

ПРИЛАДИ. РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621. 313

Ю.В. Антипенко, здобувач

Житомирський державний технологічний університет

**ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
СИНХРОННО-АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

(Представлено д.т.н., проф. Манойловим В.П.)

В статті розглянуті та обґрунтовані методи експериментального визначення фізичних та безрозмірних параметрів двофазних синхронно-асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Запропоновані методи дозволяють встановлювати ступінь точності математичних моделей зазначених двигунів і визначити співвідношення, які забезпечують оптимальність їх енергетичних характеристик.

Відомо, що при створенні будь-якого електродвигуна важливо надійно визначити його відносні параметри, які дозволяють найбільш раціонально виразити енергетичні характеристики, здійснити їх оптимізацію та перевірити точність теоретичних досліджень (математичної моделі) електродвигуна. Синхронно-асинхронний двигун, згідно з патентом України № 35641 та патентом Росії № 2153755, є єдиним типом синхронного двигуна, який має короткозамкнений ротор та можливість передавати в нього електроенергію індукційним шляхом безпосередньо від поля статора незалежно від режиму його роботи. Зазначений двигун має нетрадиційну конструкцію ротора та нетрадиційний спосіб живлення обмоток статора спеціальними модульованими напругами. Ця обставина викликає появу специфічних відносних параметрів електродвигуна та необхідність розробки і обґрунтування способу їх експериментального визначення. У зв'язку з цим в даній статті пропонується зручна та внутрішньо узгоджена методика визначення відносних параметрів для зазначеного типу електродвигуна.

1. Енергетичні характеристики синхронно-асинхронного двигуна, такі як ККД, $\cos \varphi$, момент та інші, доцільно виразити через безрозмірні (відносні) параметри, що є безрозмірними комбінаціями фізичних параметрів, які входять у систему рівнянь двигуна. У нашому випадку фізичні параметри (рис. 1) – це активні опори обмоток статора r_1, r_2 і ротора r_p , індуктивності обмоток статора L_1, L_2 , ротора L_p та максимальні значення взаєміндукції $M_{1p \max} = M_{m1}$; $M_{2p \max} = M_{m2}$ між обмотками статора і ротора, а також частота несучої ω та частота огинаючої Ω статорних напруг $U_1(t) = U_{m1} \cdot \sin \omega t \cdot \cos \Omega t$, $U_2(t) = U_{m2} \cdot \sin \omega t \cdot \sin \Omega t$ двофазного двигуна.

