

## ОСОБЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КОНВЕЙЄРА

**Вступ.** При розгляді питань енергозбереження в електромеханічній системі у більшості випадків обмежуються дослідженням втрат електричної енергії в електродвигуні. При цьому не враховується вплив зміни режиму роботи технологічного об'єкту та електродвигуна на енергетичні параметри електромеханічної системи автоматизації в цілому. Так, в роботі [1] розглянуті питання підвищення енергетичної ефективності асинхронних електроприводів. Але для повної реальної оцінки енергетичної ефективності режимів роботи необхідно розглянути систему електропривода та технологічний об'єкт як єдину електромеханічну систему.

Одним з найбільш розповсюджених механізмів загальнопромислового призначення є системи неперервного транспорту, в тому числі стрічкові конвеєри. На сьогоднішній день подібні механізми мають нерегульований асинхронний електропривод та працюють при невеликому навантаженні. Такий режим роботи подібних електроприводів призводить до значних втрат електричної енергії, що є неприйнятним при сучасних економічних умовах.

**Мета роботи.** Розглянути питання енергетичної ефективності режимів роботи стрічкового конвеєра. Визначити рівні та діапазони зміни регульованої величини, на яких забезпечується найбільша енергетична ефективність роботи електромеханічної системи.

**Матеріали досліджень.** Як було зазначено вище, конвеєрні системи мають в основі асинхронний електропривод. В теорії електричних машин доведено, що будь-яка багатофазна електрична машина з n-фазною обмоткою статора та m-фазною обмоткою ротора при умові рівності повних опорів фаз статора (ротора) в динаміці може бути представлена двофазною моделлю. Можливість такої зміни створює умови для отримання узагальненого математичного опису процесів електромеханічного перетворення енергії в електричній машині, що обертається, на основі розгляду ідеалізованого двофазного електромеханічного перетворювача. У спеціальній літературі такий перетворювач отримав назву узагальненої електричної машини [2, 3]. Таким чином, система диференціальних рівнянь, яка описує асинхронний двигун з короткозамкненим ротором з урахуванням руху електромеханічної частини, має вигляд

$$\begin{cases} di_{1a} / dt = 1 / \sigma u_{1a} - \gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta \omega_e \psi_{2b} \\ di_{1b} / dt = 1 / \sigma u_{1b} - \gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} + \beta \omega_e \psi_{2a} \\ d\psi_{2a} / dt = -\alpha \psi_{2a} + \alpha L_{12} i_{1a} - \omega_e \psi_{2b} \\ d\psi_{2b} / dt = -\alpha \psi_{2b} + \alpha L_{12} i_{1b} - \omega_e \psi_{2a} \\ M = K_d (i_{1b} \psi_{2a} - i_{1a} \psi_{2b}) \\ d\omega / dt = (M - M_c) / J \end{cases} \quad (1)$$

де  $u_{1a}, u_{1b}$  – напруги прикладені до обмотки статора;  $i_{1a}, i_{1b}$  – струми, які протікають в обмотках статора;  $\psi_{2a}, \psi_{2b}$  – потокозчеплення фази ротора;  $\omega_e = p\omega$ ,  $\omega = d\phi / dt$  – кутова швидкість обертання ротора;  $p$  – число пар полюсів;  $\phi$  – геометричний кут повороту ротора;  $\sigma = L_1 L_2 - L_{12}^2 / L_2$ ,  $\beta = L_{12} / L_2 \sigma$ ,  $\gamma = 1 / \sigma (R_1 + R_2' L_{12}^2 / L_2^2)$ ,  $R_1$  – активний опір фази статора;  $R_2'$  – активний опір фази ротора, приведенного до фази статора;  $L_1 = (x_1 + x_\mu) / \omega_{0e}$ ,  $L_2 = (x_2 + x_\mu) / \omega_{0e}$ ,  $L_{12} = x_\mu / \omega_{0e}$ ,  $K_d = p L_{12} / L_2$ ;  $M$  – момент;  $M_c$  – статичний момент;  $J$  – момент інерції.

