

О.І. Толочко, В.В. Божко

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НА ОСНОВІ
СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ПРИ
ОПТИМАЛЬНОМУ КЕРУВАННІ ЗА МАКСИМУМОМ МОМЕНТУ
НА АМПЕР**

Постановка проблеми. В останні роки виявляється великий інтерес до електроприводів на основі двигунів з постійними магнітами. Останні отримали значний поштовх в розвитку завдяки появі рідкоземельних матеріалів, які використовуються як постійні магніти. В порівнянні з асинхронними і двигунами постійного струму двигуни з постійними магнітами мають ряд переваг, а саме: висока щільність потоку в повітряному зазорі, високе відношення потужність/вага, велике співвідношення момент/інерція, малий рівень пульсацій моменту в усьому діапазоні регулювання швидкості, висока точність позиціонування, можливість керування моментом при нульовій швидкості, висока перевантажувальна здатність за моментом, високий ККД і коефіцієнт потужності, низькі масогабаритні показники. Серед двигунів з постійними магнітами виділяють два основні типи: BLDC (англ. BrushLess Direct Current) – безщіткові двигуни постійного струму, які характеризуються трапецеїдальним розподілом потоку і PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) – синхронні двигуни з постійними магнітами, які характеризуються синусоїдальним потоком в повітряному зазорі [1].

Залежно від розташування магнітів на роторі PMSM можна розділити на декілька видів, серед яких слід виділити два: SPMSM (Surface PMSM) – магніти розташовані на поверхні ротора і IPMSM (Interior PMSM) – магніти поглиблені в ротор. При установці магнітів на поверхні ротора збільшується повітряний зазор і зменшується вплив електричної асиметрії ротора (тобто індуктивності за подовжньою і поперечною осями приблизно однакові), зменшується реакція якоря і стала часу статора. Поглиблення магнітів в ротор призводить до підвищення механічної міцності ротора, що дозволяє працювати на високих швидкостях. Проте при цьому, внаслідок нерівномірності повітряного зазору, виникає електромагнітна асиметрія (тобто індуктивності за подовжньою і поперечною осями стають різними). Ця асиметрія призводить до появи разом з основною складовою моменту (результат взаємодії поперечної складової струму статора і потоку постійних магнітів) додаткової реактивної складової, за рахунок використання якої можна отримати більше відношення потужність/вага чим у SPMSM.

В результаті особливостей конструкції SPMSM і IPMSM системи управління цими двигунами мають відмінності. Для отримання високих динамічних і статичних характеристик найчастіше використовується система векторного керування з орієнтацією системи координат за вектором потоку ротора. Причому для SPMSM стратегія керування полягає в підтримці подовжньої складової струму рівною нулю. Для IPMSM внаслідок можливості використання реактивного моменту можуть бути використані різні стратегії керування. У загальному випадку при роботі двигуна можливі три зони регулювання швидкості. У першій зоні (з регулюванням швидкості без псевдопослаблення потоку), в якій діє обмеження тільки на максимальний струм, а напруга не досягає максимального рівня, зазвичай використовують закон керування МТРА (Maximum Torque Per Ampere) – максимальний момент на ампер. При збільшенні швидкості привод переходить в другу зону, де необхідно обмежувати як струм, так і напругу. В цій зоні найчастіше використовують мінімізацію загальних втрат: LM (Loss Minimization) – мінімізація втрат. В деяких випадках можливе подальше збільшення швидкості з переходом у третю зону, в якій напруга утримується на рівні обмеження, а струм не досягає максимально-припустимого значення. В цьому випадку раціонально використовувати закон керування МТРВ (Maximum Torque Per Volt) – максимальний момент на вольт [2].

Аналіз досліджень і публікацій. У літературі можна знайти різні реалізації оптимальних алгоритмів керування IPMSM [2-4]. Проте в більшості першоджерел показані лише функціональні схеми пропонованих систем або аналітичні вирази, що відбивають бажані взаємозв'язки основних сигналів електроприводу, і не показаний вплив пропонованих стратегій керування на якість перехідних процесів.

