

УДК 681.51

АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОТОКА ДЛЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

А.А. Бобцов^a, А.А. Пыркин^a, Р. Ортега^b

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия

^b Национальный центр научных исследований, 75016, Париж, Франция

Адрес для переписки: a.pyrkin@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 23.10.14, принята к печати 18.11.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-40-45

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: 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

Аннотация. Рассматривается задача синтеза адаптивного наблюдателя магнитного потока для синхронного двигателя с постоянными магнитами. Допускается, что некоторые электрические параметры, такие как сопротивление и индуктивность, являются известными постоянными числами, но сам магнитный поток, скорость вращения ротора и угол его положения не измеряются. Предлагается новый робастный подход к синтезу адаптивного наблюдателя магнитного потока, обеспечивающий глобальную ограниченность всех сигналов, а также экспоненциальную сходимость к нулю ошибки между потоком и его оценкой, вырабатываемой адаптивным наблюдателем. Задача синтеза адаптивного наблюдателя потока была решена с использованием тригонометрических свойств и линейной фильтрации, обеспечивающей парирование неизвестных членов, полученных в результате математических преобразований. Ключевая идея заключается в новом способе параметризации динамической модели магнитного потока. На первом шаге сформирована математическая модель, содержащая неизвестные параметры и зависящая от измеряемых сигналов силы тока и напряжения в обмотках двигателя. С использованием основного тригонометрического тождества найдено линейное уравнение, из которого исключены функции, зависящие от неизмеряемых величин угла и угловой скорости вращения ротора. Применяя динамические фильтры первого порядка, получена стандартная регрессионная модель, состоящая из измеряемых функций времени и неизвестных параметров. Далее построен градиентный алгоритм оценивания неизвестных параметров, гарантирующий ограниченность всех сигналов в системе. Доказано утверждение о том, что при выполнении условия исчезающего возбуждения, означающего наличие достаточного количества гармоник в регрессоре, гарантирована экспоненциальная сходимость к нулю всех ошибок оценивания неизвестных параметров. Показано, что ошибка наблюдения за магнитным потоком явно зависит от ошибок оценивания неизвестных параметров. Экспоненциальная сходимость к нулю ошибок оценивания обеспечивает экспоненциальную сходимость к нулю ошибки наблюдения за потоком. Приведен пример численного моделирования.

Ключевые слова: синхронный двигатель, магнитный поток, адаптивный наблюдатель, робастность

Благодарности. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01, Проект 14.Z50.31.0031).

ADAPTIVE FLUX OBSERVER FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

A.A. Bobtsov^a, A.A. Pyrkin^a, R. Ortega^b

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russia

^b Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 75016, France

Corresponding author: a.pyrkin@gmail.com

Article info

Received 23.10.14, accepted 18.11.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-40-45

Article in Russian

Reference for citation: Bobtsov A.A., Pyrkin A.A., Ortega R. Adaptive flux observer for permanent magnet synchronous motors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 40–45 (in Russian)

Abstract. The paper deals with the observer design problem for a flux in permanent magnet synchronous motors. It is assumed that some electrical parameters such as resistance and inductance are known numbers. But the flux, the angle and the speed of the rotor are unmeasurable. The new robust approach to design an adaptive flux observer is proposed that guarantees globally boundedness of all signals and, moreover, exponential convergence to zero of observer error between the true flux value and an estimate obtained from the adaptive observer. The problem of an adaptive flux observer design has been solved with using the trigonometrical properties and linear filtering which ensures cancellation of unknown terms arisen after mathematical calculations. The key idea is the new parameterization of the dynamical model containing unknown parameters and depending

on measurable current and voltage in the motor. By applying the Pythagorean trigonometric identity the linear equation has found that does not contain any functions depending on angle or angular velocity of the rotor. Using dynamical first-order filters the standard regression model is obtained that consists of unknown constant parameters and measurable functions of time. Then the gradient-like estimator is designed to reconstruct unknown parameters, and it guarantees boundedness of all signals in the system. The proposition is proved that if the regressor satisfies the persistent excitation condition, meaning the “frequency-rich” signal, then all errors in observer exponentially converges to zero. It is shown that observer error for the flux explicitly depends on estimator errors. Exponential convergence of parameter estimation errors to zero yields exponential convergence of the flux observer error to zero. The numerical example is considered.

Keywords: synchronous motor, flux, adaptive observer, robustness.

Acknowledgements. The work is partially financially supported by the Government of the Russian Federation (grant 074-U01, Project 14.Z50.31.0031).

