

# Деякі особливості розрахунку режимів роботи двигуна з короткозамкненим ротором при зміні частоти

Е. Швець, к.т.н., доцент

Національний університет кораблебудування імені Макарова, інститут автоматики і електротехніки  
54025 м. Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9

**Abstract:** The current paper provides static performance calculation of an induction motor with frequency drift complied with the law of rpm control. It also shows how launching time can be decreased through frequency step change of supply.

**Key words:** induction motor, frequency, rpm control.

Регулювання частоти обертання зміною частоти живильної мережі [1,2] є найбільш економічним способом регулювання і дозволяє одержати потрібні механічні характеристики електропривода.

Як джерело живлення можуть застосовуватися електромашинні обертові перетворювачі, що використовують електричні машини, чи статичні перетворювачі частоти на напівпровідникових приладах, що серійно випускає промисловість.

Позитивною властивістю частотного регулювання є можливість плавного регулювання у широкому діапазоні в обидва боки від природної характеристики (у тому числі можливе обертання двигуна з частотою, більшою номінальній).

Розрахунок характеристик робиться при постійному магнітному потоку двигуна, тому джерело живлення підтримує постійність відношення напруги до частоти  $U_c / f = \text{const}$ , який називається законом частотного керування. Таким чином частотне керування швидкості асинхронного електропривода здійснюється зміною частоти і напруги, яка живить двигун.

На підставі системи диференціальних рівнянь узагальненої машини для усталеного режиму частотного керування асинхронним двигуном запишемо рівняння електричної рівноваги для статорного і роторного ланцюгів:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= r_1 i_1 + jx_1 f^* i_1 + jx_\mu f^* (i_1 + i_2'); \\ 0 &= \frac{r_2'}{s_a} f^* i_2' + jx_2' f^* i_2' + jx_\mu f^* (i_1 + i_2'), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\dot{U}_1$  – фазна напруга при частоті  $f_1$ ;  $f^* = f_1 / f_{1\text{ном}}$  – відносна частота статора – відношення частоти напруги статора до її номінального значення;

$s_a = f_2 / f_{1\text{ном}}$  – відносна частота ротора або параметр абсолютного ковзання (параметр абсолютного ковзання характеризує не тільки частоту струму ротора, а також і момент двигуна);  $x_\mu f^*$ ,  $x_1 f^*$ ,  $x_2' f^*$  – індуктивні опори при довільній частоті.

Рівнянням (1) відповідна схема заміщення, яка приведена на (рис.1) і на якій позначені напруга, струми, електрорушійні сили і опори статорного і роторного ланцюгів.

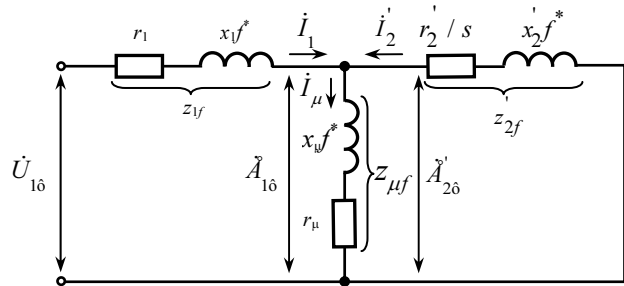


Рис.1. Схема заміщення асинхронного двигуна при частотному регулюванні

Приведемо деякі теоретичні положення і рівняння для визначення параметрів схеми заміщення.

Із схеми заміщення маємо рівняння ЕРС для статорного і роторного ланцюгів двигуна:

$$\begin{aligned} E_1 = E_2' &= U_1 f^* \sqrt{\frac{R_2'^2 + x_2'^2 \cdot s_a^2}{(b^2 + c^2 f^{*2}) s_a^2 + 2R_1 R_2' f^* s_a + (a^2 + e^2 f^{*2}) R_2'^2}} = (2) \\ &= U_1 f^* \sqrt{\frac{A(s_a)}{B(f^*, s_a)}}; \end{aligned}$$

магнітний потік у повітряному зазорі

$$\Phi = \frac{U_1}{c_1 f_{1\text{ном}}} \sqrt{\frac{A(s_a)}{B(f^*, s_a)}}; \quad (3)$$

струм статора

$$I_1 = U_1 \sqrt{\frac{a^2 + (1 + k_{2\text{pc}})^2 s_a^2}{B(f^*, s_a)}} = U_1 \sqrt{\frac{C(s_a)}{B(f^*, s_a)}}; \quad (4)$$

приведений струм ротора

$$I_2' = U_1 \frac{s_a}{\sqrt{B(f^*, s_a)}}; \quad (5)$$

струм намагнічування

$$I_\mu = U_1 \sqrt{\frac{a^2 + k_{2\text{pc}}^2 s_a^2}{B(f^*, s_a)}} = U_1 \sqrt{\frac{D(s_a)}{B(f^*, s_a)}}; \quad (6)$$

електромагнітний момент двигуна

$$M = \frac{m_1 U_1^2}{\omega_{1\text{ном}}} \frac{R_2' s_a}{B(f^*, s_a)}. \quad (7)$$

У формулах (2)-(7) прийняті наступні позначення:

$$A(s_a) = R_2'^2 + x_2'^2 \cdot s_a^2; \quad (8)$$

$$B(f^*, s_a) = (b^2 + c^2 f^{*2}) s_a^2 + 2R_1 R_2' f^* s_a + (d^2 + e^2 f^{*2}) R_2'^2; \quad (9)$$

$$C(s_a) = a^2 + (1 + k_{2pc})^2 s_a^2; \quad D(s_a) = a^2 + k_{2pc}^2 s_a^2; \quad (10)$$

$$a = \frac{R_2'}{x_\mu}; \quad b = R_1(1 + k_{2pc}); \quad c = x_\mu k_{pc}; \quad d = \frac{R_1}{x_\mu}; \quad e = 1 + k_{1pc}. \quad (11)$$

