

# ЕНЕРГЕТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ КЕРУВАННІ З МІНІМІЗАЦІЄЮ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ

Приймак Б.І., ст. викладач, к.т.н, Денисюк С.А., магістрант  
кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Питання зниження енергетичних витрат в асинхронних електроприводах, які кількісно займають домінуюче місце в промисловості, на сьогоднішній день є важливим та актуальним. Як відомо, при звичайному векторному чи частотному керуванні асинхронним двигуном (АД) магнітний потік двигуна стабілізується на номінальному рівні і лише для отримання вищих від номінальної швидкостей потік зменшується обернено-пропорційно до швидкості. Проте в разі енергоощадного керування АД його магнітний потік має підтримуватися оптимальним в сенсі певного критерію мінімізації втрат. Це значно збільшує складність задач побудови досконалих систем енергоощадного векторного керування АД. Звідси ясно, що успіх розв'язання таких задач фахівцями в галузі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу значною мірою залежить від глибини вивчення відповідних властивостей об'єкта керування, якими є енергетичні характеристики АД.

У цій праці ставилось за мету побудувати та проаналізувати енергетичні характеристики для ustalених режимів роботи АД при звичайному керуванні та при енергоощадному керуванні з мінімізацією сумарних втрат потужності.

Серед втрат потужності в АД виділяють електричні втрати в обмотці статора, електричні втрати у роторі, магнітні втрати в осерді статора, магнітні втрати у роторі, додаткові втрати та механічні втрати. Оскільки електричні втрати та магнітні втрати складають біля 80% усіх наявних в АД втрат, то, для спрощення, іншими втратами тут знехтуємо. Також не враховуватимемо насичування заліза, хоча це потрібно для адекватності загального розв'язку задачі оптимізації втрат в АД. Проте при змінах потоку двигуна униз від номінального лінійна задача мінімізації втрат дає непогану точність.

На рис.1 представлена Т-подібна схема заміщення АД. Тут  $\bar{U}_s$  - вектор

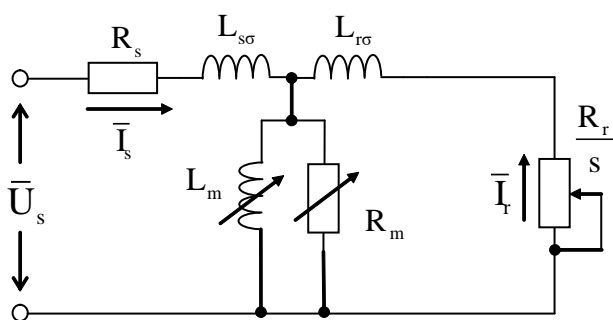


Рис.1 Схема заміщення АД

напруги статора;  $\bar{I}_s$ ,  $\bar{I}_r$  - вектори струму статора та ротора, а  $R_s$ ,  $R_r$  - активні опори фаз статора та ротора відповідно;  $L_{s\sigma}$ ,  $L_{r\sigma}$  - індуктивності від полів розсіювання;  $L_m$  - взаємна індуктивність між статором та ротором;  $R_m$  - магнітний опір;  $s = (\omega_0 - z_p \omega) / \omega_0$  - ковзання двигуна;  $\omega_0$  - кутова швидкість обертання

магнітного поля;  $M$  - електромагнітний момент двигуна;  $z_p$  - кількість пар полюсів АД. У даній схемі заміщення враховуються електричні втрати  $P_{cu}$  та

