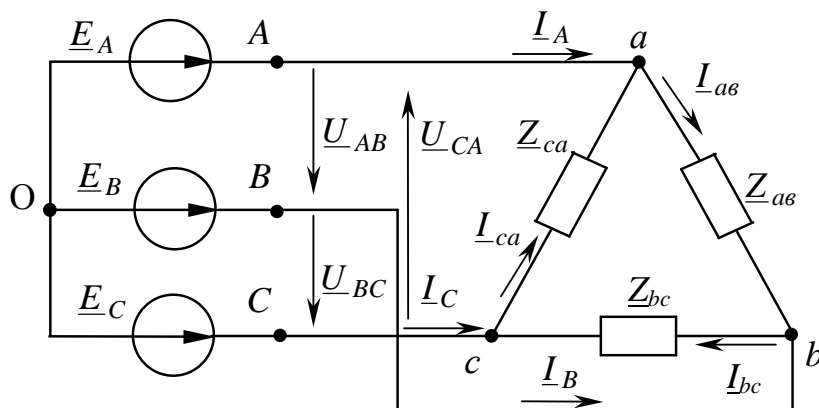


Рис. 3.7

Лінійні струми визначають за першим законом Кірхгофа для вузлів a, b, c :

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{av} - \underline{I}_{ca}; \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} . \quad (3.12)$$

При симетричному режимі фазні струми в усіх фазах однакові й зсунуті відносно своїх фазних напруг на однаковий кут, що визначається співвідношенням

$$\varphi = \arctg \frac{X_\phi}{R_\phi} , \quad (3.13)$$

де X_ϕ - реактивний опір навантаження;

R_ϕ - активний опір навантаження.

Лінійні струми при цьому за модулем будуть рівними між собою, в $\sqrt{3}$ разів більшими, ніж фазні струми, а за фазою будуть відставати на кут 30° при прямому чергуванні фаз, тобто

$$\underline{I}_A = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{av} \angle -30^\circ; \underline{I}_B = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{bc} \angle -30^\circ; \underline{I}_C = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ca} \angle -30^\circ . \quad (3.14)$$

Таким чином, при симетричному навантаженні фаз розрахунок трифазного кола можна звести до розрахунку однієї фази.

При несиметричному навантаженні лінійні струми можуть бути більшими чи меншими, ніж фазні струми.

ЗАДАЧА

Розрахунок несиметричних режимів трифазного електричного кола при з'єднанні навантаження зіркою

Трифазна система, з'єднана за схемою “зірка-зірка” з нульовим проводом, зображена на рис. 3.4, працює у несиметричному режимі. Фазні ЕРС $\underline{E}_A = 155 \angle 0^\circ$ В, $\underline{E}_B = 155 \angle -120^\circ$ В, $\underline{E}_C = 155 \angle 120^\circ$ В. Параметри навантаження: $\underline{Z}_A = 100 \angle -90^\circ$ Ом, $\underline{Z}_B = 100 \angle 0^\circ$ Ом, $\underline{Z}_C = 141 \angle 45^\circ$ Ом.

Визначити:

- лінійні напруги кола;
- фазні струми кола.

Провести баланс потужностей. Побудувати векторно-топографічну діаграму струмів і напруг.

Для розв'язання задачі необхідно:

- знати методи розрахунку трифазних кіл;
- вміти будувати векторно-топографічні діаграми струмів і напруг.

Розв'язання

1. Знайдемо лінійні напруги кола $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{AO} - \underline{U}_{BO} = \underline{E}_A - \underline{E}_B =$
 $= 155\angle 0^\circ - 155\angle -120^\circ = 155 + 77,5 + j \cdot 134,2 = 232,5 + j \cdot 134,2 = 268,5\angle 30^\circ \text{ В},$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_{BO} - \underline{U}_{CO} = \underline{E}_B - \underline{E}_C = 155\angle -120^\circ - 155\angle 120^\circ = 268,5\angle -90^\circ \text{ В},$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_{CO} - \underline{U}_{AO} = \underline{E}_C - \underline{E}_A = 155\angle 120^\circ - 155\angle 0^\circ = 268,5\angle 150^\circ \text{ В}.$$

2. Розрахуємо фазні струми. Завдяки нульовому проводу напруга $\underline{U}_{O1O} = 0$. Тоді $\underline{U}_{aO1} = \underline{U}_{AO} = \underline{E}_A$; $\underline{U}_{bO1} = \underline{U}_{BO} = \underline{E}_B$; $\underline{U}_{cO1} = \underline{U}_{CO} = \underline{E}_C$.

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_{aO1}}{\underline{Z}_A} = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{155\angle 0^\circ}{100\angle -90^\circ} = 1,55\angle 90^\circ = j \cdot 1,55 \text{ А},$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_{bO1}}{\underline{Z}_B} = \frac{\underline{E}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{155\angle -120^\circ}{100\angle 0^\circ} = 1,55\angle -120^\circ = -0,77 - j \cdot 1,34 \text{ А},$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_{cO1}}{\underline{Z}_C} = \frac{\underline{E}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{155\angle 120^\circ}{141\angle 45^\circ} = 1,1\angle 75^\circ = 0,28 + j \cdot 1,06 \text{ А}.$$

3. За першим законом Кірхгофа знайдемо струм у нульовому проводі
 $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = j \cdot 1,55 - 0,77 - j \cdot 1,34 + 0,28 + j \cdot 1,06 = -0,49 + j \cdot 1,27 =$
 $= 1,36\angle 111,1^\circ \text{ А}.$

4. Складемо баланс потужностей у колі.

Розрахуємо потужність, що віддається джерелами живлення

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{дж} &= \underline{E}_A \cdot \underline{I}_A^* + \underline{E}_B \cdot \underline{I}_B^* + \underline{E}_C \cdot \underline{I}_C^* = 155\angle 0^\circ \cdot 1,55\angle -90^\circ + 155\angle -120^\circ \cdot 1,55\angle 120^\circ + \\ &+ 155\angle 120^\circ \cdot 1,1\angle -75^\circ = -j \cdot 240,25 + 240,25 + 120,56 + j \cdot 120,56 = \\ &= 360,81 - j \cdot 119,69 \text{ ВА} \Rightarrow P_{дж} = 360,81 \text{ Вт}, Q_{дж} = -119,69 \text{ ВАр}. \end{aligned}$$

Визначимо потужність, що споживає навантаження:

$$\tilde{S}_H = I_A^2 \cdot Z_A + I_B^2 \cdot Z_B + I_C^2 \cdot Z_C = 1,55^2 \cdot (-j \cdot 100) + 1,55^2 \cdot 100 + 1,1^2 \cdot (99,7 + j \cdot 99,7) = 360,89 - j \cdot 119,61 \text{ Вт} \Rightarrow P_H = 360,89 \text{ Вт},$$

$Q_H = -119,61 \text{ ВАр}$. $\tilde{S}_{\text{джер}} \approx \tilde{S}_H$, тобто баланс потужностей виконується.

