

МЕТОД КОНТРОЛЮ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

Запропоновано метод контролю режимів роботи синхронного двигуна з урахуванням нестабільності напруг його живлення та активних і реактивних опорів обмоток. Передбачається вимірювання миттєвих напруг, струмів та температури обмотки статора і швидкості двигуна.

Предложен метод контроля режимов работы синхронного двигателя с учетом нестабильности напряжений его питания, активных и реактивных сопротивлений обмоток. Предусматривается измерение мгновенных напряжений, токов и температуры обмотки статора, а также скорости двигателя.

Synchronous motor operation mode definition method with regard to the non-stability of supplied voltage, active and reactive winding resistances is proposed. Stator winding voltages, currents, temperature and motor speed are measured.

Вступ. Однією із важливих проблем синхронних приводів потужних барабанних млинів ГЗК є забезпечення успішного запуску в несприятливих умовах. Традиційно проблему вирішують за рахунок завищеної потужності двигунів та попереднього розвантаження барабанів. Для покращання ситуації пропонуються різні методи забезпечення надійного запуску та синхронізації двигунів з важкими умовами пуску. Використання методів націлене на підвищення середньої складової електромагнітного моменту чи зменшення періодичної із збереженням надійності запуску практично без запасу встановленої потужності приводу [1,2]. При цьому виникає проблема неперервного контролю поточних кутового положення ротора та електромагнітного моменту в пускових та сталих режимах приводу.

Мета роботи. Обґрунтування методу адаптивного контролю динамічних параметрів синхронного двигуна в пускових та сталих режимах роботи.

Матеріали та результати досліджень.

В основу досліджень покладена система рівнянь Парка-Горєва, можливості контролю фактичних струмів та напруг живлення статора двигуна і швидкості його обертання. Враховано, що електромагнітний момент двигуна для системи координат d, q визначається як [3]

$$M = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d, \text{ в.о.}$$

Вирази для проекцій потокозчеплення статора у відносних одиницях за позовжною d та поперечною q осями мають вигляд диференціальних рівнянь

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = u_d + \Psi_q \omega - r_a i_d; \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = u_q - \Psi_d \omega - r_a i_q. \quad (2)$$

Проекції узагальнених векторів напруги u_d, u_q та струму i_d, i_q можливо виразити через їх амплітуди та просторове положення.

Проекції узагальненого вектора струму визначаються його просторовим положенням α_i та додатним напрямом γ поздовжньої вісі d (рис. 1).

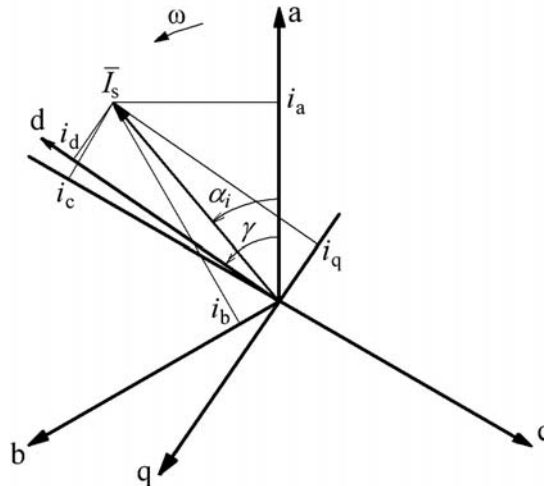


Рис. 1. Узагальнений вектор струму в осях d, q

Проекції узагальненого вектора струму за поздовжньою та поперечною осями [4]:

$$i_d = I_m \cos(\gamma - \alpha_i);$$

$$i_q = -I_m \sin(\gamma - \alpha_i).$$

Поточна амплітуда узагальненого вектора струму контролюється вимірюванням миттєвих фазних струмів обмотки статора. При визначенні проекцій узагальненого вектора на нерухомі, жорстко зв'язані зі статором, координатні вісі α, β враховуємо, що вісь α суміщається з віссю фази a статора, а вісь β випереджає її на кут $\pi/2$ як показано на рис. 2.