Введение. Постановка задачи

В работе рассматривается новый подход к синтезу адаптивного наблюдателя магнитного потока для синхронного двигателя с постоянными магнитами в предположении, что отсутствует датчик измерения положения угла ротора. Решение данной задачи представляет большой теоретический и практический интерес, поскольку для ряда технических систем (например, вакуумные насосы, краны и лифты) установка датчиков положения вызывает существенные трудности. Также следует отметить, что использование бессенсорных технологий в других технических приложениях может быть экономически выгодным, поскольку затраты на измерительные устройства будут минимальными.

Вышеуказанные проблемы естественным образом мотивируют развитие бессенсорных алгоритмов для синхронных двигателей и представлены в многочисленных работах специалистов в области электрических машин, а также систем управления (см., например, [1–8]). В настоящей работе мы будем развивать подход, опубликованный в [7].

В [7] предложена стандартная градиентная процедура оценивания магнитного потока. Анализ, сделанный для полной нелинейной модели, гарантирует глобальную (при некоторых условиях даже экспоненциальную) сходимости оценок в ограниченную область. Показаны простые и робастные алгоритмы оценивания (см. также [9]). Для более простого анализа устойчивости и доказательства глобальной сходимости использовано свойство неисчезающего возбуждения. В [5] этот подход в задаче синтеза наблюдателя совмещен со специальным способом оценивания линейной скорости и стандартным регулятором, который часто используется в приложениях, обеспечивая удовлетворительные экспериментальные результаты. Такой наблюдатель также использован в [2, 3, 10].

В отличие от [7], в данной работе будем допускать, что значение потока от постоянного магнита неизвестно. Более того, улучшая [7], покажем, что предлагаемый в рамках настоящей работы адаптивный наблюдатель потока обеспечивает не только ограниченность всех сигналов и экспоненциальную сходимости ошибки между потоком и его оценкой в некоторую область, но и экспоненциальную сходимости ошибки к нулю.

Следуя [7], рассмотрим динамическую модель магнитного потока для синхронного двигателя следующего вида:

$$\dot{\lambda} = \mathbf{v} - R\mathbf{i}, \quad (1)$$

$$\lambda = L\mathbf{i} + \mathbf{x}, \quad (2)$$

где $\lambda = [\lambda_1 \quad \lambda_2]^T$ – вектор неизвестного магнитного потока; $\mathbf{i} = [i_1 \quad i_2]^T$ и $\mathbf{v} = [v_1 \quad v_2]^T$ – соответственно

векторы тока и напряжения в обмотках двигателя; неизвестный вектор $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \lambda_m \begin{bmatrix} \cos(n_p \theta) \\ \sin(n_p \theta) \end{bmatrix}$ содержит

неизмеряемые гармоники с неизвестным значением потока от постоянного магнита λ_m ; L и R – соответственно известные индуктивность и сопротивление. Ставится задача синтеза наблюдающего устройства вектора неизвестного магнитного потока λ , обеспечивающего глобальную ограниченность всех сигналов, а также экспоненциальную сходимости к нулю ошибки между потоком и его оценкой, вырабатываемой адаптивным наблюдателем.

Основной результат

Продифференцируем уравнение (2), тогда

$$\dot{\lambda} = L \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \dot{\mathbf{x}}. \quad (3)$$

Приравнявая (1) и (3), имеем

$$\mathbf{v} - R\mathbf{i} = L \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \dot{\mathbf{x}},$$

откуда

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v} - L \frac{d\mathbf{i}}{dt} - R\mathbf{i}. \quad (4)$$

Интегрируя (4), получаем уравнение для вектора \mathbf{x}

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(0) + \mathbf{z}_1(t) - \mathbf{z}_1(0) - L\mathbf{i}(t) + L\mathbf{i}(0) - R\mathbf{z}_2(t) + R\mathbf{z}_2(0), \quad (5)$$

где

$$\dot{\mathbf{z}}_1(t) = \mathbf{v}(t),$$

$$\dot{\mathbf{z}}_2(t) = \mathbf{i}(t).$$

Перепишем (5) следующим образом:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{q}(t) + \mathbf{f}_0, \quad (6)$$

где были использованы обозначения

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{z}_1(t) - L\mathbf{i}(t) - R\mathbf{z}_2(t), \quad (7)$$

$$\mathbf{f}_0 = \mathbf{x}(0) - \mathbf{z}_1(0) + L\mathbf{i}(0) + R\mathbf{z}_2(0). \quad (8)$$