5. Побудуємо векторно-топографічну діаграму струмів і напруг. Спочатку задамо масштаби за напругою і струмом $m_U = 50 \text{ В/см}$, $m_I = 0,5 \text{ А/см}$. У вибраному масштабі напруги побудуємо симетричну систему фазних напруг, що відстають одна від одної на кут 120° (див. рис. 3.11, а). З'єднаємо кінці векторів фазних напруг, точки A, B, C і отримаємо трикутник лінійних напруг

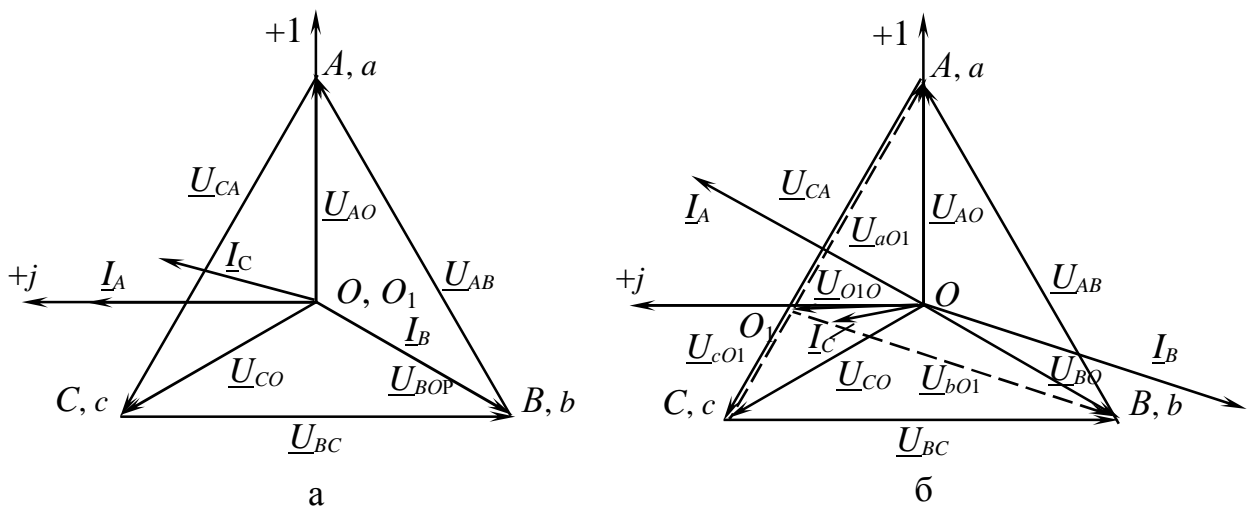


Рис.3.11

(див. рис. 3.11, а). У вибраному масштабі струму побудуємо вектори фазних струмів.

ТЕМА 4. ТРАНСФОРМАТОРИ

Загальні відомості

Трансформатор – це статичний електромагнітний пристрій, що має дві та більше індуктивно зв'язаних обмотки й призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або кількох систем змінних струмів і напруг в одну або кілька інших систем змінних струмів і напруг тієї ж самої частоти.

Первинна обмотка трансформатора з кількістю витків w_1 – це обмотка, що вмикається в електричну мережу змінного струму.

Вторинна обмотка трансформатора з кількістю витків w_2 – це обмотка, до якої підключають приймач електричної енергії.

У підвищуючих трансформаторах первинна обмотка є обмоткою нижчої напруги (НН), а вторинна – обмоткою вищої напруги (ВН), а в знижуючих трансформаторах – навпаки.

Номинальні параметри трансформатора: повна потужність $S_{ном}$, лінійна напруга первинної $U_{1лном}$ і вторинної $U_{2лном}$ обмоток і струми $I_{1лном}$ та $I_{2лном}$ в них, ККД $\eta_{ном}$, частота мережі f . Їх вказують на заводському щитку (паспорті). Там також вказують значення струму холостого ходу первинної обмотки I_0 у відсотках від $I_{1лном}$ і напругу випробуваного короткого замикання u_k у відсотках від $U_{1лном}$. Для багатофазних трансформаторів вказують схеми з'єднання обмоток і групу з'єднання, наприклад, для трифазного двохобмоткового трансформатора може бути записано Y/Y-0 або Y/ Δ -11, де цифра позначає групу з'єднання.

Під номінальною потужністю розуміють повну потужність трансформатора.

Для однофазних

$$S_{ном} = U_{1ном} \cdot I_{1ном} = U_{1лном} \cdot I_{1лном}; \quad (4.1)$$

для трифазних

$$S_{ном} = 3 \cdot U_{1ном} \cdot I_{1ном} = \sqrt{3} \cdot U_{1лном} \cdot I_{1лном}, \quad (4.2)$$

де $U_{1ном}$, $I_{1ном}$ – фазні напруга і струм в первинній обмотці трансформатора.

Номинальна вторинна напруга – це напруга на затискачах вторинної обмотки в режимі холостого ходу трансформатора (при $I_2 = 0$).

За номінальний вторинний струм умовно приймають струм, що розраховується за номінальною потужністю при номінальній вторинній напрузі.

Для однофазного трансформатора

$$I_{2ном} = I_{2лном} = \frac{S_{ном}}{U_{2ном}}; \quad (4.3)$$

для трифазного трансформатора

$$I_{2лном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{2лном}} - \text{лінійний струм}; \quad (4.4)$$

$$I_{2ном} = \frac{S_{ном}}{3 \cdot U_{2ном}} - \text{фазний струм}. \quad (4.5)$$

ЕРС, індукована в первинній і вторинній обмотках основним магнітним потоком, що замикається магнітопроводом

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = \sqrt{2} \cdot E_1 \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \\ e_2 &= -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (4.6)$$

де $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$ – основний магнітний потік.

Діючі і комплексні ЕРС, індуковані основним магнітним потоком

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_m, \underline{E}_1 = -j \cdot 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \underline{\Phi}_m, \\ E_2 &= 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_m, \underline{E}_2 = -j \cdot 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \underline{\Phi}_m \end{aligned} \right\}. \quad (4.7)$$

ЕРС розсіювання в первинній і вторинній обмотках

$$\underline{E}_{1роз} = -j \cdot X_1 \cdot \underline{I}_1, \underline{E}_{2роз} = -j \cdot X_2 \cdot \underline{I}_2, \quad (4.8)$$

де $X_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{1роз}$ і $X_2 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{2роз}$ – індуктивні опори, а $L_{1роз}$ і $L_{2роз}$ – індуктивності первинної і вторинної обмоток, обумовлені магнітним потоком розсіювання.

Коефіцієнт трансформації

$$K_{тр} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}. \quad (4.9)$$

На рис. 4.1 наведено графічне позначення однофазного двохобмоткового трансформатора в електричній схемі та схема заміщення. На схемі заміщення R_1 і X_1 – активний опір та індуктивний опір розсіювання первинної обмотки; $Z_1 = R_1 + j \cdot X_1$ – комплексний опір первинної обмотки; $Z_2' = R_2' + j \cdot X_2'$ – комплексний опір приведеної вторинної обмотки; R_0 і X_0 – активний і індуктивний опори вітки намагнічування; $Z_0 = R_0 + j \cdot X_0$ – комплексний опір вітки намагнічування, причому $Z_0 \gg Z_1$.

