

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ  
В ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

УДК 681.511.4

**Ю. Н. Золотухин, А. А. Нестеров***(Новосибирск)***ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЯ  
ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ МОМЕНТА  
СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Предложен новый метод идентификации параметров для быстродействующей адаптивной схемы подавления пульсаций момента синхронного двигателя с постоянными магнитами. Моделирование подтвердило высокую скорость сходимости искомых параметров поля к истинным значениям.

**Введение.** Широкое распространение синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) связано с их экономичностью, простотой конструкции и управления. В связи с этим становится актуальным устранение одного из главных недостатков СДПМ – зависимости момента двигателя от угла  $\theta$  положения ротора (пульсации момента), вызванной, прежде всего, несинусоидальностью магнитного потока  $\psi_{pm}(\theta)$ , создаваемого постоянными магнитами ротора. Задача минимизации пульсаций рассматривалась во многих работах. Так, например, самонастраивающаяся схема для прецизионного СДПМ-привода представлена в [1]. Метод, основанный на подстройке параметров в режиме реального времени, предложен в [2]. Адаптивный контроллер прямого привода для робота исследован в [3].

Несинусоидальный поток ротора  $\psi_{pm}(\theta)$  можно представить в виде разложения в ряд Фурье. Именно высшие гармоники этого ряда и вызывают пульсации момента двигателя. После преобразования  $\psi_{pm}(\theta)$  в систему координат  $(d, q)$  в составляющих  $\psi_d(\theta)$ ,  $\psi_q(\theta)$  остаются гармоники с номерами, кратными шести. При этом амплитуды гармоник быстро убывают с ростом номера гармоники. В работе [4] предлагается в разложениях  $\psi_d(\theta)$ ,  $\psi_q(\theta)$  сохранить лишь постоянную составляющую, шестую и двенадцатую гармоники. Учет этих гармоник при управлении двигателем позволяет существенно уменьшить пульсации момента, вызванные их наличием. В [4] описан также и алгоритм адаптации, который дает возможность определить параметры гармоник в разложениях  $\psi_d(\theta)$ ,  $\psi_q(\theta)$ . Моделирование показывает, что адаптация по описанному алгоритму, к сожалению, недостаточно быстра. В [5] представлены предварительные результаты исследований по этой проблеме.

**Метод решения.** В данной работе предложен алгоритм, позволяющий быстро определить искомые параметры.

Запишем условия баланса напряжений в обмотках статора двигателя в продольной  $d$  и поперечной  $q$  осях в форме уравнений Парка [6]:

$$\begin{cases} U_d = RI_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q - \omega \psi_q(\theta); \\ U_q = RI_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega L_d I_d + \omega \psi_d(\theta), \end{cases} \quad (1)$$

где  $U_d, U_q, I_d, I_q$  – компоненты векторов напряжения и тока в обмотках статора двигателя в координатах  $(d, q)$ ;  $R$  – активное сопротивление обмоток статора;  $L_d, L_q$  – матрицы индуктивностей обмоток статора в осях  $d, q$  соответственно;  $\omega$  – электрическая угловая частота вращения ротора;  $\psi_d(\theta), \psi_q(\theta)$  – потокосцепления обмоток статора, создаваемые магнитами ротора, в осях  $d, q$  соответственно.

По аналогии с [1] представим потокосцепления  $\psi_d(\theta), \psi_q(\theta)$  в форме

$$\begin{cases} \psi_d(\theta) = \psi_{d0} + \psi_{d6} \cos(6\theta) + \psi_{d12} \cos(12\theta); \\ \psi_q(\theta) = \psi_{q6} \sin(6\theta) + \psi_{q12} \sin(12\theta). \end{cases} \quad (2)$$

