

## АПРОКСИМАЦІЯ ПУСКОВОГО МОМЕНТУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПРИВОДУ ОСНОВОВ'ЯЗАЛЬНОЇ МАШИНИ

*Розглянуто раціональний підхід при вирішенні питання апроксимації пускового моменту в динамічній системі з асинхронним електродвигуном. Враховано особливості привода основов'язальних машин.*

*Ключові слова: основов'язальна машина, привід, асинхронний електродвигун, пусковий момент електродвигуна.*

V. CHABAN, B. PIPA

Kyiv National University of Technologies and Design

### APPROXIMATION OF STARTING TORQUE OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR DRIVE OF WARP-KNITTING MACHINE

*Considered rational approach in deciding approximation starting point in the dynamic system of induction motor.*

*The problem of dynamic analysis of mechanical system based on the starting characteristics of the motor. It is noted that when the motor is switched on at the time of its shaft is not immediately takes the value of the initial starting torque, which increases exponentially with a time constant. Considered features drive warp knitting machines.*

*Proposed approximation method starting torque asynchronous motor used in the dynamic analysis of mechanical systems multimass. A dynamic model that represents the six mass model with branching led the masses.*

*Keywords: warp knitting machine, drive, induction motor, the motor starting torque.*

Перспективним напрямком в розвитку теорії проектування машин, зокрема основов'язальних, є удосконалення методів динамічного аналізу механічних систем з асинхронним електроприводом [1–3]. При цьому особлива увага приділяється питанню врахування характеристики рушійного моменту динамічної системи на її динамічні навантаження.

#### Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень обрано апроксимацію пускового моменту асинхронного електродвигуна привода основов'язальної машини. При вирішенні задач, поставлених у даній роботі, були використані сучасні методи теоретичних досліджень, що базуються на теорії перехідних процесів в машинах змінного струму та динаміки машинних агрегатів з електроприводом.

#### Постановка завдання

Завданням досліджень стало удосконалення методу апроксимації пускового моменту асинхронного електродвигуна привода багатомасової механічної системи.

#### Результати та їх обговорення

Роль збудуючої сили  $F(t)$  в динамічних системах з асинхронним електродвигуном виконує момент електродвигуна як функція часу та його похідні різних порядків. Більшість дослідників при вивченні перехідних режимів роботи машин приймають гіпотезу про стрибкоподібну зміну моменту при пуску. З метою відображення більш реальних явищ, можна було б скористатися механічною характеристикою двигуна  $T_{\partial\omega} = f(\omega)$ . Однак ця характеристика не враховує впливу електромагнітних перехідних процесів в двигуні, зв'язаних з пуском, гальмуванням або різкою зміною навантажень. Як показують дослідження [4], ці явища в асинхронному двигуні можуть суттєво впливати на динамічні властивості машинного агрегату. Перехідні процеси в двигунах описуються системою нелінійних диференціальних рівнянь, наближений розв'язок яких пов'язаний з відповідними труднощами [1, 4]. Тому в практиці інженерних розрахунків існує ряд пропозицій по врахуванню спрощеної характеристики двигуна при наближеному розгляді електромагнітних перехідних процесів [1]. Прийняті спрощення дозволяють описувати ці процеси лінеаризованими диференціальними рівняннями. Така характеристика може розглядатися як динамічна характеристика асинхронного електродвигуна.

Згідно з [5], момент двигуна при пуску механічної системи являється сумою трьох складових:

$$T_{\partial\omega} = T_1 + T_2 + T_3, \quad (1)$$

де  $T_1$  – момент статичної характеристики двигуна з урахуванням швидкості зміни ковзання;

$T_2$  – аперіодична складова, що виникає в результаті крокового режиму при неоднотимчасній появі токів в обмотках статора;

$T_3$  – коливальний момент, зумовлений затухаючим коливальним полем.

Перша складова знаходиться за рівнянням механічної характеристики двигуна з урахуванням швидкості зміни ковзання:

$$T_1 = k_{\partial} T(\omega), \quad (2)$$

де  $k_{\partial}$  – коефіцієнт динамічності,  $k_{\partial} = 0,75 \dots 1,0$  [5];

$T(\omega)$  – значення моменту, що знаходиться за статичною характеристикою двигуна.