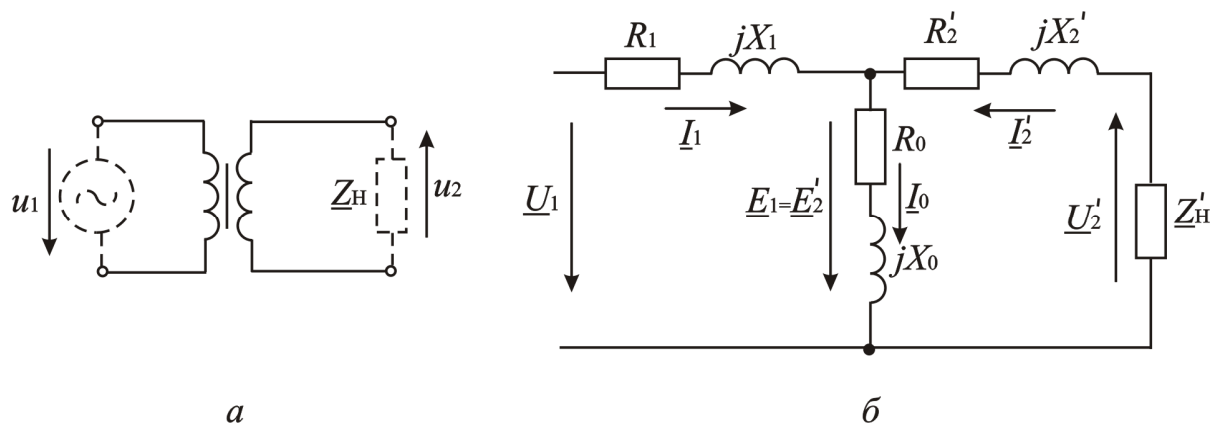


Рис. 4.1

Зв'язок між параметрами вторинної обмотки реального і зведеного трансформаторів

$$E_2' = \kappa_{mp} \cdot E_2 = E_1, U_2' = \kappa_{mp} \cdot U_2, I_2' = \frac{I_2}{\kappa_{mp}}, \quad (4.10)$$

$$R_2' = \kappa_{mp}^2 \cdot R_2, X_2' = \kappa_{mp}^2 \cdot X_2, Z_H' = \kappa_{mp}^2 \cdot Z_H$$

де E_2, U_2, R_2, X_2, Z_2 – параметри вторинної обмотки реального трансформатора, а Z_H – повний фазний опір навантаження.

Рівняння наруг і струмів зведеного трансформатора

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot X_1) \\ \underline{U}_2' &= \underline{E}_2' - \underline{I}_2' \cdot \underline{Z}_2' = \underline{I}_2' \cdot (R_2' + j \cdot X_2') \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_0 - \underline{I}_2' \end{aligned} \right\}, \quad (4.11)$$

де I_0 – струм холостого ходу, що дорівнює

$$\underline{I}_0 = \frac{U_{1ном}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0} = \frac{-\underline{E}_1}{\underline{Z}_0} = \frac{-\underline{E}_2'}{\underline{Z}_2'}, \quad (4.12)$$

а $-\underline{I}_2' = \frac{-\underline{I}_2}{\kappa_{mp}}$ – складова струму I_1 , обумовлена струмом у вторинній обмотці.

Струм у навантаженні реального і зведеного трансформаторів

$$\underline{I}_2 = \frac{U_2}{\underline{Z}_H}, \underline{I}_2' = \frac{U_2'}{\underline{Z}_H'}. \quad (4.13)$$

Коефіцієнт завантаження трансформатора

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}} = \frac{I_2'}{I_{2ном}'}. \quad (4.14)$$

Опір короткого замикання трансформатора

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2' = R_k + j \cdot X_k = Z_k \cdot e^{j \cdot \varphi_k}, \quad (4.15)$$

де $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$ – повний опір короткого замикання,

$R_k = R_1 + R_2'$ і $X_k = X_1 + X_2'$ – активна і реактивна складові повного опору короткого замикання,

$$\varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R_k} \text{ – аргумент } Z_k.$$

Схему заміщення зазвичай вважають симетричною, тобто

$$X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2}; \quad Z_1 = Z_2' = \frac{Z_k}{2}. \quad (4.16)$$

Напруга випробувального короткого замикання та її складові у відсотках від номінальної

$$\left. \begin{aligned} u_k &= \frac{U_{1к}}{U_{1ном}} \cdot 100\% = \frac{I_{1ном} \cdot Z_k}{U_{1ном}} \cdot 100\% \\ u_{ка} &= u_k \cdot \cos \varphi_k = \frac{I_{1ном} \cdot R_k}{U_{1ном}} \cdot 100\% \\ u_{кр} &= u_k \cdot \sin \varphi_k = \frac{I_{1ном} \cdot X_k}{U_{1ном}} \cdot 100\% \end{aligned} \right\}. \quad (4.17)$$

Втрата напруги в трансформаторі

$$\Delta u = \beta \cdot (u_{ка} \cdot \cos \varphi_H + u_{кр} \cdot \sin \varphi_H) = \beta \cdot u_k (\varphi_k - \varphi_H), \quad (4.18)$$

де $\cos \varphi_H$ – коефіцієнт потужності приймача.

З А Д А Ч А

Визначення параметрів схеми заміщення однофазного двохобмоткового трансформатора

У каталозі для однофазного двохобмоткового трансформатора типу ОДГ-10500/110 вказані: потужність $S_{ном} = 10500$ кВА, вища напруга $U_{вн} = 121$ кВ, нижча напруга $U_{ни} = 11$ кВ, струм холостого ходу $I_{0\%} = 3,3$ %, напруга короткого

замикання $u_k = 10,5 \%$, потужність втрат холостого ходу $P_0 = 29,5$ кВт і короткого замикання $P_k = 81,5$ кВт.

Визначити параметри схеми заміщення.

Для розв'язання задачі необхідно:

- знати схему заміщення однофазного двохобмоткового трансформатора;
- за схемою заміщення вміти визначити параметри трансформатора.

Розв'язання

1. Номінальні первинна і вторинна напруги для знижуючого трансформатора: $U_{1ном} = U_{вн} = 121$ кВ, $U_{2ном} = U_{вн} = 11$ кВ.

2. Діючі значення струмів у первинній і вторинній обмотках

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{U_{1ном}} = \frac{10500}{121} = 86,8 \text{ А}, \quad I_{2ном} = \frac{S_{ном}}{U_{2ном}} = \frac{10500}{11} = 954,5 \text{ А}.$$

3. Діюче значення струму холостого ходу $I_0 = \frac{I_{0\%}}{100} \cdot I_{1ном} = \frac{3,3}{100} \cdot 86,8 = 2,86$

А.

4. Діюче значення ЕРС E_2 реального трансформатора в режимі холостого ходу ($I_2 = 0$) $E_2 = 11$ кВ.

5. Коефіцієнт трансформації $\kappa_{тр} = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} = \frac{121}{11} = 11$.

6. Діючі значення ЕРС E_1 і E_2' в режимі холостого ходу $E_1 = E_2' = \kappa_{тр} \cdot E_2 = 121$ кВ.

7. Діюче значення напруги короткого замикання

$$U_{1к} = \frac{u_k \cdot U_{1ном}}{100} = \frac{10,5 \cdot 121000}{100} = 12705 \text{ В}.$$

8. Опір короткого замикання та його складові

$$Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1ном}} = \frac{12705}{86,8} = 146 \text{ Ом}, \quad R_k = \frac{P_k}{I_{1ном}^2} = \frac{81500}{86,8^2} = 10,8 \text{ Ом},$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{146^2 - 10,8^2} = 145,9 \text{ Ом}, \quad \underline{Z}_k = 10,8 + j \cdot 145,9 = 146 \cdot e^{j \cdot 85,77^\circ}.$$

9. Опори первинної і вторинної обмоток

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2' = R_1 + j \cdot X_1 = \frac{\underline{Z}_k}{2} = 5,4 + j \cdot 72,95 = 73 \cdot e^{j \cdot 85,77^\circ}.$$

10. Активний та індуктивний опори реальної вторинної обмотки

$$R_2 = \frac{R_2'}{\kappa_{тр}^2} = \frac{5,4}{11^2} = 0,0446 \text{ Ом}, \quad X_2 = \frac{X_2'}{\kappa_{тр}^2} = \frac{72,95}{11^2} = 0,603 \text{ Ом}.$$

