

УДК 62-83

## ОСОБЛИВОСТІ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ПРИ ВРАХУВАННІ ВТРАТ У СТАЛІ

**О. І. Толочко, В. В. Божко**

Донецький національний технічний університет

вул. Артема, 58, м. Донецьк, 83001, Україна. E-mail: vladbozhko@mail.ru

Запропоновано систему векторного керування синхронним двигуном з постійними магнітами при врахуванні втрат у сталі. Отримано залежності для розрахунку складових струмів статора, які беруть участь у створенні електромагнітного моменту. Уточнено залежності для компенсації впливів перехресних зв'язків і проти-ЕРС. Порівняно роботу класичної системи векторного керування та запропонованої.

**Ключові слова:** синхронний двигун з постійними магнітами, векторне керування, втрати в сталі, контури регулювання струмів.

## ОСОБЕННОСТИ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ УЧЕТЕ ПОТЕРЬ В СТАЛИ

**О. И. Толочко, В. В. Божко**

Донецкий национальный технический университет

ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина. E-mail: vladbozhko@mail.ru

Предложена система векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами при учете потерь в стали. Получены зависимости для расчета составляющих токов статора, которые участвуют в создании электромагнитного момента. Уточнены зависимости для компенсации влияния перекрестных связей и против-ЭДС. Выполнено сравнение классической системы векторного управления и предложенной.

**Ключевые слова:** синхронный двигатель с постоянными магнитами, векторное управление, потери в стали, контуры регулирования токов.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Синхронний двигун з постійними магнітами (СДПМ) найчастіше використовується в системах регульованого електроприводу. Можна виділити три основні системи керування СДПМ: система скалярного, векторного й прямого керування [1]. Система векторного керування з орієнтацією за вектором потокозчеплення ротора отримала найбільшого розповсюдження завдяки високим статичним і динамічним характеристикам такого електроприводу. В основі системи векторного керування лежить математичний опис СДПМ в ортогональній системі координат  $dq$ , що обертається синхронно з полем ротора. Завдяки такому перетворенню керування електромагнітним моментом можливо за рахунок регулювання проєкцій струму статора.

Однак у математичному описі СДПМ, що лежить в основі системи векторного керування, зазвичай не враховуються втрати в сталі, які існують у реальній системі й призводять до того, що у створенні електромагнітного моменту беруть участь не повні складові струму статора, а тільки їх частини. Невраховання цієї особливості під час синтезу системи керування погіршує динамічні властивості системи електроприводу.

Метою даної роботи є покращення якості регулювання системи векторного керування СДПМ при врахуванні втрат у сталі.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** У СДПМ втрати в сталі можуть складати більш вагомую частину загальних втрат порівняно з асинхронними двигунами. Втрати в сталі мають дві складові: втрати від вихрових струмів та втрати на перемагнічування, зумовлені магнітним гістерезисом. Найчастіше в схемі заміщення СДПМ їх надають у вигляді паралельної гілки з опором, значення якого, в загальному випадку, залежить від частоти обертання [2].

Схеми заміщення СДПМ в ортогональній системі координат, орієнтованій за полем ротора, при врахуванні втрат у сталі наведено на рис. 1.

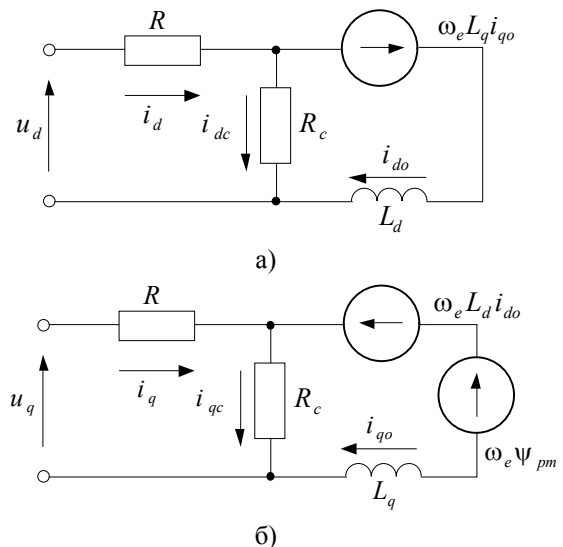


Рисунок 1 – Схеми заміщення СДПМ:  
а) канал  $d$ ; б) канал  $q$

На рис. 1 прийняті такі позначення:  $u_d, u_q, i_d, i_q$  – проєкції напруги й повного струму статора на осі  $d$  і  $q$ ;  $L_d, L_q$  – поздовжня й поперечна індуктивності статора;  $R, R_c$  – активний опір статора та опір, що характеризує втрати в сталі;  $i_{d0}, i_{q0}$  – частини ортогональних складових струму статора, які створюють електромагнітний момент;  $i_{dc}, i_{qc}$  – частини складових струму статора, які імітують

втрати в сталі;  $\omega_e = Z_p \omega$  – електрична кутова частота ротора;  $Z_p$  – кількість пар полюсів;  $\omega$  – механічна кутова швидкість ротора;  $\Psi_{pm}$  – потік постійних магнітів.

