

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF PAPERS

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1242-1246

УДК 681.51.015

Оценивание параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами

Антон Александрович Пыркин¹✉, Алексей Алексеевич Ведяков²,
Антон Кириллович Голубев³

^{1,2,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ pyrkin@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8806-4057>

² vedyakov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4336-1220>

³ akgolubev@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6951-2799>

Аннотация

Рассмотрена задача оценивания параметров неявнополюсного синхронного двигателя с поверхностно установленными постоянными магнитами. Предложена параметризация нелинейной модели двигателя, позволяющая получить регрессионное соотношение с использованием измеренных (вычисленных) значений силы тока и напряжения в обмотках статора и углового положения ротора. С помощью метода динамического расширения и смешивания регрессора синтезирован алгоритм оценивания искомых параметров за конечное время.

Ключевые слова

синхронный двигатель с постоянными магнитами, динамическая параметризация модели, оценивание параметров

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-11-2023-015 от 10.02.2023, «Создание высокотехнологичного серийного производства энергоэффективных синхронных электродвигателей со встроенным интеллектуальным датчиком положения и функциями самодиагностики для робототехники и цифровых систем автоматизации».

Ссылка для цитирования: Пыркин А.А., Ведяков А.А., Голубев А.К. Оценивание параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 6. С. 1242–1246. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1242-1246

Parameter estimation of permanent magnet synchronous motor

Anton A. Pyrkin¹✉, Alexey A. Vedyakov², Anton K. Golubev³

^{1,2,3} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ pyrkin@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8806-4057>

² vedyakov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4336-1220>

³ akgolubev@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6951-2799>

Abstract

The problem of estimating the parameters of non-salient synchronous motor with surface-mounted permanent magnets is considered. A parameterization of a nonlinear motor model is proposed, which allows obtaining a linear regressor equation using measured (estimated) values of current and voltage in the stator windings and the angular rotor position. Using the method of dynamic regressor extension and mixing, an algorithm for estimating the desired parameters in finite time is designed.

Keywords

synchronous motor with permanent magnets, dynamic parameterization of the model, parameter estimation

Acknowledgements

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-11-2023-015, 10.02.2023, “Creation of high-tech serial production of energy-efficient synchronous electric motors with integrated intelligent position sensor and self-diagnosis functions for robotics and digital automation systems”.

© Пыркин А.А., Ведяков А.А., Голубев А.К., 2023

For citation: Pyrkin A.A., Vedyakov A.A., Golubev A.K. Parameter estimation of permanent magnet synchronous motor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 6, pp. 1242–1246 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1242-1246

Широкое распространение синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) в авиационной технике, автомобильном машиностроении, биомедицинской аппаратуре, бытовой технике, робототехнических системах, а также в промышленности, особенно в системах регулирования скорости с большим диапазоном и высоким темпом пусков, остановок и реверса [1], привело к росту исследований в области управления данными двигателями [2, 3]. Контроль за значениями параметров математической модели (сопротивление, индуктивность, момент инерции, коэффициенты сил трения) очень важен в задаче проектирования современных двигателей с встроенной интеллектуальной системой управления и режимом самодиагностики. СДПМ с повышенной надежностью и сроком работы востребованы в современных безлюдных производствах в составе роботизированных комплексов, где участие человека минимально.

Представленная работа посвящена синтезу алгоритма оценивания параметров неявнополюсного СДПМ с поверхностной установкой постоянных магнитов, обеспечивающего глобальную сходимость ошибок оценивания параметров к нулю за конечное время. Схема подключения может быть любая конвенциональная, но это необходимо учесть при переходе к модели двухфазной машины. Алгоритм основан на динамической параметризации нелинейной модели с получением линейного регрессионного соотношения, на основе которого, с использованием метода динамического расширения и смешивания регрессора, формируются оценки всех параметров двигателя.