Друга складова швидко затухає і не впливає на силові розрахунки [4]. Третя складова моменту затухає зі швидкістю затухаючого аперіодичного струму в обмотках статора, частота цієї складової дорівнює приблизно частоті струму сіті:

$$T_3 = k_n T_n e^{\alpha_1 t} \sin \omega_3 t, \quad (3)$$

де  $k_n$  – пусковий коефіцієнт; для двигунів середньої потужності ( $P = 1 \dots 10$  кВт)  $k_n = 2,2 \dots 2,4$  [4];

$T_n$  – пусковий момент двигуна;

$\alpha_1$  – коефіцієнт затухання,  $\alpha_1 = -(5 \dots 3)$  [4];

$\omega_3$  – кутова частота струму,  $\omega_3 = 314 \text{ с}^{-1}$ .

Враховуючи (2), (3), вираз (1) набуває виду:

$$T_{\partial\theta} = k_{\partial} T(\omega) + k_n T_n e^{\alpha_1 t} \sin \omega_3 t. \quad (4)$$

Величина моменту  $T(\omega)$  знаходиться за формулою Клосса [5]:

$$T(\omega) = \frac{2T_k(1+a)}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0 - \omega_k} + \frac{\omega_0 - \omega_k}{\omega_0 - \omega} + 2a}, \quad (5)$$

де  $T_k$  – критичний (максимальний) момент,  $T_k = \lambda T_n$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт переважання;

$T_n$  – номінальний момент;

$\omega_0$  – синхронна кутова швидкість;

$\omega$  – текуча кутова швидкість;

$\omega_k$  – швидкість, що відповідає моменту  $T_k$ ,  $\omega_k = \omega_0(1 - S_k)$ ;

$S_k$  – критичне ковзання, знаходиться з умови [2]:

$$S_k = \alpha_r \sqrt{\frac{\alpha_s^2 + 1}{\alpha_s^2 + \sigma^2}}; \quad (6)$$

$a$  – безрозмірний коефіцієнт, знаходиться за формулою [2]:

$$a = \frac{\alpha_s(1 - \sigma)}{\sqrt{(1 + \alpha_s^2)(\sigma^2 + \alpha_s^2)}}. \quad (7)$$

Значення параметрів, що входять у формули (6), (7), знаходяться за співвідношенням:

$$\alpha_s = \frac{r_s}{x_s}; \quad \alpha_r = \frac{r_r}{x_r}; \quad k_s = \frac{x_m}{x_s}; \quad k_r = \frac{x_m}{x_r}; \quad \sigma = 1 - k_s k_r, \quad (8)$$

де  $r_s$ ,  $r_r$  – активні опори відповідно обмоток фаз статора та ротора;

$x_s$ ,  $x_r$  – синхронні реактивні опори відповідно обмоток фаз статора та ротора;

$x_m$  – реактивний опір взаємодуції;

$\sigma$  – коефіцієнт повного розсіювання.

Значення величин, що входять в формули (8), наведені в табл. 2 [5].

При безпосередньому використанні (4) в рівняннях, що описують рух багатомасової динамічної системи, виникає ряд труднощів. Задача динамічного аналізу механічної системи з урахуванням пускової характеристики електродвигуна значно спрощується, якщо вважати, що при цьому закон зміни кутової швидкості в часі задано:

$$\omega = \omega(t). \quad (9)$$

Дійсно, після підстановки виразу (9) в рівняння (4) знаходимо закон зміни рушійного моменту, як функцію часу:

$$T_{\partial\theta} = T_{\partial\theta}(t). \quad (10)$$

У випадку приведення механічної системи до одномасової системи залежність (9) виражається аналітично. Коли ж машина приводиться до багатомасової еквівалентної моделі, задача знаходження закону зміни кутової швидкості в аналітичному вигляді стає громіздкою та трудоміною. Тому для знаходження характеру зміни  $T_{\partial\theta}(t)$  для випадку багатомасової системи приймаємо в першому наближенні лінійну залежність кутової швидкості від часу:

$$\omega(t) = \begin{cases} \frac{\omega_c}{t_p} t, & 0 \leq t \leq t_p; \\ \omega_c, & t \geq t_p, \end{cases} \quad (11)$$

