

УДК 62-83:519.711

О. І. ТОЛОЧКО (д-р техн. наук, проф.), **В. В. БОЖКО**
 Державний вищий навчальний заклад
 «Донецький національний технічний університет»
vladbozhko@mail.ru

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ІНДУКТИВНОСТЕЙ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ РЕКУРЕНТНИМ МЕТОДОМ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ

Проаналізовано методи ідентифікації індуктивностей синхронного двигуна з постійними магнітами в різних режимах на основі рекурентного методу найменших квадратів. Удосконалено метод ідентифікації на основі дискретної динамічної моделі для визначення обох складових індуктивностей статора. Дано рекомендації щодо використання розглянутих методів.

Ключові слова: синхронний двигун з постійними магнітами, індуктивності за поздовжньою та поперечною осями, рекурентний метод найменших квадратів, послаблення поля.

Постановка проблеми. В останні роки великого розвитку отримує електропривод на основі синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ). Даний тип електричних машин має ряд переваг в порівнянні з асинхронними двигунами і машинами постійного струму. До основних переваг СДПМ належать проста та надійна конструкція, низькі витрати на обслуговування, найкращі показники питомої потужності, висока динаміка та високі енергетичні показники. Поліпшення характеристик СДПМ можна досягти шляхом вдосконалення як його конструкції, так і системи керування. Застосування певних алгоритмів дозволяє підвищити ефективність систем векторного керування СДПМ за рахунок мінімізації втрат (в міді, в сталі або сумарних) та забезпечити роботу в специфічних режимах (мінімум струму або напруги при бажаному електромагнітному моменті). Однак для бажаного функціонування системи електроприводу та для реалізації оптимальних алгоритмів керування необхідна вірогідна інформація про об'єкт регулювання. Причому поряд зі складнощами вимірювання деяких параметрів в реальній системі можливі й варіації останніх.

Таким чином, ідентифікація параметрів СДПМ є актуальною науково-практичною задачею, рішення якої дозволить забезпечити необхідні показники таких систем електроприводу.

Аналіз досліджень и публікацій. В літературі найбільше відображення знайшли методи ідентифікації параметрів, засновані на застосуванні дискретних моделей об'єкта регулювання. В [1] запропоновано спосіб ідентифікації основних параметрів СДПМ при нерухомому роторі і в початковий момент пуску двигуна. В [2] автор пропонує ідентифікувати параметри двигуна на підставі математичного опису електромагнітних процесів в СДПМ в статичних режимах з використанням рекурентних методів. Такий підхід не дозволяє забезпечити ідентифікації необхідних параметрів на ділянках зміни складових струмів статора. Ідентифікація на основі рівнянь динаміки запропонована в роботі [3]. Підхід ґрунтується на застосуванні методу найменших квадратів і дозволяє ідентифікацію в реальному часі. Однак у даній роботі виконується ідентифікація індуктивності тільки за поперечною віссю в припущенні незмінності індуктивності за поздовжньою віссю, що не завжди справедливо.

Мета статті. Метою даної роботи є порівняльний аналіз методів ідентифікації індуктивностей за поздовжньою та поперечною осями та удосконалення цих методів для забезпечення можливості одночасної ідентифікації обох складових індуктивностей в тому числі і на ділянках зміни струму статора.

Результати досліджень. Найбільш поширеним та зручним математичним описом синхронних двигунів з постійними магнітами при застосуванні векторного керування є опис в ортогональній системі координат, орієнтованій за потоком ротора (dq). Схеми заміщення за каналами d і q наведені на рис. 1 [1-3].

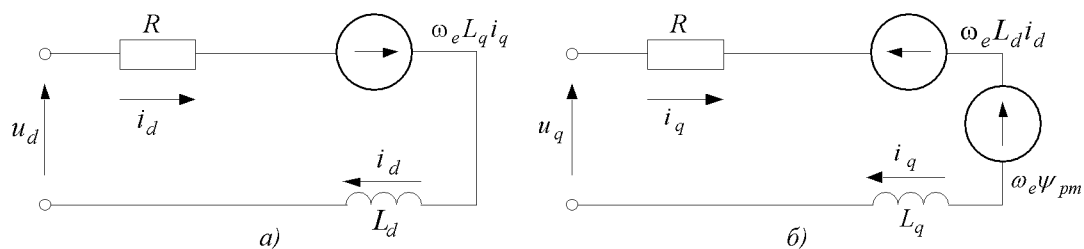


Рисунок 1 – Схеми заміщення за каналами d (а) і q (б)

На рис.1 прийняті такі позначення: u_d, u_q, i_d, i_q – проєкції напруги і повного струму статора на осі d і q ; R – активний опір фази статора; L_d, L_q – поздовжня і поперечна індуктивності статора; $\omega_e = Z_p \omega$ – електрична кутова частота ротора; Z_p – кількість пар полюсів; ω – механічна кутова частота ротора; Ψ_{pm} – потік постійних магнітів.