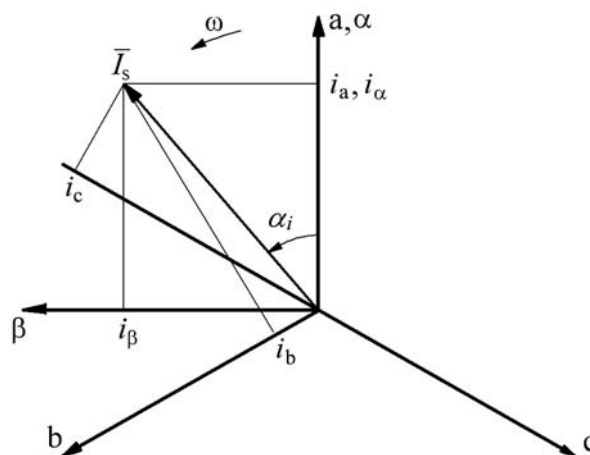


Рис. 2. Узагальнений вектор струму в осях α, β

Співвідношення між миттєвими струмами у фазовій системі координат та осях α, β з урахуванням зменшення проєкцій у 1,5 визначаються як [3]

$$i_{\alpha} = \frac{2}{3} \left[i_a - \frac{1}{2} (i_b + i_c) \right];$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_b - i_c).$$

Амплітуда узагальненого вектора струму

$$I_m = \sqrt{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2}.$$

Проекції узагальненого вектора напруги визначаються його просторовим положенням α_u та додатним напрямом γ поздовжньої вісі d ротора (рис. 3):

$$u_d = U_m \cos(\gamma - \alpha_u);$$

$$u_q = -U_m \sin(\gamma - \alpha_u).$$

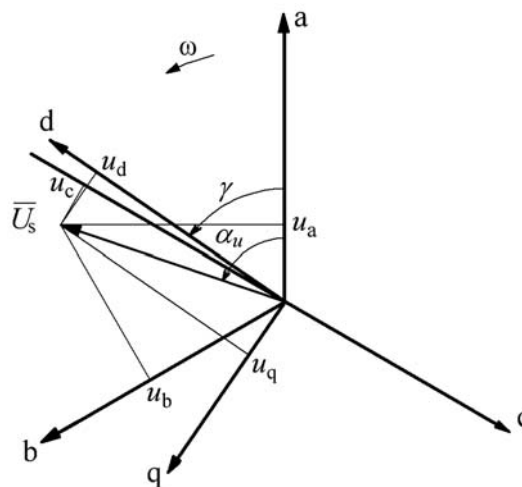


Рис. 3. Узагальнений вектор напруги в осях d, q

Поточна амплітуда узагальненого вектора напруги контролюється за допомогою вимірювання миттєвих лінійних напруг статора. Проекції миттєвих фазних напруг на вісі α, β визначаються подібно до проєкцій струмів згідно побудовань на рис. 4.