Стрічковий конвеєр представляє собою пружно-в'язку механічну систему. Його модель зручно представити у вигляді двомасової системи [4]. Тоді система рівнянь руху двомасової пружно-в'язкої механічної системи матиме вигляд:

$$\begin{cases} M - M_{c1} - M_{12} = J_1 d\omega_1 / dt \\ M'_{12} - M_{c2} = J_2 d\omega_2 / dt \end{cases} \quad (2)$$

де  $M_{c1}, M_{c2}$  – моменти опору першої та другої мас системи;  $M'_{12}$  – приведений момент сили пружної взаємодії між першою та другою масами системи.

$$M'_{12} = (\mu + C / p)(\omega_1 - \omega_2),$$

де  $C = C_{\Sigma p} + C_{\Sigma 0}$  – сумарний коефіцієнт жорсткості відповідно до робочої та холостої частин тягового органа конвеєра;  $\mu = \mu_{\Sigma p} + \mu_{\Sigma 0}$  – сумарний коефіцієнт в'язкого тертя відповідно до робочої та холостої частин тягового органа конвеєра;  $\omega_1, \omega_2$  – кутові швидкості першої та другої мас системи;  $J = J_d + J'_{пб} + J'_{\Sigma 0} + J'_{нб}$  –

момент інерції першої маси системи, який складається з моменту інерції двигуна, приведених моментів інерції привідного барабану, сумарного моменту інерції з'єднувальних муфт та редуктора відповідно;  $J = J'_{\Sigma M0} + J'_{\Sigma MP} + J'_{\text{нб}}$  - момент інерції другої маси системи, який складається з приведенного сумарного моменту інерції мас робочої та холостої частин конвеєра, приведенного моменту інерції натяжного барабану відповідно.

Лінеаризований перетворювач напруги описується рівнянням

$$K_{\text{п}} U_y = (1 + T_{\text{п}} p) E_{\text{п}} \quad (3)$$

де  $K_{\text{п}} = E_{\text{п}} / U_y = \text{const}$ ,  $T_{\text{п}}$  – стала часу, що враховує дискретність, запізнення та наявність фільтрів в системі керування. До реального двигуна прикладається трифазна симетрична напруга, яка може бути описана рівняннями

$$\begin{cases} u_a = u_1 \sin(2\pi ft) \\ u_b = u_1 \sin(2\pi ft - 2\pi/3) \\ u_c = u_1 \sin(2\pi ft + 2\pi/3) \end{cases} \quad (4)$$

де  $u_1$  – амплітуда напруги мережі живлення,  $f$  – частота мережі живлення,  $t$  – час.

В [3] отримана формула координатного перетворювача, яка приводить систему (4) в систему еквівалентних напруг  $u_{1a}, u_{1b}$  в системі координат статора a-b.

$$\begin{cases} u_{1a} = u_a - 0.5u_b - 0.5u_c \\ u_{1b} = \sqrt{3}/2(u_b - u_c) \end{cases} \quad (5)$$

Побудуємо оптимальні за енергетичною ефективністю регулятори, в які заложимо закони керування напругою та частотою, які будуть підтримувати на максимальному рівні коефіцієнт корисної дії системи при зміні навантаження. Так використовуючи Т-образну схему заміщення та відношення, які описують роботу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, отримуємо вираз для коефіцієнту корисної дії:

$$\eta = 1 / \left( 1 + \frac{1}{C' P_{\text{н}} M_{\text{с}}^*} \cdot \frac{P_{\text{мехн}} C' k_{\text{f}} (k_{\text{u}}^2 - s_{\text{н}} M_{\text{с}}^* k_{\text{f}}) + P_{\text{стн}} (a + b k_{\text{f}}) k_{\text{u}}^4 / k_{\text{f}} + P_{\text{мн}} M_{\text{с}}^{*2} k_{\text{a}}^2}{k_{\text{f}} (k_{\text{u}}^2 - s_{\text{н}} M_{\text{с}}^* k_{\text{f}})} \right), \quad (6)$$