магнітні втрати потужності  $P_{fe}$ . Сумарні втрати потужності у двигуні дорівнюють

$$\Delta P = P_{cu} + P_{fe}. \quad (1)$$

Для усталених режимів роботи сумарні втрати будуть функцією трьох незалежних змінних  $\Delta P = \Delta P(\Psi_r, M, \omega)$ , де  $\Psi_r$  – модуль вектора потокозчеплення ротора АД. Пропускаючи проміжні перетворення, з (1) отримаємо

$$\Delta P = \frac{3}{2} \left\{ \left[ R_s \left( 1 + \frac{\omega_0^2 K_r^2 L_{r\sigma}^2}{R_m^2} \right) + \frac{\omega_0^2 K_r^2 L_{r\sigma}^2}{R_m} + K_r^2 R_r \right] \frac{M^2}{K_M^2 \Psi_r^2} + \left[ R_s \left( L_m^{-2} + \frac{\omega_0^2}{R_m^2} \right) + \frac{\omega_0^2}{R_m} \right] \Psi_r^2 + R_s \frac{4M \omega_0}{3z_p R_m} \right\}, \quad (2)$$

де  $K_r = L_m/L_r$ ;  $L_r = L_m + L_{r\sigma}$ ;  $K_M = 3z_p K_r/2$ . Магнітний опір приблизно можна визначити як  $R_m \cong (K_h/|z_p \omega| + K_e)^{-1}$ , де  $K_h$  – коефіцієнт втрат від гістерезису;  $K_e$  – коефіцієнт втрат від вихрових струмів. Величина  $\omega_0$  визначається як  $\omega_0 = z_p \omega + \omega_s$ , де  $\omega_s = 2R_r M / 3z_p \Psi_r^2$  – кутова швидкість ковзання АД.

Припустивши  $L_m = const$ , дослідимо на екстремум (2) шляхом розв'язання рівняння  $d\Delta P/d\Psi_r = 0$  при  $M = const$ ,  $\omega = const$ . Виконавши це та дещо спростивши результат, отримаємо формулу для визначення енергетично оптимального значення  $\Psi_{ro}$  потокозчеплення ротора АД у вигляді

$$\Psi_{ro} \cong \sqrt{|M|} \sqrt{\frac{1}{K_M} \sqrt{\frac{R_s + K_r^2 R_r}{R_s/L_m^2 + (z_p \omega)^2/R_m(\omega)}}}. \quad (3)$$

Формулу для обчислення ККД двигуна у русійному режимі роботи отримаємо у вигляді

$$\eta = P/(P + \Delta P), \quad (4)$$

де  $P = \omega \cdot M$  – потужність на виході двигуна.

Отже при заданих значення моменту  $M > 0$  і швидкості  $\omega > 0$  двигуна сумарні втрати потужності у ньому  $\Delta P$  визначатимуться за (2) при  $\Psi_r = \Psi_m$  (для звичайного керування АД) або при  $\Psi_r = \Psi_{ro}$  (для енергоощадного керування АД), де  $\Psi_{ro}$  обчислюється за (3).

Для чисельних досліджень використовувався типовий 4-х полюсний АД з короткозамкнутим ротором потужністю 30 кВт. На рис. 2 представлені

залежності  $\Delta P = f(\Psi_r)$ , що отримані за (2) при  $\underline{M} = 0,2$  в.о. (підкресленням знизу тут позначатимуться відносні значення величин, вимірювані у відносних одиницях (в.о.)) для швидкостей  $\underline{\omega} = 1$  в.о. (крива 1),  $\underline{\omega} = 0,5$  в.о. (крива 2),  $\underline{\omega} = 0,05$  в.о. (крива 3). Аналізуючи ці криві бачимо, що втрати потужності в АД мають екстремальний характер. Причому при зменшенні швидкості точка мінімуму переміщується в напрямку зростання потоку. На рис. 3 представлені

