

Д. Н. Базылев¹, аспирант, инженер, bazylevd@mail.ru,
А. А. Бобцов^{1,2}, д-р техн. наук, декан, зав. кафедрой, проф., bobtsov@mail.ru,
А. А. Пыркин¹, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., доц., a.pyrkin@gmail.com,
М. С. Чежин¹, канд. техн. наук, доц., msch@cde.ifmo.ru,

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург,

²Институт проблем машиностроения, г. Санкт-Петербург

Алгоритмы идентификации параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами*

Предлагаются четыре алгоритма построения адаптивных наблюдателей для оценки сопротивления и индуктивности обмоток статора неявнополюсного синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ). Допущено, что токи и напряжения обмоток статора измеримы, но производные токов, момент инерции двигателя, коэффициент вязкого трения, общий магнитный поток и поток от постоянных магнитов ротора являются неизвестными величинами. Разработанные наблюдатели могут быть использованы для векторного управления СДПМ на основе бессенсорных подходов.

Ключевые слова: синхронный двигатель, адаптивный наблюдатель, сопротивление и индуктивность статора, бессенсорное управление

Введение

Применение синхронных двигателей с постоянными магнитами в различных технических системах обуславливается преимуществами приводов данного типа: большой мощностью и полезной нагрузкой, сохранением постоянной скорости вращения при ударных нагрузках и колебаниях напряжения питания, быстроедействие, высоким КПД и т. д. Подобные двигатели используются в составе шарниров роботов, в станках с ЧПУ, приводах антенно-фидерных устройств, кранах, лифтах и др. Для достижения большей топливной эффективности гидравлические приводы в транспортных средствах и самолетах заменяют на синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) [1]. Благодаря развитию цифровой техники и силовой электроники, а также в связи с тем, что в последнее время стоимость производства постоянных магнитов снизилась, СДПМ находят широкое применение в бытовой технике — в производстве холодильников, кондиционеров, пылесосов, стиральных машин и т. д. Также двигатели такого типа используются в электрических автомобилях, безредукторных мотор-колесах и судах.

*Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01). Работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0031).

Для векторного управления СДПМ требуется информация о положении угла ротора и знание параметров электродвигателя. Однако в связи с конструктивными особенностями в ряде устройств (вакуумных насосах, кранах, лифтах) установка датчиков положения ротора затруднительна. Для технических приложений массового производства (в вентиляторах, пылесосах, стиральных машинах) использование алгоритмов оценивания положения и скорости двигателя вместо измерительного оборудования может снизить себестоимость продукции и расширить рынок сбыта. В связи с этим в последнее время были предложены различные бессенсорные алгоритмы управления СДПМ, при которых предполагается отсутствие датчика положения ротора [2].

Как правило, для оценки скорости вращения двигателя используется недорогой и компактный по сравнению с аналогами датчик Холла. Однако данный тип сенсоров позволяет получать приемлемые оценки скорости ротора на относительно невысоких скоростях (до 300...400 мин⁻¹). С ростом скорости погрешность оценивания датчиком Холла существенно возрастает и точность отработки регулятором заданной скорости снижается. Поэтому для определения скорости на средних и высоких скоростях используются бессенсорные алгоритмы оценивания [3—10]. При этом для синтеза наблюдателей скорости требуется знание значений токов и напряжений обмоток статора, а также различных

параметров СДПМ: сопротивления и индуктивности обмоток статора, магнитного потока от постоянных магнитов и др.

Действительные значения параметров электродвигателей нередко неизвестны или существенно отличаются от данных, указанных в паспорте устройства, а также в справочной и технической документации [1, 2]. Отличие реальных параметров от заявленных производителем связано, в первую очередь, с технологическим процессом изготовления. Вместе с тем, параметры СДПМ изменяются в процессе функционирования в результате нагрева, механического износа, а также воздействий со стороны окружающей среды. В бессенсорных алгоритмах управления СДПМ использование значений параметров, отличных от действительных, может значительно снизить качество функционирования всей технической системы.