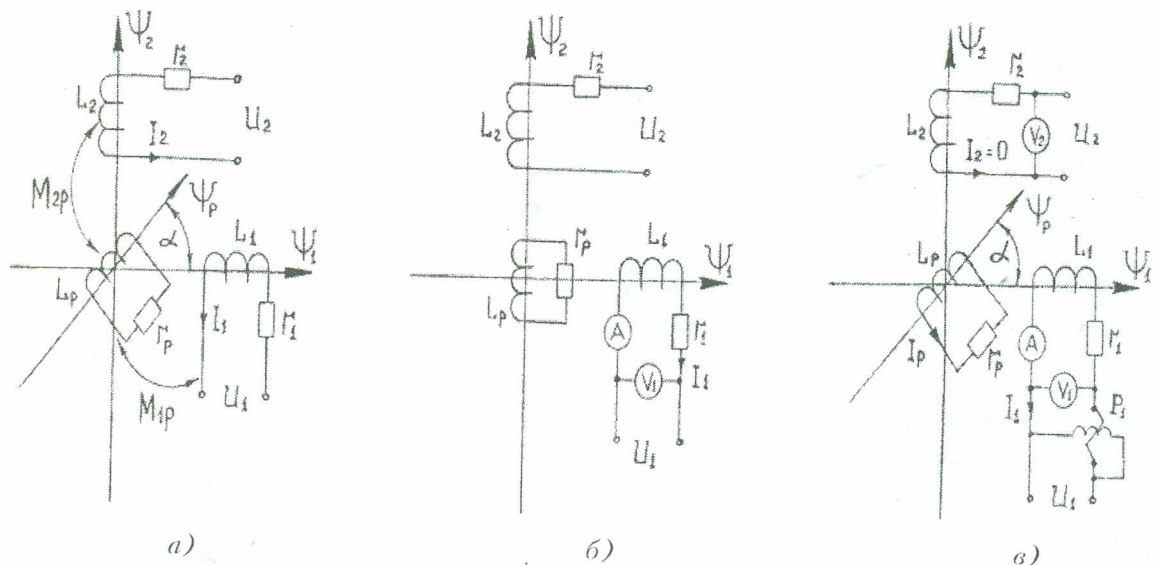


Рис. 1

Двофазний двигун наданий як приклад тому, що будь який багатofазний двигун, як відомо [1], може бути приведений до двофазного, тобто мати ідентичні з ним енергетичні характеристики.

Як за безрозмірні параметри зазначеного двигуна постають величини:

$$K_1^2 = \frac{M_{m1}}{L_1 \cdot L_p}; K_2^2 = \frac{M_{m2}^2}{L_2 \cdot L_p}; \frac{r_1}{\omega L_1}; \frac{r_2}{\omega L_2}; \frac{r_p}{\omega L_p}; \rho = \frac{\Omega}{\omega}, \quad (1)$$

що змінюються у вузьких межах. Так, наприклад, коефіцієнт зв'язку статорної і роторної обмоток $K_{1,2}^2$ змінюється в межах $K_{1,2}^2 = 0,7...0,85$; відносна швидкість $\rho = 0...0,9$, у той час як

$\frac{\Omega_{\max}}{\Omega_{\min}} = 0...10000$ і більше, а відносні опори статора і ротора: $\frac{r_1}{\omega L_1}; \frac{r_2}{\omega L_2}; \frac{r_p}{\omega L_p}$ лежать у межах $0,1...0,3$.

Зручність формул, записаних через безрозмірні параметри, полягає у їх внутрішньому стрункому порядку, який дозволяє легко бачити взаємний вплив параметрів на кінцеву величину і встановлювати співвідношення з метою оптимізації необхідних енергетичних характеристик.

2. Раціонально обрані відносні параметри змінюються, як правило, у вузьких межах, при зміні в широких межах режимів роботи двигунів будь-якої потужності. Завдяки цьому аналітичні вирази енергетичних характеристик, записані у відносних одиницях, і висновки, отримані з таких виразів, правдиві для всіх однотипних синхронно-асинхронних двигунів.

3. Встановлення оптимальних співвідношень і створення оптимальних методів розрахунку можна здійснити тільки на базі достатньо точної математичної моделі двигуна. Мірою точності математичної моделі є ступінь збігу теоретичних і експериментально знятих характеристик двигуна. При цьому в аналітичні вирази характеристик, отриманих із математичної моделі, повинні бути підставлені безрозмірні параметри, зняті дослідним шляхом на випробуваному двигуні.

Експериментальне визначення параметрів синхронно-асинхронного двигуна повинно здійснюватися на підставі системи рівнянь двигуна, складеної для прийнятого режиму вимірювання. У нашому випадку найбільш прийнятним є режим вимірювання при нерухомому роторі ($\Omega = 0$) і живленні статорних обмоток двигуна синусоїдальними напругами $U_1(t), U_2(t)$ частотою, рівною частоті несучої ω . При цьому в обмотках двигуна протікають синусоїдальні токи $i_1(t), i_2(t), i_p(t)$, як у лінійному електричному колі. Для двигуна з двофазною обмоткою статора й однією обмоткою на роторі, відповідно до рис. 1, знайдемо сумарні потокозчеплення всіх обмоток [2]:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= L_1 i_1 + M_{m1} \cos \alpha \cdot i_p; \\ \psi_2 &= L_2 i_2 + M_{m2} \sin \alpha \cdot i_p; \\ \psi_3 &= L_p i_p + M_{m1} \cos \alpha \cdot i_1 + M_{m2} \sin \alpha \cdot i_2; \quad (\alpha = \text{const}). \end{aligned} \quad (2)$$