Типовая двухфазная $\alpha\beta$ -модель, описывающая динамику исследуемого СДПМ в неподвижной системе координат, связанной со статором, имеет следующий вид [4]:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega, \\ j\dot{\omega} = -f\omega + n_p \mathbf{i}^T \mathbf{J} \boldsymbol{\lambda} - \tau_L, \\ \dot{\boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{u} - R\mathbf{i}, \\ L\dot{\mathbf{i}} = \boldsymbol{\lambda} - \lambda_m \mathbf{C}(\theta), \end{cases} \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbf{R}^2$ — потокосцепление (полный магнитный поток); $\mathbf{i} \in \mathbf{R}^2$ — сила тока в обмотках статора; $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^2$ — напряжение на обмотках статора; L и R — индуктивность и сопротивление обмоток статора; $j > 0$ — момент инерции ротора; $\theta \in [0, 2\pi]$ — угловое положение ротора; $\omega \in \mathbf{R}$ — механическая угловая скорость; f — коэффициент вязкого трения; $\tau_L \in \mathbf{R}$ — момент нагрузки; n_p — количество пар полюсов; $\lambda_m > 0$ — магнитный поток от постоянных магнитов; матрица $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ и вектор $\mathbf{C}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(n_p \theta) \\ \sin(n_p \theta) \end{bmatrix}$; здесь и далее индекс «Т» означает операцию транспонирования.

На основе выражений для потокосцепления и его производной (1) получим соотношение

$$L \frac{d\mathbf{i}}{dt} = -R\mathbf{i} - \lambda_m n_p \omega \mathbf{J} \mathbf{C}(\theta) + \mathbf{u}. \quad (2)$$

Доступными (измеряемыми или вычисленными) сигналами являются сила тока, напряжение обмоток статора и угловое положение ротора. Момент внешней нагрузки предполагается постоянным.

Выполним синтез алгоритма оценивания параметров $\boldsymbol{\eta}_1 = \text{col}(R, L, \lambda_m) \in \mathbf{R}^3$ и $\boldsymbol{\eta}_2 = \text{col}(f, j, \tau_L) \in \mathbf{R}^3$ за конечное время, при условии, что время $t_1 > 0$. Для $t \geq t_1$ получим:

$$\|\hat{\boldsymbol{\eta}}_1(t) - \boldsymbol{\eta}_1\| \leq \varepsilon_1, \|\hat{\boldsymbol{\eta}}_2(t) - \boldsymbol{\eta}_2\| \leq \varepsilon_2, \quad (3)$$

где $\hat{\boldsymbol{\eta}}_1 = \text{col}(\hat{R}, \hat{L}, \hat{\lambda}_m)$ и $\hat{\boldsymbol{\eta}}_2 = \text{col}(\hat{f}, \hat{j}, \hat{\tau}_L)$ — оценки искоемых параметров; ε_1 и ε_2 — величина, характеризующая точность оценивания, которая может быть принята равной нулю, если доступные сигналы не искажены шумами или ошибками измерений.

Вопрос оценивания достижимой точности при наличии помех измерения и ее зависимости от параметров алгоритма представляет собой отдельную задачу и в настоящей работе не рассмотрен.

На первом шаге получим регрессионную модель относительно неизвестных параметров $\boldsymbol{\eta}_1$. Применим к соотношению (2) линейный фильтр вида $\frac{1}{p + \alpha}$, при условии, что $p = \frac{d}{dt}$ и $\alpha > 0$:

$$L \frac{p}{p + \alpha} [\mathbf{i}] = -R \frac{1}{p + \alpha} [\mathbf{i}] - \lambda_m \frac{1}{p + \alpha} [n_p \omega \mathbf{J} \mathbf{C}(\theta)] + \frac{1}{p + \alpha} \mathbf{u}. \quad (4)$$

Заметим, что $n_p \omega \mathbf{J} \mathbf{C}(\theta) = \frac{d}{dt} (\mathbf{C}(\theta))$, тогда получим соотношение вида

$$\boldsymbol{\Psi}_1 = \boldsymbol{\eta}_1^T \boldsymbol{\Phi}_1, \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\eta}_1 = \text{col}(R, L, \lambda_m) \in \mathbf{R}^3$ и вычисляемые функции $\boldsymbol{\Psi}_1 \in \mathbf{R}^2$ и $\boldsymbol{\Phi}_1 \in \mathbf{R}^{3 \times 2}$

$$\boldsymbol{\Psi}_1 = \frac{1}{p + \alpha} [\mathbf{u}], \boldsymbol{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{p + \alpha} [\mathbf{i}] & \frac{p}{p + \alpha} [\mathbf{i}] & \frac{p}{p + \alpha} [\mathbf{C}(\theta)] \end{bmatrix}.$$

Выберем $k \geq 2$ различных значений параметра линейного фильтра $\alpha = \alpha_k$ в регрессионном уравнении (5), а также добавим масштабирующий коэффициент $\mu_1 > 0$, получим расширенную регрессионную модель

$$\boldsymbol{\Psi}_1(t) = \boldsymbol{\eta}_1^T \boldsymbol{\Phi}_1(t), \quad (6)$$