Схемам заміщення (рис. 1) відповідають такі рівняння електромагнітних процесів:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Psi_{pm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Вище наведений математичний опис містить параметри, інформація про які необхідна для якісного керування двигуном. В свою чергу деякі параметри можуть бути невідомими або змінюватися в процесі роботи.

Одним з основних факторів, що впливають на значення параметрів, є температура. Підвищення температури призводить до збільшення активного опору обмоток статора (близько 40%). Вплив температури на потік від постійних магнітів залежить від матеріалу, форми і розташування останніх, але в більшості випадків цим впливом можна знехтувати. При підвищенні температури індуктивності дещо зменшуються. Однак основним джерелом варіацій останніх є магнітне насичення [2]. Найчастіше робиться припущення, що індуктивності за поздовжньою та поперечною осями залежать тільки від відповідних складових струму статора, тобто взаємний вплив обох складових струму не враховується.

Деякі двигуни не мають у своєму складі датчика температури через подорожчання конструкції, складність монтажу і зменшення надійності системи приводу в цілому, але в даній роботі розглядається випадок, коли температура двигуна може бути виміряна вбудованим датчиком. В такому разі ідентифікація активних опорів не потрібна, тому що їх значення можуть бути розраховані, виходячи з поточної температури на підставі відомих залежностей [2]. Також вважаємо, що значення Ψ_{pm} відомо і незмінно, тобто не залежить від температури. Відтак, ідентифікації підлягають тільки значення індуктивностей за поздовжньою і поперечною осями.

Лінійна дискретна регресійна модель для ідентифікації параметрів об'єкта керування бути представлена у вигляді [4]

$$y[k] = \phi^T[k] \hat{\theta}[k-1], \quad (2)$$

де y – вихід моделі, ϕ – вектор даних, $\hat{\theta}$ – оцінка вектора невідомих параметрів. Задача ідентифікації невідомих параметрів зводиться до визначення параметрів θ з рівнянь (2). Для цього можуть бути використані різні методи, серед яких найбільше поширення отримав рекурентний метод найменших квадратів (РНК). Відповідно до РНК оцінка вектора невідомих параметрів моделі (2) може бути знайдена як [4]

$$\hat{\theta}[k] = \hat{\theta}[k-1] + \frac{P[k-1]\phi[k]}{\lambda + \phi^T[k]P[k-1]\phi[k]} \cdot (y[k] - \phi^T[k]\hat{\theta}[k-1]), \quad (3)$$

де

$$P[k] = \frac{1}{\lambda} \left(P[k-1] - \frac{P[k-1]\phi[k]\phi^T[k]P[k-1]}{\lambda + \phi^T[k]P[k-1]\phi[k]} \right), \quad (4)$$

λ – фактор забування.

До позитивних якостей РНК слід віднести низьку чутливість до перешкод вимірів і можливість відстеження нестационарності параметрів.

Для складання дискретної моделі у формі (2) на основі (1) можна виділити два підходи: на підставі статичних залежностей або на підставі динамічних залежностей.

У разі використання статичних залежностей в (1) в кожному з рівнянь зникає диференціальна складова ($p=0$), а отже залишається тільки один невідомий параметр. В цьому випадку дискретна модель для ідентифікації індуктивності за поздовжньою віссю (модель каналу q) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \theta[k] &= L_d, \\ y[k] &= u_q[k] - Ri_q[k] - \Psi_{pm}\omega_e[k], \\ \phi[k] &= i_d[k]\omega_e[k], \end{aligned}$$

а для ідентифікації індуктивності за поперечною віссю (модель каналу d) –

$$\begin{aligned} \theta[k] &= L_q, \\ y[k] &= u_d[k] - Ri_d[k], \\ \phi[k] &= -i_q[k]\omega_e[k]. \end{aligned}$$

У разі використання дискретної динамічної моделі за каналом d отримуємо:

$$\theta[k] = \begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix},$$

$$y[k] = u_d[k] - Ri_d[k],$$

$$\phi[k] = \begin{bmatrix} (i_d[k] - i_d[k-1])/T_s \\ -i_d[k]\omega_e[k] \end{bmatrix}.$$

В свою чергу з дискретної динамічної моделі у формі (2) для каналу q отримуємо:

$$\theta[k] = \begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix},$$

$$y[k] = u_q[k] - Ri_q[k] - \psi_{pm}\omega_e[k],$$

$$\phi[k] = \begin{bmatrix} i_d[k]\omega_e[k] \\ (i_q[k] - i_q[k-1])/T_s \end{bmatrix}.$$

Оцінка вектора параметрів, для кожного з розглянутих випадків, знаходиться за рівняннями (3) і (4).

