НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
январь–февраль 2021 Том 21 № 1 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
January–February 2021 Vol. 21 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
январь–февраль 2021 Том 21 Номер 1

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-130-134
УДК 681.51

Алгоритм идентификации параметров двигателей постоянного тока с использованием метода динамического расширения регрессора и смешивания

Хак Тунг Нгуен [1], Сергей Михайлович Власов[2]✉

[1,2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

[1] nguyenkhactunghvhq1994@gmail.com, http://orcid.org/0000-0001-6430-1927
[2] smvlasov@itmo.ru✉, http://orcid.org/0000-0002-8345-7553

Аннотация
Предмет исследования. Рассмотрена задача идентификации параметров различных робототехнических объектов на примере двигателя постоянного тока. Существующие методы идентификации параметров либо требуют большого количества времени для точного определения требуемых величин, либо дают оценку с большой погрешностью. Предлагается расширить области применения алгоритма идентификации с использованием метода динамического расширения регрессора и смешивания (Dynamic Regressor Extension and Mixing, DREM) для задач управления робототехническими объектами с двигателем постоянного тока. **Метод.** На первом этапе DREM осуществляется генерация новых форм регрессии с помощью динамического оператора к данным исходной регрессии. Затем выбирается требуемое сочетание новых данных для получения окончательной формы регрессии с применением стандартных методов оценки параметров. **Основные результаты.** Предложен новый алгоритм для идентификации параметров моделей двигателя постоянного тока. Показано, что при использовании нового подхода колебания в оценках параметров существенно ниже, тогда как время отклика намного меньше. При использовании градиентного метода время переходного процесса для оценки параметров сигнала составляет 350 с, в то время как для метода DREM это время не превышает 6 с. При этом в случае применения метода DREM отсутствует перерегулирование. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть применены при проектировании систем автоматического управления в задачах управления электромеханическими объектами, в составе которых есть двигатели постоянного тока.

Ключевые слова
двигатель постоянного тока, идентификация, неизвестные параметры, регрессор

Ссылка для цитирования: Хак Тунг Нгуен, Власов С.М. Алгоритм идентификации параметров двигателей постоянного тока с использованием метода динамического расширения регрессора и смешивания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 1. С. 130–134. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-130-134

Algorithm for identification of DC motor parameters by method of dynamic expansion of regressor and mixing

Khac Tung Nguyen[1], Sergey M. Vlasov[2]✉

[1,2] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

[1] nguyenkhactunghvhq1994@gmail.com, http://orcid.org/0000-0001-6430-1927
[2] smvlasov@itmo.ru✉, http://orcid.org/0000-0002-8345-7553

Abstract
Subject of Research. The paper considers the problem of identifying the parameters of various robotic objects. A DC motor is used as an example. Existing methods for identification of parameters require either a large amount of time for accurate determination of the required values or give an estimate with a large error. We propose to expand the application area of the identification algorithm by the method of Dynamic Regressor Extension and Mixing for control problems of robotic objects with a DC motor. **Method.** The first stage of Dynamic Regressor Extension and Mixing method generates new regression forms by applying a dynamic operator to the original regression data. Then, the required combination of new data is selected to obtain the final desired regression form. Standard parameter estimation methods are applied

to this procedure. **Main Results.** A new algorithm is proposed for identifying the parameters of DC motor models. It is shown that, when using the new approach, the fluctuations in parameter estimates are significantly lower, while the response time is much shorter. When using the gradient method, the transient time to estimate the signal parameters is 350 seconds, while for the Dynamic Regressor Extension and Mixing method this time does not exceed six seconds. Besides, Dynamic Regressor Extension and Mixing method has not got overshoot. **Practical Relevance.** The results of the work can be applied to the design of automatic control systems in control problems of electromechanical objects, including DC motors.

Keywords
DC motor, identification, unknown parameters, regressor

For citation: Nguyen Khac Tung, Vlasov S.M. Algorithm for identification of DC motor parameters by method of dynamic expansion of regressor and mixing. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 130–134 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-130-134

Введение

Двигатели постоянного тока находят широкое применение в промышленных системах управления, поскольку они имеют простую структуру. Для проектирования и оптимизации систем автоматического управления зачастую требуется точная модель двигателя постоянного тока, используемого в системе. Однако справочные значения параметров двигателя, указанные в технических характеристиках, предоставляемых производителем, могут не соответствовать действительности, особенно для дешевых двигателей постоянного тока, которые, как правило, имеют относительно большие допуски в электрических и механических характеристиках.

