

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ПРИВОДА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З КЕРУВАННЯМ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ

Долганов О.О., Лозада Ф., магістранти, Приймак Б.І., к.т.н., доц.

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу*

**Вступ.** Тема підвищення енергетичної ефективності тягових асинхронних приводів електричних транспортних засобів є актуальною та важливою. У трамваях, тролейбусах та електровозах це дозволить досягти істотного зменшення споживання електроенергії. А в автономному електротранспорті, зокрема в електромобілях, застосування асинхронних двигунів (АД) з економічним керуванням крім енергозбереження також сприятиме збільшенню пробігу без перезарядження батареї та зменшенню ємності батареї.

На сьогодні відомо чимало робіт, де автори пропонують варіанти алгоритмів керування АД зі зменшенням втрат потужності [1-5]. Проте тема енергетичних властивостей АД при керуванні з мінімізацією сумарних втрат потужності на швидкостях як нижчих, так і вищих за номінальну ще не достатньо висвітлена у літературі. Саме цій темі присвячена дана стаття.

**Мета роботи** – отримати та проаналізувати енергетичні характеристики тягового асинхронного двигуна електромобіля в ustalених режимах роботи при звичайному та при оптимальному керуванні з мінімізацією сумарних втрат потужності на швидкостях ротора як менших, так і більших від номінальної.

**Мінімізація втрат потужності в АД.** 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 насичення заліза, хоча це потрібно для достатньо високої точності загального розв'язку задачі оптимізації втрат в АД. Проте при змінах потоку двигуна униз від номінального лінійна задача мінімізації втрат теж може давати задовільну точність [4].

На рис. 1 представлена Т-подібна схема заміщення фази АД. Тут  $\bar{U}_s$  – вектор 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;  $L_m$  – індуктивність намагнічування;  $R_m$  – магнітний опір;  $s = (\omega_0 - z_p \omega) / \omega_0$  – ковзання двигуна;  $\omega_0$  – кутова швидкість обертання маг-

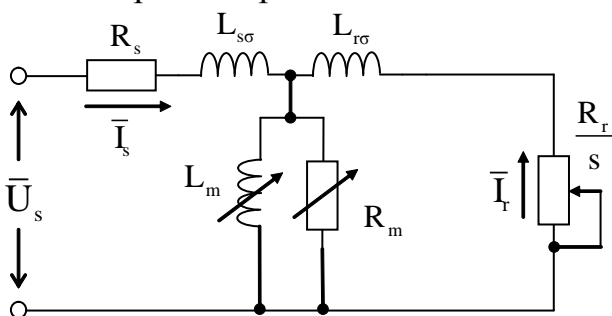


Рисунок 1 – Схема заміщення АД

нітного поля;  $z_p$  – кількість пар полюсів АД. У даній схемі заміщення враховуються електричні втрати  $P_{cu}$  та магнітні втрати  $P_{fe}$ . 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  $\Psi_r = |\bar{\Psi}_r|$  – модуль вектора потокозчеплення ротора АД;  $M$  – електромагнітний момент двигуна. Пропускаючи проміжні перетворення, з (1) отримуємо [5]

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

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  $\omega_s = 2R_r M / 3z_p \Psi_r^2$  – 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, отримуємо формулу для визначення енергетично оптимального значення  $\Psi_{ro}$  потокозчеплення ротора АД у вигляді

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

В асинхронних електроприводах з класичним векторним керуванням модуль вектора потокозчеплення ротора стабілізується на рівні  $\Psi_r = \Psi_{rc}$ , що визначається за алгоритмом

$$\Psi_{rc} = \begin{cases} \Psi_{rn} & \text{при } |\omega| \leq \omega_n, \\ \Psi_{rn} \omega_n / |\omega| & \text{при } |\omega| > \omega_n, \end{cases} \quad (4)$$

де  $\Psi_{rn}$ ,  $\omega_n$  – номінальні значення потокозчеплення ротора та швидкості двигуна відповідно.

Для отримання енергетичних характеристик асинхронного електроприводу треба враховувати фізично існуючі обмеження на такі змінні величини як напруга статора, струм статора та потокозчеплення ротора. У зорієнтованих за  $\bar{\Psi}_r$  координатах  $(d, q)$  момент двигуна та швидкість поля ротора дорівнюють

$$M = K_M \Psi_r I_q; \quad (5)$$

$$\omega_0 = z_p \omega + K_r R_r I_q / \Psi_r, \quad (6)$$

де  $I_d, I_q$  – компоненти вектора струму статора. В усталених процесах рівняння статора АД мають вигляд [6]