Мета статті. Дослідження впливу способів реалізації стратегій керування МТРА на динамічні характеристики системи електроприводу на основі IPMSM.

Результати досліджень. Математичний опис IPMSM в системі координат, орієнтованій за вектором потоку ротора, має вигляд:

$$\begin{cases} U_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p_p \omega_m i_q L_q; \\ U_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p_p \omega_m i_d L_d + \psi_{pm} p_p \omega_m; \\ T_e = \frac{3}{2} p_p \left(\psi_{pm} + L_d - L_q \right) \vec{i}_d \vec{i}_q; \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_l, \end{cases} \quad (1)$$

де U_d, U_q – проекції напруги статора на осі d і q ; R – активний опір фази статора; L_d, L_q – індуктивності фаз статора за подовжньою і поперечною осями; i_d, i_q – проекції струму статора на осі d і q ; p_p – кількість пар полюсів; ω_m – кутова частота ротора; Ψ_{pm} – магнітний потік, який створюється постійними магнітами; T_e, T_l – електромагнітний момент двигуна и момент статичного навантаження; J – сумарний момент інерції двигуна и механізму.

Стратегія керування МТРА застосовується при роботі нижче основної швидкості і дозволяє забезпечити максимальний момент при заданому струмі або отримати заданий момент при мінімальному струмі. Цей закон керування також мінімізує втрати в міді, які пропорційні квадрату повного струму статора. Для його реалізації необхідно виконати максимізацію виразу $T_e \angle i_d, i_q$ за умови постійної амплітуди вектора струму статора $I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$.

У [2] доведено, що максимум $T_e \angle i_d, i_q$ при заданому I або мінімум $I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ при заданому T_e досягається при виконанні залежності

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

або залежності кута між амплітудою вектора струму I і складовою струму i_q , що впливає з (2):

$$\beta = \arcsin \left(\frac{\Psi_{pm} - \sqrt{\Psi_{pm}^2 + 8(L_d - L_q)^2 I^2}}{4(L_d - L_q)I} \right). \quad (3)$$

Виходячи з отриманих співвідношень, мінімальний струм для отримання заданого моменту може бути сформований зі складових струму статора в системі координат d, q , або з амплітуди вектора повного струму I та кута β . Слід відзначити, що другий варіант більш складний в реалізації.

У разі завдання струму в системі координат d, q , складова i_d розраховується за формулою (2) на основі значення i_q , яке, в свою чергу, може бути прийняте пропорційним заданому моменту чи знайдене як рішення рівняння $i_q = f(T_e)$, одержаного шляхом підстановки (2) в формулу моменту (третє рівняння системи (1)). Після математичних перетворень отримаємо:

$$i_q^4 + \frac{2T_e \Psi_{pm}}{3(L_d - L_q)^2 p_p} i_q - \frac{(2T_e)^2}{9(L_d - L_q)^2 p_p^2} = 0. \quad (4)$$

Рішення цього рівняння вимагає збільшення обчислювальних витрат, тому багато авторів пропонують реалізовувати залежності $i_q = f(T_e)$ і $i_d = f(T_e)$ в табличному виді за заздалегідь розрахованими даними або апроксимувати табличну функцію ступеневими поліномами.

Для дослідження перехідних режимів розроблена математична модель системи електроприводу на основі математичного опису (1) в пакеті Matlab. В результаті моделювання отримані перехідні процеси, приведені на рис. 1-3.

Перехідні процеси отримані для наступних режимів: розгін вхолосту з номінальним динамічним моментом і накид навантаження (половина номінального).