де  $\omega_c$  – кутова швидкість сталого руху, що відповідає статичному моменту  $T_c$ ;  
 $t_p$  – час розгону системи, що знаходиться за формулою [5]:

$$t_p = \frac{J_{np} \omega_n}{T_{cp.n.} - T_c}; \quad (12)$$

$J_{np}$  – приведений момент інерції привода;

$\omega_n$  – номінальна кутова швидкість двигуна;

$$T_{cp.n.} \approx 0,45(T_k + T_{нач}); \quad (13)$$

$T_c$  – статичний момент;

$T_{нач}$  – початковий момент двигуна.

При підстановці залежності (11) в рівняння (4), одержуємо:

$$T_{\partial\theta}(t) = \begin{cases} k_{\partial} T \left( \frac{\omega_c}{t_p} t \right) + k_n T_n e^{\alpha_1 t} \sin \omega_3 t, & 0 \leq t \leq t_p; \\ k_{\partial} T(\omega_c) + k_n T_n e^{\alpha_1 t} \sin \omega_3 t, & t \geq t_p. \end{cases} \quad (14)$$

Залежність  $T(\omega)$ , що виражається формулою (5), апроксимуємо (рис. 1) кусочно-лінійною функцією [4]. Необхідно відмітити, що при вмиканні електродвигуна момент на його валу не зразу приймає значення початкового пускового моменту [5], а наростає по експоненті з постійним часом  $t_e$ . Практично для двигунів потужністю до 20 кВт  $t_e = 0,05 \dots 0,5$  с, відповідно коефіцієнт затухання при цьому дорівнює  $\alpha_2 = -(20 \dots 5)$ .

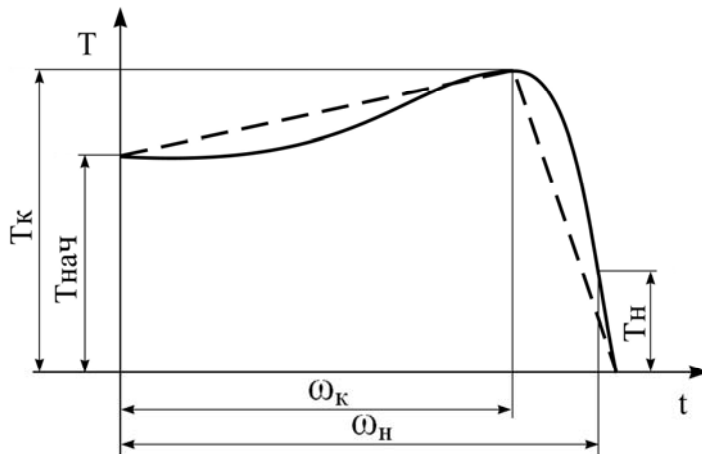


Рис. 1. Статична механічна характеристика асинхронного електродвигуна

Приблизна залежність моменту від кутової швидкості приймає вид:

$$T(\omega) = \begin{cases} T_{нач} (1 - e^{-\alpha_2 t}) + (T_k - T_{нач}) \frac{\omega}{\omega_k}, & 0 \leq \omega \leq \omega_k; \\ T_k - (T_k - T_c) \frac{\omega - \omega_k}{\omega_c - \omega_k}, & \omega_k \leq \omega \leq \omega_c; \\ T_c, & \omega_c \leq \omega. \end{cases} \quad (15)$$

Враховуючи умову (11), одержуємо момент (15) як функцію часу:

$$T\left(\frac{\omega_c}{t_p} t\right) = \begin{cases} T_{нач} (1 - e^{-\alpha_2 t}) + (T_K - T_{нач}) \frac{t}{t'}, & 0 \leq t \leq t'; \\ T_K - (T_K - T_c) \frac{t - t'}{t_p - t'}, & t' \leq t \leq t_p; \\ T_c, & t_p \leq t, \end{cases} \quad (16)$$

де  $t'$  – час, що відповідає  $T_K$ .