Для определения параметров двигателей постоянного тока применяются следующие методы:
- метод идентификации параметров двигателя постоянного тока с помощью роя частиц [1];
- поисковые методы [2];
- метод QR-разложения [3];
- метод алгебраической идентификации [4, 5];
- рекурсивный метод наименьших квадратов [6];
- метод обратной задачи [7];
- метод моментов [8].

Перечисленные методы широко применяются в течение многих лет, однако метод идентификации параметров имеет недостатки.

В настоящей работе предложен алгоритм онлайн-идентификации, основанный на методе динамического расширения и смешивания (Dynamic Regressor Extension and Mixing, DREM) [9], позволяющий оценивать все параметры по отдельности и обеспечивать глобальную сходимость ошибки оценки к нулю. Алгоритм является расширением DREM, с применением к задаче управления робототехническими системами с двигателями постоянного тока.

Постановка задачи

Для моделирования двигателя постоянного тока применяют подход, в котором строят линейную передаточную функцию, пренебрегая нелинейными эффектами [10, 11].

Как и большинство вращательных систем, рассматриваемая система может быть смоделирована как многомассовая система с массами, соединенными гибкими валами или пружинами [12, 13]. Модель может быть дополнительно упрощена как двухмассовая система, соединенная безмассовым или безынерционным гибким валом, где первая масса представляет двигатель постоянного тока, а вторая – общую нагрузку, которую вращает двигатель.

Рассмотрим проблему определения математической модели двигателей постоянного тока. Полученная математическая модель основана на втором законе Ньютона и законе напряжения Кирхгофа. Запишем математическую модель для динамической системы, которая связывает напряжение, приложенное к якорю, со скоростью двигателя.

На рис. 1 показана схема двигателя постоянного тока.

Обычно крутящий момент, создаваемый двигателем постоянного тока, пропорционален току якоря и силе магнитного поля. В таком случае можно предположить, что магнитное поле является постоянным и, следовательно, крутящий момент двигателя пропорционален только току якоря с постоянным коэффициентом k_t, как показано в уравнении:

$$T_m = k_t i.$$

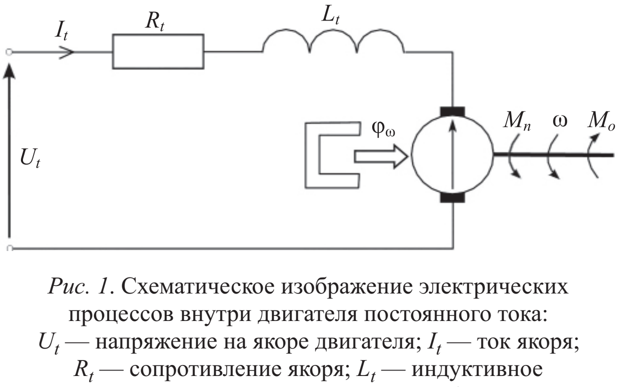

Рис. 1. Схематическое изображение электрических процессов внутри двигателя постоянного тока: U_t — напряжение на якоре двигателя; I_t — ток якоря; R_t — сопротивление якоря; L_t — индуктивное сопротивление цепи якоря; φ_ω — обратная электромагнитная сила; ω — скорость ротора; M_n — крутящий момент; M_o — момент, вызванный вязким трением

Fig. 1. Schematic image of electrical processes in the DC motor: U_t — rotor motor voltage; I_t — rotor current; R_t — rotor resistance; L_t — inductive reactance; φ_ω — reverse electromagnetic force; ω — rotor speed; M_n — torque; M_o — viscous friction torque

Обратная электромагнитная сила φ_ω, пропорциональная угловой скорости вала с постоянным коэффициентом k_b, определяется соотношением:

$$\varphi_\omega = k_b i.$$

В соответствии с рис. 1 можно вывести уравнения, основанные на втором законе Ньютона и законе напряжения Кирхгофа:

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = k_t i, \quad (1)$$

$$L\frac{di}{dt} + Ri = V - k_b\dot{\theta}, \quad (2)$$

$$\omega = \dot{\theta},$$

или

$$J\dot{\omega} + B\omega = k_t i, \quad (3)$$

$$L\frac{di}{dt} + Ri = V - k_b\omega, \quad (4)$$

где ω — скорость ротора; $\dot{\omega}$ — ускорение ротора; $\dot{\theta}$ — угловая скорость вала; $\ddot{\theta}$ — угловое ускорение вала двигателя; J — момент инерции ротора; V — входное напряжение двигателя, действующее как регулирующая переменная для системы; i — ток, подаваемый на двигатель; B — коэффициент вязкого трения двигателя; R — сопротивление обмоток статора; L — индуктивность обмоток статора; k_b — коэффициент электродвижущей силы; k_t — коэффициент крутящего момента двигателя; J, B, L — неизвестные параметры двигателя.

Задача. Рассматривается объект управления (1), (2) с неизвестными параметрами. Требуется синтезировать алгоритм идентификации, позволяющий определить неизвестные параметры.

Введем допущение для данной системы.

Допущение. Напряжение, подаваемое на двигатель, и ток, потребляемый им, считаются известными, все остальные характеристики неизвестны.

Алгоритм идентификации делится на два этапа:
1) при использовании параметризации получается регрессионная модель, в которой регрессор и регресс зависят от измеряемых сигналов;
2) при использовании линейных устойчивых фильтров и задержек получается новая регрессионная модель.

DREM позволяет заменить регрессионную модель n-го порядка n регрессионными моделями первого порядка и оценить параметры отдельно. Эффективность предлагаемого подхода демонстрируется с помощью численного моделирования.

Преобразование модели

Применим преобразование Лапласа для уравнений (3), (4):

$$(JS + B)\omega(s) = k_t I(s), \quad (5)$$

$$(Ls + R)I(s) = V(s) - k_b\omega(s). \quad (6)$$

где s — оператор Лапласа; I — ток.

Запишем (5), (6) в форме передаточной функции зависимости угловой скорости от входного напряжения:

$$P(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{k_t}{(Js + B)(Ls + R) + k_t k_b}, \quad (7)$$

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{\frac{k_t}{JL}}{s^2 + \frac{(BL + JR)}{JL}s + \frac{BR + k_t k_b}{JL}} = \frac{a}{s^2 + b_0 s + b_1}, \quad (8)$$

где $a = \frac{k_t}{JL}$; $b_0 = \frac{(BL + JR)}{JL}$; $b_1 = \frac{BR + k_t k_b}{JL}$.

Из (7), (8) имеем

$$\omega(s)s^2 = -b_0 s\omega - b_1\omega + aV. \quad (9)$$

Введем линейный фильтр второго порядка с характеристическим полиномом $\Lambda = s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0$ [9] для левой и правой части (9), получим

$$\frac{s^2}{s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0}\omega = \frac{-b_0 s}{s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0}\omega + \frac{-b_1}{s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0}\omega + \frac{a}{s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0}V. \quad (10)$$

Перепишем (10) в форме регрессионной модели:

$$y_f = m^T\boldsymbol{\beta},$$

где $y_f = \frac{s^2}{s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0}\omega$; $m^T = \left[\frac{-s}{s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0}\omega \quad \frac{-1}{s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0}\omega \quad \frac{1}{s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0}V\right] = [m_{11} \quad m_{12} \quad m_{13}]$ — регрессор; $\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix}$ — вектор неизвестных параметров.

Метод динамического расширения регрессора и смешивания

Выберем два различных устойчивых линейных фильтра [9]:

$$y_{1f} = \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1}y_f = \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1}m^T\boldsymbol{\beta} = m_1{}^T\boldsymbol{\beta};$$

$$y_{2f} = \frac{\alpha_2}{1 + \alpha_2}y_f = \frac{\alpha_2}{1 + \alpha_2}m^T\boldsymbol{\beta} = m_2{}^T\boldsymbol{\beta},$$

где α_1, α_2 — положительные постоянные числа.

Обозначим:

$$\mathbf{Y_e} = \mathbf{M_e}\boldsymbol{\beta}, \quad (11)$$

где $\mathbf{Y_e} = \begin{bmatrix} y_f \\ y_{1f} \\ y_{2f} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$; $\mathbf{M_e} = [m^T \quad m_1{}^T \quad m_2{}^T] \in \mathbb{R}^{3\times 3}$; $\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$.