Заметим, что в (7) и (8) вектор $\mathbf{q}(t)$ может быть рассчитан или измерен, но вектор \mathbf{f}_0 содержит неизвестные постоянные компоненты. Представим (6) в следующей форме:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{01} \\ f_{02} \end{bmatrix}.$$

Из последней системы имеем

$$x_1^2 + x_2^2 = q_1^2 + q_2^2 + f_{01}^2 + f_{02}^2 + 2(q_1 f_{01} + q_2 f_{02}),$$

$$\lambda_m^2 = q_1^2 + q_2^2 + f_{01}^2 + f_{02}^2 + 2(q_1 f_{01} + q_2 f_{02}),$$

что может быть записано в виде стандартной регрессионной модели вида

$$y = 2\mathbf{q}^T \mathbf{f}_0 + C, \quad (9)$$

где $y = -(q_1^2 + q_2^2)$ и $C = -\lambda_m^2 + f_{01}^2 + f_{02}^2$.

Для получения стандартной регрессионной модели без неизмеряемых сигналов введем в рассмотрение следующие линейные фильтры [11]:

$$\begin{cases} \dot{\chi}_1 = -\chi_1 + y, \\ \bar{y} = y - \chi_1, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{\chi}_2 = -\chi_2 + \mathbf{q}, \\ \bar{\mathbf{q}} = \mathbf{q} - \chi_2, \end{cases} \quad (11)$$

где $\chi_1 \in R$, $\chi_2 \in R^2$, $\chi_1(0) = 0$ и $\chi_2(0) = 0$.

Из (9) и (10) имеем

$$\bar{y} = y - \chi_1 = 2\mathbf{q}^T \mathbf{f}_0 + C - e^{-t} \int_0^t e^{\tau} 2\mathbf{q}^T \mathbf{f}_0 d\tau - e^{-t} \int_0^t e^{\tau} C d\tau = 2\mathbf{q}^T \mathbf{f}_0 - 2e^{-t} \int_0^t e^{\tau} \mathbf{q}^T d\tau \mathbf{f}_0 - Ce^{-t}. \quad (12)$$

Из (11) после аналогичных вычислений получаем

$$\bar{\mathbf{q}} = \mathbf{q} - \chi_2 = \mathbf{q} - e^{-t} \int_0^t e^{\tau} \mathbf{q} d\tau. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (12), получаем стандартную линейную регрессионную модель

$$\bar{y} = 2\bar{\mathbf{q}}^T \mathbf{f}_0 + Ce^{-t}, \quad (14)$$

состоящую из измеряемых функций времени \bar{y} и $\bar{\mathbf{q}}$, а также вектора неизвестных постоянных параметров \mathbf{f}_0 .

Пренебрегая затухающим слагаемым Ce^{-t} , для идентификации вектора неизвестных параметров \mathbf{f}_0 воспользуемся следующей типовой процедурой [12, 13]:

$$\hat{\mathbf{f}}_0 = \Gamma \left(\frac{1}{2} \bar{\mathbf{q}} \bar{y} - \bar{\mathbf{q}} \bar{\mathbf{q}}^T \hat{\mathbf{f}}_0 \right), \quad (15)$$

где $\hat{\mathbf{f}}_0$ – оценка \mathbf{f}_0 ; Γ – положительно определенная матрица второго порядка.

Для восстановления магнитного потока используем уравнение

$$\hat{\lambda}(t) = L\mathbf{i}(t) + \mathbf{q}(t) + \hat{\mathbf{f}}_0(t), \quad (16)$$

где $\hat{\lambda}$ – оценка λ ; $\hat{\mathbf{f}}_0$ является решением дифференциального уравнения (15).

Утверждение. Адаптивный наблюдатель магнитного потока (15), (16) гарантирует:

1. ограниченность всех сигналов в наблюдателе;
2. если регрессор $\bar{\mathbf{q}}(t)$ является «частотно богатым», то экспоненциальную сходимость к нулю ошибки наблюдения $\tilde{\lambda} = \lambda - \hat{\lambda}$.

Доказательство. Легко проверить, что алгоритм идентификации (15) обеспечивает глобальную ограниченность $\hat{\mathbf{f}}_0$, а также в случае выполнения условий незатухающего возбуждения регрессора $\bar{\mathbf{q}}$ (подробнее см., например, в [12, 13]) экспоненциальную сходимость к нулю ошибки $\tilde{\mathbf{f}}_0 = \mathbf{f}_0 - \hat{\mathbf{f}}_0$.

