

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕРВОПРИВОДОВ

Т. ОРЛОВСКА-КОВАЛЬСКА<sup>1</sup>, С. Ю. ЛОВЛИН<sup>2</sup>, М. Х. ЦВЕТКОВА<sup>2</sup>,  
А. А. АБДУЛЛИН<sup>2</sup>, А. Г. МАМАТОВ<sup>2</sup>, В. А. ГУРЬЯНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Вроцлавский университет науки и технологии, 50-370, Вроцлав, Польша,

<sup>2</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия,  
E-mail: madinatcvetkova@corp.ifmo.ru

Представлен метод идентификации электромеханических параметров сервопривода, основанный на методе наименьших квадратов. Метод обеспечивает автоматическое получение экспериментальных данных в условиях ограничения скорости и угла поворота. Разработанный алгоритм может автоматически корректироваться во время его работы для достижения высокой точности оцененных параметров. Приведен алгоритм работы сервопривода следящего телескопа. Предложенный алгоритм представляет интерес для разработчиков электромеханических систем. Выполнена экспериментальная проверка полученных результатов на двухмассовом стенде с переменным коэффициентом жесткости и варьируемым моментом инерции второй массы.

**Ключевые слова:** ограничение движения электропривода, автоматизация идентификации, возмущающее воздействие, прецизионный электропривод, релейное управление

**Введение.** Параметрическая идентификация сервоприводов в инженерной практике [1—6] необходима в случае: сложной модели объекта управления, многие параметры которой нельзя рассчитать (зависимость сухого и вязкого трения от скорости вращения и угла поворота сервопривода, математическое описание поведения отдельных частей механической части сервопривода, функциональная зависимость зубцового момента электрической машины от угла поворота ротора и т.п.) [7]; несоответствия расчетных параметров реальным или отсутствия в документации необходимых параметров отдельных элементов сервопривода (механическая часть, электрическая машина, подшипники и т.д.); определения параметров системы по результатам эксперимента при синтезе и настройке системы управления.

Ввод в эксплуатацию сервопривода оптико-механических систем (в особенности позиционирования и следящих) обычно занимает сравнительно много времени и требует квалифицированных разработчиков. Необходимость ограничения угла положения, скорости и ускорения такого класса систем приводит к тому, что экспериментальные данные получают путем многократных итераций с постепенным увеличением сигнала управления [6, 8, 9]. Заранее определить допустимое значение сигнала управления невозможно из-за отсутствия информации о параметрах сервопривода.

Существует огромное число методов идентификации, в том числе и для электромеханических систем. Использовать линейные методы, основанные на динамических моделях, предложено в [10].

В зависимости от наличия данных могут быть использованы следующие методы идентификации:

— расчет параметров на основе детальных данных конструкции двигателя (геометрии и сведений о материалах). Это самый точный подход и самый дорогой, так как в нем используется метод конечных элементов [11—17];

— оценка параметров, основанная на стационарных моделях двигателя, использующая итеративные решения [13], необходимые для этого данные обычно доступны;

— оценка параметров в частотной области. Построение АЧХ объекта, основанное на измерениях, выполняемых в тестовом режиме. Параметры двигателя оцениваются на основании передаточной функции. В действительности построение АЧХ не является общей инженерной практикой. Сигнал управления вычисляется в отсутствие априорных знаний о частотах механического резонанса, что может привести к повреждению оборудования во время эксперимента;

— оценка параметров во временной области. Выполняется в соответствии с полученными переходными процессами. Требуется упростить модель двигателя, так как не все параметры сложной модели можно оценить [14]. Этот метод дорогой, и обычно требуются данные, которые недоступны;

— оценка параметров в режиме реального времени. Метод на основе упрощенных моделей [15—18] не используется в прецизионных электроприводах, потому что не позволяет добиться высокой точности управления электроприводом.

В работах [10—16] рассмотрены алгоритмы оценки параметров, но не указан тип тестового сигнала. Очевидно, что высокий уровень сигнала приводит не только к точной оценке параметров в условиях внешних возмущений, но также увеличивает вероятность выхода оборудования из строя.

В настоящей статье предложен метод параметрической идентификации сервопривода, который позволяет ограничивать движение. Разработанный алгоритм обеспечивает высокую точность оценки параметров и позволяет предотвращать выход из строя электромеханической системы. Предлагаемый метод обеспечен высокой точностью экспериментальной оценки параметров сервопривода в условиях ограничения движения.

