

УДК 62-83

О.І. ТОЛОЧКО (д-р техн. наук, проф.), **А.А. БУГРОВИЙ** (магістрант)
 НТУУ «КП», кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
tolochko_oi@mail.ru

КВАЗІОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СТРАТЕГІЇ «МАКСИМАЛЬНИЙ МОМЕНТ НА АМПЕР»

Для синхронних двигунів зі вбудованими у ротор постійними магнітами виконано порівняння енергоефективності застосування стратегій керування «максимальний момент на ампер» та « $i_d = 0$ » при різних значеннях електромагнітного моменту. Виявлено, що при малих моментах ці стратегії дають майже однаковий результат. З урахуванням цього запропоновано спрощений (квазіоптимальний) алгоритм максимізації відношення моменту до струму статора.

Ключові слова: електропривод, синхронний двигун, постійні магніти, оптимальне і квазіоптимальне керування, максимальний момент на ампер, енергоефективність

Постановка проблеми. В даний час все більшого поширення набувають векторно-керовані електроприводи на основі синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ), встановленими на поверхні або в середині ротора. Установка магнітів всередині ротора СДПМ призводить до підвищення його механічної міцності, що дозволяє двигуну працювати на високих швидкостях. В цьому випадку електромагнітна система машини стає асиметричною [1]. Даний ефект призводить до появи реактивної складової електромагнітного моменту. Для таких двигунів розроблено так звані оптимальні стратегії керування, які підвищують енергоефективність систем електроприводу. Однією з оптимальних стратегій є максимізація відношення електромагнітного моменту до струму статора в ustalених режимах (скорочено ММА – максимальний момент на ампер), яка дозволяє двигуну в режимі струмообмеження розвивати максимально можливий момент, або формувати бажану величину моменту при мінімальному струмі статора [2-4]. Це сприяє мінімізації теплових втрат електроенергії. Позитивний ефект досягається за рахунок оптимального розподілу струму статора i_s на поздовжню (i_d) та поперечну (i_q) ортогональні складові. Недоліками використання розглянутої стратегії є складність реалізації оптимального алгоритму в реальному часі. Особливо це стосується систем, в яких завдання на ортогональні складові струму статора формуються у функції електромагнітного моменту двигуна або бажаного закону його зміни.

Аналіз попередніх досліджень. В роботах [5-7] для спрощення реалізації стратегії ММА пропонується замість обчислень за аналітичними виразами використовувати попередньо розраховані табличні залежності між поздовжньою і поперечною складовими струму статора, які потім апроксимуються за допомогою степеневих поліномів. Такий підхід потребує розрахунку великих масивів даних, а система регулювання стає вельми чутливою до зміни параметрів об'єкта [8], що не дає можливості забезпечити бажані результати.

Мета роботи полягає у спрощенні алгоритму керування СДВПМ при використанні стратегії «максимальний момент на ампер».

Матеріали і результати досліджень. Математичний опис СДВПМ в обертовій системі координат $d-q$, що застосовується при синтезі систем векторного керування (СВК) має вигляд [1]:

$$\begin{cases} u_d = i_d R + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q; \\ u_q = i_q R + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + c_e \omega; \\ \omega_e = z_p \omega; \\ M = c_m i_q + k_m (L_d - L_q) i_d i_q; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \end{cases} \quad (1)$$

де u_d, u_q, i_d, i_q – проекції напруги і струму статора на осі d і q ; L_d, L_q – поздовжня і поперечна індуктивності статора; R – активний опір статора; Ω, ω_e – механічна та електрична кутові швидкості ротора; z_p – кількість

©Толочко О.І., Бугровий А.А., 2015

пар полюсів; Ψ_{pm} – потокозчеплення постійних магнітів; J – момент інерції двигуна; M – момент двигуна;

$$c_e = z_p \Psi_{pm}; \quad k_m = \frac{3}{2} z_p; \quad c_m = k_m \Psi_{pm} = \frac{3}{2} z_p \Psi_{pm}.$$

В багатьох джерелах, наприклад [1, 8-12], наведені рівняння, що визначають оптимальне, з точки зору виконання критерію ММА, співвідношення ортогональних складових струму статора та електромагнітного моменту двигуна:

$$i_{do}(i_{qo}) = -\frac{\Psi_{pm}}{2(L_d - L_q)} - \sqrt{\frac{\Psi_{pm}^2}{4(L_d - L_q)^2} + i_{qo}^2}, \quad (2)$$

$$i_{qo}^4 + \frac{M \Psi_{pm}}{k_m(L_d - L_q)} i_{qo} - \left(\frac{M \Psi_{pm}}{k_m(L_d - L_q)} \right)^2 = 0. \quad (3)$$