Умножая (11) на $\mathrm{adj}\{\mathbf{M_e}\}$ (т. е. союзную матрицу для $\mathbf{M_e}$), получаем:

$$Y(t) = \Delta(t)\beta,$$

где $\Delta = \det\{\mathbf{M_e}\} \in \mathbb{R}^1$ — определитель матрицы $\mathbf{M_e}$; $\mathbf{Y} = \mathrm{adj}\{\mathbf{M_e}\}\mathbf{Y_e}$; $Y_i = \Delta\beta_i$, $i = 1, 2, 3$.

Для оценивания параметров $\beta_i(t)$ воспользуемся формулой:

$$\dot{\hat{\beta}}_i = -\gamma_i\Delta(\Delta\hat{\beta}_i - Y_i),$$

где $\gamma_i > 0$ — i-й элемент матрицы коэффициентов адаптации для оценки неизвестных параметров; $\hat{\beta}_i$ — оценка параметра β_i.

Легко показать, что для ошибки оценивания параметра $\tilde{\beta}_i = \hat{\beta}_i - \beta_i$ справедливо:

$$\dot{\tilde{\beta}}_i = -\gamma_i\Delta^2\tilde{\beta}_i,$$

откуда следует $\lim\limits_{t\to\infty}\tilde{\beta}_i(t) = 0 \Leftrightarrow \Delta(t) \notin L_2$.

Математическое моделирование

Представим результаты компьютерного моделирования, иллюстрирующие работоспособность предложенного метода идентификации неизвестных параметров двигателя постоянного тока. Моделирование выполнялось при помощи пакета MATLAB/Simulink. Для моделирования были взяты следующие параметры двигателя, соответствующие работе [2]: индуктивность обмотки якоря двигателя $L = 0{,}5$ Гн; сопротивление $R = 1$ Ом; момент инерции ротора $J = 0{,}01$ кг·м^2; коэффициент вязкого трения двигателя $B = 0{,}1$ Н·с/м^2; коэффициент электродвижущей силы $k_b = 0{,}01$; коэффициент крутящего момента двигателя $k_t = 0{,}01$.

Передаточная функция системы принимает вид:

$$P = \frac{2}{s^2 + 0{,}61s + 0{,}1}.$$

Для идентификации параметров необходимо, чтобы входное воздействие на объект управления было мультигармоническим, причем количество гармоник должно быть не меньше, чем число параметров. Для этого выберем входное воздействие в виде $V(t) = 5\sin(2t) + 2\sin(3t) + 4\sin(t)$ и следующие параметры моделирования: $\gamma = 0{,}5$; $\alpha_1 = 0{,}1$; $\alpha_2 = 1$; $\lambda_1 = 2$; $\lambda_0 = 1$.

Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Для проверки эффективности предложенного метода сравним DREM с другими алгоритмами идентификации. Для примера возьмем метод градиентного спуска.

Алгоритм оценки параметров выглядит следующим образом:

$$\dot{\hat{\beta}} = Km(y_f - m^T\hat{\beta}),$$

где K — положительный коэффициент; $\hat{\beta}$ — оценка параметра β.

Для данного метода выберем следующие параметры: напряжение статора двигателя $V(t) = 5\sin(2t) + 2\sin(3t) + 4\sin(t)$; $K = 1$; $\alpha_1 = 0{,}1$; $\alpha_2 = 1$; $\lambda_1 = 2$; $\lambda_0 = 1$.

Результаты моделирования показаны на рис. 3.

По результатам моделирования можно увидеть, что алгоритм идентификации, основанный на DREM, определяет параметры за 5 с, при этом графики гладкие без резких выбросов, и перерегулирование отсутствует. А алгоритму идентификации, основанному на методе градиентного спуска, понадобилось приблизительно 350 с, при этом на графике видны резкие скачки и колебания параметров. Данные результаты показывают эффективность разработанного метода.