**Постановка задачи идентификации.** Задача ограничения движения сервопривода связана с особенностями объекта управления датчиков обратной связи. Например, большие значения ускорений в оптико-механических системах могут привести к сдвигу оптических элементов или даже к их разрушению. Наличие силовых и информационных кабелей, соединяющих движущиеся части системы со стационарной, требует ограничения угла поворота во избежание выхода оборудования из строя. Высокоточные оптические датчики, такие как инкрементальные энкодеры фирмы Renishaw, могут работать в ограниченном диапазоне угловых скоростей [10]. А двигатели для таких сервоприводов рассчитываются с запасом, поэтому часто они способны обеспечивать угловые скорости и ускорения, существенно превышающие номинальные значения для всей системы в целом.

Использование системы защиты от превышения скорости и ускорения, а также от выхода сервопривода за пределы допустимого углового диапазона приводит к преждевременному окончанию эксперимента в процессе идентификации и не позволяет получить необходимый объем данных для точной оценки параметров. Эта проблема может быть преодолена в результате синтеза простой системы управления, задачей которой будет обеспечение ограничения положения, скорости и ускорения в процессе параметрической идентификации.

Рассмотрим модель объекта управления вида [15]:

$$\begin{cases} i = \frac{1}{T_T s + 1} u, \\ \omega = \frac{K}{s} (i + f), \\ \alpha = \frac{1}{s} \omega, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha(t)$  — угол,  $\omega(t)$  — угловая скорость,  $i(t)$  — ток,  $T_T$  — постоянная времени замкнутого контура тока, настроенного на линейный оптимум,  $u(t)$  — входной сигнал на контур тока,  $s$  — оператор Лапласа,  $K$  — неизвестный параметр, равный отношению электромеханической постоянной момента к общему моменту инерции. Возмущающее воздействие  $f(t)$  в этом случае определяется отношением возмущающего момента к константе момента.

Таким образом, определение параметра  $K$  становится важной инженерной задачей, потому что точное значение момента инерции сложной многоступенчатой нагрузки чаще всего неизвестно. Возмущающий момент имеет две составляющие: активную (момент кабельного перехода, момент дисбаланса оси телескопа и т.д.) и реактивную (момент сухого и вязкого трения).

Математическая модель трения задается следующим выражением:

$$\tau_F = K_C \text{sign}(\omega) + K_V \omega, \quad (2)$$

где  $\omega$  — производная угла поворота электропривода;  $K_C$  и  $K_V$  — коэффициенты момента сухого и вязкого трения соответственно, а функция  $\text{sign}(\omega)$ :

$$\text{sign}(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{если } \omega > 0 \\ 0, & \text{если } \omega = 0 \\ -1, & \text{если } \omega < 0. \end{cases}$$

Эта модель не учитывает особенности трения при малых значениях угловой скорости. Использование модели заметно упрощает процесс идентификации, но требует того, чтобы основная доля данных была получена при скоростях вращения, для которых ее неточностью можно пренебречь.

**Алгоритм ограничения угловой скорости и ограничения угла поворота электропривода.** Для ограничения скорости, угла поворота и ускорения электропривода во время проведения эксперимента используется релейный регулятор (рис. 1). Поскольку параметры сервопривода пока неизвестны, заранее не ясно, какой управляющий сигнал можно подавать на сервопривод.

Ограничитель угловой скорости и угла (рис. 2) выполняет соответствующую функцию путем изменения знака управляющего сигнала  $i_{0,m}$ .

При достижении верхней границы скорости  $\omega_{\max}$  выходной сигнал реле меняется на  $-1$  и скорость сервопривода снижается, при достижении нижней границы скорости  $\omega_{\min}$  выходной сигнал меняется на  $1$  и скорость возрастает (рис. 3, б). Граничные значения скорости  $\omega_{\max}$  и  $\omega_{\min}$  должны быть одного знака, только в этом случае можно однозначно определить, в какую сторону будет вращаться сервопривод.

При достижении сервоприводом одной из границ угла поворота  $\alpha_{\min}$  или  $\alpha_{\max}$  (рис. 3, а) выходной сигнал  $u_a$  релейного регулятора положения меняется на  $1$  или  $-1$ , что эквивалентно изменению знаков границ реле. Таким образом, получаются два релейных регулятора скорости — для движения в положительном и отрицательном направлениях между граничными положениями сервопривода.