$$U_d = R_s I_d - \omega_0 \sigma L_s I_q; \quad (7)$$

$$U_q = R_s I_q + \omega_0 L_s I_d, \quad (8)$$

де  $U_d, U_q$  – компоненти вектора напруги статора;  $L_s = L_m + L_{s\sigma}$  – індуктивність статора;  $\sigma = 1 - L_m^2 / L_r L_s$  – коефіцієнт розсіювання;  $I_d = \Psi_r / L_m$ . Отже обмеження струму та напруги статора можна записати як

$$I_d^2 + I_q^2 \leq I_{\max}^2; \quad (9)$$

$$U_d^2 + U_q^2 \leq U_{\max}^2, \quad (10)$$

а обмеження потокозчеплення ротора

$$\Psi_{r,\min} \leq \Psi_r \leq \Psi_m, \quad (11)$$

де  $\Psi_{r,\min}$  – деяке мінімальне значення потокозчеплення з огляду на недопущення повного розмагнічування заліза статора АД. Оскільки оптимізація втрат в АД здійснюватиметься як на нижчих, так і на вищих від номінальної швидкостей ротора, то для оптимального потокозчеплення обмеження (11) модифікуємо як

$$\Psi_{r,\min} \leq \Psi_{ro} \leq \min \{ \Psi_m, \Psi_m \omega_n / |\omega| \}. \quad (12)$$

Нижче будуть розраховані енергетичні характеристики АД у русійному режимі роботи. Втрати потужності у двигуні при класичному керуванні  $\Delta P_c$  визначатимуться за (2) при  $\Psi_r = \Psi_{rc}$ , де  $\Psi_{rc}$  обчислюється за (4), а втрати потужності при оптимальному керуванні  $\Delta P_o$  визначатимуться за (2) при  $\Psi_r = \Psi_{ro}$ , де  $\Psi_{ro}$  обчислюється за (3). При здійсненні обчислень враховуватимуться обме-

ження (9)-(12). Отримана завдяки оптимізації економія втрат потужності в АД буде визначатися як різниця  $\Delta P_c - \Delta P_o$ .

**Числові дослідження.** Для числових досліджень в статті використано типовий чотириполосний АД потужністю 30 кВт. Номінальні дані цього двигуна подано у табл. 1, де  $P$  – вихідна потужність,  $U, I$  – напруга та струм фази

Таблиця 1 – Номінальні дані АД

|                   |                   |                    |
|-------------------|-------------------|--------------------|
| $P=30$ кВт        | $U=220$ В         | $I=56,8$ А         |
| $f=50$ Гц         | $n=1467$ об/хв    | $\cos\varphi=0,88$ |
| $R_s = 0,1376$ Ом | $R_r = 0,0862$ Ом | $R_m = 187$ Ом     |
| $L_s = 43,14$ мГн | $L_r = 43,64$ мГн | $L_m = 41,83$ мГн  |

статора (діючі значення),  $f, n$  – частота живлення та швидкість вала двигуна. Обмеження напруги та струму були прийняті

$$U_{\max} = \sqrt{2}U = 311 \text{ В},$$

$I_{\max} = 1,5\sqrt{2}I = 120 \text{ А}$ . Всі представлені нижче на графіках величини нормовані відносно своїх номінальних значень і вимірюються у відносних одиницях (в.о.). Для втрат потужності за базове значення взято номінальні втрати в АД.

Спершу розглянемо роботу двигуна на швидкостях вниз від номінальної. На рис. 2 представлені залежності оптимального потокозчеплення від момента двигуна  $\Psi_{ro} = f(M)$  для швидкостей  $\omega=1$  в.о. (крива 1),  $\omega=0,5$  в.о. (крива 2),  $\omega=0,05$  в.о. (крива 3). На рис. 3 наведені залежності зекономлених втрат потужності  $\Delta P_c - \Delta P_o$  від момента двигуна для цих же швидкостей. Як видно з рис. 3 економія втрат може сягати 25%, а зона економії знаходиться в інтервалі значень моменту  $M \cong 0,0 \div 0,6$  в.о. При цьому як рівень так і ширина зони економії втрат зменшуються зі зниженням швидкості ротора.