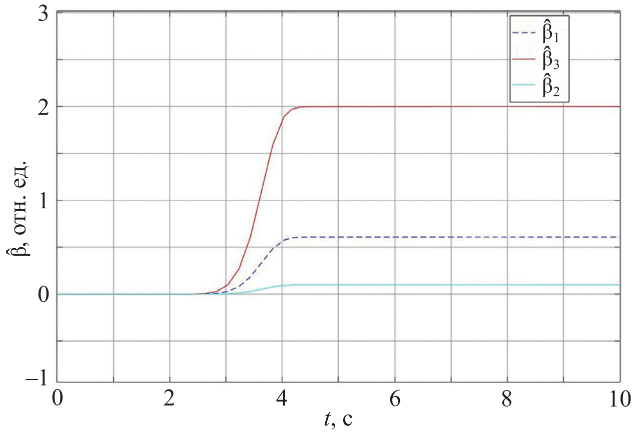

Рис. 2. График оценки параметра $\hat{\beta}$ (метод DREM)

Fig. 2. Parameter $\hat{\beta}$ estimation (DREM method)

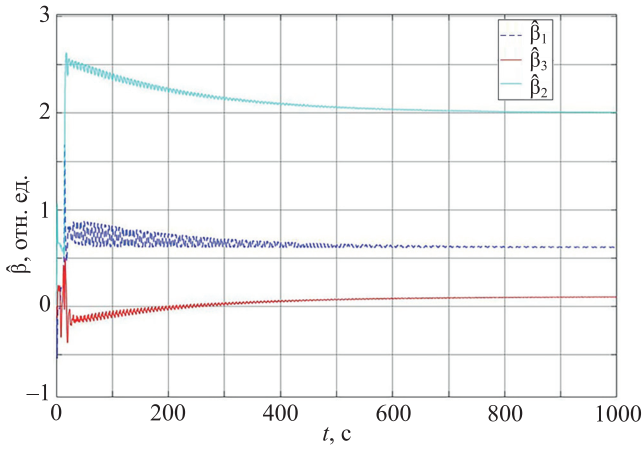

Рис. 3. График оценки параметров $\hat{\beta}$ (метод градиентного спуска)

Fig. 3. Parameter $\hat{\beta}$ estimation (gradient descent method)

Заключение

В настоящей работе рассмотрена задача идентификации параметров двигателя постоянного тока. Предложен новый алгоритм идентификации параметров на основе измерения значения потребляемого тока, обеспечивающий сходимость параметров к истинным значениям при условии их стационарности с высокой точностью. Работоспособность метода продемонстрирована при помощи математического моделирования. Для оценки эффективности представленного метода выполнено сравнение с классическим алгоритмом идентификации на основе метода градиентного спуска. Разработанный алгоритм показал существенное преимущество по сравнению с классическим методом, что говорит о возможности его применения в робототехнических системах. В будущем планируется провести экспериментальные исследования с реальными объектами.

Литература

1. Гаргаев А.Н., Каширских В.Г. Идентификация параметров двигателей постоянного тока с помощью метода роя частиц // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 4. С. 71–74.
2. Гаргаев А.Н., Каширских В.Г. Идентификация параметров двигателей постоянного тока с помощью поисковых методов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 1. С. 131–134.
3. Шишков Н.В. Определение параметров двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением на основе метода QR разложения // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 4. С. 79–81.
4. Mamani G., Becedas J., Feliu-Batlle V., Sira-Ramirez H. Open-loop algebraic identification method for a DC motor // Proc. 9th European Control Conference (ECC 2007). Kos, Greece. 2007. P. 3430–3436. doi: 10.23919/ecc.2007.7068846
5. Mamani G., Becedas J., Feliu-Batlle V. On-line fast algebraic parameter and state estimation for a DC motor applied to adaptive control // Proc. of the World Congress on Engineering. London, UK. 2008. P. 1006–1012.
6. Krneta R., Antić S., Stojanović D. Recursive least squares method in parameters identification of DC motors models // Facta Universitatis. Series: Electronics and Energetics. 2005. V. 18. N 3. P. 467–478. doi: 10.2298/FUEE0503467K
7. Hadef M., Mekideche M.R. Parameter identification of a separately excited DC motor via inverse problem methodology // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2009. V. 17. N 2. P. 99–106. doi: 10.3906/elk-0805-5
8. Hadef M., Bourouina A., Mekideche M.R. Parameter identification of a DC motor via moments method // Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2008. V. 7. N 2. P. 159–163.
9. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. 2016. V. 62. N 7. P. 3546–3550. doi: 10.1109/TAC.2016.2614889
10. Lyshevski S.E. Nonlinear control of mechatronic systems with permanent-magnet DC motors // Mechatronics. 1999. V. 9. N 5. P. 539–552. doi: 10.1016/S0957-4158(99)00014-8
11. Mummadi V.C. Steady-state and dynamic performance analysis of PV supplied DC motors fed from intermediate power converter // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2000. V. 61. N 4. P. 365–381. doi: 10.1016/S0927-0248(99)00120-8
12. Nordin M., Gutman P.-O. Controlling mechanical systems with backlash — A survey // Automatica. 2002. V. 38. N 10. P. 1633–1649. doi: 10.1016/S0005-1098(02)00047-X
13. Ioannou P., Sun J. Robust Adaptive Control. Prentice Hall, 1996. 821 p.