Значение  $i_{0,m}$ , подаваемое на вход, линейно увеличивается от  $0$  до тех пор, пока сервопривод не начнет вращение. В некоторых случаях такого значения недостаточно для точной идентификации и для непрерывного вращения электропривода, если сервопривод начал движение в области с малыми значениями момента трения и перешел в область больших. Чтобы отследить такую ситуацию и увеличить сигнал управления, вычисляется период  $\Delta T_r$  между переключениями реле скорости. При известном периоде  $\Delta T_r$ , который соответствует изменению скорости между граничными значениями  $\omega_{\max}$  и  $\omega_{\min}$ , можно вычислить среднее ускорение за этот период:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\Delta T_r}. \quad (3)$$

Сравнив значение ускорения с допустимым, система корректирует его изменением  $i_{0,m}$ .

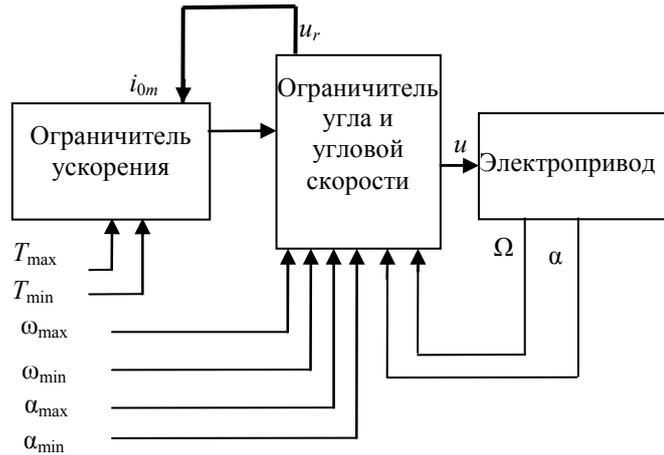


Рис. 1

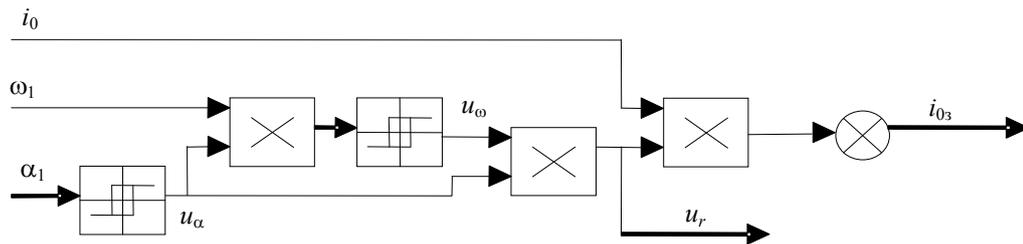


Рис. 2

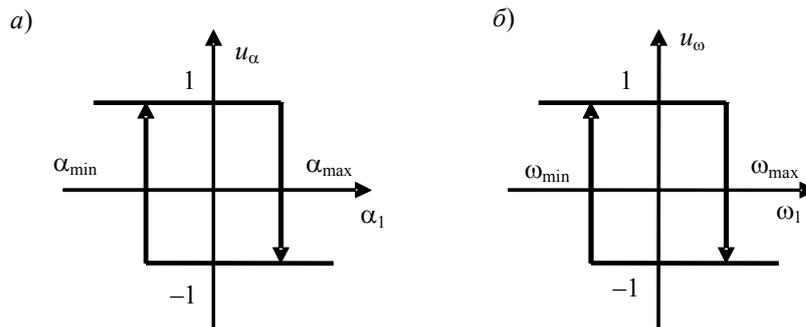


Рис. 3

**Оценка статического коэффициента объекта управления.** Экспериментально исследуются последовательный разгон и торможение электропривода, вызванные кусочно-постоянным управляющим сигналом  $i(t)$ . Интервалы разгона и торможения с периодом, соответствующим значениям между  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$ , выбираются в качестве образцов, используемых для оценки параметра  $K$ . Система (1) на этих интервалах может быть преобразована к следующему виду:

$$\begin{cases} i = u, \\ \omega = \frac{K}{s}(i + f), \\ \alpha = \frac{1}{s}\omega, \end{cases} \quad (4)$$

где  $f = -f_a - f_c \text{sign}(\omega) - f_v \omega$ ,  $f_a$  — возмущающее воздействие, обусловленное действием активных сил сопротивления,  $f_c$  — возмущающее воздействие, обусловленное влиянием сухого трения,  $f_v$  — возмущающее воздействие, обусловленное влиянием вязкого трения.