Математичний опис, отриманий за схемами заміщення, наведеним на рис. 1, має вигляд:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) & -\omega_e L_q \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \\ \omega_e L_d \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) & R + pL_q \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Psi_{pm} \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + p \frac{L_d}{R_c} & -\frac{\omega_e L_q}{R_c} \\ \frac{\omega_e L_d}{R_c} & 1 + p \frac{L_q}{R_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_e \Psi_{pm}}{R_c} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

У загальному випадку електромагнітний момент розраховується за виразом:

$$M = \frac{3}{2} Z_p \Psi_{pm} i_{qo} + \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo}. \quad (3)$$

Як можна побачити з рівняння (3), у системі ВК при врахуванні втрат у сталі більш доцільно виконувати регулювання не повних складових струму статора, а тільки тих частин, що йдуть на створення електромагнітного моменту.

На рис. 2 наведено функціональну схему такого варіанта системи векторного керування СДПМ. У цій системі передбачається, що двигун матиме вбудований датчик положення ротора, що є найбільш розповсюдженим рішенням у наш час. Інформація про кутове положення ротора використовується для виконання координатних перетворень ( $abc-dq$  та  $dq-abc$ ) та отримання сигналу кутової швидкості, який, у свою чергу, слугує для організації контуру регулювання швидкості й бере участь у формуванні заданих значень струмів відповідно до обраного алгоритму керування [3]. Основною відмінністю запропонованої системи керування від класичної є те, що як внутрішні контури регулювання використовуються контури тільки тих частин складових струмів статора, що беруть участь у створенні електромагнітного моменту ( $i_{do}, i_{qo}$ ).

Для отримання фактичних значень  $i_{do}, i_{qo}$  необхідно виконати перетворення  $i_d, i_q$  згідно з виразами (4), отриманими з (2).

Також компенсацію впливів перехресних зв'язків (ПЗ) і проти-ЕРС більш доцільно виконувати за виразами (5), які можуть бути отримані з (1).

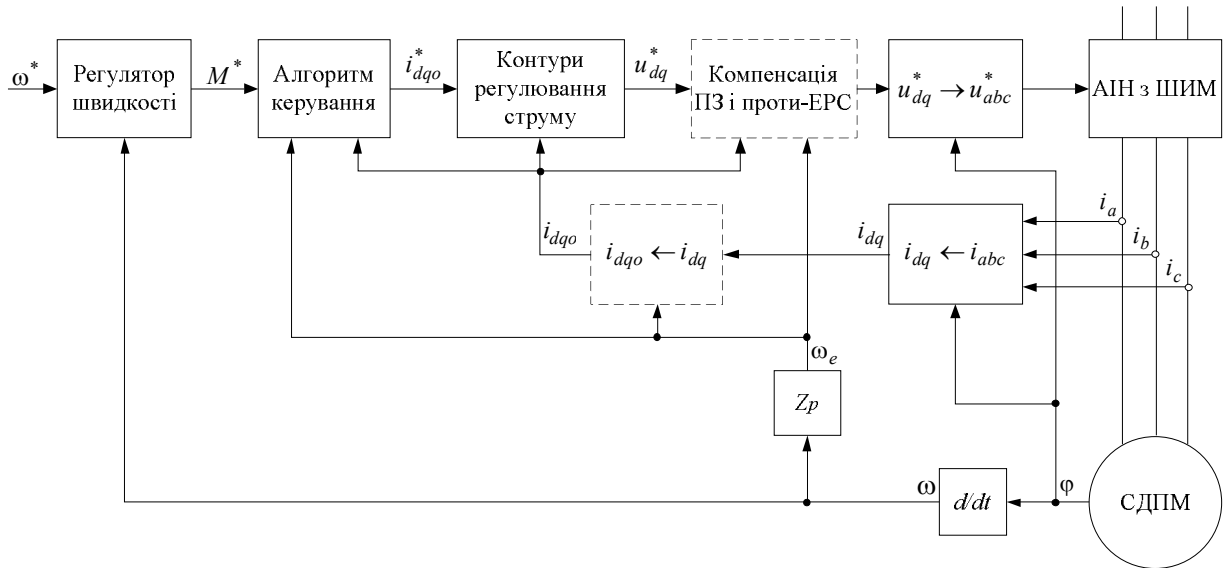


Рисунок 2 – Функціональна схема системи ВК СДПМ при врахуванні втрат у сталі

$$\begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + L_d L_q (\omega_e / R_c)^2} \left( \begin{bmatrix} 1 & L_q \omega_e / R_c \\ -L_d \omega_e / R_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_q \omega_e / R_c \\ 1 \end{bmatrix} \Psi_{pm} \omega_e / R_c \right); \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{do} \\ u_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e L_q (1 + R/R_c) \\ \omega_e L_d (1 + R/R_c) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Psi_{pm} (1 + R/R_c) \end{bmatrix}; \quad (5)$$

де  $u_{do}, u_{qo}$  – виходи відповідних регуляторів струму.