З урахуванням (2) одержимо систему рівнянь рівноваги напруг у миттєвій і комплексній формі запису:

$$\begin{cases} U_1(t) = \frac{d\psi_1}{dt} + r_1 i_1 = \frac{d}{dt}(L_1 i_1 + M_{m1} \cos \alpha \cdot i_p) + i_1 r_1 \\ U_2(t) = \frac{d\psi_2}{dt} + r_2 i_2 = \frac{d}{dt}(L_2 i_2 + M_{m2} \sin \alpha \cdot i_p) + i_2 r_2 \\ U_p(t) = 0 = \frac{d\psi_p}{dt} + r_p i_p = \frac{d}{dt}(L_p i_p + M_{m1} \cos \alpha \cdot i_1 + M_{m2} \sin \alpha \cdot i_2) + i_p r_p \end{cases}$$

звідки

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_p Z_{m1} \cos \alpha; \quad (3)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_p Z_{m2} \sin \alpha; \quad (4)$$

$$U_p = 0 = \dot{I}_1 Z_{m1} \cos \alpha + \dot{I}_2 Z_{m2} \sin \alpha + \dot{I}_p Z_p, \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} Z_1 &= r_1 + j\omega L_1; \quad Z_2 = r_2 + j\omega L_2; \quad Z_p = r_p + j\omega L_p; \\ Z_{m1} &= j\omega M_{m1}; \quad Z_{m2} = j\omega M_{m2}; \quad \alpha = \text{const} \end{aligned} \quad (6)$$

є відповідно комплексні опори 1-ї та 2-ї обмоток статора, обмотки ротора, максимальні опори взаємодукації і кут повороту ротора щодо осі горизонтальної обмотки статора (рис. 1, а).

4.1. Визначення активного опору обмоток статора r_1, r_2 здійснюється на постійному струмі за допомогою омметра або мосту.

4.2. Визначення індуктивностей L_1, L_2 обмоток статора здійснюється відповідно до схеми, зображеної на рис. 1, б, де на першу обмотку подається синусоїдальна напруга $U_1 \cong (0,2 \dots 0,5)U_{1 \text{ ном}}$, а друга обмотка розімкнута ($I_2 = 0$).

При цьому ротор повернуто на такий кут $\alpha = \alpha_0 = 90^\circ$, при якому струм I_1 досягає свого мінімального значення, а тому струм ротора I_p перетворюється в нуль. У такий спосіб режим вимірювання відбувається за умови $I_2 = 0, I_p = 0, U_2 = 0, \alpha = 90^\circ$, при цьому рівняння (4), (5) тотожно дорівнюють нулю. Рівняння (3) приймає вигляд:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}_1 \cdot (r_1 + j\omega L_1),$$

звідки $U_1 = I_1 \sqrt{r_1^2 + \omega^2 L_1^2}$; а отже для першої і другої обмоток статора:

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \frac{1}{\omega} \left[\frac{U_1^2}{I_1^2} - r_1^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad \frac{r_1}{\omega L_1} = r_1 \left[\frac{U_1^2}{I_1^2} - r_1^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \\ L_2 &= \frac{1}{\omega} \left[\frac{U_2^2}{I_2^2} - r_2^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad \frac{r_2}{\omega L_2} = r_2 \left[\frac{U_2^2}{I_2^2} - r_2^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для симетричного статора ($r_1 = r_2, L_1 = L_2$) достатньо одного виміру.

4.3. Визначення параметрів $K_{1,2}^2$ і $\frac{r_p}{\omega L_p}$ проводять за схемою, яка зображена на рис. 1, в.