Интервал времени с анализируемыми данными выбирается со знакопостоянной скоростью. В этом случае величина момента сухого трения постоянна. Тогда для каждого интервала следующая величина будет постоянной:

$$f_{ac} = f_a + f_c \text{sign}(\Omega).$$

В таком случае выражение для угловой скорости может быть переписано следующим образом:

$$\omega(t) = K \int_{t_0}^{t_k} (u - f_{ac} - f_v \omega(t)) dt, \quad (5)$$

где  $t_0$  и  $t_k$  — начальное и конечное время интервала.

Для упрощения вычислений предположим, что угловая скорость изменяется линейно на интервалах дискретизации выборки, тогда

$$\omega(t_k) = \omega(t_0) + K(u(t_k - t_0) - f_{ac}(t_k - t_0) - \sum_{i=1}^k f_v \left( \frac{\omega(t_{i-1}) + \omega(t_i)}{2} \right) T_d), \quad (6)$$

где  $T_d$  — период дискретизации цифровой системы.

Предположим, что

$$\Omega = [\omega(t_1) - \omega(t_0) \dots \omega(t_k) - \omega(t_0)]^T,$$

$$H = \begin{pmatrix} u(t_1 - t_0) & (t_1 - t_0) & \sum_{i=1}^1 \frac{\omega(t_{i-1}) + \omega(t_i)}{2F_d} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u(t_k - t_0) & (t_k - t_0) & \sum_{i=1}^k \frac{\omega(t_{i-1}) + \omega(t_i)}{2F_d} \end{pmatrix},$$

$$X = [K, Kf_{ac}, Kf_v]^T,$$

где  $F_d = T_d^{-1}$ .

Тогда выражение (6) может быть переписано:

$$\Omega = HX. \quad (7)$$

Вектор оценки неизвестных параметров  $\hat{X}$  может быть найден методом наименьших квадратов:

$$\hat{X} = (H^T H)^{-1} H^T \Omega. \quad (8)$$

Система оценивает отклонение значений и на основании полученных данных принимает решение о выполнении нового эксперимента с более высоким значением  $T_{\min}$  для повышения точности идентификации.

**Экспериментальные результаты.** Эксперимент проводился на двухмассовом стенде с переменным коэффициентом жесткости и варьируемым моментом инерции второй массы. Вал с настраиваемой упругостью зафиксирован в двух подшипниковых стойках. Трехфазный синхронный двигатель RSM-P-36-275\*25 BS фирмы ООО „Рухсервомотор“ (СМПМ) помещен на передней части сложного вала, там же расположен инкрементный оптический датчик фирмы Renishaw с разрешающей способностью 6297600 (учитывая интерполирующий механизм).

СМПМ имеет следующие параметры: постоянная противоЭДС  $C_e = 3,58$  В·с/рад, сопротивление статорной обмотки  $R = 1,2$  Ом, электромагнитная постоянная времени  $T_e = 8$  мс, число пар полюсов  $p = 24$ .

Частота дискретизации цифровой системы управления 1 кГц. Токковый контур настроен на линейный оптимум с постоянной времени 0,001 с. Для регулирования системы управления сервоприводом требуется оценка момента инерции.

На рис. 4 представлены графики управляющего сигнала и угловой скорости, необходимые для идентификации параметра  $K$ . Скорость меняется в заданных пределах от 0 до 10 град/с. Задание на контур тока нарастает плавно, пока не будет достигнуто требуемое ускорение.

