

УДК 62-83:621.313.32

**І.З. Щур**, д-р техн. наук,  
**М.Ф. Мандзюк**

### ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

*Анотація.* Розглянуто основні стратегії керування синхронними двигунами з постійними магнітами: нульового струму по осі  $d$ , максимального моменту на одиницю струму, одиничного коефіцієнта потужності, сталого потоку у повітряному проміжку, мінімізації втрат у міді. Проведено порівняльний аналіз енергетичної ефективності різних стратегій керування.

**І. З. Щур**, доктор технічних наук

**М. Ф. Мандзюк**

### ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

*Аннотация.* Рассмотрены основные стратегии управления синхронными двигателями с постоянными магнитами: нулевого тока по оси  $d$ , максимального момента на единицу тока, единичного коэффициента мощности, постоянного потока в воздушном промежутке, минимизации потерь в меди. Проведен сравнительный анализ энергетической эффективности различных стратегий управления.

**I.Z. Shhur**, PhD

**M.F. Mandzjuk**

### ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT STRATEGIES SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT ONES MAGNETS

*Abstract.* The article reviews the main control strategies for permanent magnet synchronous motors: zero  $d$ -axis current, maximum torque per unit current, unity power factor, constant mutual flux linkage and minimizing power loss in copper. The efficiency of different control strategies is compared and analyzed.

**Постановка проблеми.** Вентильні електричні приводи на базі синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ) мають високу ефективність, добрі масо-габаритні показники, простоту керування та охолодження, низькі експлуатаційні витрати, велику довговічність та надійність [1, 3]. Для керування такими електроприводами використовуються різні підходи, аналіз та дослідження ефективності яких є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [4] наведено теоретичні основи та динамічні характеристики різних стратегій керування. Детальний аналіз стратегій керування з мінімізацією втрат двигуна проведено у [2]. Використання кожної з розглянутих у [2, 4] стратегій керування є доцільним, виходячи як з умови забезпечення максимального електромагнітного моменту, так і енергетичної ефективності.

**Мета статті.** Отримання математичних виразів критеріїв для стратегій керування СДПМ у відносних одиницях (в.о.). Дослідження енергетичної ефективності різних стратегій керування СДПМ.

**Викладення матеріалу.** Аналіз режимів роботи СДПМ найпростіше виконувати в обертовій та зорієнтованій за вектором потокозчеплення ротора системі координат  $d$ - $q$ . Тоді математична модель СДПМ без врахування втрат у сталі має вигляд [1]:

$$\begin{cases} U_d = I_d(R_s + L_d s) - \omega L_q I_q; \\ U_q = I_q(R_s + L_q s) + \omega(L_d I_d + \Phi_0), \end{cases} \quad (1)$$

© Щур І.З., Мандзюк М.Ф., 2011

де  $U_d, U_q, I_d, I_q$  – проекції векторів напруг та струмів на відповідні осі обертової системи координат;  $R_s$  – активний опір обмоток статора;  $L_d, L_q$  – індуктивності обмоток статора по відповідних осях;  $\omega$  – кругова частота,  $\Phi_0$  – магнітний потік, що створюється одним полюсом постійних магнітів.

Для отримання загального результату аналізу стратегій керування СДПМ перейдемо до відносних одиниць (в.о.) Якщо за базову величину приймемо напругу  $U_\sigma$ , то відповідно базові величини струму і кругової частоти будуть  $I_\sigma = U_\sigma / R_s$ ,  $\omega_\sigma = U_\sigma / \Phi_0$ . Тоді математична модель СДПМ (1) у в.о.

$$\begin{cases} U_d^* = I_d^* - \omega^* I_q^* T_q^*; \\ U_q^* = I_q^* + \omega^* I_d^* T_d^*, \end{cases} \quad (2)$$

де  $U_d^*, U_q^*, I_d^*, I_q^*, \omega^*$  – відповідні змінні двигуна у в.о.;  $T_d^* = (\omega_\sigma L_d) / R_s$ ;  $T_q^* = (\omega_\sigma L_q) / R_s$ .

Електромагнітний момент СДПМ

$$M = \frac{3}{2} p \Phi_0 I_q + \frac{3}{2} p (L_d - L_q) I_d I_q, \quad (3)$$

де  $p$  – кількість пар полюсів СДПМ.

Прийнявши за базову величину моменту  $M_\sigma = 3 p \Phi_0 I_\sigma / 2$  та поділивши на неї обидві частини (3), отримаємо у в.о.

$$M^* = I_q^* + (T_d^* - T_q^*) I_d^* I_q^*. \quad (4)$$

У даній роботі, при розрахунку енергетичної ефективності різних стратегій керування,

враховуються лише втрати у міді, які у в.о. можна розрахувати (приймавши  $P_6 = 3U_6 I_6 / 2$ )

$$\Delta P^* = I_d^{*2} + I_q^{*2} \quad (5)$$

Коефіцієнт корисної дії двигуна

$$\eta = 1 - \Delta P^* / (M^* \omega^*) \quad (6)$$

У випадку використання стратегії нульового струму по осі  $d$  ( $I_d = 0$ ) кут між векторами потоку та струму підтримується на рівні  $90^\circ$ . Така стратегія є широко розповсюджена, оскільки залежність між струмом  $I_q$  та електромагнітним моментом є лінійною, що спрощує керування. В той же час відмінний від нуля струм  $I_d$  збільшує магнітний потік у повітряному проміжку, що дає змогу збільшити електромагнітний момент. Ця особливість використовується у всіх інших стратегіях.