где $\boldsymbol{\Psi}_1(t) = \mu_1 \text{row}(\boldsymbol{\Psi}_1(t, \alpha_1), \dots, \boldsymbol{\Psi}_1(t, \alpha_k)) \in \mathbf{R}^{1 \times 2k}$, $\boldsymbol{\Phi}_1(t) = \mu_1 \text{row}(\boldsymbol{\Phi}_1(t, \alpha_1), \dots, \boldsymbol{\Phi}_1(t, \alpha_k)) \in \mathbf{R}^{3 \times 2k}$.

Умножим функции модели (6) на $\boldsymbol{\Phi}_1^T(t)$, получим

$$\Psi_1(t)\Phi_1^T(t) = \eta_1^T \Phi_1(t)\Phi_1^T(t). \quad (7)$$

Применим процедуру смешивания [5, 6], получим набор скалярных моделей:

$$\mathbf{Z}_1(t) = \Delta_1(t)\eta_1, \quad (8)$$

где $\mathbf{Z}_1^T(t) = (\Psi_1(t)\Phi_1^T(t))\text{adj}\{\Phi_1(t)\Phi_1^T(t)\} \in \mathbf{R}^3$, $\Delta_1(t) = \det\{\Phi_1(t)\Phi_1^T(t)\} \in \mathbf{R}$.

Для получения оценок параметров модели (4) за конечное время воспользуемся модифицированной версией алгоритма градиентного спуска [7, 8]:

$$\begin{aligned} \hat{\eta}_1(t) &= \frac{1}{1 - \bar{w}_1(t)}(\hat{\ell}_1(t) - \hat{\ell}_1(0)\bar{w}_1(t)), \\ \dot{\hat{\ell}}_1(t) &= \gamma_1 \Delta_1(t)(\mathbf{Z}_1(t) - \Delta_1(t)\hat{\ell}_1(t)), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\gamma > 0$ — коэффициент адаптации, а функция \bar{w}_1 равна:

$$\begin{aligned} \bar{w}_1(t) &= \begin{cases} \rho_1, & w_1(t) \geq \rho_1, \\ w_1(t), & w_1(t) < \rho_1, \end{cases} \\ \dot{w}_1(t) &= -\gamma_1 \Delta_1^2(t)w_1(t), \\ w_1(0) &= 1, \end{aligned} \quad (10)$$

с настроечным параметром $\rho_1 \in (0, 1)$. Алгоритм из выражений (9) и (10) обеспечивает глобальную сходимость ошибки оценивания к нулю в том случае, если

$$\exists t_1 > 0: \int_0^{t_1} \Delta_1^2 d\tau \geq -1/\gamma_1 \ln(\rho_1). \quad (11)$$

На втором шаге применим линейный фильтр вида $\frac{1}{(p + \beta)^2}$, где $p = \frac{d}{dt}$ и $\beta > 0$, ко второму уравнению системы (1):

$$\begin{aligned} j \frac{p^2}{(p + \beta)^2}[\theta] &= -f \frac{p}{(p + \beta)^2}[\theta] + n_p \frac{1}{(p + \beta)^2}[\mathbf{i}^T \mathbf{J} \boldsymbol{\lambda}] - \\ &- \tau_L \frac{1}{(p + \beta)^2}[1(t)], \end{aligned}$$

где $1(t)$ — функция Хевисайда.

Перепишем второе уравнение системы (1) в виде линейной регрессии

$$\Psi_2 = \eta_2^T \Phi_2, \quad (12)$$

где $\eta_2 = \text{col}(j, f, \tau_L) \in \mathbf{R}^3$; $\Psi_2 \in \mathbf{R}$ и $\Phi_2 \in \mathbf{R}^{1 \times 3}$ — функции вида:

$$\begin{aligned} \Psi_2 &= n_p \frac{1}{(p + \beta)^2}[\mathbf{i}^T \mathbf{J} \boldsymbol{\lambda}], \\ \Phi_2 &= \left[\frac{p^2}{(p + \beta)^2}[\theta] \quad \frac{p}{(p + \beta)^2}[\theta] \quad \frac{1}{(p + \beta)^2}[1(t)] \right]. \end{aligned}$$