Порівняння результатів ідентифікації в разі невідомих, але незмінних в процесі роботи (без магнітного насичення) значень індуктивностей за поздовжньою і поперечною осями наведено на рис. 2.

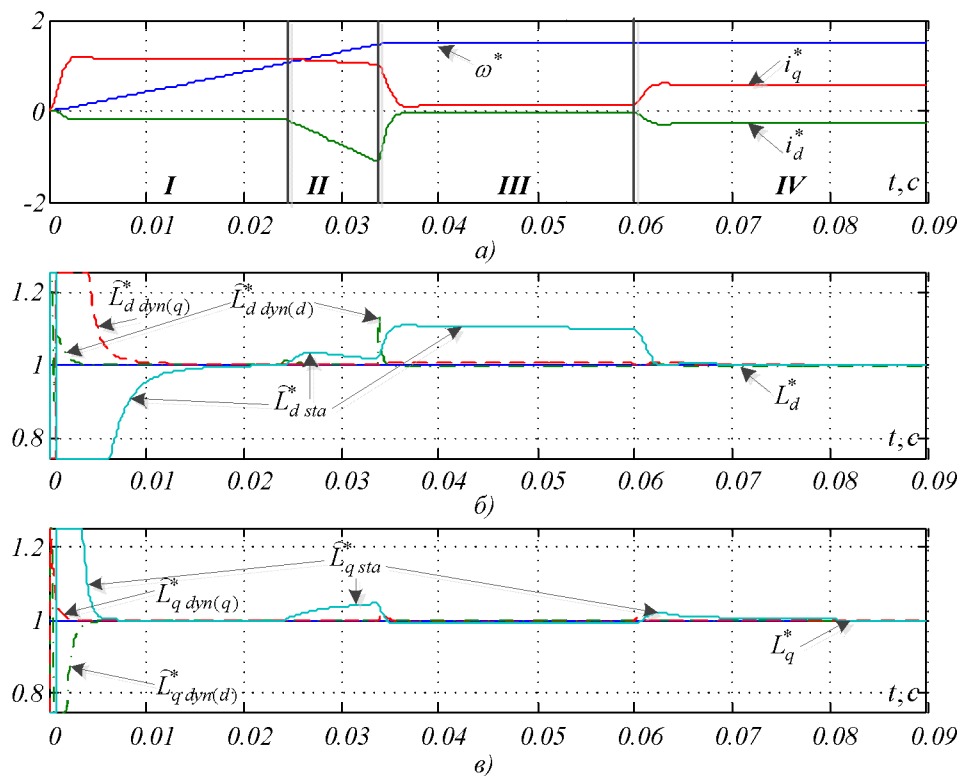


Рисунок 2 – Результати ідентифікації індуктивностей за поздовжньою і поперечною осями без врахування ефекту магнітного насичення:

- а) графіки швидкості та складових струму статора;
- б) ідентифікація індуктивності за поздовжньою віссю;
- в) ідентифікація індуктивності за поперечною віссю

На рис. 2 для наочності результати значення наведені у відносних одиницях: швидкість та складові струму статора по відношенню до номінальних значень, індуктивності – по відношенню до значень, наведених в паспорті двигуна. При позначенні індуктивностей використані відповідні індекси: «*sta*» – ідентифікація на основі рівнянь статички, «*dyn(d)*» і «*dyn(q)*» – на основі рівнянь динаміки для моделей d і q відповідно. Ідентифікація виконувалася в наступних режимах: *I* – розгін з динамічним моментом, рівним номінальному; *II* – розгін в режимі послаблення поля; *III* – робота на холостому ході (момент холостого ходу прийнятий рівним 10% від номінального); *IV* – накид навантаження (55% від номінального). В якості алгоритму керування був обраний алгоритм «Максимальний момент на ампер» [5].