Отже, маємо вирази вигляду

$$u_{\alpha} = \frac{2}{3} \left[u_a - \frac{1}{2} (u_b + u_c) \right];$$

$$u_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_b - u_c).$$

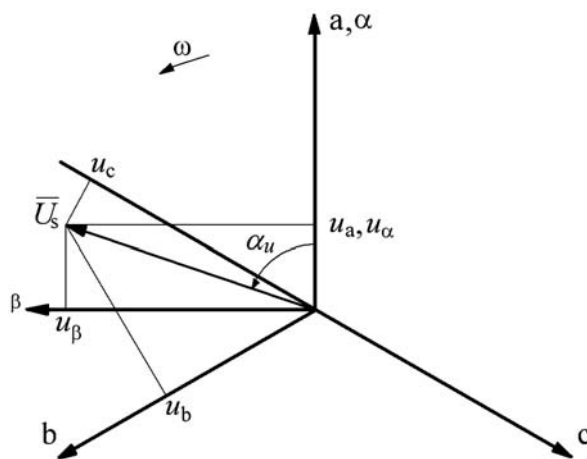


Рис. 4. Узагальнений вектор напруги в осях α, β

Оскільки миттєві лінійні напруги статора виражаються через фазні як

$$u_{ab} = u_a - u_b;$$

$$u_{bc} = u_b - u_c;$$

$$u_{ca} = u_c - u_a,$$

то

$$u_\alpha = \frac{2}{3} \left(\frac{u_{ab} - u_{ca}}{2} \right);$$

$$u_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_{bc}).$$

Амплітуда узагальненого вектора напруги

$$U_m = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}.$$

За проєкціями узагальнених векторів напруги та струму на вісі α, β визначаємо просторове положення цих векторів за виразами

$$\alpha_u = \arctg \frac{u_\beta}{u_\alpha}; \quad (3)$$

$$\alpha_i = \arctg \frac{i_\beta}{i_\alpha}.$$

Просторове положення додатного напрямку γ поздовжньої вісі d ротора визначається швидкістю обертання ротора та його початковим положенням як

$$\gamma = \int \omega \cdot dt + \gamma_0.$$

Для знаходження початкового значення γ можливо скористатися методом подачі до обмотки збудження змінної напруги при нерухомому роторі за розімкненої обмотки статора. Оскільки обмотка збудження однофазна, то при протіканні по ній змінного струму виникає пульсуюче магнітне поле, напрям якого

співпадає із віссю d ротора. Це магнітне поле зумовлює пульсуючу ЕРС в обмотці статора E_s , яка відстає від магнітного потоку на кут $\pi/2$ (рис. 5а).

Для знаходження напрямку пульсуючої ЕРС статора E_s необхідно на затискачах обмотки статора виміряти миттєві лінійні напруги та за виразом (3) знайти напрям їх узагальненого вектора, який відповідає напрямку ЕРС E_s . Слід врахувати, що наведена ЕРС відстає від магнітного потоку обмотки збудження Φ_f на кут $\pi/2$, а також те, що при від'ємному напрямі струму в обмотці збудження напрям магнітного потоку буде протилежним додатному напрямку поздовжньої вісі d (рис. 5б).

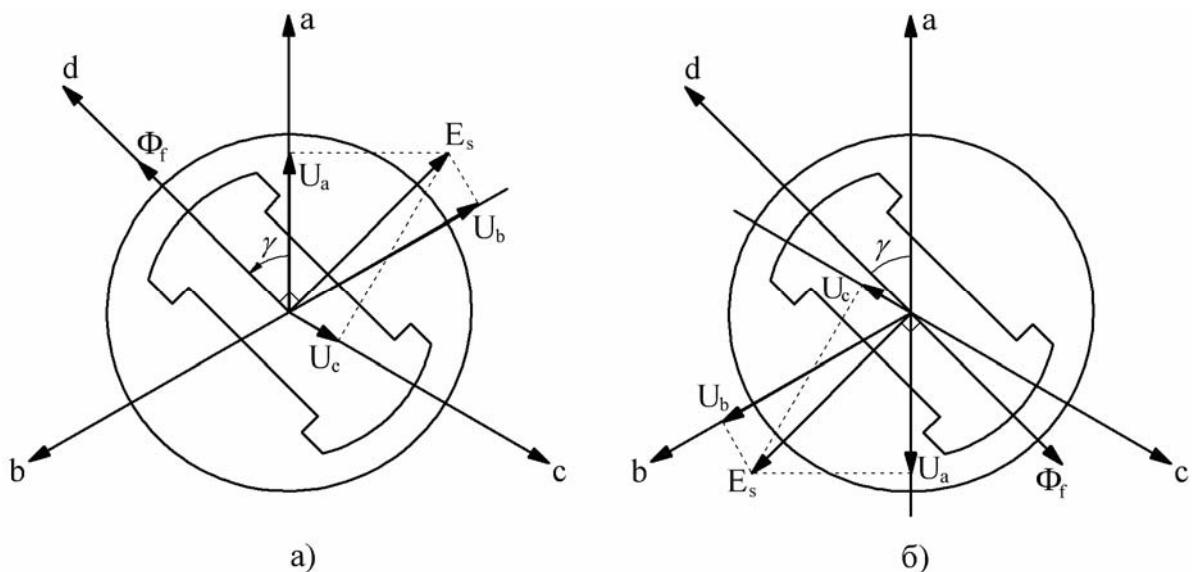


Рис. 5. Векторна діаграма напруг при додатному напрямі струму збудження (а) та від'ємному (б)

