

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ СЕРВОПРИВОДА С НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ ТИПА „МЕРТВОЕ ВРЕМЯ“

Т. ОРЛОВСКА-КОВАЛЬСКА¹, С. Ю. ЛОВЛИН², М. Х. ЦВЕТКОВА²,
А. А. АБДУЛЛИН², А. Г. МАМАТОВ²

¹Вроцлавский университет науки и технологии, 50-370, Вроцлав, Польша,

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

Предложен подход к автоматической идентификации электрических параметров сервопривода и ШИМ-инвертора, основанный на методе наименьших квадратов. Традиционно для параметрической идентификации сервоприводов используется линейная математическая модель объекта и не учитываются нелинейности, обусловленные „мертвым временем“ и падением напряжения на силовых ключах преобразователя. Выходное напряжение ШИМ-инвертора существенно искажается за счет этих особенностей, что ухудшает результаты идентификации. Предложенный метод идентификации использует модель, учитывающую влияние „мертвого времени“ и падение напряжения на силовых ключах преобразователя. Показано, что новый метод обладает более высокой точностью оценки параметров, чем метод, использующий линейную модель сервопривода.

Ключевые слова: идентификация, сервопривод, мертвое время, ШИМ-инвертор, метод наименьших квадратов

Введение. В последние годы преобразователи напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) получили широкое распространение в приводах двигателей с регулируемой скоростью благодаря разработке высокоскоростных переключающих устройств, таких как полевые транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) [1, 2]. Одна из важных особенностей таких преобразовательных устройств — конечное время переключения силовых ключей. Чтобы предотвратить одновременное открытие ключей одной стойки инвертора, в преобразовательных устройствах вводится „мертвое время“ для сигнала ШИМ. В течение „мертвого времени“ выходное напряжение зависит от состояния закрывающегося в этот момент ключа и направления тока в фазе инвертора, подключенной к этой стойке. В результате возникает искажение выходного напряжения инвертора, которое называется эффектом „мертвого времени“ [3—5].

Искажение выходного напряжения инвертора влияет на токи машины, что приводит к искажению фазного тока, пульсациям крутящего момента и ухудшению характеристик управления [6—8]. Методы преодоления этой проблемы включают в себя компенсацию влияния „мертвого времени“ [9—11] или его минимизацию [12—14]. Большинство таких методов основано на учете направления тока. Основную сложность составляют расчет напряжения компенсации и обнаружение пересечения нулевого значения тока, основанные на точной оценке „мертвого времени“.

Задача параметрической идентификации параметров двигателя, учитывающих влияние „мертвого времени“, освещена плохо [3, 4, 15].

В настоящей статье показана целесообразность моделирования влияния „мертвого времени“ и падения напряжения на силовых ключах при оценке параметров двигателя. Предлагается метод идентификации, позволяющий увеличить точность идентификации за счет использования таких аналитических моделей двигателя с инвертором.

Постановка задачи. Рассматривается модель трехфазного инвертора и синхронной машины с постоянными магнитами (СМПМ) [3, 4]:

$$\left\{ \begin{aligned} (\varphi_a(t) - \Delta U_a(t)) - (\varphi_c(t) - \Delta U_c(t)) &= \\ &= (2i_a(t) + i_b(t))R - (e_a(t) - e_c(t)) + L \frac{d(2i_a(t) + i_b(t))}{dt}, \\ (\varphi_b(t) - \Delta U_b(t)) - (\varphi_c(t) - \Delta U_c(t)) &= \\ &= (2i_b(t) + i_a(t))R - (e_b(t) - e_c(t)) + L \frac{d(2i_b(t) + i_a(t))}{dt}, \\ i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) &= 0, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где R — электрическое сопротивление фазы СМПМ; L — индуктивность фазы СМПМ; $e_a(t)$, $e_b(t)$, $e_c(t)$ — ЭДС, индуцируемые в фазах СМПМ в результате изменения магнитного поля ротора при вращении; $\varphi_a(t)$, $\varphi_b(t)$, $\varphi_c(t)$ — средние за период коммутации силовых ключей потенциалы фаз; $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ — мгновенные значения токов в соответствующих фазах СМПМ; ΔU_a , ΔU_b , ΔU_c — изменение напряжения инвертора, вызванное наличием „мертвого времени“ и падением напряжения на ключах. Потенциалы фаз при векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) следующие:

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_a(t) &= u_0(t) \frac{U_{DC}}{\sqrt{3}} \left(\sin(p\alpha(t)) + \frac{1}{6} \sin(3p\alpha(t)) \right), \\ \varphi_b(t) &= u_0(t) \frac{U_{DC}}{\sqrt{3}} \left(\sin(p\alpha(t) - \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{6} \sin(3p\alpha(t)) \right), \\ \varphi_c(t) &= u_0(t) \frac{U_{DC}}{\sqrt{3}} \left(\sin(p\alpha(t) + \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{6} \sin(3p\alpha(t)) \right), \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где p — число пар полюсов СМПМ; α — угол поворота ротора СМПМ; $u_0(t)$ — обобщенный сигнал управляющего воздействия.

Изменение напряжения инвертора рассчитывается по следующей формуле:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta U_a &= (\Delta u_{\text{const}} + \tau U_{DC}) \text{sign}(i_a), \\ \Delta U_b &= (\Delta u_{\text{const}} + \tau U_{DC}) \text{sign}(i_b), \\ \Delta U_c &= (\Delta u_{\text{const}} + \tau U_{DC}) \text{sign}(i_c). \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где Δu_{const} — падение напряжения на ключах; τ — относительная задержка на переключение транзисторов

$$\tau = \frac{t_{\text{МВ}}}{T_s}, \quad (4)$$

где $t_{\text{МВ}}$ — „мертвое время“.