Отже, для формування складових струму статора у функції моменту необхідно в реальному часі розв'язувати чисельними методами неповне рівняння четвертої степені (3) відносно i_{qo} , а потім обчислювати i_{do} за формулою (2). Щоб спростити алгоритм керування, треба проаналізувати оптимальні траєкторії і порівняти їх за ефективністю з відповідними залежностями, отриманими для типових системами векторного керування (СВК) синхронними двигунами, в яких d -складову струму статора підтримують на нульовому рівні (назвемо цей спосіб керування стратегією « $i_d = 0$ »).

Дослідження виконаємо на прикладі СДВПМ з параметрами $n_n = 4000 \text{ об/хв}$, $M_n = 1.8 \text{ Нм}$, $\Psi_{pm} = 0.0844 \text{ Вб}$, $J = 0.45 \cdot 10^{-3} \text{ кгм}^2$, $z_p = 3$, $R = 2.21 \text{ Ом}$, $L_d = 9.77 \text{ мГн}$, $L_q = 14.94 \text{ мГн}$ у відносних одиницях (в.о.), використовуючи у якості базових величин номінальний момент ($\bar{M} = M / M_n$) та амплітудне значення номінального струму $|i_{sn}| = M_n / c_m$ ($\bar{i} = i / |i_{sn}|$).

Графіки залежностей ортогональних складових і модуля струму статора

$$|i_s| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (4)$$

від електромагнітного моменту при стратегіях ММА та « $i_d = 0$ » подані на рис.1. При $i_d = 0$ модуль струму i_{s0} дорівнює його q -складовій i_{q0} і визначається з рівняння моменту (див. систему (1)) як

$$i_{q0}(M) = |i_{s0}(M)| = M / c_m. \quad (5)$$

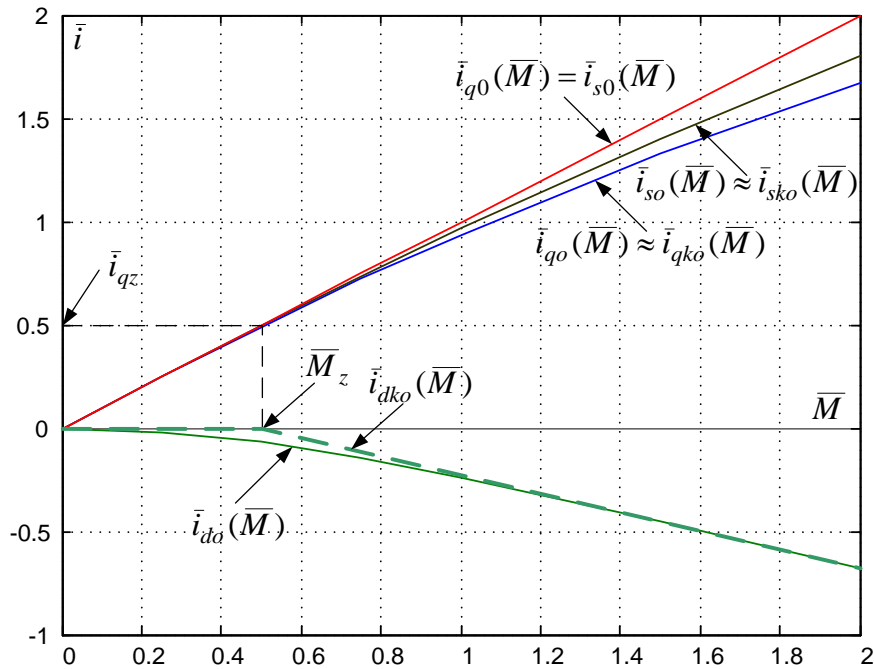


Рисунок 1 – Графіки оптимальних та квазіоптимальних траєкторій у площині \bar{M}, \bar{i}

З рис.1 видно, що ефективність стратегії ММА, порівняно зі стратегією $i_d = 0$, збільшується при зростанні електромагнітного моменту. Для досліджуваного двигуна різниця між порівнюваними стратегіями при $M \leq 0.5M_n$ майже не існує. Тому залежність $i_{do}(M)$ можна замінити спрощеною залежністю типу «зона нечутливості» $i_{dko}(M)$, яку назовемо квазіоптимальною:

$$i_{dko}(M) = \begin{cases} 0 & \text{при } |M| \leq M_z, \\ k_l(M - M_z) & \text{при } M > M_z, \\ k_l(M + M_z) & \text{при } M < -M_z. \end{cases} \quad (6)$$

Така залежність досить просто реалізується на практиці як в аналоговому, так і в цифровому вигляді, і при вдало обраних параметрах практично не знижує показників енергоефективності.