В связи с этим возникает необходимость разработки таких адаптивных алгоритмов идентификации параметров СДПМ [11–15], которые могут быть использованы для бессенсорного управления двигателем, т. е. таких алгоритмов, для которых не требуется знания углового положения и скорости ротора. В этом случае ошибки измерения положения ротора не скажутся на качестве идентификации параметров.

В работах [3, 4] был предложен адаптивный наблюдатель магнитного потока СДПМ, обеспечивающий глобальную ограниченность всех сигналов, а также экспоненциальную сходимость к нулю ошибки между потоком и его оценкой, вырабатываемой адаптивным наблюдателем. При этом положение и скорость ротора оценивались исходя из оценок магнитного потока. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования показали, что предложенный способ превосходит другие современные бессенсорные алгоритмы оценивания с точки зрения робастности и скорости сходимости.

Для синтеза адаптивного наблюдателя магнитного потока [4] требуется знание только токов и напряжений, а также сопротивления и индуктивности обмоток статора СДПМ. Все остальные параметры и переменные могут быть неизвестными. Целью настоящей работы является развитие результатов, предложенных в работе [4], а именно, разработка алгоритмов идентификации сопротивления и индуктивности обмоток статора. При этом допускается, что на низких скоростях управление двигателем осуществляется с помощью оценок положения и скорости, полученных с использованием датчика Холла. На более высоких скоростях функционирует бессенсорный алгоритм управления с применением адаптивного наблюдателя потока [4].

Постановка задачи

Рассмотрим классическую двухфазную модель ненасыщенного СДПМ с неявнополюсным ротором в координатах статора [1]:

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = v - Ri; \\ j\dot{\omega} = -k_f\omega + \tau_e - \tau_L; \\ \dot{\theta} = \omega, \end{cases} \quad (1)$$

где $\lambda = [\lambda_1 \lambda_2]^T$ — вектор неизвестного магнитного потока; $i = [i_1 i_2]^T$ и $v = [v_1 v_2]^T$ — соответственно измеряемые векторы тока и напряжения в обмотках статора; R — сопротивление обмоток статора; j — момент инерции ротора; k_f — коэффициент вязкого трения; τ_e — электромагнитный момент, развиваемый двигателем; τ_L — нагрузочный момент; θ и ω — угловое положение и скорость ротора соответственно.

Поскольку ротор СДПМ является неявнополюсным и постоянные магниты расположены на поверхности ротора, то общий магнитный поток в двигателе удовлетворяет уравнению

$$\lambda = Li + \lambda_m C(\theta), \quad (2)$$

где L — индуктивность обмоток статора; $C(\theta) = [\cos(n_p\theta) \sin(n_p\theta)]^T$ — вектор, содержащий неизменяемые гармоники; n_p — число пар полюсов; λ_m — магнитный поток от постоянных магнитов ротора.

Будем считать, что токи и напряжения обмоток статора измеримы, а производные токов, общий магнитный поток, магнитный поток от постоянных магнитов ротора, момент инерции двигателя и коэффициент вязкого трения являются неизвестными величинами. Ставится задача оценить значения сопротивления R и индуктивности L обмоток статора СДПМ при малых угловых скоростях ротора в целях использования полученных оценок для адаптивного наблюдателя потока [4].

Идентификация параметров статора синхронного двигателя

Продифференцируем соотношение (2):

$$\dot{\lambda} = L \frac{d}{dt} i + \lambda_m n_p \omega \begin{bmatrix} -\sin(n_p\theta) \\ \cos(n_p\theta) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Так как скорость ротора мала ($\omega \approx 0$), то в соотношении (3) можно пренебречь слагаемым, умноженным на ω , и записать (3) в виде

$$\dot{\lambda} = L \frac{d}{dt} i. \quad (4)$$

Заметим, что переход от уравнения (3) к виду (4) справедлив при ненулевых нагрузочном моменте и/или моменте трения.

