

УДК 62 – 83 : 621.313.3

О.В. СТАЦЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

**ПІДВИЩЕННЯ СПІВВІДНОШЕННЯ «МОМЕНТ-СТРУМ» ПРИ
ЧАСТОТНО-СТРУМОВОМУ КЕРУВАННІ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ**

Статтю присвячено вирішенню актуального питання підвищення співвідношення «момент-струм» в системах з частотно-струмовим керуванням. З урахуванням нелінійності характеристики намагнічування отримані аналітичні вирази для регулювання струму статора та абсолютного ковзання при керуванні моментом двигуна по критерію максимуму співвідношення «момент-струм». Визначені переваги запропонованого підходу.

Ключові слова: частотно-струмове керування, асинхронний двигун, максимум співвідношення «момент-струм».

На сьогоднішній день значна частина електроенергії споживається електроприводами змінного струму, найбільш розповсюдженими з яких є асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Для забезпечення енергетичної ефективності технологічних процесів використовують системи автоматизованих електроприводів з цими двигунами та перетворювачами частоти [1]. Залежно від характеристик технологічного процесу для керування двигуном в таких системах використовуються різні підходи. Одним з відомих підходів є керування по критерію максимуму співвідношення «момент-струм» [2], який доцільно реалізовувати в системах з частотно-струмовим керуванням. Тому задача визначення підходів до керування, які підвищують вказане співвідношення є актуальною.

Однією з властивостей систем електропривода з частотно-струмовим керуванням є можливість зміни магнітного потоку двигуна в широких межах. В [3] запропонований підхід до частотно-струмового керування моментом двигуна, при якому обмежується величина струму намагнічування лінійною ділянкою характеристики намагнічування. Але в [4], що регулювання струму намагнічування на нелінійній ділянці характеристики намагнічування дозволяє підвищити співвідношення «момент-струм» в порівнянні з підходами, що обмежують струм намагнічування. При цьому, наведені в [4] результати були отримані шляхом математичного моделювання, що обмежує можливість їх використання.

Об'єкти та методи дослідження

Об'єктом досліджень є процес регулювання моменту асинхронного двигуна в системі з частотно-струмовим керуванням по критерію максимуму співвідношення «момент-струм». При вирішенні задач досліджень використовувалися методи теорії електричних машин, теорії електроприводу, а також методи математичного моделювання.

Постановка завдання

Основним завданням досліджень є визначення аналітичних виразів, відповідно до яких слід змінювати величину струму та його абсолютне ковзання, для забезпечення роботи асинхронного двигуна по критерію максимуму співвідношення «момент-струм».

Результати та їх обговорення

Для вирішення поставленого завдання необхідно визначити залежність електромагнітного моменту від вхідних змінних. Відповідно до [5] електромагнітний момент пропорційний векторному добутку потокозчеплення ротора на струм ротора. Якщо проігнорувати вплив магнітних потоків розсіювання ротора, а відповідно і індуктивності розсіювання ротора можна записати:

$$M \approx \frac{3 \cdot p}{2} \Psi_M \cdot I_R, \quad (1)$$

де M – електромагнітний момент; Ψ_M – потокозчеплення намагнічування; I_R – струм ротора; p – кількість пар полюсів.

З урахуванням зробленого припущення, і виходячи з Т-подібної схеми заміщення фази асинхронного двигуна [6], можна записати вираз для струму ротора, як функцію від струму статора I_S і струму намагнічування I_M :

$$I_R = \sqrt{I_S^2 - I_M^2}. \quad (2)$$

Для визначення аналітичної залежності потокозчеплення намагнічування від струму намагнічування скористаємось експериментально знятою характеристикою холостого ходу (рис.1).

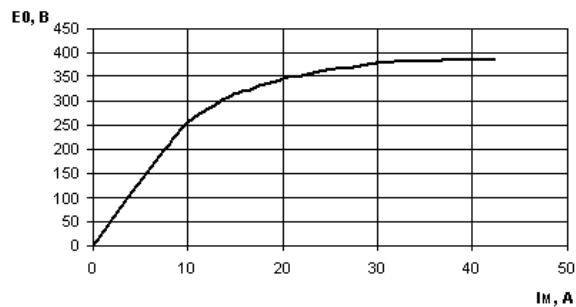


Рис.1. Залежність ЕРС взаємодуції від струму намагнічування

Ця характеристика має лінійну та нелінійну ділянку, причому нелінійна може бути описана у вигляді:

$$E_0 = \omega_S \cdot \left(k_\Psi - \frac{a_\Psi}{I_M} \right), \text{ відповідно } \Psi_M = k_\Psi - \frac{a_\Psi}{I_M}, \quad (3)$$

де k_Ψ , a_Ψ – параметри апроксимованої нелінійної характеристики намагнічування; ω_S – частота струму статора.