де  $C' = 1 / (1 - s_{\text{н}})$ ,  $P_{\text{н}}$  – номінальна потужність електродвигуна;  $s_{\text{н}}$  – номінальне ковзання;  $P_{\text{мехн}}, P_{\text{стн}}, P_{\text{мн}}$  – втрати механічні, в сталі, в міді відповідно при номінальному режимі роботи електродвигуна;  $a, b$  – коефіцієнти, які залежать від сталі та товщини листа, представляють втрати на гістерезис та на вихрові струми;  $M_{\text{с}}^* = M_{\text{с}} / M_{\text{н}}$  – коефіцієнт завантаженості;  $k_{\text{u}} = u / u_{\text{н}}$  – коефіцієнт регулювання напруги;  $k_{\text{f}} = f / f_{\text{н}}$  – коефіцієнт регулювання частоти.

Для того, щоб отримати максимальне значення коефіцієнта корисної дії, необхідно перші похідні виразу (6) по  $k_{\text{u}}$  та  $k_{\text{f}}$  прирівняти до нуля. Таким чином, отримано закони регулювання напругою та частотою, які дають можливість підтримувати значення коефіцієнта корисної дії на оптимальному (максимальному) рівні при зміні завантаженості:

$$k_{\text{u}} = \sqrt{k_{\text{f}} M_{\text{с}}^*} \sqrt{s_{\text{н}} + \sqrt{s_{\text{н}} + P_{\text{мн}} k_{\text{f}} / P_{\text{стн}} (a + b k_{\text{f}})}}, \quad (7)$$

$$a k_{\text{f}}^3 + b k_{\text{f}}^2 + c k_{\text{f}} + d = 0, \quad (8)$$

$$k_{\text{f}} = \sqrt[3]{-q + \sqrt{D}} + \sqrt[3]{-q - \sqrt{D}} - b/3a,$$

$$\text{де } D = q^2 + p^2, q = (2b^3 - 9abc + 27a^2d) / 54a^3, p = 3ac - b^2 / 9a^2, a = 2P_{\text{м}} M_{\text{с}}^2 \cdot k_{\text{u}}^4, b = 2P_{\text{с}} (3as_{\text{н}} M_{\text{с}} \cdot k_{\text{u}}^2 - b \cdot k_{\text{u}}^4).$$

Для того, щоб отримати структурні схеми оптимальних за енергетичною ефективністю регуляторів, вирази (7), (8) запишемо у вигляді:

$$u = u_{\text{н}} \sqrt{f / f_{\text{н}} M_{\text{с}}^*} \sqrt{s_{\text{н}} + \sqrt{s_{\text{н}} + \frac{P_{\text{мн}} f / f_{\text{н}}}{P_{\text{стн}} (a + b f / f_{\text{н}})}}}, \quad (9)$$

$$f = f_{\text{н}} (\sqrt[3]{-q + \sqrt{D}} + \sqrt[3]{-q - \sqrt{D}} - b/3a). \quad (10)$$

Оскільки в стрічкових конвеєрах основними режимами роботи є статичний, а проміжок часу пуску відносно невеликий, то розглянемо характер втрат при усталеному режимі роботи транспортного пристрою.

На основі отриманих моделей асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором (1), двомасової пружно-в'язаної механічної системи стрічкового конвеєра (2), перетворювача частоти (3), виразів (4) та (5), оптимальних за енергетичною ефективністю регуляторів (9) та (10) розроблена структурна схема загальної моделі замкненої пружно-в'язаної електромеханічної системи стрічкового конвеєра з оптимальним по енергетичній ефективності регулятором із законом регулювання напругою (рис.1). На рис.1 прийняті наступні позначення:

ЗІ – датчик інтенсивності; ПІ-РІШ – пропорційно інтегральний регулятор швидкості;

ОРН – оптимальний по енергетичній ефективності регулятор із законом регулювання напругою;  $k_{\omega}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості;  $u_3$  – напруга завдання;  $u_{ззш}$  – напруга зворотного зв'язку. Результати дослідження режимів роботи загальної моделі пружно-в'язкої системи механічного конвеєра при різних навантаженнях для випадку дослідження оптимального регулятора та без нього приведено на рис.2, 3, 4.