Приравняем правые части уравнения (4) и первого уравнения системы (1):

$$\mathbf{v} - R\mathbf{i} = L \frac{d}{dt} \mathbf{i}. \quad (5)$$

Поскольку производные токов являются недоступными для измерения, используем линейную фильтрацию сигналов в правой и левой частях уравнения (5). Введем в рассмотрение линейный фильтр $F(p) = \frac{\alpha}{p + \alpha}$ с параметром $\alpha > 0$.

Нетрудно показать, что если $x(t)$ — дифференцируемый сигнал, то справедливо следующее равенство:

$$\frac{\alpha}{p + \alpha} [\dot{x}(t)] = \frac{\alpha p}{p + \alpha} [x(t)] + \varepsilon_x(t), \quad (6)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования; $\varepsilon_x(t)$ — экспоненциально затухающий сигнал; $\alpha > 0$ — параметр фильтрации.

Применим фильтры $F(p)$ к сигналам левой и правой частей уравнения (5), принимая во внимание соотношение (6):

$$-R \frac{\alpha}{p + \alpha} \mathbf{i} + \frac{\alpha}{p + \alpha} \mathbf{v} = L \frac{\alpha p}{p + \alpha} \mathbf{i} + \varepsilon_i(t). \quad (7)$$

Пренебрежем в соотношении (7) экспоненциально затухающим сигналом $\varepsilon_i(t)$ и введем новые обозначения $\xi_1 = \left[\frac{\alpha}{p + \alpha} \right] \mathbf{i}$ и $\xi_2 = \left[\frac{\alpha}{p + \alpha} \right] \mathbf{v}$. Тогда

уравнение (7) примет вид

$$-R\xi_1 + \xi_2 = L\dot{\xi}_1, \quad (8)$$

где ξ_1 , ξ_2 и $\dot{\xi}_1$ — измеримые сигналы.

Адаптивный наблюдатель сопротивления обмоток статора при известной индуктивности. В случае если индуктивность L обмоток статора СДПМ известна, то соотношение (8) принимает вид стандартной регрессионной модели относительно неизвестного параметра R :

$$R\xi_1 = \xi_2 - L\dot{\xi}_1. \quad (9)$$

Для идентификации сопротивления статора воспользуемся следующей типовой процедурой [16]:

$$\hat{R} = \gamma_1 \xi_1 (\xi_2 - L\dot{\xi}_1 - \hat{R}\xi_1), \quad (10)$$

где $\hat{R}$ — оценка R ; $\gamma_1 > 0$ — настраиваемый параметр.

Адаптивный наблюдатель индуктивности обмоток статора при известном сопротивлении. Если величина R известна, то соотношение (8) принимает вид стандартной регрессионной модели относительно неизвестной индуктивности статора СДПМ:

$$L\dot{\xi}_1 = \xi_2 - R\xi_1. \quad (11)$$

Сконструируем адаптивный наблюдатель индуктивности тем же способом, что и (10):

$$\hat{L} = \gamma_2 \dot{\xi}_1 (\xi_2 - R\xi_1 - \hat{L}\dot{\xi}_1), \quad (12)$$

где $\hat{L}$ — оценка L ; $\gamma_2 > 0$ — настраиваемый параметр.

Адаптивные наблюдатели сопротивления и индуктивности обмоток статора при неизвестных параметрах. Получим оценки сопротивления и индуктивности статора для случая, когда обе эти величины неизвестны. Представим матричное уравнение (8) в развернутой форме:

$$\begin{cases} -R\xi_{11} + \xi_{21} = L\dot{\xi}_{11}; \\ -R\xi_{12} + \xi_{22} = L\dot{\xi}_{12}. \end{cases} \quad (13)$$

Для идентификации сопротивления R обмоток статора СДПМ умножим обе части первого уравнения системы (13) на $\dot{\xi}_{12}$, второго — на $\dot{\xi}_{11}$, а затем вычтем преобразованное второе уравнение из первого. В результате получим стандартную регрессионную модель

$$R(\dot{\xi}_{11}\xi_{12} - \dot{\xi}_{12}\xi_{11}) = \xi_{22}\dot{\xi}_{11} - \xi_{21}\dot{\xi}_{12}. \quad (14)$$