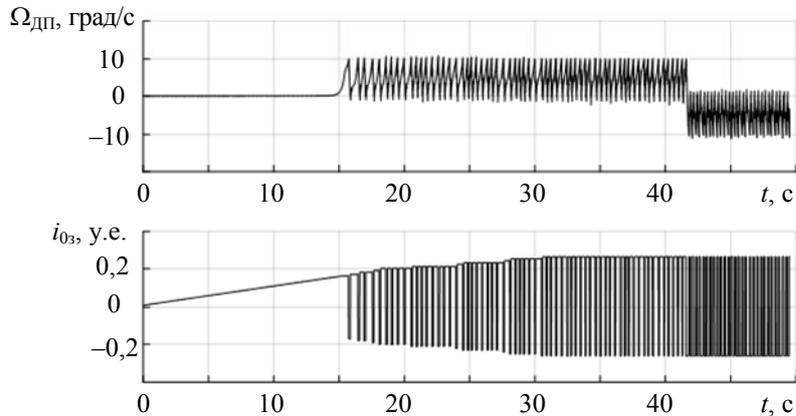


Рис. 4

В этом эксперименте выбрано среднее ускорение  $25 \text{ град/с}^2$ , которое значительно меньше ограничения ускорения для стенда в  $100 \text{ град/с}^2$ , ему соответствует изменение скорости вращения от 0 до 10 град/с за время  $T_{\min} = 400 \text{ мс}$ .

Оцененные значения параметра  $K$  и его отклонение  $\sigma$  приведены в таблице. Стандартное отклонение  $\sigma$  вектора данных  $x$  определяется:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2},$$

где  $\bar{y}$  — среднее значение элементов вектора  $y$ .

Результаты оценки при разных значениях периода  $T$ 

$T_{\min}, \text{ мс}$	$K$	$\sigma$
200	207,04	19,96
400	238,96	13,04
600	234,42	13,34
800	236,28	14,52

Система использует первый набор данных, удовлетворяющий требованиям точности параметров оценки. Если эти данные отсутствуют, используются данные с наивысшей точностью параметра. На рис. 5 приведены результаты оценки угловой скорости. Термин „расчетная скорость“ относится к угловой скорости электропривода, полученной в результате моделирования с использованием оценочного параметра  $K$ . Согласование смоделированных и экспериментальных данных позволяет подтвердить применимость предложенного метода идентификации.