Коефіцієнти розсіювання відповідно для статора і ротора, а також загальний коефіцієнт розсіювання відповідно мають вид:

$$k_{1pc} = \frac{x_1}{x_\mu}; \quad k_{2pc} = \frac{x_2'}{x_\mu}; \quad k_{pc} = k_{1pc} + k_{2pc} + k_{1pc} \cdot k_{2pc}. \quad (12)$$

У тому випадку коли індуктивний опір розсіювання набагато більший чим індуктивні опори статорної і роторної обмоток коефіцієнтами розсіювання (12) зневажають, тоді (7) можна зобразити у розгорнутому вигляді:

$$M = \frac{m_1 U_1^2}{\omega_{ном}} \frac{R_2' s_a}{2R_1 R_2' f^* s_a + [R_1^2 + (x_1 + x_2')^2 f^{*2}] s_a^2 + R_2'^2 f^{*2}}. \quad (13)$$

З рівняння (13) випливає, що електромагнітний момент двигуна є функція трьох параметрів: напруги  $U_1$ , частоти  $f^*$  і абсолютного ковзання  $s_a$ .

Абсолютне критичне ковзання і критичний момент відповідно мають значення:

$$s_{a,кр} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2 f^{*2}}}; \quad (14)$$

$$M_{кр} = \frac{m_1 U_1^2 f^{*2}}{2\omega_{ин} f^* [R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2 f^{*2}}]}. \quad (15)$$

Для приведення в рух механізму використовуються електричний двигун паспортні, дані якого приведені нижче.

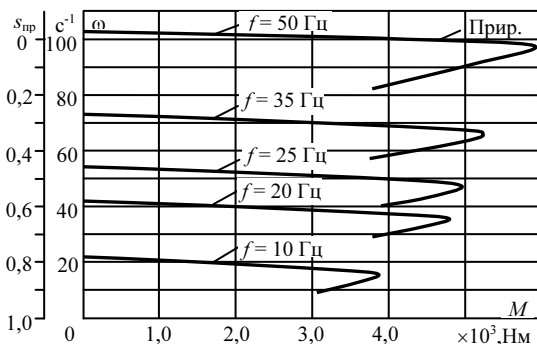


Рис. 2. Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному керуванні

Типорозмір двигуна 4АН355М6; потужність  $P_{ном} = 250$  кВт; напруга  $U_{ном} = 380$  В; частота обертання ротора  $\omega_{ном} = 103$  с<sup>-1</sup>; струм статора  $I_{ном} = 447$  А; активний і реактивний опори фази статорної і ротор-

ної обмоток відповідно  $r_1 = 0,0103$  Ом,  $x_1 = 0,0541$  Ом,  $r_2' = 0,0074$  Ом,  $x_2' = 0,0639$  Ом, момент інерції двигуна  $J_{дв} = 9,5$  кг·м<sup>2</sup>.

Таким чином рівняння (14) і (15) використовують для розрахунку механічних характеристик  $M = f(s)$  по класичній уточненій формулі Клосса:

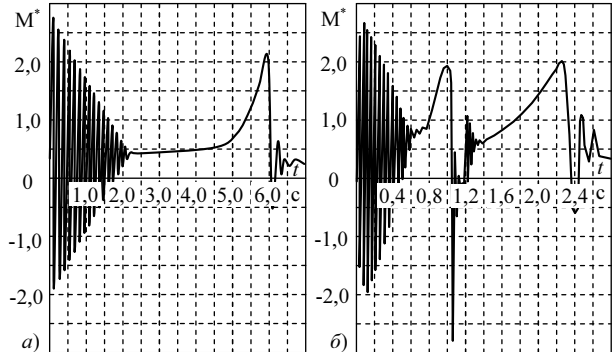


Рис. 3. Перехідні процеси зміни моменту при пуску двигуна

$$M = \frac{2M_{кр} (1 + a s_{a,кр})}{\frac{s}{s_{a,кр}} + \frac{s_{a,кр}}{s} + 2a s_{a,кр}}. \quad (16)$$

На рис.2. приведені механічні характеристики асинхронного двигуна для різних значень частот.

Аналіз характеристик показує, що максимальний момент зменшується, приблизно на 20% при зниженні частоти в 2,5 рази, що несприятливо позначається на перевантажувальній здатності двигуна. Тому в реальних умовах, які враховують насичення, одержання достатньої перевантажувальної здатності в області малих частот виявляється неможливим.

Варто мати на увазі, що для підтримки максимального моменту зі зменшенням частоти необхідно, щоб регулятори напруги знижували його в меншій мірі, чим частоту.

На рис.3. приведені перехідні процеси  $M^*(t)$  прямого пуску при номінальній частоті  $f = f_{ном}$ , напрузі  $U = U_{ном}$  рис.3,а і для двохступінчатого пуску перший – при  $U = 0,5 U_{ном}$  і  $f = 0,5 f_{ном}$  до половинної швидкості, другий – до робочої швидкості при  $U = U_{ном}$  і  $f = f_{ном}$  двигуна рис.3,б.

Аналіз отриманих діаграм показує, що ступінчастий пуск виявляється більш швидким. Сумарний час пуску скоротилося з 5,9 с при прямому пуску до 2,3 с при ступінчастому.

[1]. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 264 с.

[2]. Васильев В. Н, Слободниченко Б. И, Бендахман Б. Динамика асинхронного частотно-управляемого электропривода подруливающего устройства // Электромашиностроения та електрообладання: Респ. міжвід. науково-техн. зб. 1998. – Вип. 50.