11. Повний опір первинного кола в режимі холостого ходу та його складові

$$Z_{10} = |\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0| = \frac{U_{1ном}}{I_0} = \frac{121000}{2,86} = 42308 \text{ Ом},$$

$$R_{10} = R_1 + R_0 = \frac{P_0}{I_0^2} = \frac{29500}{2,86^2} = 3606 \text{ Ом},$$

$$X_{10} = X_1 + X_0 = \sqrt{Z_{10}^2 - R_{10}^2} = \sqrt{42308^2 - 3606^2} = 42308 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{10} = 3606 + j \cdot 42308 = 42308 \cdot e^{j \cdot 85,13^\circ}.$$

12. Повний опір вітки намагнічування та його складові

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_{10} - \underline{Z}_1 = 3600 + j \cdot 42235 = 42235 \cdot e^{j \cdot 85,13^\circ}, \quad Z_0 = 42235 \text{ Ом}, \quad R_0 = 3600 \text{ Ом}, \\ X_0 = 42235 \text{ Ом}.$$

13. Уточнені значення ЕРС, індукованих головним магнітним потоком $E_1 = E_2' = I_0 \cdot Z_0 = 2,86 \cdot 42235 = 120800 \text{ В}$, тобто ЕРС E_1 і E_2' відрізняються від $U_{1ном}$ на 0,17%, що дозволяє вважати їх практично рівними.

ТЕМА 5. ТРИФАЗНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ

Загальні відомості

Асинхронна машина – це електрична машина змінного струму, в якій в сталому режимі магнітне поле, що бере участь в основному процесі перетворення енергії, і ротор обертаються з різними кутовими швидкостями.

Асинхронні машини бувають двох конструктивних виконань – з короткозамкненим і фазним ротором (з контактними кільцями).

Режими роботи асинхронної машини: двигунний (основний), генераторний і тормозний. Найбільш поширені трифазні асинхронні двигуни (АД).

Номинальні (паспортні) дані двигуна: механічна потужність $P_{ном}$, напруга обмотки статора $U_{1ном}$, струм статора $I_{1ном}$, частота напруги мережі f , частота обертання ротора $n_{2ном}$, ККД $\eta_{ном}$, коефіцієнт потужності $\cos\phi_{ном}$, напруга між

контактними кільцями при розімкненій обмотці ротора $U_{20} = E_2$ і номінальний струм в обмотці ротора $I_{2ном}$ – для АД з фазним ротором.

У каталогах на двигуни, крім того, вказують початкову кратність пускового струму $I_{n*} = I_n / I_{ном}$, початкову кратність пускового моменту $M_{n*} = M_n / M_{ном}$, кратність максимального моменту (перевантажувальну здатність двигуна) $M_{max*} = M_{max} / M_{ном}$.

У паспортних даних АД зазвичай вказують два значення напруги, наприклад, 380/220 В. Менше значення напруги (220 В) – це фазна напруга обмотки статора. Якщо лінійна напруга мережі рівна цьому значенню, то обмотки статора необхідно з'єднати трикутником, якщо лінійна напруга мережі рівна більшому значенню (380 В), то обмотки статора необхідно з'єднати зіркою. Відповідно вказують і два значення лінійного струму $I_{1ном}$ при з'єднанні обмоток зіркою і трикутником.

Частота обертання магнітного поля

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}, 1 \quad (5.1)$$

де f – частота напруги мережі, p – кількість пар полюсів у машині. При промисловій частоті $f = 50$ Гц частота магнітного поля визначається як $n_1 = 3000 / p$.

Ковзання – це відносна різниця частот обертання, або кутових швидкостей магнітного поля і ротора

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}, \quad (5.2)$$

де n_2 – частота обертання ротора, $\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30}$, $\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30}$ – кутові швидкості обертання магнітного поля і ротора.

Частота обертання ротора

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s). \quad (5.3)$$

Частота ЕРС, індукованої в обмотці статора магнітним потоком, що обертається, дорівнює частоті напруги в мережі

$$f_1 = f. \quad (5.4)$$

Частота ЕРС і струму в обмотці ротора

$$f_2 = s \cdot f_1. \quad (5.5)$$

Діючі і комплексні значення ЕРС, індуковані у фазних обмотках статора і нерухомого ротора, а також ротора, що обертається

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 4,44 \cdot f_1 \cdot k_1 \cdot w_1 \cdot \Phi_m, \quad \underline{E}_1 = -j \cdot 4,44 \cdot f_2 \cdot k_1 \cdot w_1 \cdot \underline{\Phi}_m, \\ E_2 &= 4,44 \cdot f_1 \cdot k_1 \cdot w_2 \cdot \Phi_m, \quad \underline{E}_2 = -j \cdot 4,44 \cdot f_1 \cdot k_1 \cdot w_2 \cdot \underline{\Phi}_m \\ E_{2об} &= 4,44 \cdot f_2 \cdot k_2 \cdot w_2 \cdot \Phi_m, \quad \underline{E}_{об} = -j \cdot 4,44 \cdot f_2 \cdot k_2 \cdot w_2 \cdot \underline{\Phi}_m \end{aligned} \right\}, \quad (5.6)$$

де w_1 і w_2 – число витків фазних обмоток статора і ротора, k_1 і k_2 – їх обмоткові коефіцієнти.

Із рівнянь (5.6) зрозуміло, що $E_{2об} = s \cdot E_2$.

Коефіцієнт трансформації ЕРС з урахуванням (5.6):

$$k_e = \frac{w_1 \cdot k_1}{w_2 \cdot k_2}. \quad (5.7)$$

ЕРС розсіювання обмоток статора і ротора

$$\underline{E}_{1роз} = -j \cdot X_1 \cdot I_1, \quad \underline{E}_{2роз} = -j \cdot X_2 \cdot I_2, \quad \underline{E}_{2оброз} = -j \cdot X_{2об} \cdot I_2, \quad (5.8)$$

де $X_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_{1роз}$, $X_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_{2роз}$, $X_{2об} = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot L_{2роз}$ – індуктивні опори, а $L_{1роз}$ і $L_{2роз}$ – індуктивності фазних обмоток статора і ротора, що обумовлені потоками розсіювання. З урахуванням рівняння (5.5) $X_{2об} = s \cdot X_2$.

Струм ротора

$$I_2 = \frac{\underline{E}_{2об}}{\underline{Z}_{2об}} = \frac{\underline{E}_{2об}}{R_2 + j \cdot X_{2об}} = \frac{\underline{E}_2}{R_2/s + j \cdot X_2}, \quad (5.9)$$

де $\underline{Z}_{2об} = R_2 + j \cdot X_{2об}$ – комплексний опір фазної обмотки ротора, що обертається, R_2 – активний опір фазної обмотки ротора, що обертається, R_2/s – те саме для нерухомого ротора.

Зв'язок між параметрами реального і зведеного роторів

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}'_2 &= k_e \cdot \underline{E}_2 = \underline{E}_1, \quad \underline{I}'_2 = \frac{\underline{I}_2}{k_e} \\ R'_2 &= k_e \cdot k_i \cdot R_2, \quad X'_2 = k_e \cdot k_i \cdot X_2 \end{aligned} \right\}, \quad (5.10)$$

де $k_i = \frac{m_1}{m_2} \cdot k_e$ – коефіцієнт трансформації за струмом, m_1 і m_2 – кількість фаз обмоток статора і ротора. Для двигуна з фазним ротором $m_1 = m_2$ і $k_i = k_e$.