Аналогично соотношению (12) воспользуемся методом градиентного спуска:

$$\begin{aligned} \hat{R} &= \gamma_3 (\dot{\xi}_{11}\xi_{12} - \dot{\xi}_{12}\xi_{11}) \times \\ &\times (\xi_{22}\dot{\xi}_{11} - \xi_{21}\dot{\xi}_{12} - \hat{R}(\dot{\xi}_{11}\xi_{12} - \dot{\xi}_{12}\xi_{11})), \end{aligned} \quad (15)$$

где $\gamma_3 > 0$ — настраиваемый параметр.

Для получения оценки L умножим обе части первого уравнения системы (13) на ξ_{12} , второго — на ξ_{11} , а затем вычтем преобразованное второе уравнение из первого:

$$L(\dot{\xi}_{11}\xi_{12} - \dot{\xi}_{12}\xi_{11}) = \xi_{21}\xi_{12} - \xi_{22}\xi_{11}. \quad (16)$$

Тогда адаптивный наблюдатель индуктивности может быть сконструирован в виде

$$\begin{aligned} \hat{L} &= \gamma_4 (\dot{\xi}_{11}\xi_{12} - \dot{\xi}_{12}\xi_{11}) \times \\ &\times (\xi_{21}\xi_{12} - \xi_{22}\xi_{11} - \hat{L}(\dot{\xi}_{11}\xi_{12} - \dot{\xi}_{12}\xi_{11})), \end{aligned} \quad (17)$$

где $\gamma_4 > 0$ — настраиваемый параметр.

Результаты моделирования

В данном разделе представлены результаты численного моделирования предложенных способов адаптивного оценивания сопротивления и индуктивности статора СДПМ.

При моделировании были использованы параметры двигателя ВМР0701F из работы [17], приведенные ниже:

Индуктивность L , мГн.	40,03
Сопротивление R , Ом	8,875
Момент инерции ротора J , кг·м ²	60·10 ⁻⁶
Число пар полюсов n_p , шт.	5
Постоянный магнитный поток λ_m , Вб	0,2086
Максимальный ток I , А.	2,3

