

М.Й.Бурбело, докт.техн.наук, О.М.Кравець (Вінницький нац. техн. ун-т)

АЛГОРИТМИ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

В статті обґрунтовано можливість підвищення точності визначення параметрів АД в системах діагностичного контролю та векторного керування. Досліджено, що при реалізації цифрових квазірівноважених вимірювальних каналів доцільно використовувати як інформативні параметри системи зрівноваження внутрішні недоступні змінні (похідну потокозчеплення та потокозчеплення) асинхронного двигуна, що забезпечує роздільність контурів регулювання.

В статье обоснована возможность повышения точности определения параметров АД в системах диагностического контроля и векторного управления. Исследовано, что при реализации цифровых квазиуравновешенных измерительных каналов целесообразно использовать в качестве информативных параметров системы уравновешивания внутренние недоступные переменные (производную потокозчепления и потокозчепление) асинхронного двигателя, что обеспечивает раздельность контуров регулирования.

Вступ. Неперервний контроль стану асинхронних двигунів (АД) за значеннями струму зворотної послідовності, струму витоку чи інших величин, які використовуються під час робочого (функціонального) діагностування АД, є достатньо ефективним щодо встановлення факту їх пошкодження. Однак на ранніх стадіях виникнення пошкоджень вірогідність робочого діагностування недостатня. За таких умов виникає необхідність застосування періодичного діагностичного контролю АД з вимірюванням таких основних параметрів як кутова швидкість, момент інерції, параметрів схеми заміщення АД. Проблема діагностичного контролю ускладнюється тим, що серійно не випускаються засоби для вимірювання основних параметрів діагностування АД. Однією з найбільш складних є задача створення засобів для вимірювання параметрів схеми заміщення АД. Особливо необхідними такі засоби є для систем векторного керування АД.

Сучасний рівень розвитку силової електроніки та мікропроцесорних засобів керування забезпечує широке поширення частотно-регульованого електроприводу. Системи векторного керування дозволяють створювати електроприводи, які за своїми характеристиками не поступаються приводам постійного струму. Переважно такі системи використовують принцип орієнтації поля, тобто забезпечують розділення каналів керування магнітним потоком та швидкістю шляхом регулювання у системі координат, що обертається і пов'язана, як правило, з вектором потокозчеплення ротора. Найбільш складною задачею, що затрудняє розробку систем векторного керування, є отримання поточних значень потоку, моменту та швидкості за відсутності сенсорів на валу двигуна. Виходячи з цього, постає необхідність поточної ідентифікації параметрів схеми заміщення АД в процесі роботи системи.

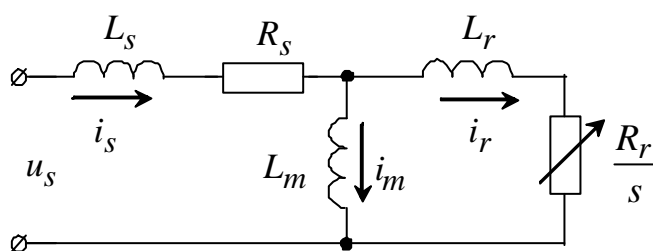


Рис. 1

Схема заміщення АД зображена на рис. 1, де L_s , L_r – індуктивності розсіювання відповідно статора і приведена ротора; L_m – взаємна індуктивність; R_s , R_r – активні опори фази відповідно статора та приведений ротора; s – ковзання; u_s , i_s – напруга і струм статора; i_m , i_r – струми намагнічування і приведений ротора.

Вирішенню проблеми оцінювання електричних параметрів АД присвячена

велика кількість наукових робіт, наприклад, [2,3], і шляхи оцінювання їх є дуже різноманітними. Однак складність вирішення задачі, яка зумовлена нелінійністю об'єкта дослідження, не дозволяє забезпечити необхідну точність.

Постановка завдання. Ставиться задача обґрунтування можливості підвищення точності визначення електричних параметрів асинхронних двигунів в системах векторного регулювання електроприводів.