Схему заміщення двигуна представлено на рис. 5.1, де R_1 – активний опір фазної обмотки статора, R_2' – зведений активний опір фазної обмотки нерухомого ротора, $R_2' \cdot \frac{1-s}{s}$ – зведений активний опір ротора, що відображає процес перетворення електричної енергії в механічну.

Активна потужність підведеної електричної енергії

$$P_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{1л} \cdot I_{1л} \cdot \cos \varphi. \quad (5.11)$$

Механічна потужність на валу

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2 = 0,105 \cdot M_2 \cdot n_2. \quad (5.12)$$

ККД двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P_n}{P_2 + \sum P_n}. \quad (5.13)$$

Потужність втрат у двигуні

$$P_n = P_{ne1} + P_{ne2} + P_{nm1} + P_{nmх} + P_{nd}, \quad (5.14)$$

де $P_{ne1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2$, $P_{ne2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = 3 \cdot R_2' \cdot I_2'^2$ – потужність електричних втрат в обмотках статора і ротора, P_{nm1} – потужність магнітних втрат в осерді статора, $P_{nmх}$ і $P_{nd} = 0,005 \cdot P_{ном}$ – потужність механічних і додаткових втрат.

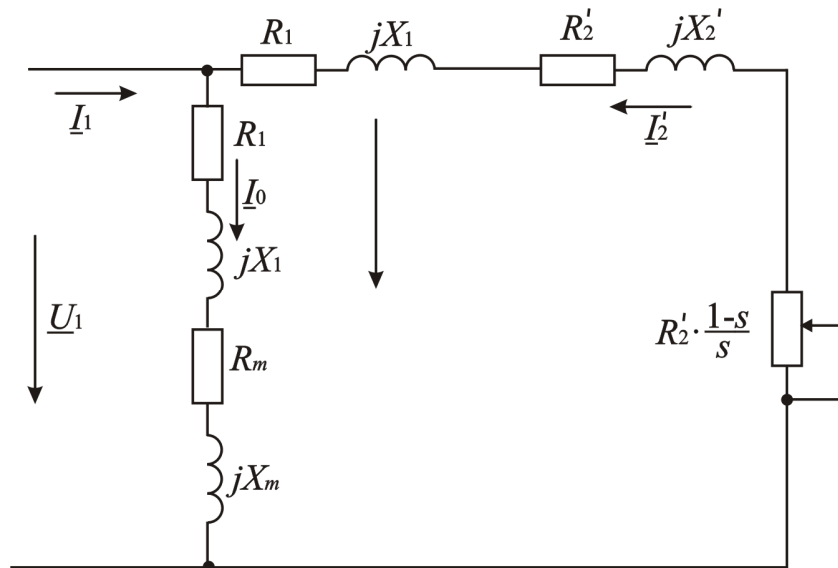


Рис. 5.1

Електромагнітний (обертаючий) момент

$$M = \frac{m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2}{s \cdot \omega_1} = \frac{3 \cdot \frac{R_2' \cdot I_2'^2}{s}}{\omega_1} = C \cdot \Phi_m \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2 =$$

$$= C \cdot \Phi_m \cdot I_{2a} = \frac{C' \cdot \frac{R_2'}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_k^2}, \quad (5.15)$$

де $I_{2a} = I_2 \cdot \cos \psi_2$ – активна складова струму в обмотці ротора, $\cos \psi_2 = \cos(\underline{E}_2 \wedge \underline{I}_2)$, $X_k = X_1 + X_2'$ – індуктивний опір двигуна, а сталі C і C' відповідно дорівнюють $C = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot p \cdot \omega_1 \cdot k_1$, $C' = \frac{3 \cdot p \cdot U_1^2}{2 \cdot \pi \cdot f}$.

Критичне ковзання, що відповідає максимальному моменту M_{max}

$$s_m = \frac{R_2' + R_D'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \frac{R_2 + R_D}{X_2}, \quad (5.16)$$

де R_D' – зведений додатковий опір реостату в колі ротора.

Максимальний момент

$$M_{max} = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{1}{R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (5.17)$$

Спрощене рівняння механічної характеристики у відносних одиницях (формула Клосса)

$$M_* = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}. \quad (5.18)$$

Критичне ковзання може бути визначене з рівняння (5.16) за відомими параметрами обмотки ротора або з рівняння (5.18) за відомими значеннями моментів і ковзання для будь-якого характерного режиму роботи АД (пуск, номінальний режим). Наприклад, критичне ковзання, відповідне природній механічній характеристиці, може бути знайдене з відомих для номінального режиму ковзанню $s_{ном}$ і обертаючому моменту $M_* = 1$

$$s_m = s_{ном} \cdot \left(M_{max*} = \sqrt{M_{max*}^2 - 1} \right). \quad (5.19)$$

Робочі характеристики двигуна – це залежності $n_2(P_2)$, $s(P_2)$, $M_2(P_2)$, $P_1(P_2)$, $I_1(P_2)$, $\eta(P_2)$, $\cos\varphi(P_2)$

З А Д А Ч А

Визначення параметрів трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Двигун з короткозамкненим ротором серії 4А має наступні номінальні дані: потужність $P_{ном} = 45$ кВт; напруга 380 В; частота напруги $f = 50$ Гц; частота обертання $n_{2ном} = 1475$ об/хв.; ККД $\eta_{ном} = 0,93$; коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{ном} = 0,9$. Також відомі початкова кратність пускового струму $I_n^* = 7$, початкова кратність пускового моменту $M_n^* = 1,4$ і перевантажувальна здатність $M_{max}^* = 2,5$.

Визначити:

- кількість пар полюсів;
- частоту обертання магнітного поля;
- ковзання при номінальному навантаженні;
- номінальний обертовий момент;
- активну потужність електричної енергії, підведеної до двигуна;
- номінальний і пусковий струми статора;
- пусковий і максимальний моменти при номінальному ковзанні;
- як зміняться пусковий струм, пусковий і максимальний моменти при зниженні напруги на 10%.

Для розв'язання задачі необхідно:

- знати основні характеристики асинхронного двигуна;
- вміти за відомих каталожних даних розраховувати параметри двигуна.

Розв'язання

1. При частоті мережі $f = 50$ Гц частота обертання магнітного поля дорівнює $n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{p} = \frac{3000}{p}$ і в залежності від кількості пар полюсів p може набувати значення 3000; 1500; 1000 об/хв і т.д.

2. Оскільки ковзання в номінальному режимі роботи АД складає декілька відсотків, то частота обертання ротора відповідно до рівняння (5.3) мало відрізняється від частоти обертання магнітного поля. Щоб знайти частоту обертання магнітного поля, необхідно частоту обертання ротора

$n_{2ном} = 1475$ об/хв округлити до найбільшого цілого значення з наведеного в пункті 1 ряду, звідки $n_1 = 1500$ об/хв, що відповідає кількості пар полюсів $2 \cdot p = 4$.

3. Ковзання в номінальному режимі $s_{ном} = 1 - \frac{n_{2ном}}{n_1} = 1 - \frac{1475}{1500} = 0,016$.