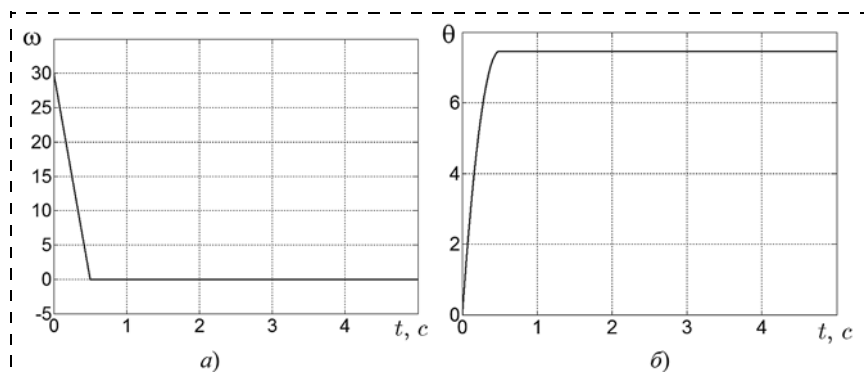


Рис. 1. Графики желаемой угловой скорости (а) и углового положения (б) ротора

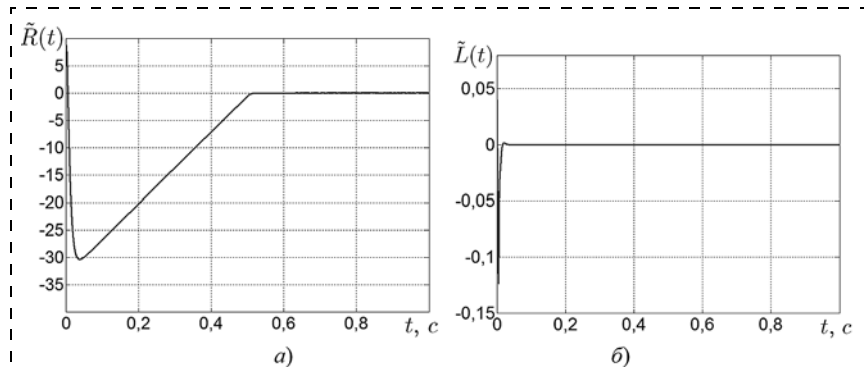


Рис. 2. Графики переходных процессов при $\alpha = 200$, $\gamma_1 = 200$, $\gamma_2 = 0,5$, $\tau_L = 1$ Н·м: ошибка оценивания R (а) адаптивного наблюдателя (10) и ошибка оценивания L (б) адаптивного наблюдателя (12)

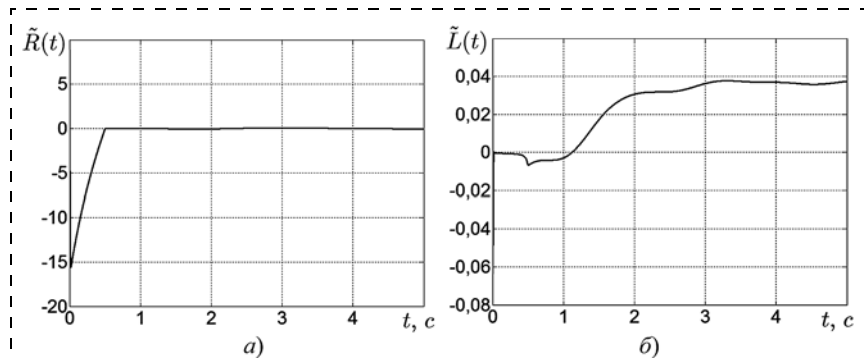


Рис. 3. Графики переходных процессов при $\alpha = 200$, $\gamma_1 = 200$, $\gamma_2 = 0,5$, $\tau_L = 2 + \sin(2t)$ Н·м: ошибка оценивания R (а) адаптивного наблюдателя (10) и ошибка оценивания L (б) адаптивного наблюдателя (12)

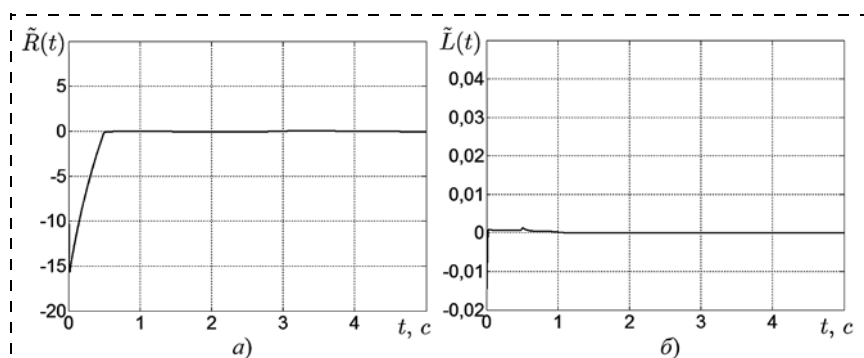


Рис. 4. Графики переходных процессов при $\alpha = 200$, $\gamma_3 = 4$, $\gamma_4 = 4$, $\tau_L = 2 + \sin(2t)$ Н·м: ошибка оценивания R (а) адаптивного наблюдателя (15) и ошибка оценивания L (б) адаптивного наблюдателя (17)

Управление двигателем на низких скоростях осуществляется на основе оценок положения и скорости ротора, полученных с помощью датчика Холла. Следует отметить, что при нулевых значениях угловой скорости ω и нагрузочного момента τ_L идентификация величин R и L невозможна, поскольку в этом случае значения токов и напряжений на обмотках статора равны нулю, в результате чего происходит обнуление функций в регрессионных моделях (9), (11), (14) и (16). Поэтому синхронному двигателю была задана желаемая скорость (рис. 1), имитирующая начальный толчок вала ротора, для оценки параметров статора (рис. 2—4). Также к двигателю был приложен нагрузочный момент τ_L с целью обеспечить изменение токов и напряжений обмоток статора при скоростях вращения ротора, близких к нулю.