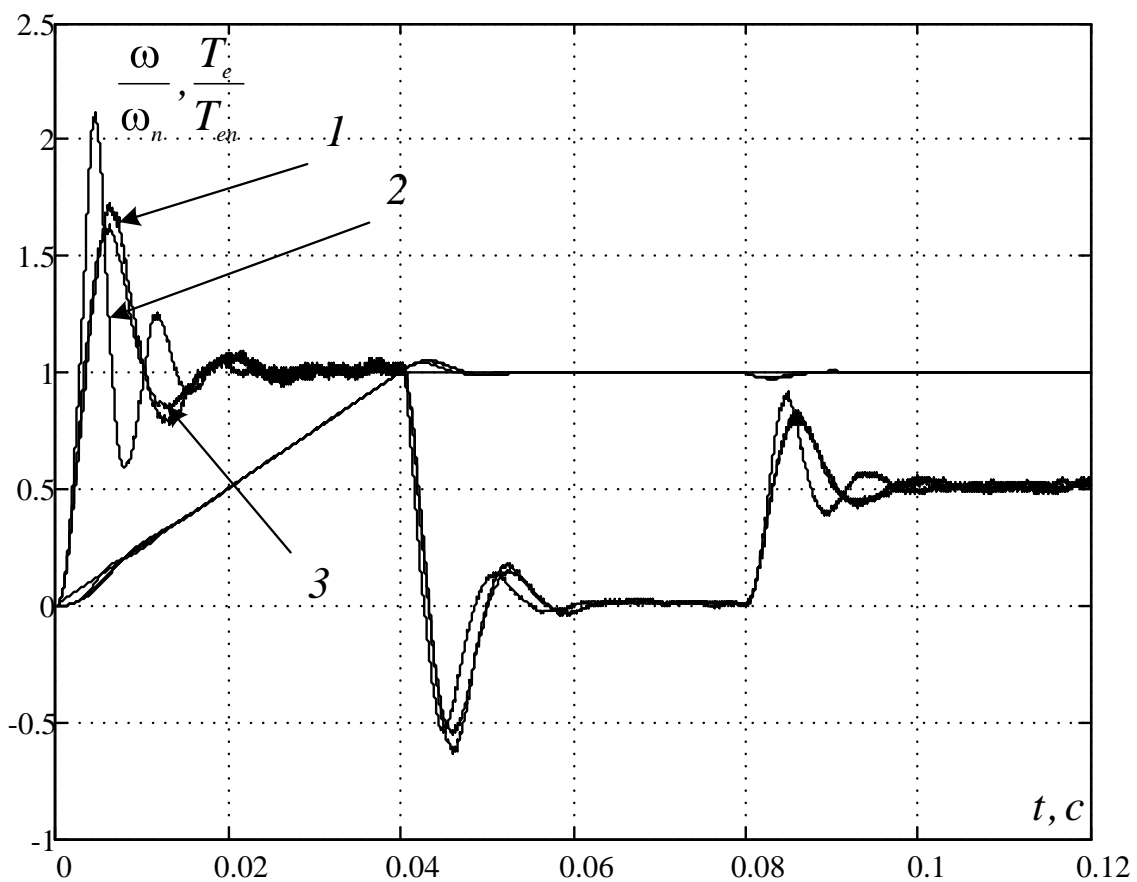


Рисунок 1 – Відносна кутова швидкість ротора і момент двигуна:

- 1) закон керування $i_d = 0$;
- 2) закон керування МТРА (обчислення тільки i_d);
- 3) закон керування МТРА (обчислення i_d та i_q).