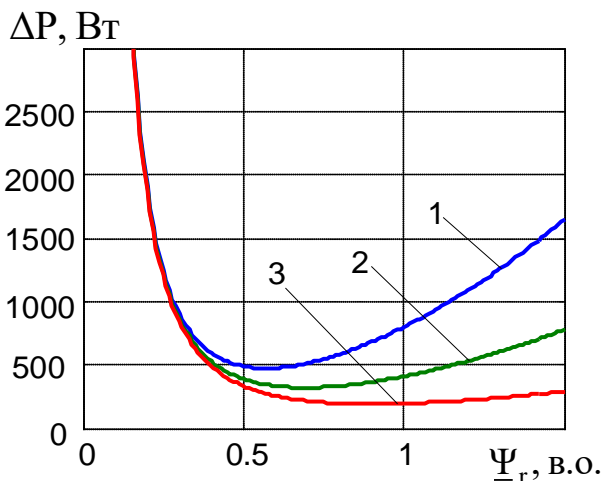


Рис.2 Залежності  $\Delta P = f(\Psi_r)$

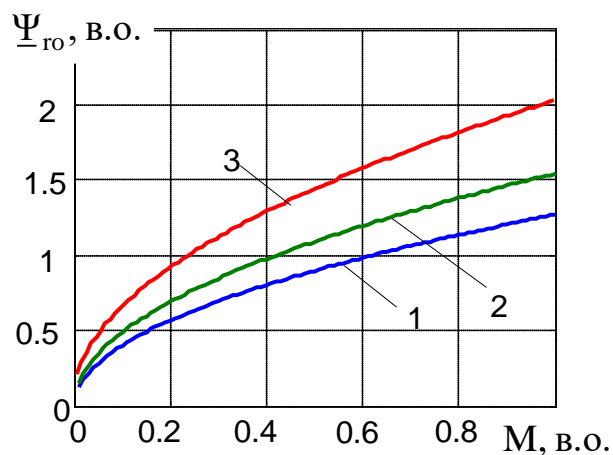


Рис.3 Залежності  $\Psi_{ro} = f(M)$

залежності  $\Psi_{ro} = f(M)$ , що отримані за (3) при швидкостях  $\underline{\omega} = 1$  в.о. (крива 1),  $\underline{\omega} = 0,5$  в.о. (крива 2),  $\underline{\omega} = 0,05$  в.о. (крива 3). За цим рисунком бачимо, що меншим швидкостям відповідає більне значення оптимального потоку.

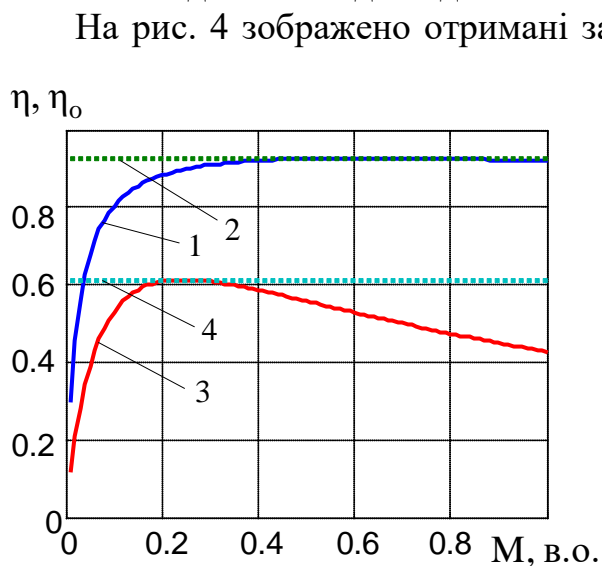


Рис.4 Залежності  $\eta(M)$  та  $\eta_o(M)$

На рис. 4 зображено отримані за (4) ККД для звичайного керування АД  $\eta(M)$  (криві 1, 3) та для енергоощадного керування  $\eta_o(M)$  (криві 2, 4) при швидкостях  $\underline{\omega} = 1$  в.о. (криві 1, 2) та  $\underline{\omega} = 0,05$  в.о. (криві 3, 4). Аналізуючи цей рисунок, бачимо, що криві 2 та 4 є практично горизонтальними лініями на рівні максимумів кривих 1 та 3 відповідно. Це свідчить про отримання в АД при енергоощадному керуванні

максимально можливого ККД (для кожної конкретної швидкості) незалежно від моменту двигуна. Також бачимо, що зона економії енергії на високих швидкостях лежить зліва, а на малих швидкостях – як зліва так і справа від максимуму на кривій ККД для звичайного керування.