В представлении (2) параметры  $\psi_{d0}, \psi_{d6}, \psi_{d12}, \psi_{q6}, \psi_{q12}$  являются неизвестными параметрами поля и подлежат идентификации. Введем обозначения

$$\begin{cases} V_d(t) = -U_d + RI_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q; \\ V_q(t) = +U_q - RI_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega L_d I_d. \end{cases} \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) уравнение (1) можно переписать в форме

$$\begin{cases} \omega[\psi_{q6} \sin(6\theta) + \psi_{q12} \sin(12\theta)] = V_d(t); \\ \omega[\psi_{d0} + \psi_{d6} \cos(6\theta) + \psi_{d12} \cos(12\theta)] = V_q(t). \end{cases} \quad (4)$$

Для полного описания процессов в СДПМ к уравнениям (4) необходимо добавить уравнения движения ротора:

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega; \\ T_j \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_l, \end{cases} \quad (5)$$

где  $T_j$  – суммарная механическая постоянная времени ротора и нагрузки;  $M_e = \psi_d(\theta)I_q - \psi_q(\theta)I_d$  – вращающий момент двигателя;  $M_l$  – момент сопротивления нагрузки.

Если в уравнение (4) подставить точные значения параметров поля и измеренные значения токов, напряжений, скорости, вычисленное с помощью (5) значение угла  $\theta$ , то эти уравнения обратятся в тождества по времени  $t$ . Следовательно, задачу определения параметров поля можно свести к минимизации по этим параметрам функционалов

$$\begin{cases} F_1(\psi_{q6}, \psi_{q12}) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \{\omega[\psi_{q6} \sin(6\theta) + \psi_{q12} \sin(12\theta)] - V_d(t)\}^2 dt; \\ F_2(\psi_{d0}, \psi_{d6}, \psi_{d12}) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \{\omega[\psi_{d0} + \psi_{d6} \cos(6\theta) + \psi_{d12} \cos(12\theta)] - V_q(t)\}^2 dt, \end{cases} \quad (6)$$

где  $[t_0, t_1]$  – интервал идентификации.

Дальнейшие вычисления удобнее провести в векторной форме. Введем в рассмотрение вектор-столбцы

$$\begin{cases} Y_q = [\psi_{q6}, \psi_{q12}]; \\ Y_d = [\psi_{d0}, \psi_{d6}, \psi_{d12}] \end{cases} \quad (7)$$

и вектор-функции угла  $\theta$

$$\begin{cases} C(\theta) = [1; \cos(6\theta); \cos(12\theta)]; \\ S(\theta) = [\sin(6\theta); \sin(12\theta)]. \end{cases} \quad (8)$$

При этом уравнения (2), (4) и функционалы (6) приобретают компактную форму:

$$\begin{cases} \psi_d(\theta) = C^T(\theta)Y_d; \\ \psi_q(\theta) = S^T(\theta)Y_q, \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \omega S^T(\theta)Y_q = V_d(t); \\ \omega C^T(\theta)Y_d = V_q(t), \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} F_1(Y_q) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} [\omega S^T(\theta)Y_q - V_d(t)]^2 dt; \\ F_2(Y_d) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} [\omega C^T(\theta)Y_d - V_q(t)]^2 dt. \end{cases} \quad (11)$$