При $\tau_L = \text{const}$, $\omega = 0$ токи и напряжения статора постоянны, а их производные равны нулю. Оценивание с помощью адаптивных наблюдателей (10) и (12) дает хороший результат (см. рис. 2). Однако идентификация параметров статора по формулам (15) и (17) неэффективна, так как функции ξ_{11} и ξ_{12} регрессора близки к нулю. Чтобы обеспечить ненулевое значение функций в регрессионных моделях (14) и (16), требуется изменяющийся нагрузочный момент или переменное возмущающее воздействие.

На рис. 3 и 4 показаны результаты моделирования при $\tau_L = 2 + \sin(2t)$. Из графиков переходных процессов следует, что при изменяющемся нагрузочном моменте использование наблюдателя индуктивности (17) более эффективно, чем использование наблюдателя (12). В то же время оба адаптивных наблюдателя (10) и (15) позволяют получить высокую точность идентификации сопротивления статора.

Заключение

Рассмотрена задача идентификации параметров фазных обмоток статора синхронного двигателя с постоянными магнитами. При синтезе адаптивных наблюдателей сопротивления и индуктивности об-

моток статора была использована линейная фильтрация известных сигналов. В результате с помощью математических преобразований задача была сведена к идентификации неизвестных параметров на основе стандартной регрессионной модели. Было допущено, что измеряемыми сигналами являются токи и напряжения статора, а производные токов, общий магнитный поток и поток от постоянных магнитов ротора являются неизвестными. Для каждого наблюдателя сформулированы требования к внешней нагрузке, позволяющие успешно проводить идентификацию параметров статора СДПМ. Результаты моделирования демонстрируют эффективность предложенных алгоритмов оценивания.

Разработанные адаптивные наблюдатели могут быть применены для случая, когда управление двигателем на низких скоростях осуществляется с помощью датчика Холла, а на более высоких скоростях применяются бессенсорные технологии управления. Отличительная особенность предложенных алгоритмов оценивания заключается в том, что идентификация параметров обмоток статора может происходить в рабочем режиме СДПМ. Полученные в работе результаты могут служить основой при построении устройств оценки параметров других электромеханических объектов и систем управления, использующих бессенсорные технологии.

Список литературы

1. **Nam K. H.** AC Motor Control and Electric Vehicle Applications. CRC Press, 2010, 449 p.
2. **Acarnley P. P., Watson J. F.** Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines, IEEE Trans. on Ind. Electron., April 2006, vol. 53, no. 2, pp. 352–362.
3. **Бобцов А. А., Пыркин А. А., Ортега Р.** Адаптивный наблюдатель магнитного потока для синхронного двигателя с постоянными магнитами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 40–45.
4. **Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Ortega R., Vukosavic S. N., Stankovic A. M., Panteley E. V.** A Robust Globally Convergent Position Observer for the Permanent Magnet Synchronous Motor, Automatica, Nov. 2015, vol. 61, pp. 47–54.