Рассмотрим функцию Ляпунова вида

$$V = \frac{\tilde{\mathbf{f}}_0^T \Gamma^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_0}{2}. \quad (17)$$

Из (15) и (14) имеем модель ошибки

$$\dot{\tilde{\mathbf{f}}}_0 = -\Gamma \bar{\mathbf{q}} \bar{\mathbf{q}}^T \tilde{\mathbf{f}}_0 + \frac{1}{2} C \Gamma \bar{\mathbf{q}} e^{-t}. \quad (18)$$

Дифференцируя по времени (17) с учетом (18), имеем

$$\dot{V} = -\tilde{\mathbf{f}}_0^T \bar{\mathbf{q}} \bar{\mathbf{q}}^T \tilde{\mathbf{f}}_0 + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{f}}_0^T \bar{\mathbf{q}} C e^{-t} \leq -\frac{1}{2} (\tilde{\mathbf{f}}_0^T \bar{\mathbf{q}})^2 + \frac{1}{2} C^2 e^{-2t}. \quad (19)$$

Интегрируя неравенство $\dot{V} \leq \frac{1}{2} C^2 e^{-2t}$, получим

$$V(t) \leq V(0) + \frac{1}{4} C^2 (1 - e^{-2t}) \leq V(0) + \frac{1}{4} C^2,$$

откуда следует ограниченность функции $V(t)$ и, как следствие, ошибки оценивания $\tilde{\mathbf{f}}_0$.

Из (16) нетрудно видеть соотношение для ошибки наблюдения за магнитным потоком:

$$\tilde{\lambda}(t) = \tilde{\mathbf{f}}_0(t). \quad (20)$$

Соотношение (20) говорит о том, что ошибка наблюдения за магнитным потоком определяется характером поведения функции $\tilde{\mathbf{f}}_0(t)$. Следовательно, $\tilde{\lambda}(t)$ также ограничена.

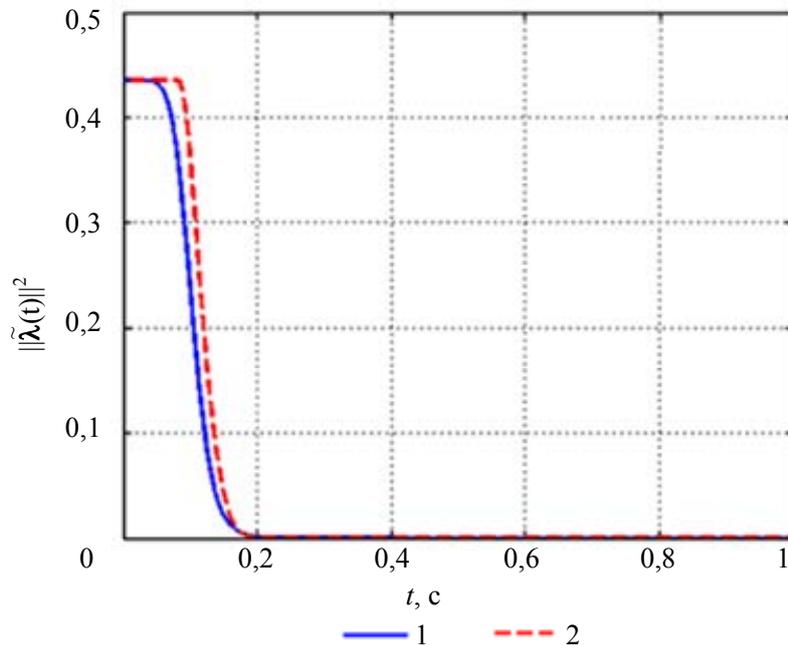


Рисунок. Переходные процессы для ошибок наблюдения по магнитному потоку $\|\tilde{\lambda}(t)\|^2 = \tilde{\lambda}_1^2 + \tilde{\lambda}_2^2$:
1 – алгоритм (16), (15), (10), (11), (7); 2 – алгоритм [7]

Если регрессор $\bar{\mathbf{q}}(t)$ удовлетворяет условию неисчезающего возбуждения, то из неравенства (19) при отсутствии экспоненциально затухающего члена можно показать экспоненциальную сходимость $\tilde{\mathbf{f}}_0(t)$ к нулю. Подробное доказательство приведено в [13, Теорема 4.3.2]. При наличии экспоненциально затухающего члена, как в (19), можно использовать то же самое доказательство, которое с учетом принципа сравнения [14, Лемма 3.4] гарантирует экспоненциальную сходимость к нулю функции $V(t)$, и, как

следствие, экспоненциальную сходимость к нулю ошибок оценивания $\tilde{\mathbf{f}}_0(t)$ и наблюдения $\tilde{\lambda}(t)$, что и требовалось доказать.