До першої статорної обмотки підключені ватметр, вольтметр, амперметр. Друга обмотка розімкнута ($I_2 = 0$) і на її клеми підключено вольтметр V_2 з великим внутрішнім опором, що вимірює напругу E_2 , індуквану в цій обмотці струмом I_p . На клеми першої обмотки подана синусоїдальна напруга U_1 і ротор примусово повертають на кут $\alpha = 45^\circ$ доти, доки напруга E_2 не досягне максимального значення $E_2 = E_{2 \text{ max}}$. При цьому вимірюються струм I_1 , напруга U_1 , потужність P_1 , ЕРС $E_{2 \text{ max}} = U_2$. Заміряти кут повороту α не потрібно, тому що при $\alpha = \alpha_0 = 45^\circ$ ЕРС $E_2 = E_{2 \text{ max}}$. Таким чином, режим вимірювання відбувається при умовах $I_2 = 0; E_2 = E_{2 \text{ max}}; \alpha = \alpha_0 = 45^\circ$. При цьому система (3, 4, 5) запишеться у вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_p Z_{m1} \cos \alpha_0; \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_{2 \text{ max}} = \dot{I}_p Z_{m2} \sin \alpha_0; \\ \dot{I}_p Z_p &= -\dot{I}_1 Z_{m1} \cos \alpha_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Виключаючи з рівняння (8) струм I_p , одержимо:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_1 \frac{Z_{m1}^2}{Z_p} \cos^2 \alpha_0; \\ \dot{E}_{2 \text{ max}} &= -\frac{Z_{m1} Z_{m2} \sin 2\alpha_0}{2Z_p} \cdot \dot{I}_1. \end{aligned} \quad (9)$$

З другого рівняння (9) випливає, що $E_2 = E_{2 \text{ max}}$ при $\alpha_0 = 45^\circ$.

Помноживши обидві частини першого рівняння (9) на спряжений струм \dot{I}_1 , знайдемо комплексну S_1 , активну P_1 та реактивну Q_1 потужності:

$$S_1 = P_1 + jQ_1 = \dot{U}_1 \cdot \dot{I}_1 = I_1 \cdot I_1 \cdot \left(Z_1 - \frac{Z_{m1}^2}{Z_p} \cos^2 \alpha_0 \right), \text{ звідки}$$

$$\begin{cases} P_1 = I_1^2 r_1 + \frac{|Z_{m1}|^2}{|Z_p|^2} r_p \cos^2 \alpha_0 I_1^2 \\ Q_1 = I_1^2 \omega L_1 - \frac{|Z_{m1}|^2}{|Z_p|^2} \omega L_p \cos^2 \alpha_0 I_1^2 \end{cases} \quad (10)$$

Виключаючи з системи (10) величину $\cos^2 \alpha_0$, знайдемо відносний параметр:

$$\frac{r_p}{\omega L_p} = \frac{P_1 - I_1^2 r_1}{|Q_1 - I_1^2 \omega L_1|} = \frac{P_1 - I_1^2 r_1}{|\sqrt{U_1^2 I_1^2 - P_1^2} - I_1^2 \cdot \omega L_1|} \quad (11)$$

4.4. Визначення втрат у сталі P_c проводяться відповідно до схеми, позначеної на рис. 1, в.

Напруга U_1 приймається рівною номінальному значенню $U_{1ном}$, або значенню, прийнятому в пункті 4.3. Ротор виставляється на кут $\alpha = \alpha_0 = 90^\circ$, при якому ЕРС E_2 , а отже струм I_p перетворюється на нуль. При цьому струм I_1 , та вимірювана потужність P_1 досягають мінімуму. Вимірювання відбувається за умов, тотожних умовам в пункті 4.1, а отже активна потужність P_1 складається з втрат у сталі і втрат у міді першої обмотки, тобто: $P_{1min} = P_c + I_{1min}^2 \cdot r_1$, отже втрати в сталі:

$$P_c = P_{1min} - I_{1min}^2 \cdot r_1 \quad (12)$$

Оскільки співвідношення (11) отримано без урахування втрат у сталі, то воно є наближеним. Уточнене співвідношення з урахуванням втрат у сталі знайдемо із (11) і (12) у вигляді:

$$\frac{r_p}{\omega L_p} = \frac{P_1 - P_c - I_1^2 r_1}{|\sqrt{U_1^2 I_1^2 - (P_1 - P_c)^2} - I_1^2 \omega L_1|} \quad (13)$$

В уточненому співвідношенні (13) значення P_c повинне бути отримане при тій же напрузі U_1 , що й у пункті 4.3. Сумарні втрати в сталі всього двигуна приблизно дорівнюють втратам у сталі при живленні однієї обмотки статора номінальною (немодульованою) синусоїдальною напругою при вимірюванні, прийнятому в пункті 4.4.