5. **Ortega R., Shah D., Espinosa G., Hilaliret M.** Sensorless speed control of non-salient permanent magnet synchronous motors. Int. J. on Robust and Nonlinear Control, 2014, vol. 24, pp. 644–668.
6. **Tomei P., Verrelli C.** Observer-based speed tracking control for sensorless permanent magnet synchronous motors with unknown torque. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, vol. 56, no. 6, pp. 1484–1488.
7. **Dib W., Ortega R., Malaize J.** Sensorless control of permanent-magnet synchronous motor in automotive applications: Estimation of the angular position. In IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2011, pp. 728–733.
8. **Lee J., Nam K., Ortega R., Praly L., Astolfi A.** Sensorless control incorporating a nonlinear observer for surface-mount permanent magnet synchronous motors. IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 25, no. 2, pp. 290–297, 2010.
9. **Ortega R., Nam K., Praly L., Astolfi A., Hong J., Lee J.** Sensorless control method and system for SPMSM using nonlinear observer. Korean Patent N 10-1091970, 2009.
10. **Ortega R., Praly L., Astolfi A., Lee J., Nam K. H.** Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability. Control Systems Technology, IEEE Trans., 2011, vol. 19, no. 3, pp. 601–614.
11. **Ichikawa S., Tomita M., Doki S., Okuma S.** Sensorless control of permanent magnet synchronous motors using online parameter identification based on system identification theory. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, vol. 53, no. 2, pp. 363–372. doi: 10.1109/TIE.2006.870875.
12. **Piippo A., Hinkkanen M., Luomi J.** Adaptation of motor parameters in sensorless PMSM drives. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 203–212. doi: 10.1109/TIA.2008.2009614.
13. **Кибартене Ю. В.** Синхронный электродвигатель с неподвижным ротором как объект идентификации электрических параметров // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 4, с. 82–84.
14. **Hinkkanen M., Tuovinen T., Harnefors L., Luomi J.** A combined position and stator-resistance observer for salient PMSM drives: Design and stability analysis, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 27, no. 2, pp. 601–609.
15. **Kisck D., Chanag J., Kang D., Kim J., Anghel D.** Parameter identification of permanent-magnet synchronous motors for sensorless control, Rev. Roum. Sci. Techn.—E'lectrotechn. et E'nerg, vol. 55 no. 2, pp. 132–142, 2010.
16. **Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
17. **Schneider Electric.** BMP Synchronous motor, Motor manual, V1.00, 12.2012, 2012.

Parameter Identification Algorithms for the Synchronous Motors with Permanent Magnets

D. N. Bazylev¹, bazylevd@mail.ru✉, **A. A. Bobtsov**^{1, 2}, bobtsov@mail.ru, **A. A. Pyrkin**¹, a.pyrkin@gmail.com, **M. S. Chezhin**¹, msch@cde.ifmo.ru,

¹St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, 197101, Russian Federation,

²Institute for Problems of Mechanical Engineering, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: Bazylev Dmitry N., Postgraduate Student, Engineer, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, 197101, Russian Federation, e-mail: bazylevd@mail.ru

Received on December 08, 2015

Accepted on December 18, 2015

Sensorless technologies for the field-oriented control of the permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are being actively developed today. Recently, a robust, nonlinear and globally convergent position observer for the surface-mount permanent magnet synchronous motor (SPMSM) has been proposed in [4]. The key feature of the robust observer is estimation of the rotor position requiring only the knowledge of the stator currents, voltages, resistance and inductance. However, the resistance and inductance of the stator may change during operation as a result of overheating, mechanical wear and environmental impacts. Thus, the aim of this study is to develop adaptive algorithms for the stator windings' parameters, which can be used for this position observer improvement. In this paper the authors propose four adaptive observers for estimation of the resistance and inductance at low motor speeds. It is assumed, that only currents and voltages of the stator windings are known. The other state variables and parameters of PMSM are unknown. The main idea of the synthesis of identification algorithms is linear filtering, which allows us to eliminate the unknown terms obtained by the mathematical transformations. Requirements to the external load, which ensure successful identification of the PMSM stator parameters, are given for each observer. The proposed adaptive observers for the stator resistance and inductance can be applied in case, when at low speeds, the field-oriented control of PMSM is carried out by means of Hall sensor, while at higher speeds, the sensorless control algorithms are used. A distinctive feature of the proposed estimation algorithms is that the resistance and inductance identification can be implemented during PMSM operation.