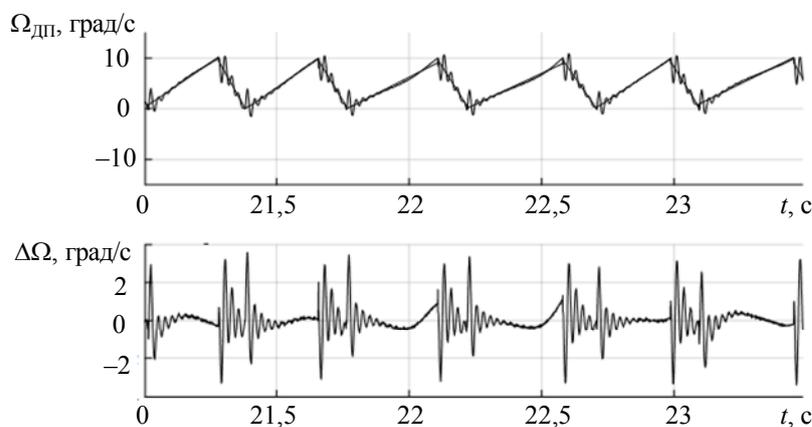


Рис. 5

**Заключение.** Предложенный метод идентификации позволяет оценить электромеханические параметры сервопривода. Экспериментальные результаты получены с учетом ограничения скорости, ограничения ускорения и ограничения угла, что важно для прецизионных электроприводов оптико-механических систем. Использование алгоритма идентификации полностью автоматизирован и не требует присутствия квалифицированного персонала. Применимость системы подтверждена экспериментальными данными.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ljung L.* System Identification: Theory for the User. MIT Press, Cambridge, MA, 1980.
2. *Садовников М. А., Томасов В. С., Толмачев В. А.* Прецизионный электропривод для оптических комплексов контроля космического пространства // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 6. С. 81—86.
3. *Kapun A., Curkovic M., Hase A., Jezernik K.* Identifying dynamic model parameters of a BLDC motor // Simulation Modelling Practice and Theory. 2008. Vol. 16. P. 1254—1265.
4. *Tutunji T., Molhim M., Turki E.* Mechatronic system identification using an impulse response recursive algorithm // Simulation Modelling Practice and Theory. 2007. Vol. 15. P. 970—988.
5. *Ravindra Pantankar, Liangtao Zhu.* Real-time multiple parameter estimation for voltage controlled brushless DC motor actuators // Proc. of the 2004 American Control Conference. 2004. Vol. 4. P. 3851—3856.
6. *Lovlin S. Y., Abdullin A. A.* Adaptive system for compensation of periodic disturbances in servo drive // 2016 IX Intern. Conf. on Power Drives Systems (ICPDS). Perm, 2016. P. 1—5. DOI: 10.1109/ICPDS.2016.7756719.
7. *Васильев В. Н., Томасов В. С., Шаргородский В. Д., Садовников В. А.* Состояние и перспективы развития прецизионных приводов комплексов высокоточных наблюдений // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. № 6. С. 5—11.
8. *Lovlin S. Y., Tsvetkova M. H., Subbotin D. A.* Identification of a permanent magnet synchronous motor system with dead-zone characteristics // Advances in Automatic Control: Proc. of the 16th Intern. Conf. on Automatic Control, Modelling & Simulation (ACMOS '14). 2014. N 35. P. 199—206.
9. *Liu L., Cartes D. A., Liu W.* Particles warm optimization based parameter identification applied to PMSM // Proc. of the 2007 American Control Conf. 2007. P. 2955—2960.
10. *Subbotin D. A., Lovlin S. Y., Tsvetkova M. H.* Identifying dynamic model parameters of a servo drive. // Manufacturing Engineering, Automatic Control and Robotics. Proc. of the 14th Intern. Conf. on Robotics, Control and Manufacturing Technology (ROCOM '14). 2014. N 32. P. 50—57.
11. *Xing Y.* A novel rotor resistance identification method for an indirect rotor flux- oriented controlled induction machine system // IEEE Trans. Power Electronic. 2002. Vol. 17. P. 353—364.
12. *Gutierrez-Villalobos J. M., Rodriguez-Resendiz J., Rivas-Araiza E. A., Mucino V. H.* A review of parameter estimators and controllers for induction motors based on artificial neural networks // Neurocomputing. 2013. Vol. 118. P. 87—100.
13. *Cirrinzione M. et al.* A new experimental application of least-squares techniques for the estimation of the induction motor parameters // IEEE Trans. Ind. Appl. 2003. Vol. 39. P. 1247—1256.
14. *Alonge F., D'Ippolito F., Raimondi F. M.* Least squares and genetic algorithms for parameter identification of induction motors // Control Engineering Practice. 2001. Vol. 9. P. 647—657.
15. *Балковой А. П., Цаценкин В. К.* Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Изд. дом МЭИ, 2010.
16. *Cabrera L. A. et al.* Tuning the stator resistance of induction motors using artificial neural network // IEEE Trans. Power Electron. 1997. Vol. 12. P. 779—787.
17. *Zhu Z. Q. and Howe D.* Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines // IEEE Trans. on Energy Conversion. 2000. Vol. 15. P. 407—412.
18. *Koubaa Y.* Parametric identification of induction motor with H-G diagram // Intern. Conf. on Electrical Drives and Power Electronics. 2001. P. 433—437.

- Сведения об авторах**
- Тереза Орловска-Ковальска** — PhD, Dr. Sci; Вроцлавский университет науки и технологии, кафедра электрических машин, электроприводов и измерений; зав. кафедрой; E-mail: teresa.orlowska-kowalska@pwr.edu.pl
- Сергей Юрьевич Ловлин** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: seri-l@yandex.ru
- Мадина Хасановна Цветкова** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: madinatcvetkova@corp.ifmo.ru
- Артур Александрович Абдуллин** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: artur.abdullin@corp.ifmo.ru
- Александр Геннадьевич Маматов** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: amamatov@corp.ifmo.ru
- Валерий Алексеевич Гурьянов** — Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; тьютор; E-mail: guryanow@ets.ifmo.ru

Поступила в редакцию  
19.11.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Орловска-Ковальска Т., Ловлин С. Ю., Цветкова М. Х., Абдуллин А. А., Маматов А. Г., Гурьянов В. А. Идентификация электромеханических параметров сервоприводов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 4. С. 346—354.

#### IDENTIFICATION OF ELECTROMECHANICAL PARAMETERS OF PRECISION ELECTRIC DRIVES

T. Orłowska-Kowalska<sup>1</sup>, S. Yu. Lovlin<sup>2</sup>, M. H. Tsvetkova<sup>2</sup>,  
A. A. Abdullin<sup>2</sup>, A. G. Mamatov<sup>2</sup>, V. A. Guryanow<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Wroclaw university of science and technology, 50-370, Wroclaw, Poland,

<sup>2</sup>ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia,  
E-mail: madinatcvetkova@corp.ifmo.ru

A method of identification of electromechanical parameters of the electric drive, based on the method of least squares, is proposed. The method solves the problem of automatic acquisition of experimental data under the conditions of speed and rotation angle limitation. Algorithm realizing the method can be automatically adjusted during its operation to achieve high accuracy of the estimated parameters. An algorithm for servo tracking telescope is presented as an example. The proposed algorithm may be of interest for designers of electromechanical systems with limited motion. Experimental verification of the results on a two-mass bench with variable stiffness coefficient and variable moment of inertia of the second mass was carried out.