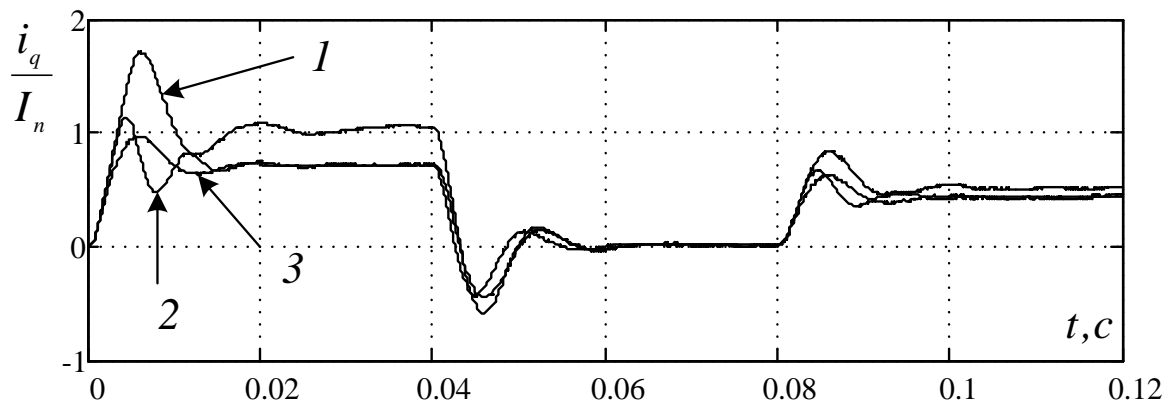
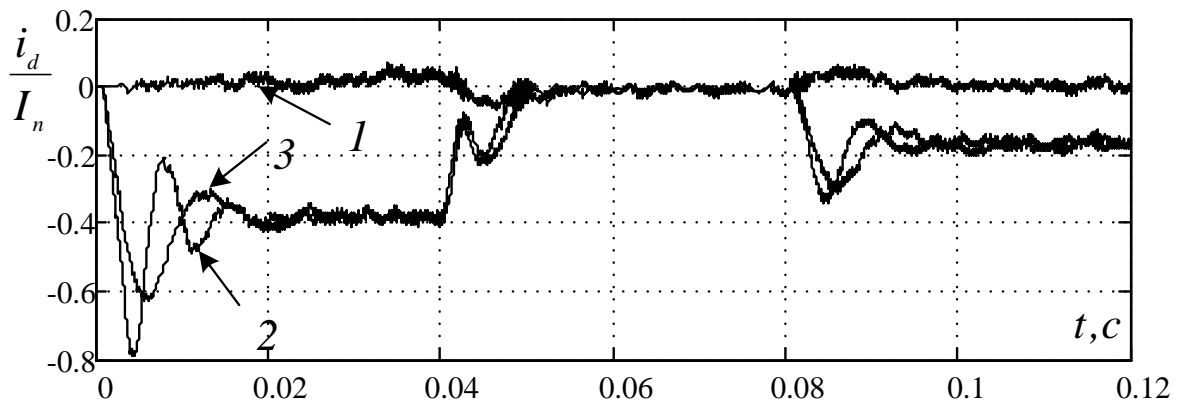