Стратегія максимального моменту на одиницю струму мінімізує сумарний струм СДПМ за конкретного значення моменту. Загальний вираз критерію у в.о. для даної стратегії

$$I_q^* = \sqrt{I_d^* (I_d^* + 1 / (T_d^* - T_q^*))} \quad (7)$$

Максимальний момент для даної стратегії керування обмежується мінімально можливими втратами, тому вираз (7) є критерієм і для стратегії мінімізації втрат у міді [4].

Для стратегії одиничного коефіцієнта потужності критерій у в.о.

$$I_q^* = \sqrt{\frac{T_d^* I_d^{*2} + I_d^*}{T_q^*}} \quad (8)$$

Стратегії сталого потоку у повітряному проміжку у в.о.

$$I_q^* = \sqrt{\frac{1 - (1 + T_d^* I_d^*)^2}{T_q^{*2}}} \quad (9)$$

На підставі виразів (7)-(9) для різних стратегій керування на рис.1 представлені графічно критеріальні залежності  $I_q^*(I_d^*)$  для СДПМ з такими параметрами (прийнято  $U_6 = 80$  В):  $R_s = 0,25$  Ом,  $\Phi_0 = 0,4$  Вб,  $p = 8$ ,  $L_d = 1,5$  мГн,  $L_q = 2,5$  мГн,  $n_n = 500$  об/хв,  $M_n = 500$  Н·м.

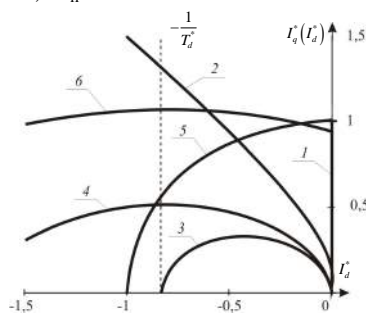


Рис. 1. Критеріальні залежності  $I_q^*(I_d^*)$ :

- 1 – нульового струму по осі  $d$ ; 2 – максимального моменту на одиницю струму; 3 – одиничного коефіцієнта потужності; 4 – сталого потоку у повітряному проміжку 5 – обмеження за

максимальним струмом; 6 – обмеження за максимальною напругою при номінальній швидкості  
 З метою аналізу енергетичних показників для усіх стратегій за виразом (6) на рис.2 побудовані енергетичні характеристики СДПМ в залежності від навантаження при номінальній кутовій швидкості (номінальне значення моменту у в.о.  $M_n^* = 0,326$ ).

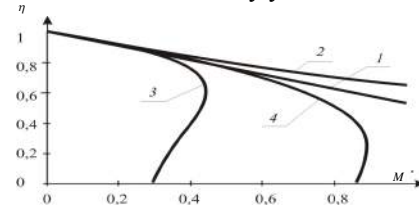


Рис. 2. Залежність  $\eta(M^*)$  для стратегій керування: 1 – нульового струму по осі  $d$ ; 2 – максимального моменту на одиницю струму; 3 – одиничного коефіцієнта потужності; 4 – сталого потоку у повітряному проміжку

**Висновки.** При виборі стратегії керування СДПМ необхідно враховувати увесь комплекс факторів: максимальний момент та енергетичну ефективність в залежності від навантаження (рис.2), а також обмеження за струмом та напругою (рис.1).

Список використаної літератури

1. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока / В.М. Перельмутер — Харьков: Основа, 2004. – 210 с.
2. Толочко О.І. Уніфікований алгоритм керування синхронними двигунами без електричного збудження / О.І. Толочко, В.В. Божко // Наук. пр. Донецьк. націон. техн. ун-ту. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2011. – Вип. 11(186). – С. 392-395.
3. Ehsani M. Moder Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory, and Design / M. Ehsani, Y. Gao, A. Emadi // CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, 2010. – 534 p.
4. Monajemy R. Comparison of Torque Control Strategies Based on the Constant Power Control System for PMSM / R.Monajemy, R.Krishnan // Control in power electronics. Selected problems. – Academic press, 2002. – Pp. 225-250.

Отримано 12.07.2011



Щур Ігор Зенонович,  
 д-р техн. наук, проф. каф.  
 ел.приводу та автоматизації  
 промислових установок НУ  
 "Львівська політехніка",  
 тел. (032) 258-26-20,  
 e-mail: i\_shchur@meta.ua



Мандзюк Максим  
 Феодосійович,  
 аспірант каф. охорони праці  
 НУ "Львівська політехніка",  
 e-mail: mandzyuk@ua.fm