Функция Φ_2 может быть вычислена на основе доступного сигнала угла поворота θ , а Ψ_2 зависит от недоступного сигнала потокосцепления $\boldsymbol{\lambda}$. Благодаря алгоритму состоящему из выражений (9), (10) и четвертому

уравнению системы (1) восстановим мгновенное значение потокосцепления и, пользуясь оценкой полного магнитного потока $\hat{\boldsymbol{\lambda}}$ при формировании регрессора, для регрессионного уравнения (12) с тремя различными параметрами β повторим алгоритм из выражений (7)–(10) с масштабирующим коэффициентом $\mu_2 > 0$ для получения оценок $\hat{\eta}_2$:

$$\hat{\eta}_2(t) = \frac{1}{1 - \bar{w}_2(t)}(\hat{\ell}_2(t) - \hat{\ell}_2(0)\bar{w}_2(t)),$$

$$\dot{\hat{\ell}}_2(t) = \gamma_2 \Delta_2(t)(\mathbf{Z}_2(t) - \Delta_2(t)\hat{\ell}_2(t)),$$

$$\bar{w}_2(t) = \begin{cases} \rho_2, & w_2(t) \geq \rho_2, \\ w_2(t), & w_2(t) < \rho_2, \end{cases}$$

$$\dot{w}_2(t) = -\gamma_2 \Delta_2^2(t)w_2(t), \quad w_2(0) = 1, \quad \gamma_2 > 0,$$

$$\mathbf{Z}_2^T(t) = (\Psi_2(t)\Phi_2^T(t))\text{adj}\{\Phi_2(t)\Phi_2^T(t)\},$$

$$\Delta_2(t) = \det\{\Phi_2(t)\Phi_2^T(t)\},$$

$$\Psi_2(t) = \mu_2 \text{row}(\hat{\psi}_2(t, \beta_1), \dots, \hat{\psi}_2(t, \beta_3)),$$

$$\Phi_2(t) = \mu_2 \text{row}(\phi_2(t, \beta_1), \dots, \phi_2(t, \beta_3)),$$

$$\hat{\psi}_2 = n_p \frac{1}{(p + \alpha)^2}[\mathbf{i}^T \mathbf{J} \hat{\boldsymbol{\lambda}}],$$

$$\phi_2 = \left[\frac{p^2}{(p + \beta)^2}[\theta] \quad \frac{p}{(p + \beta)^2}[\theta] \quad \frac{1}{(p + \beta)^2}[1(t)] \right],$$

$$\hat{\boldsymbol{\lambda}} = \hat{L}\mathbf{i} + \hat{\lambda}_m \mathbf{C}(\theta). \quad (13)$$

Полученный алгоритм обеспечивает глобальную сходимость ошибки оценивания к нулю при отсутствии помех измерений и выполнении цели (3) при их наличии, если

$$\exists t_2 > 0: \int_0^{t_2} \Delta_2^2 d\tau \geq -\frac{1}{\gamma_2} \ln(\rho_2), \quad \rho_2 \in (0, 1). \quad (14)$$

Для выполнения условия (11) требуется, чтобы в регрессоре ϕ_1 не было линейно зависимых компонент, и достаточно, если его компоненты не сходятся к нулю. Последнее справедливо в обычных режимах функционирования двигателя, кроме его полной остановки. Линейная зависимость может наблюдаться на практике при векторном управлении, если желаемое значение тока i_d (сила тока по продольной оси во вращающейся системе координат, связанной с ротором) будет равно нулю. В этой связи для оценивания параметров R и λ_m можно использовать подход инъекции высокочастотного сигнала [9], а именно задать желаемое значение i_d в виде гармонической функции большой частоты и малой амплитуды. Для выполнения условий (14) требуются аналогичные условия для регрессора ϕ_2 , что может быть обеспечено при непостоянном угловом ускорении. В противном случае, в зависимости от длительности переходных процессов и параметров алгоритма, условия (14) могут быть нарушены.