Обґрунтування результатів. Оскільки індуктивність кола намагнічування L_m є нелінійним елементом, то систему рівнянь АД подамо через струм статора і потокозчеплення. Для цього спочатку запишемо систему рівнянь через струми статора і ротора

$$\frac{d\psi_m}{dt} = u_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt}; \quad \frac{d\psi_m}{dt} = \frac{R_r}{s} i_r + L_r \frac{di_r}{dt}. \quad (1)$$

Виразивши струм ротора через струм статора та струм намагнічування, друге рівняння системи (1) подамо у вигляді

$$\frac{d\psi_m}{dt} = \frac{R_r}{s} i_s + L_r \frac{di_s}{dt} - \frac{R_r}{s} i_m - L_r \frac{di_m}{dt}. \quad (2)$$

Враховуючи, що $i_m = \psi_m / L_m$, запишемо вираз для похідної струму намагнічування

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{1}{L_m} \left(\frac{d\psi_m}{dt} - \frac{\psi_m}{L_m} \frac{dL_m}{dt} \right).$$

Оскільки індуктивність намагнічування є складною функцією потокозчеплення $L_m = f(\psi_m)$, то $\frac{dL_m}{dt} = f'(\psi_m) \frac{d\psi_m}{dt}$, де $f'(\psi_m)$ – похідна індуктивності намагнічування по потокозчепленню, то остаточно вираз для похідної струму намагнічування

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{1}{L_m} \left(1 - \frac{\psi_m}{L_m} f'(\psi_m) \right) \frac{d\psi_m}{dt}. \quad (3)$$

З урахуванням (1), (2) та (3) система рівнянь АД, що представлена через струм статора і потокозчеплення, набуде вигляду

$$\begin{aligned} L_s \frac{di_s}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} &= u_s - R_s i_s; \\ -L_r \frac{di_s}{dt} + \left(1 + \frac{L_r}{L_m} \left(1 - \frac{\psi_m}{L_m} f'(\psi_m) \right) \right) \frac{d\psi_m}{dt} &= \frac{R_r}{s} \left(i_s - \frac{\psi_m}{L_m} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Систему рівнянь (4) можна спростити до вигляду

$$\begin{aligned} L_s \frac{di_s}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} &= u_s - R_s i_s; \\ -L'_r \frac{di_s}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} &= \frac{R'_r}{s} \left(i_s - \frac{\psi_m}{L_m} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

де $R'_r = \frac{R_r}{1 + \frac{L_r}{L_m} \left(1 - \frac{\Psi_m}{L_m} f'(\Psi_m)\right)}$; $L'_r = \frac{L_r}{1 + \frac{L_r}{L_m} \left(1 - \frac{\Psi_m}{L_m} f'(\Psi_m)\right)}$ – еквівалентні нелінійні параметри АД.

Виразивши $\frac{d\Psi_m}{dt}$ з першого рівняння і підставивши в друге, систему (5) можна привести до одного рівняння

$$u_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt} - L'_r \frac{di_s}{dt} = \frac{R'_r}{s} \left(i_s - \frac{\Psi_m}{L_m} \right). \quad (6)$$

З (6) випливає, що п'ятиелементна схема заміщення АД (рис. 1) еквівалентна чотирьох-елементній схемі заміщення (рис. 2), на якій позначено: $R_1 = R_s$, $L_1 = L_s + L'_r$, $R_2 = R'_r / s$,

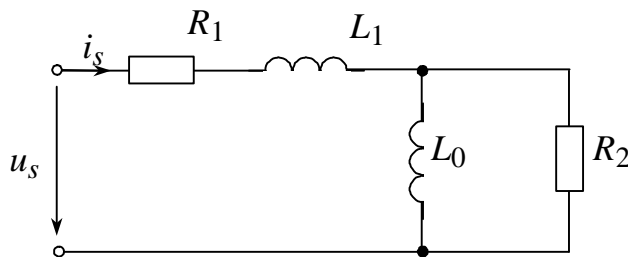


Рис. 2

$L_0 = L'_m$. Індуктивність L'_m визначається з умови рівності струму в колі намагнічування і також є еквівалентним нелінійним елементом. Однак застосування такої схеми заміщення можливе за незначної нелінійності і в усіх випадках має бути обґрунтованим, що не дозволяє однозначно рекомендувати такий підхід для визначення електричних параметрів АД.