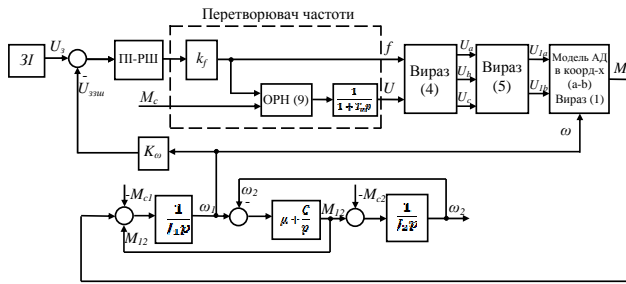


Рис. 1 Структурна схема загальної моделі пружно – в'язкої електромеханічної системи стрічкового конвеєра

мальним регулятором.

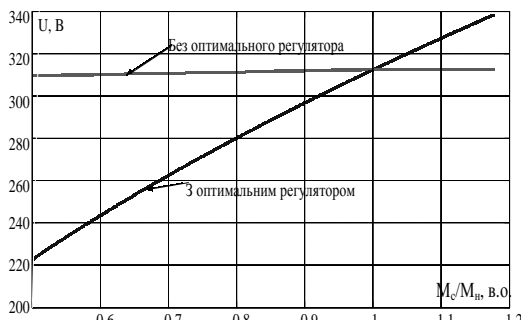


Рис. 2 Перехідні процеси напруг

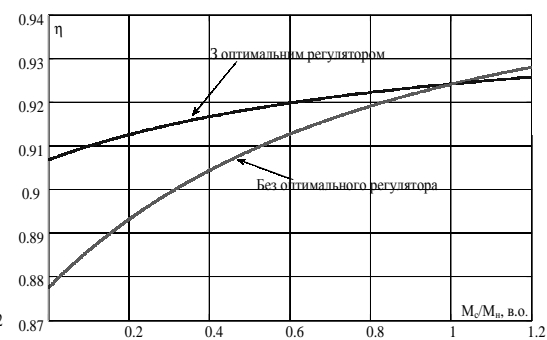


Рис.3 Перехідні процеси ККД

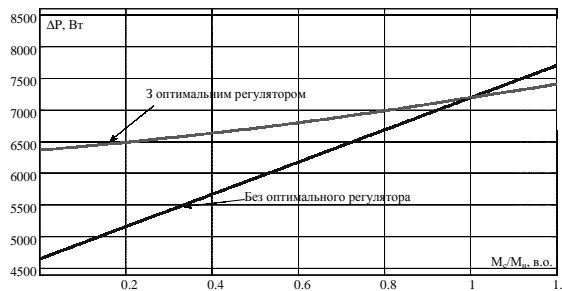


Рис.4 Перехідні процеси потужності

Як видно з приведених графіків, використання синтезованих оптимальних регуляторів напруги дає можливість, при навантаженні  $0.5M_n$  зменшити втрати енергії в середньому на 24-28%.

**Висновки.** Перехід від нерегульованого електроприводу до регульованого призводить до збільшення коефіцієнта корисної дії та, відповідно, зменшення загальних втрат в електромеханічній системі конвеєра. Введення в електромеханічну систему оптимального по енергозбереженню регулятора із законом регулювання напруги дозволяє досягти зменшення втрат. Ефект зменшення втрат спостерігається при навантаженнях системи менших від номінального, що є дуже важливо для систем неперервного транспорту, адже в основному вони працюють з недовантаженням.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Печеник М.В., Суходілля О.М. Питання підвищення енергетичної ефективності асинхронних електроприводів / М.В. Печеник, О.М. Суходілля// Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 1998. - №2. – С.29-32.
2. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И.Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высших технических учебных заведений / А.И. Вольдек; 3-е изд., перераб.-Л.:Энергия, 1978 – 832с.
4. Печеник М.В., Зайченко О.А. Розробка моделі електромеханічної системи стрічкового конвеєра з врахуванням енергозберігаючих режимів роботи електроприводу/ М.В. Печеник, О.А. Зайченко . – 2007. - №1 - С.115-120.