Тоді вираз електромагнітного моменту (1) матиме вигляд:

$$M \approx \frac{3 \cdot p}{2} \cdot \left(k_\Psi - \frac{a_\Psi}{I_M} \right) \cdot \sqrt{I_S^2 - I_M^2}. \quad (4)$$

Для визначення того, при якому значенні струму намагнічування електромагнітний момент буде максимальним, необхідно продиференціювати отриманий вираз по струму намагнічування:

$$\frac{dM}{dI_M} = \frac{3 \cdot p}{2} \cdot \frac{a_\Psi \cdot I_S^2 - k_\Psi \cdot I_M^3}{I_M^2 \cdot \sqrt{I_S^2 - I_M^2}}. \quad (5)$$

Якщо прирівняти отриманий вираз до нуля, то можна визначити залежність струму намагнічування від струму статора, при якому електромагнітний момент буде максимальним. Вирішення такого рівняння при не нульових значеннях параметрів має три корені, один з яких є дійсним. Відповідно шукана залежність струму намагнічування від струму статора матиме вид:

$$I_M = \sqrt[3]{I_S^2 \cdot \frac{a_\Psi}{k_\Psi}}. \quad (6)$$

Виходячи з отриманої залежності, можна зробити висновок про те, що для забезпечення максимуму електромагнітного моменту для заданого струму статора, струм намагнічування має бути

пропорційний кореню кубічному з квадрата струму статора. При підстановці цього виразу в (4) можна отримати залежність електромагнітного моменту від струму статора:

$$M = \frac{3 \cdot p}{2} \cdot k_{\Psi} \cdot \sqrt{\left(I_S^{\frac{2}{3}} - \left(\frac{a_{\Psi}}{k_{\Psi}} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^3} \quad (7)$$

Для регулювання моменту необхідно визначити функції, відповідно до яких слід змінювати струм статора і абсолютне ковзання залежно від сигналу завдання моменту M^* . Вираз для регулювання струму статора можна отримати з (7) як обернену функцію:

$$I_S = \sqrt{\left(\left(\frac{2 \cdot M^*}{3 \cdot p \cdot k_{\Psi}} \right)^{\frac{2}{3}} + \left(\frac{a_{\Psi}}{k_{\Psi}} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^3} \quad (8)$$

Для визначення функції регулювання абсолютного ковзання скористаємося Т-подібною схемою заміщення. З урахуванням прийнятих припущень про відсутність впливу індуктивності розсіювання роторного кола, напруги в колі намагнічування та колі ротора будуть однаковими. Відповідно можна записати:

$$I_R \cdot \frac{R_r}{s} = \omega_s \cdot \Psi_M, \quad (9)$$

де R_r – активний опір обмотки ротора; s – ковзання.

Враховуючи те, що ковзання дорівнює відношенню абсолютного ковзання до частоти струму, з виразу (9) можна отримати шукану функцію. Для цього слід замінити: струм ротора відповідно до (2), потокозчеплення намагнічування відповідно до (3) і підставити струм намагнічування, при якому досягається максимум електромагнітного моменту (6):

$$\Delta s = \frac{R_r}{k_{\Psi}} \cdot I_S \cdot \sqrt{\frac{I_S^{\frac{2}{3}}}{I_S^{\frac{2}{3}} - \left(\frac{a_{\Psi}}{k_{\Psi}} \right)^{\frac{2}{3}}}} \quad (10)$$

Для компенсації прийнятих допусків, пов'язаних з відсутністю врахування індуктивності розсіювання ротора, в отриманих виразах (8,10) слід використовувати параметри інверсної Г-подібної схеми заміщення. Для цього коефіцієнти k_{Ψ} і a_{Ψ} необхідно помножити на відношення довідникових значень індуктивності намагнічування до повної індуктивності ротора, а опір ротора необхідно помножити на квадрат цього відношення.

Скориставшись виразом (10) розрахуємо залежність абсолютного ковзання від струму статора для двигуна 4A160M4У3 [8]. Розрахунок будемо проводити в діапазоні струмів від 10 А до 50 А, який відповідає роботі двигуна на нелінійній ділянці характеристики намагнічування (рис. 2).

Порівнявши дану залежність з результатами математичного моделювання, виконаними в [4] для того самого двигуна, можна побачити що вони практично повністю співпадають, що підтверджує коректність отриманих результатів.

Для аналізу ефективності використання отриманих залежностей при керуванні моментом двигуна виконаємо порівняльний аналіз запропонованого підходу з регулюванням, при якому струм

намагнічування підтримується на номінальному рівні, що є характерним для векторного керування з орієнтацією по полю. Для виконання аналізу розрахуємо залежність струму статора від сигналу завдання електромагнітного моменту при використанні вказаних підходів. Враховуючи те, що одержані залежності справедливі лише при роботі двигуна на нелінійній ділянці характеристики намагнічування. Для малих значень завдання моменту, коли регулювання струму намагнічування здійснюється на лінійній ділянці характеристики, використаємо підхід описаний в [3]. Відповідно до нього при малих значеннях моменту струм статора слід змінювати пропорційно кореню квадратному з сигналу моменту, а абсолютно ковзання підтримувати сталим та рівним критичному.