Для визначення додатного напрямку поздовжньої вісі d слід контролювати струм збудження та корегувати знайдений напрям узагальненого вектора напруги статора згідно напрямку струму збудження. Тому при визначенні початкового просторового положення додатного напрямку поздовжньої d вісі ротора для додатного струму збудження слід користуватися виразом

$$\gamma_0 = \alpha_u + \frac{\pi}{2},$$

а для від'ємного брати

$$\gamma_0 = \alpha_u - \frac{\pi}{2}.$$

Поточну швидкість ω двигуна можливо контролювати, наприклад, за допомогою імпульсного датчика кутового положення встановленого на валу двигуна.

У рівняння (1) - (2) входить активний опір обмотки статора, яка при роботі двигуна нагрівається із відповідним зростанням опору. Для його визначення враховуємо, що сучасні потужні синхронні двигуни оснащені термопарами, які дозволяють контролювати поточну температуру обмотки статора та дозволяють контролювати її опір за виразом

$$r_a = r_{a x} (1 + \alpha \cdot \tau),$$

де $r_{a x}$ – опір обмотки статора при температурі 15°C; α – температурний коефіцієнт опору (для міді $\alpha = 0,004$ 1/°C); τ – перевищення температури, °C.

Отже, для визначення поточних потокозчеплення статора, кутового положення ротора та електромагнітного моменту мікропроцесорна система спостерігача, окрім введення миттєвих лінійних напруг та фазних струмів статора, струму збудження та кута повертання імпульсного датчика повинна забезпечити швидке вирішення системи із трьох диференціальних рівнянь та алгебраїчного виразу для електромагнітного моменту наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} &= U_m \cos(\gamma - \alpha_u) + \Psi_q \omega - r_a I_m \cos(\gamma - \alpha_i); \\ \frac{d\Psi_q}{dt} &= -U_m \sin(\gamma - \alpha_u) - \Psi_d \omega + r_a I_m \sin(\gamma - \alpha_i); \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega; \\ M &= -\Psi_d I_m \sin(\gamma - \alpha_i) - \Psi_q I_m \cos(\gamma - \alpha_i). \end{aligned}$$

Очевидно, що вимоги до швидкодії та розрядності мікропроцесорної системи достатньо жорсткі. Однак виправдані через повне, адаптивне врахування нестабільності параметрів двигуна.

Висновки. Встановлені залежності дозволяють визначати поточні кутове положення ротора, потокозчеплення статора та електромагнітний момент двигуна за допомогою контролю миттєвих струмів і напруг живлення двигуна. Для практичного використання методу необхідна розробка алгоритмів та апаратних засобів мікропроцесорного спостерігача. Перевага методу у повній адаптації до змінювання параметрів двигуна через нагрівання обмоток та насичення магнітних кіл.

Список літератури

1. Комплектний синхронний електропривід з програмним керуванням / Г.Г. Півняк, В.І. Кириченко, В.В. Кириченко та ін. // Доповіді Національної академії наук України, 2007, №7. – С.97.
2. Півняк Г.Г., Кириченко В.І., Кириченко В.В., Боровик Р.О., Барабан В.В., Бакутін А.В. Вплив нагрівання на пускові властивості синхронного двигуна, Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 28.–С.417-418.
3. Кононенко Е.В., Сипайлов Г.А., Хорьков К.А. Электрические машины (специальный курс). Учебное пособие для вузов. – Москва: «Высшая школа», 1975. – 279 с.
4. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М. – Л.: «Госэнергоиздат», 1963. – 744 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ткачевим В.В.
Надійшла до редакції 15.06.11*