Отметим, что в предложенном алгоритме использован только параметр количества пар полюсов n_p , который можно считать известным, а остальные параметры

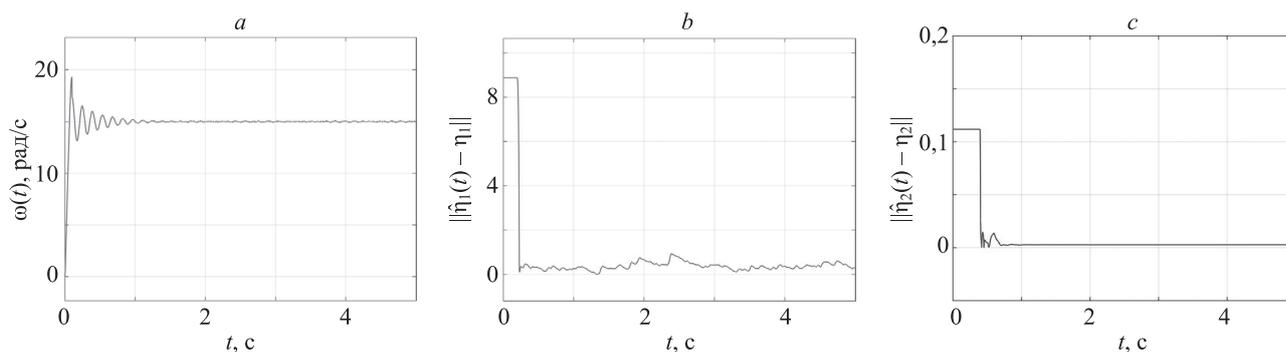


Рисунок. Угловая скорость ротора (a) и нормы ошибки оценивания параметров для $\hat{\eta}_1$ (b) и $\hat{\eta}_2$ (c)
 Figure. Rotor rotation speed (a) and norms of estimation errors for parameters $\hat{\eta}_1$ (b) and $\hat{\eta}_2$ (c)

требуют оценки. В этой связи влияние параметрических возмущений исключено. Если рассмотреть помехи измерения, то на практике для уменьшения их влияния можно использовать онлайн версию метода наименьших квадратов с аналогичной модификацией для получения сходимости за конечное время. Отметим, что используемый линейный фильтр может быть заменен на любой другой линейный оператор для лучшей фильтрации сигналов. Полученный алгоритм достаточно чувствителен к смещениям в помехах измеряемых сигналов, поэтому при их наличии можно воспользоваться подходом, предложенным в работе [10], с параметризацией и оцениванием этих смещений.

На рисунке представлены результаты численного моделирования работы двигателя ВМР0701F Schneider Electric [2], согласно модели (1), со следующими значениями параметров: $R = 8,875$ Ом, $L = 0,04003$ Гн, $n_p = 5$, $f = 0,05$ Н·м·с, $\lambda_m = 0,2086$ Вб, $j = 6 \cdot 10^{-5}$ кг·м², $\tau_L = 0,1$ Н·м. При этом алгоритм (5)–(10), (12), (13) с параметрами $\gamma_1 = \gamma_2 = 5$, $\rho = 0,9$, $\hat{\eta}_1(0) = 0$, $\hat{\eta}_2(0) = 0$, $\alpha_1 = 50$, $\alpha_2 = 100$, $\beta_1 = 50$, $\beta_2 = 75$, $\beta_3 = 100$.

Для регулирования скорости двигателя использовано векторное управление со следующими параметрами для регуляторов скорости $k_p = 0,0528$, $k_i = 23,6871$ и тока $k_p = 0,1601$, $k_i = 35,5$. Требуемая скорость, подаваемая на вход регулятора, составила 15 рад/с. Необходимое значение тока i_q (сила тока по поперечной оси, во вращающейся системе координат, связанной с

ротором) было сформировано регулятором скорости, а i_d выбрано равным $0,5\sin(50t)$. Внешний момент τ_L приложен с момента времени 0,1 с.

Дополнительно сигналы ψ_1 и ϕ_1 были пропущены через фильтр с передаточной функцией $\frac{50}{p + 50}$. Кроме того, на алгоритм оценивания сигналы подавались после завершения переходных процессов на фильтрах, принятого равным 0,2 с, что реализовано с помощью изменения масштабирующих коэффициентов: $\mu_1 = 0$ для $t \in [0; 0,2)$ с и $\mu_1 = 2000$ для $t \geq 0,2$ с, $\mu_2 = 0$ для $t \in [0; 0,4)$ с и $\mu_2 = 5000$ для $t \geq 0,4$ с.

В измерения силы тока добавлена помеха с равномерным случайным распределением $[-0,05; 0,05]$ А, а значения напряжения, поступающие на вход алгоритма, помеха с равномерным случайным распределением $[-0,1; 0,1]$ В. Важно, что напряжение, как правило, было не измерено, а вычислено, а соответствующая систематическая ошибка расчетов смоделирована подачей на алгоритм зашумленных значений напряжения, умноженных на 0,99. Сила тока после завершения переходного процесса была изменена в диапазоне $[-0,85; 0,85]$ А, а напряжение — $[-23,5; 23,5]$ В.