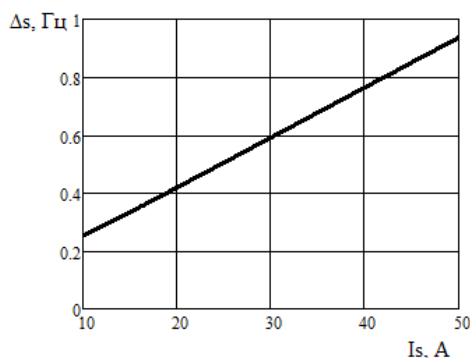


Рис. 2. Залежність абсолютного ковзання від струму статора при забезпеченні максимуму моменту

Розрахунок будемо проводити для двигуна 4A160M4У3 при завданні моменту від нульової величини до номінальної. Результати розрахунку приведені на рис.3, суцільною лінією показана залежність, розрахована відповідно до запропонованого підходу, а пунктиром – при стабілізації струму намагнічування на рівні 11,5 А.

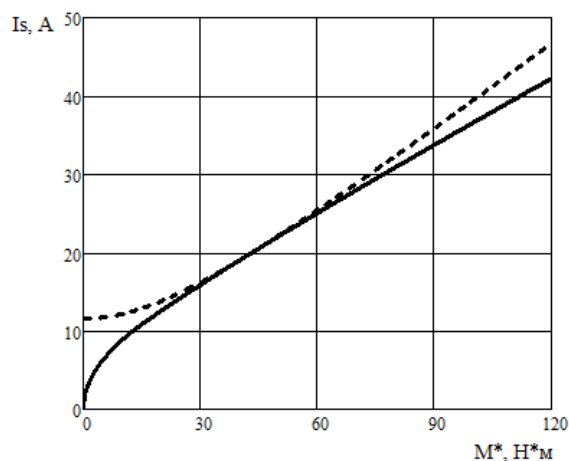


Рис. 3. Залежності струму статора від моменту за наявності (показано пунктиром) і відсутності (показано суцільною лінією) стабілізації струму намагнічування

Як видно з приведених графіків регулювання струму намагнічування дозволяє підвищити співвідношення «момент-струм». При малих значеннях моменту використання підходу, описаного в [3], забезпечує мінімальну величину струму, у той час, яка вимушена стабілізація струму намагнічування призводить до суттєвого збільшення струму статора. При середніх значеннях моменту струм статора в обох випадках однаковий, що обумовлено рівністю струмів намагнічування. А при більших значеннях моменту врахування нелінійності характеристики намагнічування дозволяє знизити струм статора, а

відповідно підвищити співвідношення «момент-струм» (при номінальному моменту підвищення співвідношення складає 10,7%). Проте в загальному випадку підвищення вказаного співвідношення може бути іншим, оскільки воно залежить від конкретної характеристики намагнічування двигуна.

Висновки

В результаті виконаних досліджень визначені залежності, використання яких для частотно-струмового керування моментом асинхронного двигуна дозволяє підвищити співвідношення «момент-струм» за рахунок врахування нелінійної частини характеристики намагнічування. Подальші дослідження доцільно спрямувати на визначення енергетичної ефективності запропонованого в статті підходу до керування.

Список використаної літератури

1. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов – М.: Изд. центр «Академия», 2007. – 576с.
2. A maximum torque per ampere control strategy for induction motor drives / O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, K.A. Corzine // IEEE Transactions on energy conversion. – 1998. – Vol. 13, № 2. – P. 163-169.
3. Стаценко А.В. Регулирование момента асинхронного двигателя при частотно-токовом управлении // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2011. – Вип. 6/2011 (71). – Ч.1. – С. 20-25.
4. Мазуренко Л.И., Стаценко А.В. Учет насыщения магнитной системы асинхронного двигателя и его влияние на процесс разгона // Вісник КДПУ. – 2007. – Вип. 3/2007 (44). – Ч.2. – С. 57-61.
5. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока [пер. с немецкого Дартау А.А., Щедрович В.А.]; под ред. А.И. Вольдека – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / Копылов И.П. – [2-е изд.]. – М.: Высшая школа, 1994. – 318 с.
7. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

Стаття надійшла до редакції / Article received: 20.08.2013

Повышение соотношения «момент-ток» при частотно-токовом управлении асинхронным двигателем

Стаценко А.В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Статья посвящена решению актуального вопроса повышения соотношения «момент-ток» в системах с частотно-токовым управлением. С учетом нелинейности характеристики намагничивания получены аналитические выражения для регулирования тока статора и абсолютного скольжения при управлении моментом двигателя по критерию максимума соотношения «момент-ток». Определены преимущества предложенного подхода.

Ключевые слова: частотно-токовое управление, асинхронный двигатель, максимум соотношения «момент-ток».

The increasing of «torque-current» ratio with the frequency-current induction motor control

Statsenko A.

Kyiv national university of technologies and design

This article is devoted to solving the urgent problem increasing of «torque-current» ratio in systems with frequency-current control. Taking into account non-linearity of magnetization characteristic the analytical expressions for the stator current and absolute slip regulation under maximum «torque-current» ratio motor control were defined. The advantages of the proposed approach were identified.

Key words: frequency-current control, induction motor, maximum «torque-current» ratio.