**Keywords:** movement restriction of electric drive, automation of identification, disturbance, precision electric motor, relay control

#### REFERENCES

1. Ljung L. *System Identification: Theory for the User*, MIT Press, Cambridge, MA, 1980.
2. Sadovnikov M.A., Tomasov V.S., Tolmachev V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 6(54), pp. 81–86. (in Russ.)
3. Kapun A., Curkovic M., Hace A., Jezernik K. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2008, no. 16, pp. 1254–1265.
4. Tutunji T., Molhim M., Turki E. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2007, vol. 15, pp. 970–988.
5. Ravindra Pantankar, Liangtao Zhu. *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, 2004, vol. 4, pp. 3851–3856.
6. Lovlin S.Y., Abdullin A.A. *IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS)*, Perm, 2016, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICPDS.2016.7756719.
7. Lovlin S.Y., Tsvetkova M.H., Subbotin D.A. *Advances in Automatic Control: Proceedings of the 16th International Conference on Automatic Control, Modelling & Simulation (ACMOS '14)*, 2014, no. 35, pp. 199–206.
8. Liu L., Cartes D.A., Liu W. *Proceedings of the 2007 American Control Conference*, 2007, pp. 2955–2960.
9. Vasil'yev V.N., Tomasov V.S., Shargorodskiy V.D., Sadovnikov V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 6, pp. 5–11.
10. Subbotin D.A., Lovlin S.Y., Tsvetkova M.H. *Manufacturing Engineering, Automatic Control and Robotics: Proceedings of the 14th International Conference on Robotics, Control and Manufacturing*

- Technology (ROCOM '14)*, 2014, no. 32, pp. 50–57.
11. Xing Y. *IEEE Trans. Power Electronic*, 2002, vol. 17, pp. 353–364.
  12. Gutierrez-Villalobos J.M., Rodriguez-Resendiz J., Rivas-Araiza E.A., Mucino V.H. *Neurocomputing*, 2013, vol. 118, pp. 87–100.
  13. Cirrincione M. et al. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2003, vol. 39, pp. 1247–1256.
  14. Alonge F., D'Ippolito F., Raimondi F.M. *Control Engineering Practice*, 2001. vol. 9, pp. 647–657.
  15. Balkovoy A.P., Tsatsenkin V.K. *Pretsizionnyy elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami* (Precision Electric Drive with Brushless DC Motors), Moscow, 2010. (in Russ.)
  16. Cabrera L.A. et al. *IEEE Trans. Power Electron*, 1997, vol. 12, pp. 779–787.
  17. Zhu Z.Q. and Howe D. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 2000, vol.15, pp. 407–412.
  18. Koubaa Y. *International Conference on Electrical Drives and Power Electronics*, 2001, pp. 433–437.

#### Data on authors

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| <b>Teresa Orłowska-Kowalska</b> | — PhD, Dr. Sci.; Wrocław University of Science and Technology, Department of Electrical Machines, Drives and Measurements; Head of the Department; E-mail: teresa.orłowska-kowalska@pwr.edu.pl |
| <b>Sergey Yu. Lovlin</b>        | — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: seri-l@yandex.ru  |
| <b>Madina H. Tsvetkova</b>      | — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: madinatcvetkova@corp.ifmo.ru  |
| <b>Artur A. Abdullin</b>        | — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: artur.abdullin@corp.ifmo.ru   |
| <b>Alexander G. Mamatov</b>     | — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: amamatov@corp.ifmo.ru   |
| <b>Valery A. Guryanow</b>       | — ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Tutor; E-mail: guryanow@ets.ifmo.ru  |

**For citation:** Orłowska-Kowalska T., Lovlin S. Yu., Tsvetkova M. H., Abdullin A. A., Mamatov A. G., Guryanow V. A. Identification of electromechanical parameters of precision electric drives. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 4. P. 346–354 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-346-354