Для обраної у якості спрощеної залежності типової нелінійності треба визначити лише 2 параметри: межу нечутливості M_z і коефіцієнт підсилення лінійної ділянки k_l . Для вибору межі нечутливості треба порівняти графіки $i_{so}(M) = \sqrt{i_{do}^2(M) + i_{qo}^2(M)}$ та $i_{s0}(M) = i_{q0}(M) = M/c_m$ і визначити таке максимально можливе значення моменту M_z , при якому ще виконується умова

$$\frac{i_{so}(M) - i_{s0}(M)}{i_{so}(M)} \leq \varepsilon, \quad (7)$$

де ε – максимально припустиме відносне відхилення квазіоптимального струму від оптимального всередині зони нечутливості. Наприклад, можна покласти $\varepsilon = 0.01$. Для досліджуваного СДВПМ таке відносне відхилення струмів при використанні порівнюваних стратегій досягається при $0 \leq M \leq M_z = 0.5M_n$

Для визначення коефіцієнту підсилення квазіоптимальної залежності $i_{dko}(M)$ на лінійній ділянці достатньо знайти рівняння прямої, що проходить через 2 точки з координатами $[M_z, 0]$ та $[2M_n, i_{do}(2M_n)]$, як це показано на рис.1. У цьому разі

$$k_l = \frac{i_{do}(2M_n)}{2M_n - M_z}. \quad (8)$$

Координати другої точки можна змінювати в залежності від режиму роботи конкретного двигуна і значень електромагнітного моменту, з якими він працює протягом найбільшого часу, але, скоріше за все, в цьому не буде потреби, тому що, як видно з рис.1, отримана квазіоптимальна траєкторія асимптотично наближається до оптимальної.

Після визначення залежності $i_{dko}(M)$ q -складову струму статора можна визначити з рівняння електромагнітного моменту за формулою

$$i_{qko}(M, i_{dko}) = \frac{M}{k_m[\psi_{pm} + (L_d - L_q)i_{dko}]}, \quad (9)$$

що набагато простіше, ніж розв'язувати степеневе рівняння (3) чисельними методами.

Квазіоптимальні траєкторії $i_{qko}(M)$ та $i_{sko}(M)$ практично збігаються з оптимальними $i_{qo}(M)$ та $i_{so}(M)$ відповідно, що свідчить про ефективність запропонованої спрощеної методики оптимізації.

На рис. 2 для порівняння приведені узагальнені структурні схеми формування оптимального (а) та квазіоптимального (б) розподілень ортогональних складових струмів статора у функції моменту, які наочно демонструють переваги квазіоптимального алгоритму з точки зору простоти його реалізації.

В системах регулювання швидкості оптимальне керування за стратегією ММА зазвичай здійснюється у такий спосіб: завдання на q -складову струму статора виробляє регулятор швидкості, а завдання на d -складову – нелінійний функціональний перетворювач (НФП), що здійснює перетворення за формулою (2), якій відповідає оптимальна траєкторія $i_{qo}(i_{do})$, представлена на рис.3. На цьому ж рисунку зображено сімейство гіперболічних

кривих $i_q(i_d)$ рівних моментів, розрахованих за формулою

$$i_q(i_d) = \frac{M}{k_m[\psi_{pm} + (L_d - L_q)i_d]}. \quad (10)$$

Точки P_i перетину цих гіпербол з траєкторією ММА визначають оптимальний розподіл складових струму статора при заданих значеннях моменту. Кола з центрами в початковій точці системи координат, проведені через точки P_i пунктирними лініями, мають радіуси, що дорівнюють сумарним струмам статора i_{so} при оптимальному розподілі їх складових.