Оскільки в процесі вимірювання напруга на статорі, струм статора та похідна струму статора можуть бути виміряні безпосередньо, то систему рівнянь (5) можна пода-

ти у вигляді двох рівнянь, записаних відносно похідної потокозчеплення

$$\frac{d\Psi_m}{dt} = u_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt}; \quad (7)$$

$$\frac{d\Psi_m}{dt} = L'_r \frac{di_s}{dt} + \frac{R'_r}{s} \left(i_s - \frac{\Psi_m}{L_m} \right). \quad (8)$$

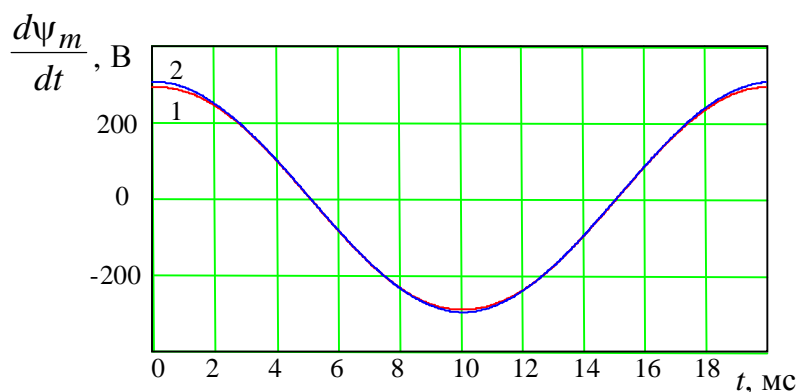


Рис. 3

На рис. 3 показано залежності похідної потокозчеплення, що розраховані за формулами (7) і (8), для краново-металургійного двигуна типу МТКН512-8 повторнокороткочасного режиму роботи (ПВ=25 %) з номінальною потужністю 45 кВт у режимі заданої синусоїдної напруги у разі наближеного визначення параметрів $R'_r \approx R_r$; $L'_r \approx L_r$. Параметри двигуна такі:

$$R_s = 0,103 \text{ Ом}, \quad R_r = 0,237 \text{ Ом},$$

$$X_s = \omega L_s = 0,172 \text{ Ом},$$

$$X_r = \omega L_r = 0,366 \text{ Ом}, \quad X_m = \omega L_m = \omega(b_0 + b_2 \Psi_m^2), \quad b_0 = 0,036 \text{ Гн}, \quad b_2 = -0,02 \text{ Гн/Вб}^2, \quad s = 0,075.$$

Близькість залежностей похідної потокозчеплення, що розраховані за формулами (7) і (8), вказує на можливість представлення даного типу двигуна чотирьохелементною схемою заміщення і наближеного визначення параметрів $R'_r \approx R_r$; $L'_r \approx L_r$. У даному випадку необхідним є уточнення параметра R'_r , зокрема, при $R'_r = 0,230$ Ом криві $d\psi_m/dt$ збігаються. Інформативними у даному

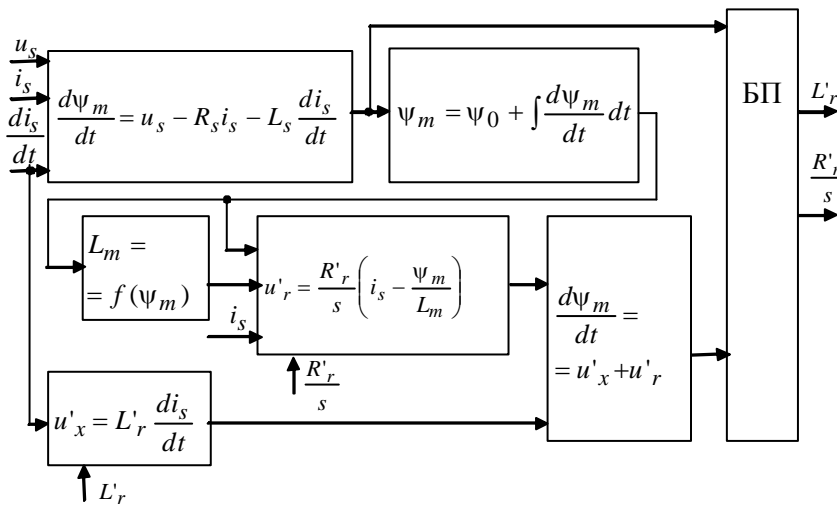


Рис. 4

випадку є амплітудні значення $d\psi_m/dt$.