На рисунке видно, что предложенный алгоритм оценивания обеспечил сходимость норм векторов ошибок оценивания параметров в некоторую малую область при наличии помех измерения и систематической ошибки расчета напряжения.

Литература

1. Sakunthala S., Kiranmayi R., Mandadi P.N. A review on speed control of permanent magnet synchronous motor drive using different control techniques // Proc. of the 2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS). 2018. P. 97–102. <https://doi.org/10.1109/icpects.2018.8521574>
2. Bobtsov A.A., Pyrkina 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. V. 61. P. 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.07.032>
3. Ortega R., Monshizadeh N., Monshizadeh P., Bazylev D., Pyrkina A. Permanent magnet synchronous motors are globally asymptotically stabilizable with PI current control // Automatica. 2018. V. 98. P. 296–301. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.09.031>

References

1. Sakunthala S., Kiranmayi R., Mandadi P.N. A review on speed control of permanent magnet synchronous motor drive using different control techniques. Proc. of the 2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), 2018, pp. 97–102. <https://doi.org/10.1109/icpects.2018.8521574>
2. Bobtsov A.A., Pyrkina 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. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.07.032>
3. Ortega R., Monshizadeh N., Monshizadeh P., Bazylev D., Pyrkina A. Permanent magnet synchronous motors are globally asymptotically stabilizable with PI current control. Automatica, 2018, vol. 98, pp. 296–301. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.09.031>

4. Nam K.H. *AC Motor Control and Electric Vehicle Applications*. CRC Press, 2010. 435 p.
5. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2017. V. 62. N 7. P. 3546–3550. <https://doi.org/10.1109/tac.2016.2614889>
6. Ortega R., Aranovskiy S., Pyrkin A.A., Astolfi A., Bobtsov A.A. New results on parameter estimation via dynamic regressor extension and mixing: Continuous and discrete-time cases // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2021. V. 66. N 5. P. 2265–2272. <https://doi.org/10.1109/tac.2020.3003651>
7. Pyrkin A., Bobtsov A., Ortega R., Vedyakov A., Aranovskiy S. Adaptive state observers using dynamic regressor extension and mixing // *Systems & Control Letters*. 2019. V. 133. P. 104519. <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2019.104519>
8. Pyrkin A., Bobtsov A., Ortega R., Vedyakov A., Cherginets D., Ovcharov A., Bazylev D., Petranovsky I. Robust nonlinear observer design for permanent magnet synchronous motors // *IET Control Theory & Applications*. 2021. V. 15. N 4. P. 604–616. <https://doi.org/10.1049/cth2.12065>
9. Jang J.H., Ha J.I., Ohto M., Ide K., Sul S.K. Analysis of permanent-magnet machine for sensorless control based on high-frequency signal injection // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2004. V. 40. N 6. P. 1595–1604. <https://doi.org/10.1109/tia.2004.836222>
10. Pyrkin A.A., Vedyakov A.A., Ortega R., Bobtsov A.A. A robust adaptive flux observer for a class of electromechanical systems // *International Journal of Control*. 2020. V. 93. N 7. P. 1619–1629. <https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1521995>

Авторы

Пыркин Антон Александрович — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 26656070700](https://orcid.org/0000-0001-8806-4057), <https://orcid.org/0000-0001-8806-4057>, pyrkin@itmo.ru

Ведяков Алексей Алексеевич — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 49664023200](https://orcid.org/0000-0003-4336-1220), <https://orcid.org/0000-0003-4336-1220>, vedyakov@itmo.ru

Голубев Антон Кириллович — аспирант, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0008-6951-2799>, akgolubev@itmo.ru

Authors

Anton A. Pyrkin — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 26656070700](https://orcid.org/0000-0001-8806-4057), <https://orcid.org/0000-0001-8806-4057>, pyrkin@itmo.ru

Alexey A. Vedyakov — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 49664023200](https://orcid.org/0000-0003-4336-1220), <https://orcid.org/0000-0003-4336-1220>, vedyakov@itmo.ru

Anton K. Golubev — PhD Student, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0008-6951-2799>, akgolubev@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 29.09.2023
Одобрена после рецензирования 27.10.2023
Принята к печати 22.11.2023

Received 29.09.2023
Approved after reviewing 27.10.2023
Accepted 22.11.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»