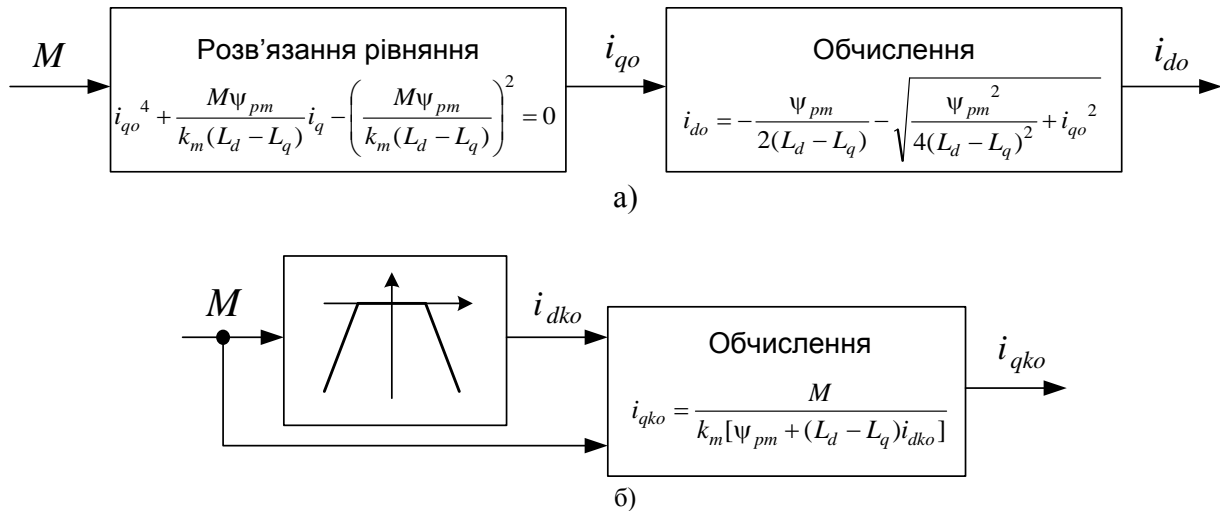


Рисунок 2 – Узагальнені структурні схеми реалізації оптимального (а) та квазіоптимального (б) алгоритму керування СДВПМ за критерієм ММА

З рис.3 видно, що параболічна ММА-траєкторія перетинає гіперболи рівних моментів під кутом 90° , що забезпечує мінімально можливі значення струму статора при заданому моменті. Тому гіперболи рівних моментів знаходяться поза колами рівних струмів, тобто будь-яке сполучення ортогональних складових струмів, відмінне від оптимального, дає збільшення модуля вектора струму.

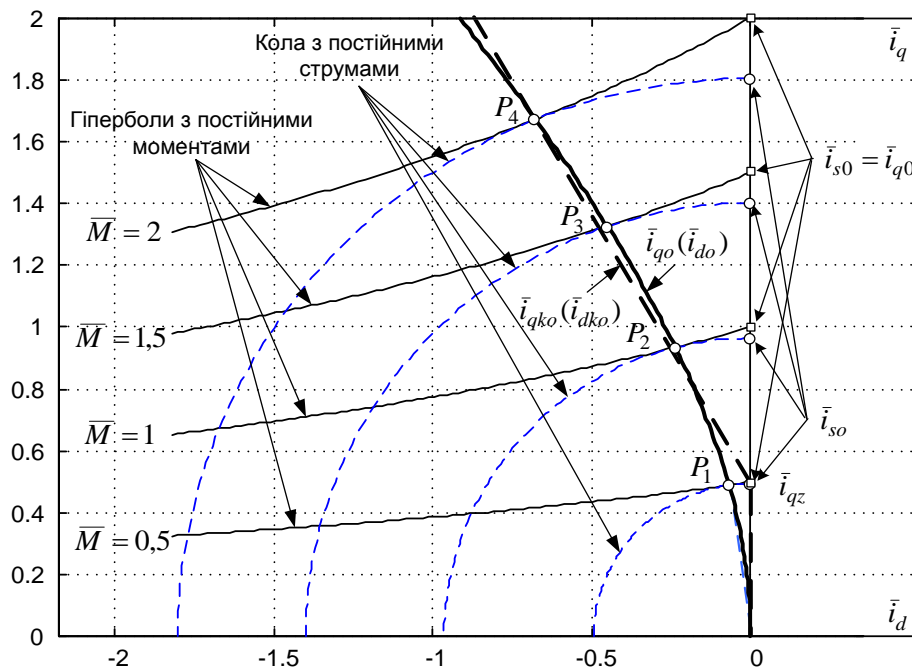


Рисунок 2 – Траєкторії вектору струму статора у площині \bar{i}_d, \bar{i}_q

Для порівняння струмів при використанні досліджуваних стратегій керування треба звернути увагу на точки перетину з віссю \bar{i}_q кіл рівних струмів, що визначають модулі струмів для стратегії ММА, і гіпербол рівних моментів, які визначають модулі струмів для стратегії « $i_d = 0$ ».