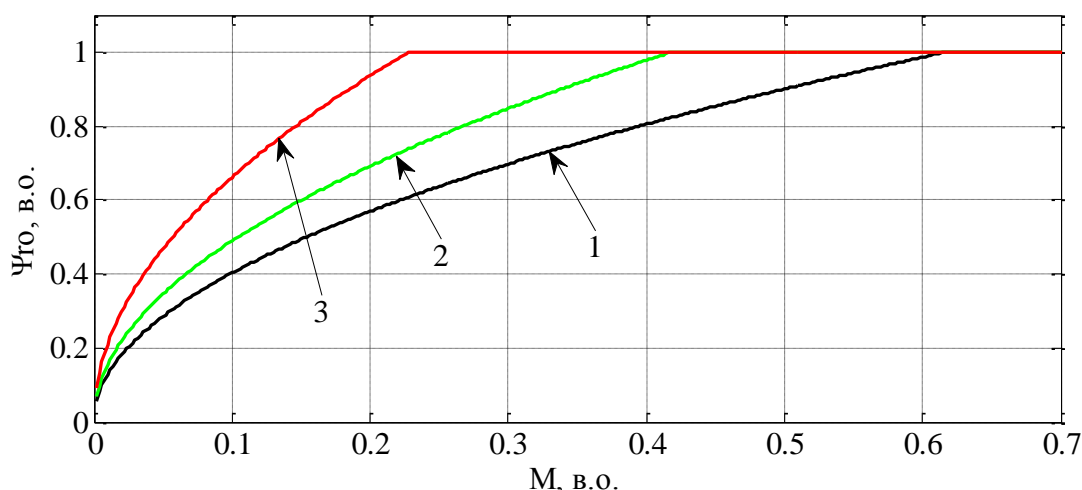


Рисунок 2 – Залежності оптимального потокозчеплення від моменту двигуна за менших від номінальної швидкостей ротора

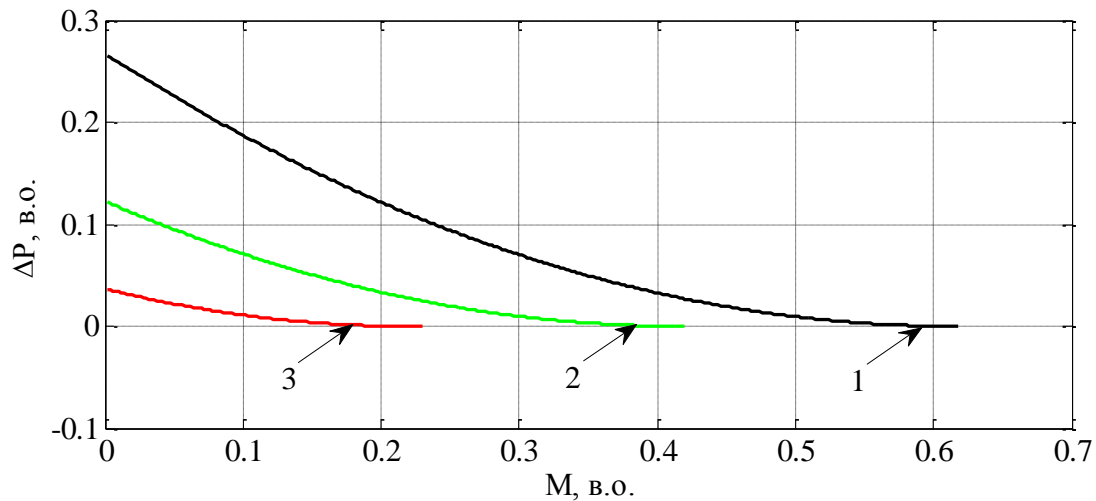


Рисунок 3 – Залежності зекономлених втрат потужності від момента двигуна за менших від номінальної швидкостей ротора

Тепер розглянемо роботу двигуна на швидкостях угору від номінальної. На рис. 4 представлені залежності оптимального потокозчеплення від момента двигуна  $\Psi_{ro} = f(M)$  для швидкостей  $\omega = 1$  в.о. (крива 1),  $\omega = 1,5$  в.о. (крива 2),  $\omega = 2$  в.о. (крива 3),  $\omega = 2,5$  в.о. (крива 4),  $\omega = 3$  в.о. (крива 5), а на рис. 5 наведені залежності зекономлених втрат потужності  $\Delta P_c - \Delta P_o$  від момента двигуна для цих же швидкостей. Причиною обмеження горизонтальних ділянок кривих потокозчеплення на рис. 4 є досягнення напругою статора свого максимального значення. Як видно з рис. 5 як рівень, так і ширина зони економії втрат зменшуються зі зростанням швидкості ротора.