4. Номінальний момент двигуна

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_2} = 9,55 \cdot \frac{P_{ном}}{n_{2ном}} = 9,55 \cdot \frac{45000}{1475} = 291 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

5. Активна потужність електричної енергії, підведеної до двигуна

$$P_{1ном} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} = \frac{45000}{0,93} = 48400 \text{ Вт}.$$

6. Номінальний струм двигуна

$$I_{1ном} = \frac{P_{1ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном} \cdot \cos \phi_{1ном}} = \frac{48400}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9} = 81,8 \text{ А}.$$

7. Пусковий струм $I_n = I_{n*} \cdot I_{1ном} = 7 \cdot 81,8 = 572 \text{ А}.$

8. Пусковий момент $M_n = M_{n*} \cdot M_{ном} = 1,4 \cdot 291 = 407 \text{ Н}\cdot\text{м}.$

9. Максимальний момент $M_{max} = M_{max*} \cdot M_{ном} = 2,5 \cdot 291 = 727,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$

10. Пусковий струм, пусковий і максимальний моменти при напрузі

$$U_1 = 0,9 \cdot U_{1ном} : I_n' = I_n \cdot \frac{U_1}{U_{1ном}} = 572 \cdot \frac{0,9 \cdot 380}{380} = 515 \text{ А},$$

$$M_n' = M_n \cdot \left(\frac{0,9 \cdot U_1}{U_{1ном}} \right)^2 = 407 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot 380}{380} \right)^2 = 323 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_{max}' = M_{max} \cdot \left(\frac{0,9 \cdot U_1}{U_{1ном}} \right)^2 = 727,5 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot 380}{380} \right)^2 = 589 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

ТЕМА 6. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Загальні відомості

Для приведення у дію виробничих машин і механізмів використовують електропривід, що складається з електродвигуна, передавального пристрою і систем перетворення, керування й автоматизації. У деяких випадках передавальні пристрої і перетворювачі (струму, частоти та інші) можуть бути відсутні.

Характер руху електроприводу описує рівняння моментів:

$$M = M_c + M_\delta, \quad (6.1)$$

де M – обертовий момент двигуна, M_c – статичний момент опору механізму,

$M_\delta = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$ – динамічний момент, J – момент інерції обертових мас, $\frac{d\omega}{dt}$ –

кутове прискорення.

У сталому режимі $M = M_c$.

Стале значення кутової швидкості ω або частоти обертання n у двигунів (окрім синхронних) залежить від моменту опору механізму (навантаження).

Знаходження кутової швидкості або частоти обертання і моменту M в сталому режимі здійснюється графічним методом, як показано на рис. 6.1. Точка перетину характеристики робочого механізму (крива 1) з характеристикою електродвигуна (крива 2) відповідає значенням ω (або n) і M .

При роботі двигуна відбувається стале виділення теплоти, що призводить до його нагріву. Перевищення температури електродвигуна над температурою навколишнього середовища описується рівнянням.

$$\vartheta = \frac{Q}{A} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \vartheta_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (6.2)$$

де Q – кількість теплоти, що виділяється за одиницю часу, A – тепловіддача

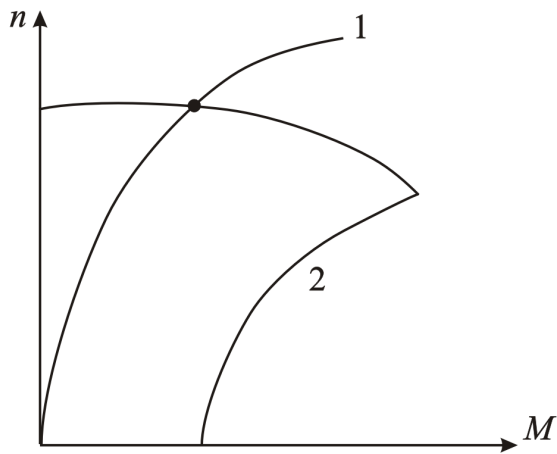


Рис. 6.1

навколишнього середовища за одиницю часу, $T = C/A$ – стала часу, C – теплоємність двигуна, ϑ_0 – перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища в момент ввімкнення двигуна при $t = 0$.

У сталому тепловому режимі, коли кількість теплоти, що виділяється в двигуні, і

теплоти, що розсіюється в навколишнє середовище, стають однаковими (теоретично при $t = \infty$, а практично при $t \cong 4 \cdot T$), перевищення температури досягає максимального значення $\vartheta_{\infty} = Q/A$. З урахуванням останнього

$$\vartheta = \vartheta_{\infty} - (\vartheta_{\infty} - \vartheta_0) \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (6.3)$$

Стале значення перевищення температури двигуна залежить від потужності P_2 на його валу.

Відповідно до характеру роботи виробничих механізмів в умовах експлуатації розрізняють наступні основні режими роботи двигунів: тривалий, короткочасний і повторно-короткочасний.

Тривалий режим – режим, у якому електродвигун може працювати тривалий час, при цьому стале значення перевищення температури двигуна ϑ_{∞} над температурою навколишнього середовища не перевищує встановленого значення. Такий режим роботи характерний для двигунів вентиляторів, насосів, компресорів, транспортерів, потужних металорізючих станків.

Короткочасний режим – режим, при якому перевищення температури електричного двигуна досягає гранично допустимого значення для даного класу ізоляції, але не досягає сталого значення. У цьому режимі двигун працює впродовж порівняно незначного проміжку часу, а перерва в роботі значна, і двигун встигає охолонути до температури навколишнього середовища. У короткочасному режимі працюють двигуни затворних шлюзів, підйомних механізмів розвідних мостів і т.д.

Повторно-короткочасний режим – режим, при якому періоди роботи електродвигуна під навантаженням чергуються з паузами, коли двигун відключається. При цьому періоди роботи і паузи не настільки тривалі, щоб температура двигуна досягла сталого значення. Такий режим роботи характерний для двигунів підйомно-транспортних механізмів, пресів, штампувальних машин і деяких металообробних станків. Час циклу цього режиму $t_u = t_p + t_0$, де t_p – час роботи двигуна, t_0 – час паузи. Час циклу зазвичай не перевищує десяти хвилин.

Повторно-короткочасний режим характеризується тривалістю включення

$$TB = \frac{t_p}{t_u} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% . \quad (6.4)$$

Для електродвигунів стандартні значення $TB = 15, 25, 40$ і 60% .

Принципи вибору електродвигунів

Вибір двигуна полягає в підборі для відповідного механічного обладнання електродвигуна, що підходить за родом струму, напругою, потужністю і частотою.

Для машин і механізмів, що не потребують регулювання частоти обертання, рекомендується застосовувати асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором або синхронні двигуни. Двигуни постійного струму дозволяється застосовувати тільки у випадках, коли двигуни змінного струму не відповідають характеристикам механізму або не є економічними. Синхронні двигуни рекомендується застосовувати для нерегульованих механізмів тривалого режиму роботи при одиничній потужності 100 кВт і більше.

Сучасною серією асинхронних двигунів є серія 4А. Двигуни випускають в двох варіантах виконання за ступенем впливу навколишнього середовища: захищені (IP23) і закриті, що обдуваються (IP44).

Припустима температура нагріву ізоляції електродвигуна і температура навколишнього середовища визначають значення потужності P_2 на валу двигуна. Температура навколишнього середовища визначена стандартом і складає 40°C . Для кожного класу ізоляції встановлені значення припустимого перевищення температури: А – 60°C , Е — 75°C , В – 80°C , F – 100°C , Н – 125°C .

Вибір двигуна для тривалого режиму відбувається, виходячи з умови $P_{ном} \geq P$. Якщо двигун призначений для роботи в тривалому режимі при

змінному навантаженні, попередній вибір двигуна відбувається, виходячи з умови $P_{ном} \geq P_{cp}$, а потім здійснюється перевірочний розрахунок.

На практиці застосовують методи, засновані на розрахунку еквівалентних значень струмів, моментів, потужностей.