З аналізу розташування цих точок випливає, що оптимальну, за стратегією ММА, параболічну траєкторію $i_{do}(i_{qo})$ також, як і траєкторію $i_{do}(M)$ в системі регулювання моменту, можна замінити спрощеною квазіоптимальною нелінійністю типу «зона нечутливості» $i_{dko}(i_{qko})$, яка зображена на рис.3 жирним пунктиром. Межа зони нечутливості за q -складовою струму статора пов'язана з межею зони для моменту співвідношеннями (див. рис.1)

$$i_{qz} = \frac{M_z}{c_m}, \quad \bar{i}_{qz} = \bar{M}_z, \quad (11)$$

а коефіцієнт підсилення лінійної ділянки можна обирати за такою ж методикою, як і для залежності $i_{dco}(M)$, тобто

$$k_{11} = \frac{i_{do}(2M_n)}{i_{qo}(2M_n) - i_{qz}}. \quad (12)$$

З рис.3 видно, що сумарний струм статора при запропонованому квазіоптимальному керуванні майже не буде відрізнятися від його оптимальних значень в широкому діапазоні зміни моменту.

Працездатність запропонованих алгоритмів керування СДВПМ перевірена методом математичного моделювання. Струми статора в усталеному режимі при різних моментах відповідають статичним характеристикам, поданим на рис. 1.

За результатами моделювання треба відзначити підвищені перерегулювання і коливальність перехідних процесів у системі регулювання швидкості, керованій за стратегією ММА, що також потребує уваги при подальших дослідженнях.

Висновки

1. Запропоновані закони квазіоптимального керування за стратегією ММА доцільно застосовувати в системах регулювання моменту та швидкості, як такі, що виключають необхідність розв'язання алгебраїчного рівняння 4-ої степені в реальному часі, використовують тільки елементарні арифметичні та логічні операції і практично не погіршують відношення моменту до струму у порівнянні з оптимальним.

2. Застосування розглянутих оптимальної та квазіоптимальної стратегій керування погіршують якість перехідних процесів систем з регулятором швидкості у порівнянні з типовими системами векторного керування, що потребує уваги при подальших дослідженнях.

3. Для узагальнення отриманих результатів слід перевірити можливість запропонованого спрощення алгоритму оптимального керування СДВПМ для двигунів різної потужності та різного ступеня асиметрії магнітної системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Schröder, Dierk. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Dierk Schröder. – Berlin; Heidelberg : Springer, 2009. – 1336 p.
2. Inoue, Y. Comparative Study of IPMSM Control Strategies for Torque Ripple Reduction / Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada // Power Electronics and Applications. – 2007. – P. 1 - 9.
3. Толочко О.І. Дослідження електроприводів на основі синхронного двигуна з постійними магнітами при оптимальному керуванні за максимумом моменту на ампер / О.І. Толочко, В.В. Божко // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. научн. тр. УкрНИИВЭ. – 2010. – Донецк: ООО «АИР». – С. 242- 247.
4. Vas, Peter. Sensorless Vector and Direct Torque Control / Peter Vas – New York: Oxford University Press Inc, 1998. – 367 p.
5. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока / В.М. Перельмутер. – X. : Основа, 2004. – 210 с.
6. Morimoto, S. Design and control system of permanent magnet synchronous motor for high torque and high efficiency operation / S. Morimoto, Y. Takeda, K. Hatanaka, Y. Tong, T. Hirasu // Industry Applications. – 1991. – Vol. 1. – P. 176 - 181.
7. Krishnan, R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives / R. Krishnan. – CRC Press, 2010. – 564 p.
8. Morimoto, S. High performance servo drive system of salient pole permanent magnet synchronous motor / S. Morimoto, K. Hatanaka, Y. Tong, Y. Takeda,; T. Hirasu // Industry Applications. – 1991. – Vol. 1. – P. 463 - 468.
9. Morimoto, S. Servo Drive System and Control Characteristics of Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motor / Shigeo Morimoto, Keita Hatanaka, Yi Tong, Yoji Takeda, Takao Hirasu // Transactions On Industry Application. – 1993. – Vol. 29, №2. – P. 338 - 343.