На рис. 3 наведено графіки відпрацювання заданого електромагнітного моменту в класичній і за-

пропонованій системах векторного керування з алгоритмом, що забезпечує підтримку подовжньої складової струму статора на нульовому рівні.

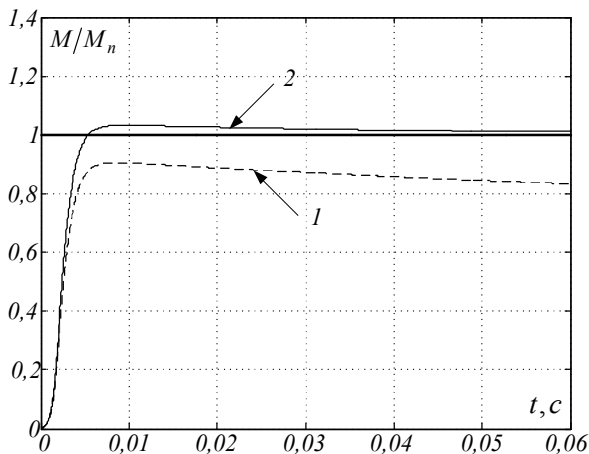


Рисунок 3 – Графіки електромагнітного моменту в системі векторного керування СДПМ:  
1 – класична система; 2 – запропонована система

Як можна побачити з рис. 3, у випадку наявності втрат у сталі в СДПМ і при використанні класичної системи керування присутня суттєва похибка в регулюванні моменту, значення якої збільшується зі зростанням швидкості, що пов'язано зі збільшенням втрат у сталі. У той же час запропонована система забезпечує значно точніше відпрацювання бажаного моменту.

Отже, в системах електроприводу, які вимагають керування моментом або працюють без задатчика інтенсивності (в режимі обмеження моменту), використання запропонованої системи дозволить підвищити точність регулювання моменту або скоротити час розгону та гальмування приводу.

У свою чергу, в разі використання системи регулювання швидкості із задатчиком інтенсивності усталені значення моментів в обох системах будуть

однакові. Однак забезпечення потрібного моменту в класичній системі досягається при підвищеному значенні струму статора, а відтак і при підвищених втратах у двигуні. Результати моделювання показали, що в номінальному режимі застосування запропонованої системи дозволяє знизити сумарні втрати (в сталі та в міді) на 3–5 %. Це можна пояснити тим, що в класичній системі при підтриманні подовжньої складової струму статора на нульовому рівні її частина  $i_{do}$  стає додатною, створюючи реактивний момент, спрямований назустріч моменту, зумовленому постійними магнітами (3). Для компенсації дії від'ємного реактивного моменту в системі зростає складова струму  $i_{qo}$ .

**ВИСНОВКИ.** Використання в системі векторного керування СДПМ внутрішніх контурів регулювання частин складових струмів статора  $i_{do}, i_{qo}$ , що йдуть на створення електромагнітного моменту замість повних складових  $i_d, i_q$ , дозволяє покращити якість регулювання при наявності втрат у сталі двигуна.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Bose, Bimal K. *Modern power electronics and AC drives*. – NJ: Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.
2. Schröder, Dierk. *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*. – Berlin: Heidelberg Springer, 2009. – 1336 p.
3. Толочко О.І., Божко В.В. Уніфікований алгоритм керування синхронними двигунами без електричного збудження // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія „Електротехніка і енергетика”. – 2011. – № 11. – С. 392–395.

#### FEATURES OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR VECTOR CONTROL TAKING INTO ACCOUNT CORE LOSSES

**O. Tolochko, V. Bozhko**

Donetsk National Technical University

vul. Artema, 58, Donetsk, 83001, Ukraine. E-mail: vladbozhko@mail.ru

Permanent magnet synchronous motor vector control system taking into account core losses was proposed. Dependences for calculating the components of the stator currents, which are create electromagnetic torque, were obtained. Dependences for compensating the effect of cross-connections and back-EMF were refined. A comparison of the classical system and the proposed vector control system was made.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor, vector control, core losses, current control loop.

#### REFERENCES

1. Bose, Bimal K. *Modern power electronics and AC drives*. – NJ: Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.
2. Schröder Dierk. *Electric motors – Control of power systems*. – Berlin: Heidelberg Springer, 2009. – 1336 p. [in German]
3. Tolochko O.I., Bozhko V.V. Unified control algorithm of synchronous motors without electrical excitation // *Proceedings of the Donetsk National Technical University. Series "Electrical engineering and energetics"* – 2011. – № 11. – PP. 392–395. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 20.07.2012.

Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Нізімовим В.Б.