Найбільш простим методом вибору двигуна є метод визначення його еквівалентної потужності

$$P_{екв} = \sqrt{\frac{P_n^2 \cdot t_n + P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_2^2 \cdot t_2}{k_1 \cdot (t_n + t_2) + t_1 + t_2 + \dots + k_2 \cdot t_0}}, \quad (6.5)$$

де P_n, P_2, P_1, P_2 і т.д. – значення потужності на валу двигуна у відповідні проміжки часу (пуску, гальмування і т.д.) $t_n, t_2, t_1, t_2; t_0$ – час паузи; k_1 – коефіцієнт, що враховує зниження тепловіддачі при пуску і гальмуванні; k_2 – коефіцієнт, що враховує зменшення тепловіддачі під час паузи. Для двигунів постійного струму $k_1 = 0,75$ і $k_2 = 0,5$; для асинхронних двигунів $k_1 = 0,5$ і $k_2 = 0,25$.

Номінально потужність двигуна обирається з умови $P_{ном} \geq P_p = P_{екв}$. Цей метод може використовуватися при виборі двигунів постійного струму, асинхронних і синхронних двигунів.

Перевірку двигуна за перевантажувальною здатністю виконують шляхом порівняння найбільшого моменту навантаження $M_{нб}$, що визначається за графіком навантаження, з максимальним моментом двигуна M_{max} . Необхідно дотриматись умови

$$M_{нб} \leq k_u \cdot M_{max}, \quad (6.6)$$

де k_u – коефіцієнт, що враховує зниження напруги.

Для повторно-короткочасного режиму номінальна потужність двигуна обирається для одного з значень TB (15, 25, 40, 60%).

При багатоступеневому графіку навантаження еквівалентна потужність за період роботи визначається за графіком навантаження

$$P_{екв} = \frac{\sum_{k=1}^n P_k^2 \cdot t_k}{\sum_{k=1}^n t_k}, \quad (6.7)$$

де P_k – потужність двигуна в проміжок часу t_k , n – число ступенів циклу графіку навантаження. При одноступеневому графіку $P_{екв} = P$.

Тривалість вмикання

$$TB = \frac{\sum_{k=1}^n t_k}{\sum_{k=1}^n t_k + t_0} \cdot 100\% . \quad (6.8)$$

Потужність двигуна обирають, виходячи з умови

$$P_{ном} \geq P_p = P_{екв} \cdot \sqrt{\frac{TB}{TB_{ст}}} , \quad (6.9)$$

де $TB_{ст}$ – стандартне значення TB , вказане в паспорті двигуна.

Коефіцієнти k_m – механічного перевантаження двигуна в короткочасному режимі роботи при номінальній напрузі і k_m – теплового перевантаження двигуна відповідно дорівнюють

$$\left. \begin{aligned} k_m = P_{кр*} = \frac{P_{кр}}{P_{ном}} &\cong M_* \\ k_m = P_{кр*}^2 = M_*^2 = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{кр}}{T}}} \end{aligned} \right\} , \quad (6.10)$$

де $t_{кр}$ – час роботи в короткочасному режимі (стандартні тривалості періоду короткочасної роботи 10, 30, 60 і 90 хвилин), T – стала нагріву двигуна (для асинхронних двигунів захищеного виконання малої і середньої потужності зазвичай приймають 15-60 хвилин).

ЗАДАЧА

Вибір асинхронного двигуна для вентилятора

Визначити необхідну потужність і вибрати за каталогом асинхронний двигун з короткозамкненим ротором загальнопромислового призначення для вентилятора з продуктивністю $Q = 5000$ м3/год при тиску 981 Па, ККД вентилятора 40%, а частота обертання 1450 об/хв.

Для розв'язання задачі необхідно:

- знати, як пов'язані між собою продуктивність вентилятора і потужність;
- вміти користуватися каталогом для вибору двигуна.

Розв'язання

Необхідна розрахункова потужність двигуна $P_p = \frac{Q \cdot p}{\eta_e \cdot \eta_n}$, де p – тиск, η_e –

ККД вентилятора, η_n – ККД передачі.

$$P_p = \frac{5000 \cdot 981}{3600 \cdot 0,4 \cdot 1} = 3406 \text{ Вт.}$$

Із каталогу вибираємо найближчий, більший за потужністю, двигун типу 4A100L4УЗ, з номінальною потужністю 4 кВт і частотою обертання 1450 об/хв. Обраний двигун не потребує перевірки на нагрів, перевантажувальну здатність і на пусковий момент, оскільки він розрахований на роботу при номінальній потужності для тривалого режиму і має малий протидіючий момент при пуску.

ТЕМА 7. ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В БУДІВНИЦТВІ. ВИБІР ПРОВОДУ

Загальні відомості

Вибір марки проводу

Проводи складаються з провідникової жили, ізоляції і захисного шару. За матеріалом провідникової жили проводи бувають мідні й алюмінієві. У марці проводів з алюмінієвою жилою присутня літера «А». Якщо провідникова жила складається з великої кількості тонких перевитих дротів, то такий провід буде гнучким і в марці проводу це буде відмічатися літерою «Г».

В якості ізолюючого матеріалу застосовують (у дужках вказано позначення даної ізоляції в марці проводу): гуму (Р), наїрітову гуму (Н), полівінілхлорид (В), поліетилен (П). Окрім ізольованих проводів для повітряних ліній використовують неізольовані (голі) проводи, для яких в якості провідникового матеріалу застосовують сталь.

Захисний шар використовують для захисту ізоляції від механічних і хімічних впливів. Для захисту використовують обплетення з пряжі, пластмасові або металеві оболонки.

Вибір перерізу проводу

Промисловість випускає проводи наступних перерізів, мм²: 0,5; 0,75; 1,0; 1,2; 2,0; 2,5; 4; 5; 6; 8; 10; 16; 25; 35; 50 і т.д. Вибір перерізу здійснюється за трьома критеріями: за механічною міцністю ($S_{мх}$), за струмом навантаження (S_I) і за втратою напруги ($S_{\Delta U\%}$).

1. Вибір за механічною міцністю

Залежно від умов прокладки проводів в довідникових таблицях вказують мінімально допустимі перерізи з точки зору механічної міцності. Обраний переріз повинен відповідати умові $S_{mx} \geq S_{min}$. Для більшості умов прокладки алюмінієвих проводів $S_{min} = 2,5 \text{ мм}^2$, а для мідних $S_{min} = 0,5$ або $0,75 \text{ мм}^2$.

2. Вибір за струмом навантаження

Струм у провіднику залежить від потужності електроприймача: чим більша потужність, тим більший струм у провіднику. У провіднику з опором R при протіканні струму I має місце потужність втрат $I^2 \cdot R$, при цьому провід і його ізоляція нагріваються. Кожний клас ізоляції має максимально припустиму температуру нагріву, і відповідно максимально припустимий струм I_{np} .

Залежно від перерізу проводу, матеріалу провідникової жили, класу ізоляції, умов прокладки проводів і кількості жил у довідникових таблицях наводять припустимі значення струмів у проводах. Знайшовши розрахунковий струм I_p в проводі, за таблицями обирають такий переріз S_b , щоб $I_{np} \geq I_p$.

У випадку однофазного приймача, приєднаного в кінці лінії, що має електричну потужність P , розрахунковий струм визначають за формулою

$$I_p = \frac{P}{U_\phi \cdot \cos \varphi}, \quad (7.1)$$

де U_ϕ – фазна напруга; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності приймача.

У випадку трифазного приймача, приєднаного в кінці лінії, розрахунковий струм

$$I_p = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_\lambda \cdot \cos \varphi}, \quad (7.2)$$

де P – потужність трифазного приймача, U_λ – лінійна напруга.