REFERENCES

1. Dierk Schröder. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Dierk Schröder. – Berlin; Heidelberg : Springer, 2009. – 1336 p.
2. Inoue, Y. Comparative Study of IPMSM Control Strategies for Torque Ripple Reduction / Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada // Power Electronics and Applications. – 2007. – P. 1 - 9.
3. Tolochko O.I. Doslidzhennya elektropyvodiv na osnovi synkronnoho dyvuhuna z postyynymy mahnitamy pry optymal'nomu keruvanni za maksymumom momentu na amper [Research-based electric synchronous motor with permanent magnets with optimal control for maximum amps at the moment] / O.I. Tolochko, V.V. Bozhko //

Vzrivozashchyschennoe elektrooborudovanye: sb. nauchn. tr. UkrNYYVE. – 2010. – Donetsk: ООО «AYR». – p. 242-247.

4. Vas, Peter. Sensorless Vector and Direct Torque Control / Peter Vas – New York: Oxford University Press Inc, 1998. – 367 p.

5. Perel'muter V.M. Pryamoe upravlenye momentom y tokom dyhateley peremennoho toka [Direct torque control and current AC motors]/ V.M. Perel'muter. – Kh. : Osnova, 2004. – 210 s.

6. Morimoto, S. Design and control system of permanent magnet synchronous motor for high torque and high efficiency operation / S. Morimoto, Y. Takeda, K. Hatanaka, Y. Tong, T. Hirasu // Industry Applications. – 1991. – Vol. 1. – P. 176 - 181.

7. Krishnan, R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives / R. Krishnan. – CRC Press, 2010. – 564 p.

8. Morimoto, S. High performance servo drive system of salient pole permanent magnet synchronous motor / S. Morimoto, K. Hatanaka, Y. Tong, Y. Takeda,; T. Hirasu // Industry Applications. – 1991. – Vol. 1. – P. 463 - 468.

9. Morimoto, S. Servo Drive System and Control Characteristics of Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motor / Shigeo Morimoto, Keita Hatanaka, Yi Tong, Yoji Takeda, Takao Hirasu // Transactions On Industry Application. – 1993. – Vol. 29, №2. – P. 338 - 343.

Надійшла до редколегії 01.12.2015

Рецензент: С.М. Пересада

О.И.ТОЛОЧКО, А.А.БУГРОВОЙ
НТУУ «КПИ»

Квазиоптимальное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами при использовании стратегии «максимальный момент на ампер». Для синхронных двигателей со встроенными в ротор постоянными магнитами выполнено сравнение энергоэффективности применения стратегий управления «максимальный момент на ампер» и « $i_d = 0$ » при различных значениях электромагнитного момента. Обнаружено, что при малых моментах эти стратегии дают почти одинаковый результат. С учетом этого предлагается упрощенный (квазиоптимальный) алгоритм максимизации отношение момента к току статора.

Ключевые слова: *электропривод, синхронный двигатель, постоянные магниты, оптимальное и квазиоптимальное управление, максимальный момент на ампер, энергоэффективность.*

О.І. ТОЛОЧКО, А.А. БУГРОВОІ
НТУУ «КПІ»

Quasi-optimal control of synchronous motor with permanent magnets using a strategy of "maximum torque per ampere" For synchronous motors with built-in permanent magnet rotor was made a comparison control strategy "maximum torque per ampere (MTPA)" and the sample vector control algorithm with maintaining component that generates flux of the stator current at zero (Strategy « $i_d = 0$ »). To study the value of options was compared stator currents in the steady state for different values of the electromagnetic torque. It has been found that the efficiency of optimal control increases with the time and at low points compared strategies provide nearly identical relationship to the current moment. Given these results, as well as the complexity of the implementation of optimal algorithms associated with the necessity of numerical solution of real-time algebraic equation of fourth degree relatively to the stator torque current offers simplified (quasi-optimal) algorithm for maximizing the ratio of torque to the stator current. The nonlinear optimal trajectories in the torque control and speed control systems are replaced by the typical nonlinear trajectories like "dead zone." There was proposed the method of determining boundaries of the insensitivity and the gain of the linear section. With this simplifying in the system of electromagnetic torque control is calculated more easier and does not require the decision of a difficult equation. Performance of the proposed control algorithm of IPMSM tested by simulation. Stator currents in steady state at different moments correspond to the calculated static characteristics.

Keywords: *electric synchronous motor, permanent magnets, a quasi-optimal and optimal control, maximum torque per ampere, energy efficiency.*