References

1. Gargaev A.N., Kashirskih V.G. Parameter identification based on particle swarm optimization applied to DC motor. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2015, no. 4, pp. 71–74. (in Russian)
2. Gargaev A.N., Kashirskih V.G. Parameter identification based on search algorithm applied to DC motor. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2013, no. 1, pp. 131–134. (in Russian)
3. Shishkov N.V. Determining parameters of direct current motor with series excitation on the basis of technique of QR decomposition. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 79–81. (in Russian)
4. Mamani G., Becedas J., Feliu-Batlle V., Sira-Ramirez H. Open-loop algebraic identification method for a DC motor. *Proc. 9th European Control Conference (ECC 2007)*, Kos, Greece, 2007, pp. 3430–3436. doi: 10.23919/ecc.2007.7068846
5. Mamani G., Becedas J., Feliu-Batlle V. On-line fast algebraic parameter and state estimation for a DC motor applied to adaptive control. *Proc. of the World Congress on Engineering*, London, UK, 2008, pp. 1006–1012.
6. Krneta R., Antić S., Stojanović D. Recursive least squares method in parameters identification of DC motors models. *Facta Universitatis. Series: Electronics and Energetics*, 2005, vol. 18, no. 3, pp. 467–478. doi: 10.2298/FUEE0503467K
7. Hadef M., Mekideche M.R. Parameter identification of a separately excited DC motor via inverse problem methodology. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2009, vol. 17, no. 2, pp. 99–106. doi: 10.3906/elk-0805-5
8. Hadef M., Bourouina A., Mekideche M.R. Parameter identification of a DC motor via moments method. *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 159–163.
9. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, vol. 62, no. 7, pp. 3546–3550. doi: 10.1109/TAC.2016.2614889
10. Lyshevski S.E. Nonlinear control of mechatronic systems with permanent-magnet DC motors. *Mechatronics*, 1999, vol. 9, no. 5, pp. 539–552. doi: 10.1016/S0957-4158(99)00014-8
11. Mummadi V.C. Steady-state and dynamic performance analysis of PV supplied DC motors fed from intermediate power converter. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000, vol. 61, no. 4, pp. 365–381. doi: 10.1016/S0927-0248(99)00120-8
12. Nordin M., Gutman P.-O. Controlling mechanical systems with backlash — A survey. *Automatica*, 2002, vol. 38, no. 10, pp. 1633–1649. doi: 10.1016/S0005-1098(02)00047-X
13. Ioannou P., Sun J. *Robust Adaptive Control*. Prentice Hall, 1996, 821 p.

Авторы

Хак Тунг Нгуен — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, nguyenkhactunghvhq1994@gmail.com, http://orcid.org/0000-0001-6430-1927

Власов Сергей Михайлович — кандидат технических наук, доцент (квалификационная категория «ординарный доцент»), Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 55355689600, smvlasov@itmo.ru, http://orcid.org/0000-0002-8345-7553

Authors

Khac Tung Nguyen — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, nguyenkhactunghvhq1994@gmail.com, http://orcid.org/0000-0001-6430-1927

Sergey M. Vlasov — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 55355689600, smvlasov@itmo.ru, http://orcid.org/0000-0002-8345-7553

Статья поступила в редакцию 19.11.2020
Одобрена после рецензирования 20.12.2020
Принята к печати 23.01.2021

Received 19.11.2020
Approved after reviewing 20.12.2020
Accepted 23.01.2021