Функціональну схему вимірювальних перетворень, які необхідно здійснювати для визначення електричних параметрів АД за формулами (7) і (8), зображено на рис. 4. Після знаходження похідної потокозчеплення з формули (7) передбачається визначення потокозчеплення $\psi_m = \psi_0 + \int \frac{d\psi_m}{dt} dt$, де ψ_0 – стала інтегрування, а потім – індуктивності намагнічування $L_m = f(\psi_m)$. В подальшому визначаються напруги

$u'_x = L'_r \frac{di_s}{dt}$ та $u'_r = \frac{R'_r}{s} \left(i_s - \frac{\psi_m}{L_m} \right)$, причому параметри L'_r та R'_r налагоджуються в процесі визна-

чення параметрів моделі, а також похідної потокозчеплення $\frac{d\psi_m}{dt} = u'_x + u'_r$. Налагодження моделі здійснюється блоком порівняння та прийняття рішень (БП), який аналізує миттєві значення двох реалізацій похідної потокозчеплення, що поступають на його входи, і приймає рішення щодо зміни параметрів, які ідентифікуються.

Другий підхід до визначення параметрів АД полягає у порівнянні миттєвих значень потокозчеплення, розрахованих за формулами

$$\psi_m = \psi_0 + \int_0^t (u_s - R_s i_s) dt - L_s i_s; \quad \psi_m = L_m \left(i_s + \frac{L'_r}{R'_r} \frac{di_s}{dt} - \frac{1}{R'_r} \frac{d\psi_m}{dt} \right). \quad (9,10)$$

На рис. 5 показано залежності потокозчеплення, що розраховані за формулами (9) і (10), які позначено відповідно цифрами 1 та 2, для вказаного вище типу двигуна. За відхиленнями миттєвих значень потокозчеплень, відображених кривими 1 та 2, можна зробити висновок, що використання

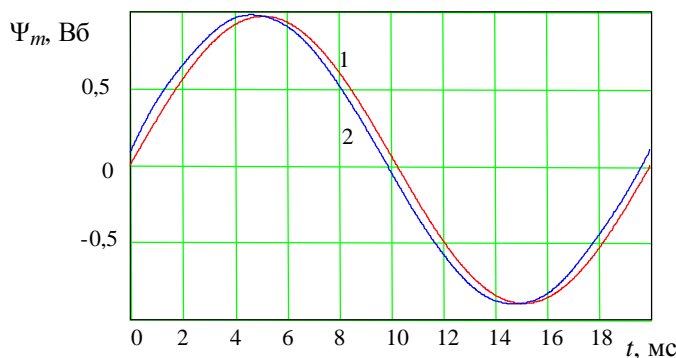


Рис. 5

потокозчеплення забезпечує порівняно вищу чутливість вимірювальних каналів, ніж у разі використання похідної потокозчеплення.

Криві ψ_m після уточнення параметра $R'_r = 0,230$ Ом зображено на рис. 6, з якого випливає, що інформативним є фазовий зсув між потокозчепленнями, розрахованими за формулами (9) і (10). Функціональну схему вимірювальних перетворень за формулами (9) і (10) зображено на рис. 7. У даному випадку після визначення потокозчеплення за формулою (9) визначаються напруга