Рисунок 2 – Відносні подовжня і поперечна складові струму статора

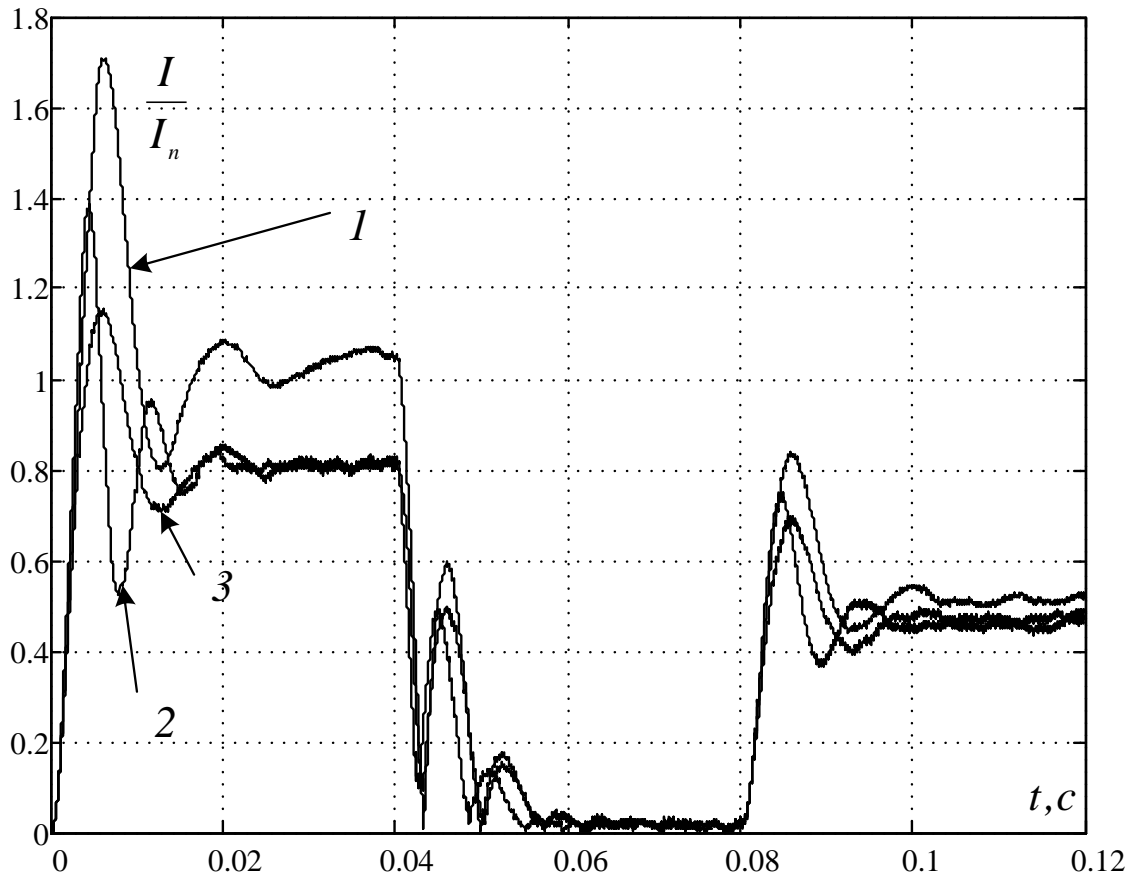


Рисунок 3 - Відносне амплітудне значення струму статора

З приведених перехідних процесів видно, що використання закону керування МТРА дозволяє отримати бажаний момент при меншому струмі, за рахунок регулювання складової i_d у від'ємному напрямку. Таким чином, для регулювання швидкості нижче за основну для IPMSM раціонально використовувати стратегію керування МТРА. Причому вигаш за струмом тим більше, чим більше момент, який розвиває двигун.

Слід зазначити, що сталі амплітудні значення вектора струму статора для закону керування МТРА однаково, незалежно від того, обчислюється складова струму i_q чи ні. Однак при розрахунку тільки i_d з ростом моменту двигуна перехідні процеси стають більш коливальними.

Висновки:

1. Досліджені різні способи реалізації стратегії керування МТРА і показана ефективність застосування цього закону керування IPMSM при швидкості нижче за основну з моментом двигуна близьким до номінального.

2. Встановлено, що при моменті двигуна близькому до номінального, у разі застосування закону керування МТРА доцільно розраховувати завдання на поперечну складову струму статора у функції заданого моменту.

3. До подальших напрямів досліджень слід віднести дослідження роботи приводу в другому і третьому діапазонах регулювання швидкості і використання стратегій керування LM і МТРV.

Список літератури

1. Jacek F. Giera. Permanent magnet motor technology / Jacek F. Giera, Mitchell Wing. – New York: Marcel Dekker, Inc., 2002. – 611 p.

2. Dierk Schröder. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Dierk Schröder. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2009. – 1336 p.

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

4. Krishnan R. Electric motor drives: Modeling, Analysis, and Control / R.Krishnan. – New Jersey: Prentice Hall, 2001. – 652 p.