На рисунке представлены переходные процессы для нормы ошибки наблюдения за магнитным потоком. Приведено сравнение алгоритма [7] и алгоритма (16), (15), (10), (11), (7), предлагаемого в настоящей работе.

Заключение

В работе рассмотрена задача синтеза наблюдающего устройства вектора неизвестного магнитного потока для синхронного двигателя с постоянными магнитами. На базе динамической модели магнитного потока вида (1), (2) был построен адаптивный наблюдатель, включающий в свою структуру уравнение (16), а также алгоритм настройки вектора неизвестных постоянных параметров вида (15). В сравнении с [7], предлагаемый подход обладает робастными свойствами, так как обеспечивает экспоненциальную сходимость к нулю ошибки между потоком λ и его оценкой (16) при условии, что значение потока от постоянного магнита λ_m является неизвестной константой.

Развитие предлагаемых исследований видится в решении задачи синтеза адаптивного наблюдателя магнитного потока для неизвестных параметров L и R [15, 16]. Более сложной задачей является рассмотрение двигателя с неизотропным ротором (неидеальной цилиндрической формы) [17].

References

1. Acarnley P.P., Watson J.F. Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, vol. 53, no. 2, pp. 352–362. doi: 10.1109/TIE.2006.870868
2. Shah D., Espinosa-Perez G., Ortega R., Hilairet M. An asymptotically stable sensorless speed controller for non-salient permanent magnet synchronous motors. *International Journal on Robust and Nonlinear Control*, 2014, vol. 24, pp. 644–668. doi: 10.1002/rnc.2910
3. Dib W., Ortega R., Malaize J., Sensorless control of permanent-magnet synchronous motor in automotive applications: estimation of the angular position. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2011, art. 6119400, pp. 728–733. doi: 10.1109/IECON.2011.6119400
4. 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.
5. Lee J., Hong J., Nam K., Ortega R., Praly L., Astolfi A. Sensorless control of surface-mount permanent-magnet synchronous motors based on a nonlinear observer. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 290–297. doi: 10.1109/TPEL.2009.2025276
6. Nam K.H. *AC Motor Control and Electric Vehicle Applications*. CRC Press, 2010, 449 p.
7. Ortega R., Praly L., Astolfi A., Lee J., Nam K. Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 601–614.
8. Pillai H., Ortega R., Hernandez M., Devos T., Malrait F. Robustness analysis of a position observer for surface-mount permanent magnet synchronous motors vis-a-vis rotor saliency. *Proc. 9th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, NOLCOS 2013*. Toulouse, France, 2013, vol. 9, part 1, pp. 353–358. doi: 10.3182/20130904-3-FR-2041.00074
9. Malaize J., Praly L., Henwood N. Globally convergent nonlinear observer for the sensorless control of surface-mount permanent magnet synchronous machines. *Proc. 51st IEEE Conference on Decision and Control, CDC 2012*. Maui, USA, 2012, pp. 5900–5905. doi: 10.1109/CDC.2012.6426415
10. 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. doi: 10.1109/TAC.2011.2121330
11. Middleton R.H., Goodwin G.C. Adaptive computed torque control for rigid link manipulations. *Systems and Control Letters*, 1988, vol. 10, no. 1, pp. 9–16. doi: 10.1016/0167-6911(88)90033-3
12. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelineinoe i Adaptivnoe Upravlenie Slozhnymi Dinamicheskimi Sistemami* [Nonlinear and Adaptive Control of Complex Dynamic Systems]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2000, 549 p.
13. Ioannou P.A., Sun J. *Robust Adaptive Control*. Upper Saddle River, Prentice Hall, 1996, 825 p.
14. Khalil H. *Nonlinear Systems*. 3rd ed. Upper Saddle River, Prentice Hall, 2002, 750 p.
15. 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
16. 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

17. 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 Power Electronics*, 2012, vol. 27, no. 2, pp. 601–609. doi: 10.1109/TPEL.2011.2118232

- Бобцов Алексей Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, декан факультета, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, bobtsov@mail.ru
- Пыркин Антон Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Российская Федерация, a.pyrkin@gmail.com
- Ортега Ромео** – PhD, директор по исследованиям, Национальный центр научных исследований, 75016, Париж, Франция, ortega@lss.supelec.fr
- Alexei A. Bobtsov** – D.Sc., Professor, Dean, Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, bobtsov@mail.ru
- Anton A. Pyrkin** – PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, a.pyrkin@gmail.com
- Romeo Ortega** – PhD, Directeur de Recherche, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Paris, 75016, France, ortega@lss.supelec.fr