Як видно з рис. 2, в разі незмінних в процесі роботи індуктивностей ідентифікація виконується досить точно (похибка при усталених значеннях складових струму не перевищує 1%). Загальною тенденцією є збільшення похибки ідентифікації в режимі холостого ходу (особливо при застосуванні статичних моделей), що

може бути пов'язано з малими значеннями складових струму статора, які виступають в якості вхідних сигналів алгоритму ідентифікації. У разі використання рівнянь статички спостерігається більший час ідентифікації і збільшення похибки в режимі послаблення поля, що пояснюється присутністю диференційної складової у струмі статора.

На рис. 3 наведені результати ідентифікації за умови присутності магнітного насичення. У моделі вплив магнітного насичення було імітовано лінійним зменшенням індуктивностей за поздовжньою віссю на 20% при $i_d = I_{\max}$ і за поперечною на 40% при $|i_q| = I_{\max}$.

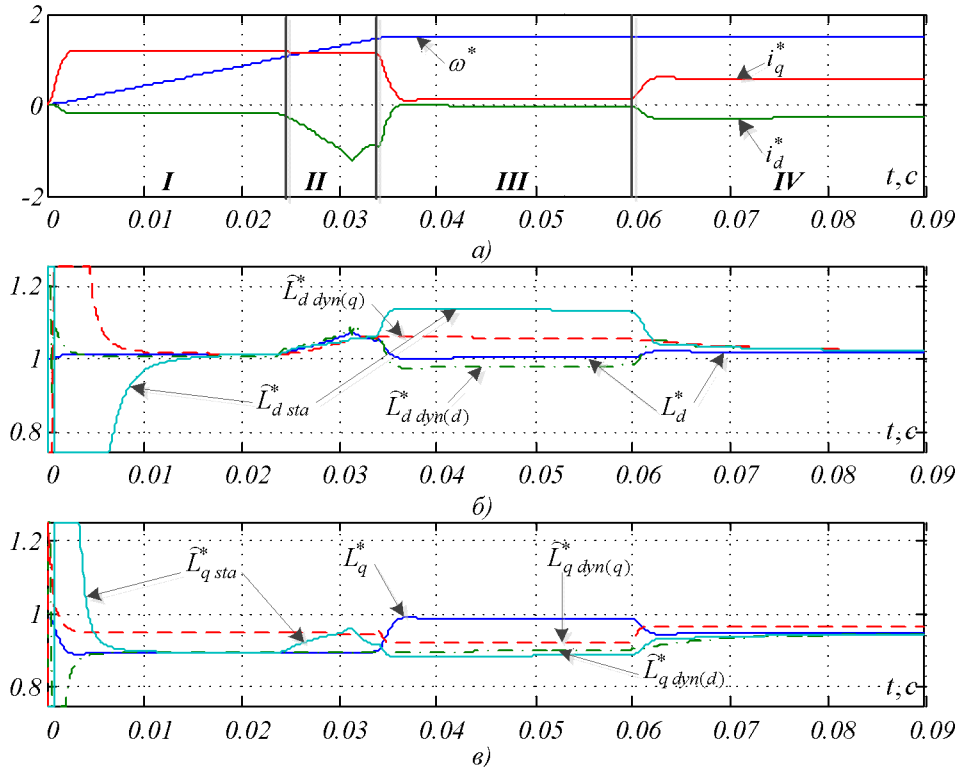


Рисунок 3 – Результати ідентифікації індуктивностей за поздовжньою і поперечною осями з урахуванням ефекту магнітного насичення:

- а) графіки швидкості та складових струму статора;
- б) ідентифікація індуктивності за поздовжньою віссю;
- в) ідентифікація індуктивності за поперечною віссю

З рис. 3 можна побачити, що ідентифікація поздовжньої індуктивності виконується достатньо точно у разі використання будь-якої з моделей, що розглядаються. При ідентифікації L_q високої точності можна досягти при використанні моделі на основі статичних рівнянь, але, як і при незмінних значеннях індуктивностей, спостерігається збільшення похибки в режимі послаблення поля. Ідентифікація індуктивності за поперечною віссю при використанні дискретної динамічної моделі за каналом q в процесі розгону виконується з більшою похибкою в порівнянні з іншими варіантами.

Отже, найкращі результати ідентифікації індуктивностей за поздовжньою і поперечною осями отримані при використанні дискретної динамічної моделі електромеханічної частини за поздовжньою віссю d .