Як однофазні, так і трифазні приймачі можуть бути розподілені вздовж однієї лінії, тобто приєднані до лінії передачі в різних точках. У цьому випадку в формулах (7.1) і (7.2) замість потужності P треба підставляти розрахункову потужність

$$P_p = k_n \cdot \sum_{i=1}^n P_i, \quad (7.3)$$

де P_i – номінальна потужність i -го електроприймача, k_n – коефіцієнт попиту, n – кількість електроприймачів, приєднаних до лінії.

Коефіцієнт попиту враховує той факт, що не всі приймачі можуть бути ввімкнені одночасно. Для декількох світильників, приєднаних до лінії, що вмикаються одним перемикачем, коефіцієнт попиту $k_n = 1$. Для лінії, що живить світильники ряду приміщень, $k_n = 0,8...0,9$.

3. Вибір за втратами напруги

Кожний електроприймач має номінальну напругу, що вказана у паспорті. Більшість приймачів допускають відхилення напруги на $\pm 5\%$. Тому в лініях передачі від джерела живлення до найвіддаленішого приймача допускається мати втрати напруги не більше 5%.

Як відомо, на ділянці електричного кола зі струмом I втрати напруги дорівнюють $\Delta U = I \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)$, де R і X – активний і реактивний опори цієї ділянки. У мережах з напругою до 1 кВ індуктивним опором нехтують і вважають, що

$$\Delta U = I \cdot R \cdot \cos \varphi. \quad (7.4)$$

У випадку однофазного навантаження в кінці лінії струм визначають за (7.1), а опір - з формули $R = 2 \cdot l / \gamma \cdot S$, де l – довжина лінії, м; γ – питома провідність, м/(Ом·мм²); S – переріз проводу, мм².

Замінивши втрату напруги ΔU в вольтах на втрату напруги у відсотках $\Delta U \% = \Delta U \cdot 100\% / U_{ном}$, отримаємо формулу для визначення перерізу проводу $S_{\Delta U \%}$, що забезпечує припустиму втрату напруги:

- для однофазного навантаження в кінці лінії

$$S_{\Delta U \%} \geq \frac{200 \cdot P \cdot l}{\gamma \cdot \Delta U \% \cdot U_{\phi}^2}; \quad (7.5)$$

- для однофазного навантаження, розподіленого вздовж лінії

$$S_{\Delta U \%} \geq \frac{200 \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot l_i}{\gamma \cdot \Delta U \% \cdot U_{\phi}^2}; \quad (7.6)$$

- для трифазного навантаження в кінці лінії

$$S_{\Delta U \%} \geq \frac{100 \cdot P \cdot l}{\gamma \cdot \Delta U \% \cdot U_{л}^2}; \quad (7.7)$$

- для трифазного навантаження, розподіленого вздовж лінії

$$S_{\Delta U\%} \geq \frac{100 \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot l_i}{\gamma \cdot \Delta U\% \cdot U_n^2}. \quad (7.8)$$

У формулах (7.5)-(7.8) необхідно вважати питому провідність алюмінієвих і мідних проводів відповідно рівними 33 і 54 м/(Ом·мм²). Знайшовши три перерізи проводу, в якості обраного перерізу S приймають максимальне з трьох (S_{mx} , S_I , $S_{\Delta U\%}$).

У чотирипровідних мережах із заземленою нейтраллю провідність нейтральних проводів повинна бути не менше 50% провідності лінійних проводів.

З А Д А Ч А

Вибір перерізу проводу

Асинхронний двигун потужністю $P_2 = 4,5$ кВт, $\cos\varphi = 0,8$, $\eta = 0,85$, $U_{ном} = 380$ В приєднаний до лінії довжиною $l = 40$ м. Вибрати переріз проводу марки АПРТО при $\Delta U\% = 3\%$.

Для розв'язання задачі необхідно:

- знати методику вибору перерізу проводів;
- вміти за довідниковими даними вибирати переріз проводу.

Розв'язання

1. Переріз проводу за механічною міцністю $S_{mx} = 2,5$ мм².

2. Розрахунковий струм $I_p = \frac{P_2}{\eta \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi} = \frac{4500}{0,85 \cdot \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 10$ А.

3. Відповідно за довідниковими даними [3] для трипровідної лінії, прокладеної в сталевій трубі, переріз проводу за струмом навантаження $S_I = 2$ мм² ($I_{np} = 18$ А > 10 А).

3. Переріз за втратою напруги ($\Delta U\% = 3\%$).

$$S_{\Delta U\%} = \frac{100 \cdot P_2 \cdot l}{\eta \cdot \gamma \cdot \Delta U\% \cdot U_n^2} = \frac{100 \cdot 4500 \cdot 40}{0,85 \cdot 33 \cdot 3 \cdot 380^2} = 1,5 \text{ мм}^2.$$

4. Обираємо значення перерізу $S = 2,5$ мм².

РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Рибалко М. П. Теоретичні основи електротехніки. Лінійні електричні кола [Текст]: підручник / М. П. Рибалко, В. О. Есауленко, В. І. Костенко. – Донецьк: Новий світ, 2003. – 513 с.
2. Шегедін О. І. Теоретичні основи електротехніки. Частина 1: Навчальний посібник для студентів дистанційної форми навчання електротехнічних та електромеханічних спеціальностей вищих навчальних закладів [Текст]: Підручник О. І. Шегедін, В. С. Маляр. – Львів: Новий Світ, 2004. – 168 с.
3. Иванов И. И. Электротехника. Основные положения, примеры и задачи [Текст]: Учебник / И. И. Иванов, А. Ф. Лукин, Г. И. Соловьев. – СПб.: Лань, 2002. – 192 с.
4. Паначевний Б. І. Загальна електротехніка: теорія і практикум [Текст]: Підручник / Б. І. Паначевний, Ю. Ф. Свєргун. – К.: Каравела, 2004. – 440 с.
5. Алиев И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию (5-е изд. испр.) / Серия «Справочники» [Текст]: Учебник / И. И. Алиев. – Ростов н/Д: Феникс, 2004. – 480 с.
6. Электротехника // Под ред. проф. В. Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1985. – 380 с.
7. Забродин Ю. С. Промышленная электроника [Текст]: Учебник / Ю. С. Забродин. – М.: Альянс-книга КТК, 2008. – 496 с.
8. Копылов И. П. Электрические машины [Текст]: Учебник / И. П. Копылов. – М.: Энергоиздат, 2004. – 340 с.
9. Яцун М. А. Электричні машини [Текст]: Підручник / М. А. Яцун. – Львів: Вид. Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2001. – 428 с.
10. Дворяшин Б. В. Основы метрологии и радиоизмерения [Текст]: Учебник / Б. В. Дворяшин. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки
до проведення практичних занять
з дисциплін

«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА» та «ЕЛЕКТРОТЕХНІКА В БУДІВНИЦТВІ»

(для студентів заочної форми навчання за напрямками підготовки
6.060101 «Будівництво», 6.060103 «Гідротехніка (Водні ресурси)»)

Укладачі: **ДОРОХОВ** Володимир Олександрович,
ТУГАЙ Дмитро Васильович

Відповідальний за випуск: *Я. Б. Форкун*

Редактор: *С. В. Тимошук*

Комп'ютерне верстання: *І. В. Волосожарова*

План 2011, поз. 262 М

Підп. до друку 12.09.2011 р.

Формат 60×84/16

Друк на ризографі.

Ум.-друк. арк. 2,3

Зам. №

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12.05.2011 р.