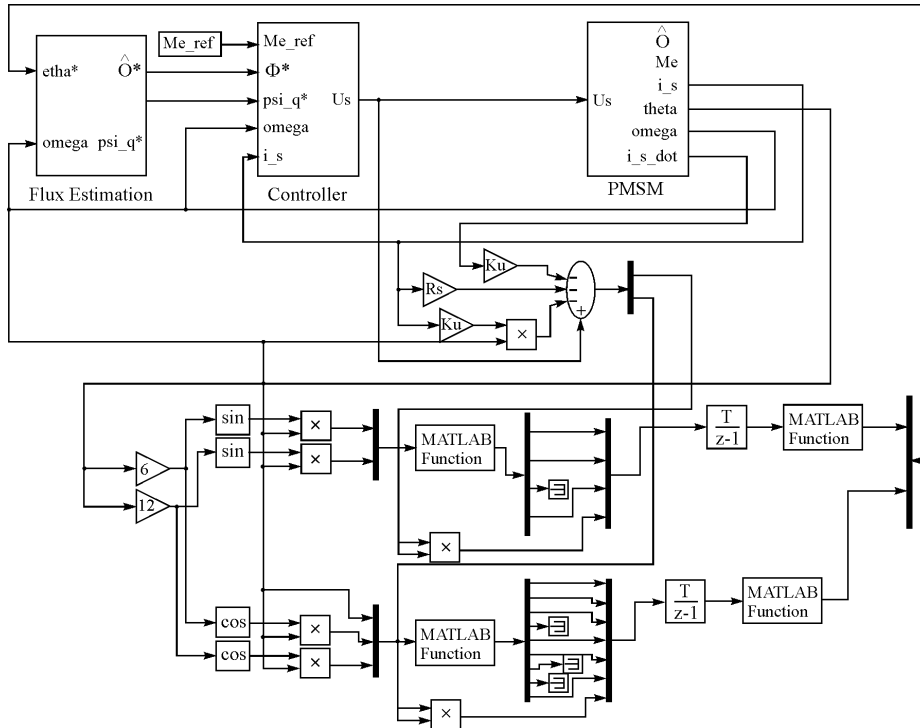


Рис. 1. Схема идентификации параметров поля двигателя в среде MATLAB-SIMULINK

Дифференцируя правые части соотношений (11) по компонентам векторов  $Y_d, Y_q$  и приравнявая производные нулю, получим условия минимума функционалов (11) по искомым параметрам поля:

$$\begin{cases} \int_{t_0}^{t_1} \omega S(\theta) [\omega S^T(\theta) Y_q - V_d(t)] dt = 0; \\ \int_{t_0}^{t_1} \omega C(\theta) [\omega C^T(\theta) Y_d - V_q(t)] dt = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Отсюда непосредственно получим значения параметров

$$\begin{cases} Y_q = \left[ \int_{t_0}^{t_1} \omega^2 S(\theta) S^T(\theta) dt \right]^{-1} \left[ \int_{t_0}^{t_1} \omega S(\theta) V_d(\theta) dt \right]; \\ Y_d = \left[ \int_{t_0}^{t_1} \omega^2 C(\theta) C^T(\theta) dt \right]^{-1} \left[ \int_{t_0}^{t_1} \omega C(\theta) V_q(\theta) dt \right]. \end{cases} \quad (13)$$