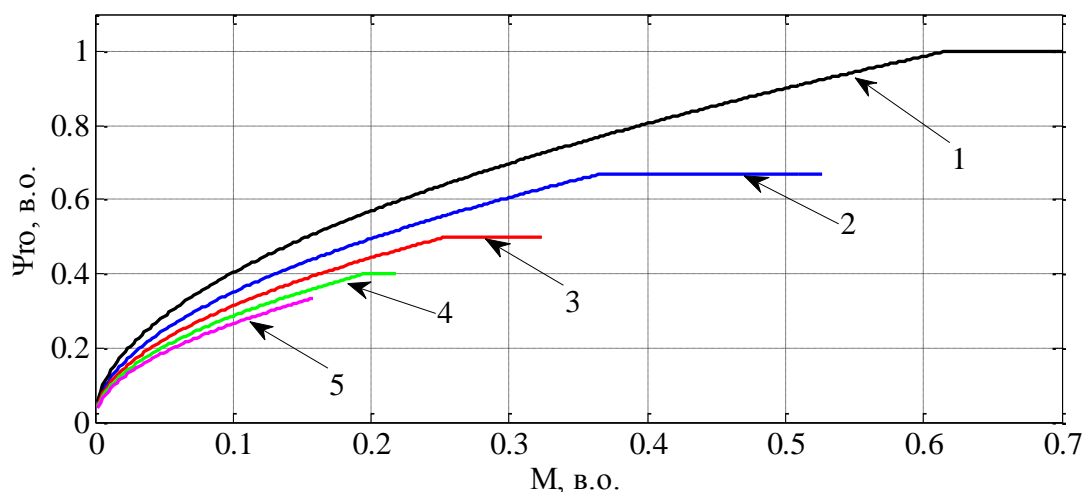


Рисунок 4 – Залежності оптимального потокозчеплення від момента двигуна за більших від номінальної швидкостей ротора

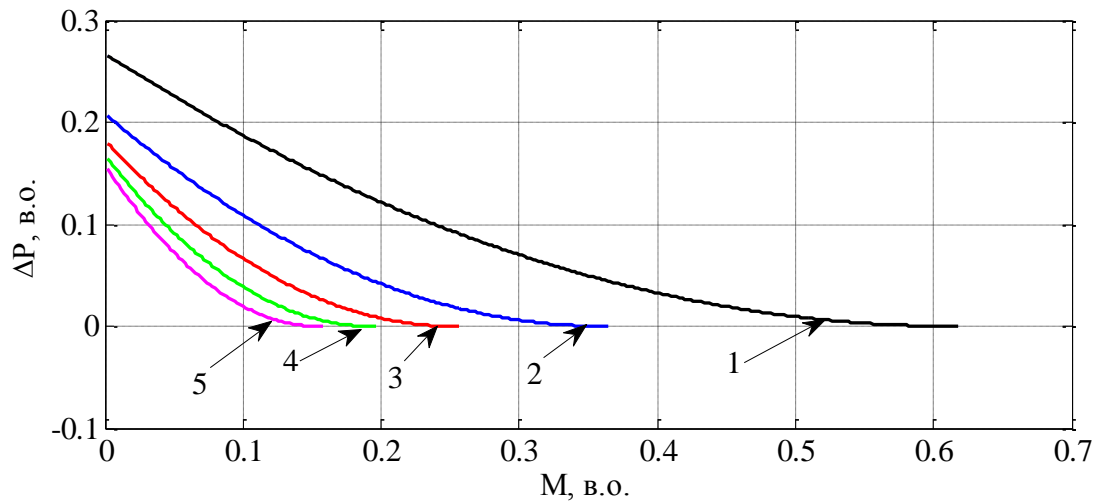


Рисунок 5 – Залежності зекономлених втрат потужності від момента двигуна за більших від номінальної швидкостей ротора

**Висновки.** Проведено порівняльне дослідження енергетичних властивостей тягового АД електромобіля в усталених режимах роботи при звичайному керуванні та при економічному керуванні з мінімізацією сумарних втрат потужності. Встановлено, що завдяки мінімізації втрат економія може сягати 25% від номінальних втрат, а зона економії втрат може простягатися в інтервалі значень момента  $M \cong 0,0 \div 0,6$  в.о. При змінах швидкості двигуна як вниз, так і вгору від номінальної рівень та ширина зони економії втрат в АД зменшуються.

#### Перелік посилань

1. Lim S., Nam K. Loss-minimizing control scheme for induction motors, Proc. Inst. Elect. Eng., Vol. 151, No. 4, Jul. 2004, pp. 385-397.
2. Casadei, D., Mengoni, M., Serra, G., Tani, A., Zarri, L. A control scheme with energy saving and DC-link overvoltage rejection for induction motor drives of electric vehicles // IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 46, No 4, 2010, P. 1436-1446.
3. Liu Y., Zhao J., Wang R., & Huang C. Performance improvement of induction motor current controllers in field-weakening region for electric vehicles. IEEE Trans. on Power Elect., Vol. 28, No.5, 2013, P. 2468-2482.
4. Приймак Б.И. Аналитическое определение энергетически оптимального значения потока ротора асинхронной машины / Б.И. Приймак // Электричество. – 2005. – № 12 – С. 36-43.
5. Приймак Б.И. Алгоритми керування потоком для оптимізації втрат потужності в асинхронній машині / Б.И. Приймак // Техн. електродинаміка. – 2005. – № 6. – С. 48-52.
6. Novotny D.W., Lipo T.A. Vector control and dynamics of AC drives, Oxford: Clarendon Press, 1996. – 456 p.