Як відомо [1, 3], при пуску механічної системи максимальні навантаження очікуються на відріжку часу  $0 \leq t \leq t'$ . Тоді зі співвідношень (16) приймаємо в якості розрахункового наступне значення для рушійного моменту:

$$T\left(\frac{\omega_c}{t_p} t\right) = T_{нач} (1 - e^{-\alpha_2 t}) + (T_K - T_{нач}) \frac{t}{t'}, \quad 0 \leq t \leq t'. \quad (17)$$

Враховуючи прийняті допущення та вираз (17), співвідношення (14) приймає вид:

$$T_{\partial\partial}(t) = \left[ T_{нач} (1 - e^{-\alpha_2 t}) + (T_K - T_{нач}) \frac{t}{t'} \right] k_{\partial} + T_n k_n e^{\alpha_1 t} \sin \omega_3 t, \quad 0 \leq t \leq t', \quad (18)$$

або

$$T_{\partial\partial}(t) = C(1 - e^{-\alpha_2 t}) + D t + E e^{\alpha_1 t} \sin \omega_3 t, \quad (19)$$

де

$$C = k_{\partial} T_{нач}; \quad D = k_{\partial} \frac{T_K - T_{нач}}{t'}; \quad E = k_0 T_0; \quad t' = \omega_K \frac{t_p}{\omega_H}. \quad (20)$$

Одержана формула (19) являє собою вираз наближеної динамічної характеристики двигуна як функції часу.

Для асинхронного електродвигуна, що використовується в приводі основов'язальних машин типу ОВ (ОВ-7 та ін.) з параметрами [3]:  $P = 4,5$  кВт;  $n_0 = 1500$  об./хв;  $n_H = 1440$  об./хв;  $T_H = 56,9$  Нм;  $T_{нач} = 113,8$  Нм;  $T_K = 159,32$  Нм формула (19) набуває числового значення:

$$T_{\partial\partial}(t) = 113,8(1 - e^{-20t}) + 121,3t + 161,0e^{-5t} \sin 314t. \quad (21)$$

Аналізуючи результати досліджень, можна зробити висновок, що запропонований метод апроксимації пускового моменту асинхронного електродвигуна доцільно використовувати при динамічному аналізі багатомасових механічних систем, зокрема основов'язальних машин, динамічна модель яких являє собою шестимасову модель з розгалуженням ведених мас.

## Література

1. Вейц В.Л. Динамические расчеты приводов машин / В.Л. Вейц, А.Б. Кочура, А.М. Мартыненко. – Л. : Машиностроение, 1971. – 352 с.
2. Вейц В.Л. Динамика машинных агрегатов / Вейц В.Л. – Л. : Машиностроение, 1969. – 370 с.
3. Чабан В.В. Динаміка основов'язальних машин / Чабан В.В., Бакан Л.А., Піпа Б.Ф. – К. : КНУТД, 2012. – 287 с.
4. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
5. Петров И.И. Специальные режимы работы асинхронного электропривода / И.И. Петров, А.М. Мейстель. – М. : Энергия, 1968. – 264 с.

## References

1. Vejc V.L., Kochura A.B., Martynenko A.M. Dinamicheskie rascheti privodov mashin. – L. : Mashinostroenie, 1971. – 352 s.
2. Vejc V.L. Dinamika mashinnyh agregatov. – L. Mashinostroenie, 1969. – 370 s.
3. Chaban V.V., Bakan L.A., Pipa B.F. Dinamika osnovov'jazal'nih mashin. – K.: KNUTD, 2012 - 287 s.
4. Kovach K.P., Rac I. Perehodnye processy v mashinah peremennogo toka. – M.-L.: Gosjenergoizdat, 1963. – 744 s.
5. Petrov I.I., Meistel' A.M. Special'nye rezhimy raboty asinhronnogo jelektroprivoda. – M.: Jenergija, 1968. – 264 s. nergija, 1968. – 264 s.

Рецензія/Peer review : 2.3.2013 р. Надрукована/Printed :21.4.2013 р.