Для моделювання використовувалися технічні дані СДПМ виробництва *Schneider Electric – BSH0701P* ($P_n=440 \text{ Вт}$; $U_n=230 \text{ В}$; $N_n=3000 \text{ об/хв}$; $N_{\max}=8000 \text{ об/хв}$; $M_n=1,3 \text{ Нм}$; $M_0=1,4 \text{ Нм}$; $M_{\max}=3,5 \text{ Нм}$; $I_0=1,8 \text{ А}$; $I_n=1,6 \text{ А}$; $I_{\max}=5,7 \text{ А}$; $Z_p=3$; $J=0,25e-4 \text{ кгм}^2$; $K_t=0,8 \text{ Нм/А}$; $K_e=46 \text{ В/кхв}^{-1}$; $R=5,2 \text{ Ом}$; $L_d=35,3 \text{ мГн}$, $L_q=42,6 \text{ мГн}$) [6].

Висновки:

1. У разі низьких значень складових струму (холостий хід) точність ідентифікації знижується.
2. При незмінних значеннях індуктивностей за поздовжньою і поперечною осями їх ідентифікація виконується з достатньою точністю не залежно від моделі.
3. При урахуванні ефекту магнітного насичення (при змінних значеннях) допустима точність ідентифікації обох індуктивностей може бути отримана на основі дискретної динамічної моделі за каналом d .
4. У випадку роботи тільки в першій зоні регулювання швидкості можна застосовувати дискретну модель, отриману на підставі статичних залежностей, як більш просту.

До подальшим напрямками досліджень слід віднести урахування ефекту широтно-імпульсної модуляції і методи ідентифікації при використанні повної моделі СДПМ з втратами в сталі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Khaburi D.A. Parameter identification of permanent magnet synchronous machine in vector control / D.A. Khaburi, M. Shahnazari // EPE. – 2003.
2. Underwood Samuel J. On-line parameter estimation and adaptive control of permanent magnet synchronous machines: diss. Ph. D / Samuel J. Underwood. – Akron, 2006. – 187 p.
3. Performance improvement of sensorless IPMSM drives in a low-speed region using online parameter identification / Yukinori Inoue, Yasunori Kawaguchi, Shigeo Morimoto et al. // IEEE Transactions on industry applications. – Vol. 47. – №2. – 2011. – P. 798-804.
4. Ljung L. System Identification – Theory For the User / L. Ljung. – 2-nd ed. – N.J.: PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999. – 609 p.
5. Толочко О.І. Уніфікований алгоритм керування синхронними двигунами без електричного збудження / О.І. Толочко, В.В. Божко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Електротехніка і енергетика” – 2011. – №11. – С. 392-395.
6. BSH Servo motor. – V2. – 02.11.2011 : [Motor manual]. – 2011. – 97 p.

Надійшла до редколегії 07.03.2012

Рецензент: Сивокобиленко В.Ф.

О. И. ТОЛОЧКО, В. В. БОЖКО
Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»

O. TOLOCHKO, V. BOZHKO
State Institution of Higher Education
«Donetsk National Technical University»

Идентификация индуктивностей синхронного двигателя с постоянными магнитами рекуррентным методом наименьших квадратов. Проанализированы методы идентификации индуктивностей синхронного двигателя с постоянными магнитами в разных режимах на основе рекуррентного метода наименьших квадратов. Усовершенствован метод идентификации на основе дискретной динамической модели для определения обеих составляющих индуктивности статора. Даны рекомендации по использованию рассмотренных методов.

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами, индуктивности по продольной и поперечной осям, рекуррентный метод наименьших квадратов, ослабление поля.

Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor Inductances Based on Recursive Least Squares Method. The identification methods of permanent magnet synchronous motor inductances in different modes, based on recursive least squares method were analyzed. Identification method based on discrete dynamical model for the determination of both components of the stator inductance was improved. Recommendations on the use of the considered methods were given.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, direct and quadrature axes inductances, recursive least squares method, field weakening.



Толочко Ольга Іванівна, 1948 р.н., Україна, закінчила Донецький політехнічний інститут, д.т.н., професор, зав. кафедри електроприводу і автоматизації промислових установок ДонНТУ. Основний напрямок наукової діяльності – оптимальне керування електромеханічними об'єктами в умовах неповної інформації про об'єкт регулювання.



Божко Владислав Володимирович, 1985 р.н., Україна, закінчив Донецький національний технічний університет, аспірант кафедри електроприводу і автоматизації промислових установок ДонНТУ. Основний напрямок наукової діяльності – оптимальне керування синхронними двигунами з постійними магнітами.