Keywords: synchronous motor, adaptive observer, resistance and inductance of the stator, sensorless control

Acknowledgements: This article is supported by Government of Russian Federation (grant 074-U01, GOSZADANIE 2014/190 (project 2118)), the Ministry of Education and Science of Russian Federation (project 14.Z50.31.0031).

For citation:

Bazylev D. N., Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Chezhin M. S. Parameter Identification Algorithms for the Synchronous Motors with Permanent Magnets, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 193–198.

DOI: 10.17587/mau/17.193-198

References

1. **Nam K. H.** AC Motor Control and Electric Vehicle Applications, CRC Press, 2010, 449 p.
2. **Acarney P. P., Watson J. F.** Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines, *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, April 2006, vol. 53, no. 2, pp. 352–362.
3. **Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Ortega R.** Adaptivnyj nabljudatel' magnitnogo potoka dlja sinhronnogo dvigatelja s postojannymi magnitami (Adaptive flux observer for permanent magnet synchronous motors. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics), *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 40–45 (in Russian).
4. **Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Ortega R., Vukosavic S. N., Stankovic A. M., Panteley E. V.** A Robust Globally Convergent Position Observer for the Permanent Magnet Synchronous Motor, *Automatica*, 2015, vol. 61, pp. 47–54.
5. **Ortega R., Shah D., Espinosa G., Hilaliret M.** Sensorless speed control of non-salient permanent magnet synchronous motors, *Int. J. on Robust and Nonlinear Control*, 2014, vol. 24, pp. 644–668.
6. **Tomei P., Verrelli C.** Observer-based speed tracking control for sensorless permanent magnet synchronous motors with unknown torque, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, vol. 56, no. 6, pp. 1484–1488.
7. **Dib W., Ortega R., Malaize J.** Sensorless control of permanent-magnet synchronous motor in automotive applications: Estimation of the angular position, *In IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2011, pp. 728–733.
8. **Lee J., Nam K., Ortega R., Praly L., Astolfi A.** Sensorless control incorporating a nonlinear observer for surface-mount permanent magnet synchronous motors, *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 25, no. 2, pp. 290–297, 2010.
9. **Ortega R., Nam K., Praly L., Astolfi A., Hong J., Lee J.** Sensorless control method and system for SPMSM using nonlinear observer. Korean Patent N 10-1091970, 2009.
10. **Ortega R., Praly L., Astolfi A., Lee J., Nam K. H.** Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability, *Control Systems Technology, IEEE Trans.*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 601–614.
11. **Ichikawa S., Tomita M., Doki S., Okuma S.** Sensorless control of permanent magnet synchronous motors using online parameter identification based on system identification theory, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, vol. 53, no. 2, pp. 363–372. doi: 10.1109/TIE.2006.870875.
12. **Piippo A., Hinkkanen M., Luomi J.** Adaptation of motor parameters in sensorless PMSM drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 203–212. doi: 10.1109/TIA.2008.2009614.
13. **Kibartene Ju. V.** Sinhronnyj elektrodvigatel' s nepodvizhnym rotorom kak ob'ekt identifikacii elektricheskikh parametrov (Synchronous motor with fixed rotor as an object of identification of electrical parameters. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University), *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 82–84 (in Russian).
14. **Hinkkanen M., Tuovinen T., Harnefors L., Luomi J.** A combined position and stator-resistance observer for salient PMSM drives: Design and stability analysis, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 27, no. 2, pp. 601–609.
15. **Kisck D., Chanag J., Kang D., Kim J., Anghel D.** Anghel, Parameter identification of permanent-magnet synchronous motors for sensorless control, *Rev. Roum. Sci. Techn.—Electrotechn. et E'nerg*, vol. 55 no. 2, pp. 132–142, 2010.
16. **Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L.** Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami (Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems. Saint Petersburg: Science), SPb., Nauka, 2000, 549 p. (in Russian).
17. **Schneider Electric.** BMP Synchronous motor, *Motor manual*, V1.00, 12.2012, 2012.