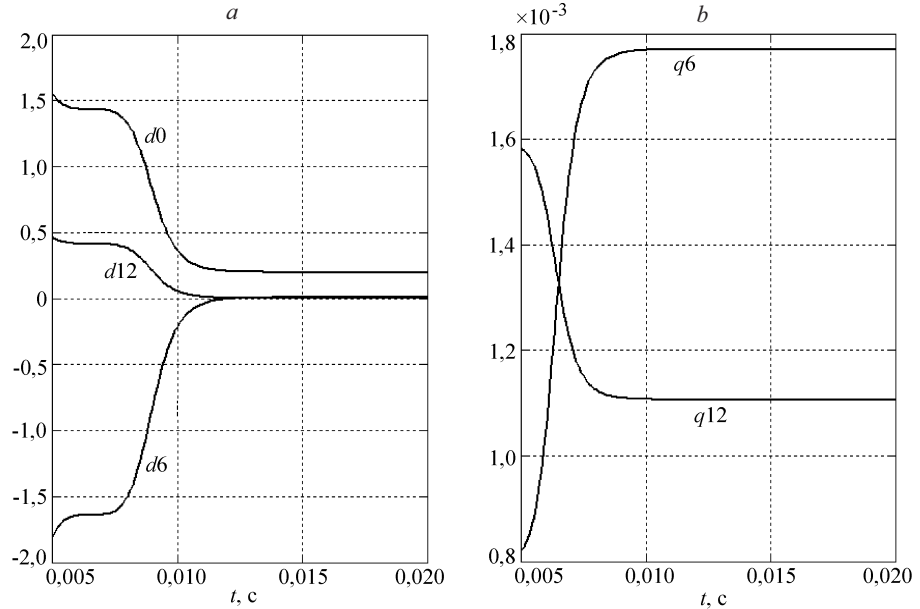


Рис. 2. Сходимость оценок параметров:  $\Psi_{d0}$ ,  $\Psi_{d6}$ ,  $\Psi_{d12}$  (a) и  $\Psi_{q6}$ ,  $\Psi_{q12}$  (b)

Соотношения (13) решают задачу идентификации параметров поля в системе с СДПМ и, следовательно, задачу подавления пульсаций момента, вызванных соответствующими гармониками поля.

Зависимость  $Y_d, Y_q$  от параметров  $t_0, t_1$  проявляется только при малом значении длины интервала  $[t_0, t_1]$ . С ростом длины интервала идентификации значения  $Y_d, Y_q$ , полученные в соответствии с (13), быстро стремятся к истинным значениям параметров поля. Кроме того, в связи с наличием в предлагаемом алгоритме операций интегрирования по времени, увеличение длины  $[t_0, t_1]$  снижает влияние шумов в каналах измерений параметров процесса на точность идентификации.

На рис. 1 приведена схема идентификации параметров поля и модель системы управления, подавляющей пульсации момента. В модели системы управления использован контроллер векторного управления двигателем с пропорционально-дифференциальными регуляторами в контурах тока. При этом задания на токи в координатах  $(d, q)$  определяются соотношениями

$$I_{d\_ref} = 0; \quad I_{q\_ref} = \frac{M_{ref}}{\Psi_q(\theta)}, \quad (14)$$

где  $\Psi_q(\theta)$  определяется из уравнений (9), а  $M_{ref}$  – задание на момент. На рис. 2, a, b приведены результаты моделирования, отражающие скорость сходимости к истинным значениям оценок параметров  $\Psi_{d0}, \Psi_{d6}, \Psi_{d12}$  и  $\Psi_{q6}, \Psi_{q12}$ .

**Заключение.** Предложенный метод идентификации параметров позволил разработать быстродействующую адаптивную схему подавления пульсаций момента синхронного двигателя с постоянными магнитами. Моделирование подтвердило высокую скорость сходимости искомых параметров

поля к их истинным значениям и высокую эффективность системы подавления пульсаций момента двигателя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Holz J., Springob L.** Identification and compensation of torque ripple in high-precision permanent magnet motor drives // IEEE Trans. on Industrial Electron. 1996. **43**, N 2. P. 309.
2. **Hung J. Y., Ding Z.** Design of currents to reduce torque ripple in brushless dc motors // IEE Proc. Pt. B: Electric Power Appl. 1993. **140**, N 4. P. 260.
3. **Bogosyan S. O., Gokasan M.** Adaptive torque ripple minimization of permanent magnet synchronous motors for direct drive applications // Proc. of the IEEE IAS Annual Meeting. Orlando, FL, 1995. Vol. 1. Pt. 1. P. 231.
4. **Petrović V., Ortega R., Stanković A. M., Tadmor G.** Design and implementation of an adaptive controller for torque ripple minimization in PM synchronous motors // IEEE Trans. Power Electron. 2000. **15**, N 5. P. 871.
5. **Nesterov A. A., Zolotukhin Yu. N.** Method of PMSM field parameters identification in torque ripples suppression system // Proc. of the IASTED Intern. Conf. "Automation, Control, and Information Technology" (ACIT 2005). Anaheim – Calgary – Zurich: ACTA Press, 2005. P. 439.
6. **Park R. H.** Two-reaction theory of synchronous machines – generalized methods of analysis. Pt. I // AIEE Trans. 1929. **48**. P. 716.

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
E-mail: zol@idisys.iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию  
18 января 2006 г.*