З першого рівняння (10) та другого рівняння (9) після деяких перетворень знаходимо:

$$K_1^2 = 2 \frac{P_1 - I_1^2 r_1}{I_1^2 \omega L_1} \cdot \frac{1 + \left(\frac{r_p}{\omega L_p} \right)^2}{\frac{r_p}{\omega L_p}} \quad (14)$$

$$K_1^2 \cdot K_2^2 = 4 \frac{E_{2max}^2}{I_1^2} \cdot \frac{1 + \left(\frac{r_p}{\omega L_p} \right)^2}{\omega L_1 \cdot \omega L_2} \quad (15)$$

З системи рівнянь (14) та (15), з урахуванням (7) та (13), легко знаходимо параметри K_1^2 , K_2^2 . Для випадку симетричного статора ($L_1 = L_2$; $K_1 = K_2$) із співвідношення (15) маємо:

$$K_1^2 = K_2^2 = 2 \frac{E_{2max}}{I_1 \cdot \omega L_1} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{r_p}{\omega L_p} \right)^2} \quad (16)$$

Таким чином, двофазний двигун з несиметричним статором має шість (1), а з симетричним статором ($r_1 = r_2 = r$; $L_1 = L_2 = L$; $M_{m1} = M_{m2} = M_m$) тільки чотири безрозмірні параметри;

$\frac{r_1}{\omega L_1} = \frac{r_2}{\omega L_2}$; $\frac{r_p}{\omega L_p}$; $K^2 = K_1^2 = K_2^2$, $p = \frac{\Omega}{\omega} = \frac{N}{60 f_{нес}} \left(\frac{об}{хв} \right) (Г4)$, що визначаються експериментально із співвідношень (7), (11), (13), (14), (15), (16).

Параметр p є відношенням частоти огинаючої до частоти несучої і може бути вимірний за допомогою частотоміра, підключеного до ланцюга обмотки статора, або за допомогою тахометра, приєднаного до вала двигуна. Звичайно, частота несучої ω при роботі двигуна зберігає постійне значення. Якщо ця частота змінюється в інтервалі від ω_{\min} до ω_{\max} , то параметри $\frac{r_1}{\omega L_1}$,

$\frac{r_p}{\omega L_p}$ можуть бути записані в зручному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{r_1}{\omega L_1} &= \frac{1}{\omega / \omega_{\max}} \cdot \frac{r_1}{\omega_{\max} \cdot L_1} = \frac{1}{q} \cdot \frac{r_1}{\omega_{\max} \cdot L_1}, \\ \frac{r_p}{\omega L_p} &= \frac{1}{q} \cdot \frac{r_p}{\omega_{\max} \cdot L_p}, \end{aligned} \quad (17)$$

де $q = \frac{\omega}{\omega_{\max}} \leq 1$ є відносна частота несучої, а $\frac{r_1}{\omega_{\max} \cdot L_1}$, $\frac{r_p}{\omega_{\max} \cdot L_p}$ – нові постійні безрозмірні параметри. З виразу (14) випливає, що частота ω_{\max} може бути задана більш-менш довільно, в тому числі з умов зручності.

Таким чином, запропонована вище методика експериментального визначення обраних параметрів виділяється простотою, зручністю здійснення вимірювань, значною точністю і узгодженістю із системою рівнянь (математичною моделлю) двигуна, що автоматично гарантує її високу достовірність і надійність.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Сили С. Электромеханические преобразователи энергии. – М.: Энергия, 1968. – 375 с.
2. Чиликин М.Г., Ключев В.И. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 615 с.

АНТИПЕНКО Юрій Валентинович – здобувач кафедри автоматичного управління в технічних системах Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- електричний привод;
- перетворювальна техніка.

Подано 10.04.2004