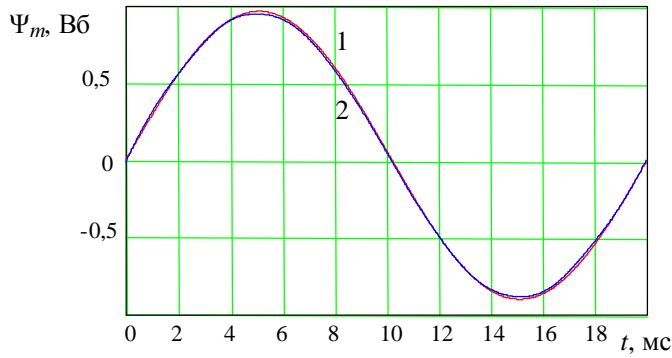


Рис. 6

$u'_x = L'_r \frac{di_s}{dt}$, струм $i'_r = \frac{s}{R'_r} \left(u'_x - \frac{d\psi_m}{dt} \right)$, а також потокозчеплення $\psi_m = L_m (i_s + i'_r)$.

Згідно із запропонованими алгоритмами визначаються параметри R'_r/s та L'_r . Отримані значення мають однакову методичну похибку: для даного типу двигуна при заданому ковзанні отримані результати приблизно на 3 % менші від відповідно R_r/s та L_r . Причому постійна часу ротора як один з найбільш важливих параметрів ідентифікації визначається без методичної похибки.

Розглянуті алгоритми можуть бути безпосередньо використані при визначенні одного параметра у разі відомих решти параметрів. За невідомих двох параметрів АД потрібний пошук станів квазірівноваги, які забезпечують роздільність двох контурів зрівноваження. Якщо невідомих параметрів три і більше, то необхідно також є зміна умов проведення експерименту, наприклад, використання двох режимів роботи з різним ковзанням або використання двох частот напруги чи струму живлення АД [1].

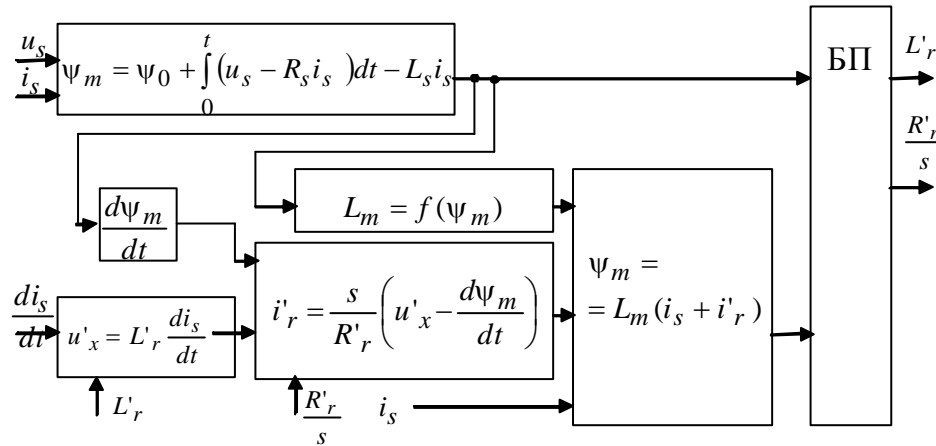


Рис. 7

Висновки. Отримано умови можливості представлення асинхронних двигунів чотирьохелементною схемою заміщення. Для цього здійснюється

порівняння двох залежностей похідної потокозчеплення та потокозчеплення. За незначних їхніх відхилень, які можна скоригувати налагодженням параметрів моделі, робиться висновок про можливість використання чотирьохелементної схеми заміщення.

Показано, що при реалізації цифрових квазірівноважених вимірювальних каналів доцільно використовувати як інформативні параметри системи зрівноваження – внутрішні недоступні змінні схеми заміщення АД, наприклад, похідну потокозчеплення та потокозчеплення, що забезпечує роздільність контурів регулювання.

1. Бурбело М.Й. Квазірівноважені частотно-варіаційні вимірювальні системи. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 225 с.
2. Волков А.В. Идентификация внутренних параметров частотно-регулируемого асинхронного двигателя // Электротехника та електроенергетика. – 2003. – №1. – С. 82–87.
3. Волков А.В. Идентификация потокозчепления ротора частотно-регулируемого асинхронного двигателя // Электротехника. – 2002. – №6. – С. 40–46.

Надійшла 27.02.2009