Момент СМПМ рассчитывается следующим образом:

$$M = c_e \left(\sin(p\alpha) i_a + \sin\left(p\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) i_b + i_c \sin\left(p\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \right), \quad (5)$$

где c_e — коэффициент противоЭДС.

Обобщенный ток i_0 вычисляется так:

$$i_0 = \frac{2}{3} \left(\sin(p\alpha) i_a + \sin\left(p\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) i_b + i_c \sin\left(p\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \right). \quad (6)$$

Тогда формула момента $M(t)$ принимает следующий вид:

$$M(t) = \frac{3}{2} c_e i_0(t), \quad (7)$$

т.е., управляя величиной $i_0(t)$, можно регулировать момент $M(t)$.

На основании формул (1), (2), (6) получим дифференциальное уравнение для обобщенного тока $i_0(t)$:

$$T_e \frac{d(i_0(t))}{dt} + i_0(t) = K_{об} u_0(t) - f_0(t), \quad (8)$$

где

$$K_{об} = \frac{U_{DC} - 2\Delta u_{const}}{\sqrt{3}R},$$

$$f_0 = \frac{1}{R} \left(c_e \Omega + \frac{2}{3} \tau (U_{DC} - 2\Delta u_{const}) (\sin(p\alpha) \text{sign}(i_a) + \sin(p\alpha - \frac{2\pi}{3}) \text{sign}(i_b) + \sin(p\alpha + \frac{2\pi}{3}) \text{sign}(i_c)) \right),$$

Ω — скорость ротора.

Использование линейных моделей для параметрической идентификации при настройке регуляторов дает значительные погрешности, например, на рис. 1 приведены АЧХ ($L(\Omega)$) и ФЧХ ($\Psi(\Omega)$) передаточной функции от обобщенного управляющего воздействия $u_0(t)$ к обобщенному току $i_0(t)$ в отсутствие „мертвого времени“ (1) и при его наличии при разных амплитудах задающей синусоиды u_{0a} : 0,5 (2) и 0,1 (3). Частотные характеристики получены путем подачи синусоид обобщенного управляющего воздействия $u_0(t)$ с различной частотой и амплитудой u_{0a} [16]. Различие для разных амплитуд задающей синусоиды u_{0a} может привести к неправильной оценке параметров модели и, как следствие, получению неустойчивой системы управления. Идентификацию параметров модели необходимо производить с учетом особенностей энергоподсистемы электропривода на базе СМПИМ.

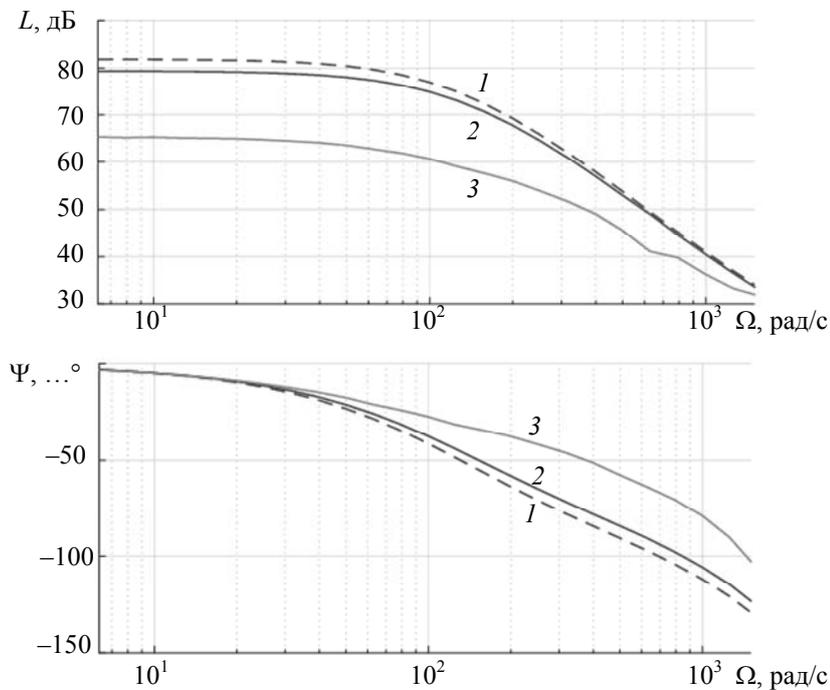


Рис. 1

Параметрическая идентификация без учета нелинейностей инвертора. Исследуемый в настоящей статье объект — нелинейный. При некорректно поставленном эксперименте

частотный метод идентификации может давать результаты, отличающиеся на порядок от реальных (см. рис. 1). Можно получить значения параметров, близкие к реальным, если использовать в эксперименте максимальные значения амплитуд задающих синусоид, что, однако, может привести к выходу из строя оборудования.

Рассмотрим параметрическую идентификацию по переходной характеристике объекта (1). В соответствии с формулой (8) для $u_0 = \text{const}$ в отсутствие движения ротора и без учета „мертвого времени“ ($f_0 = 0$) можно записать линейную регрессию для интервала измерения:

$$i_0(t_1) = (i_0(t_0) - K_{об}u_0(t_0))e^{-\frac{t_1-t_0}{T_e}} - K_{об}u_0(t_0). \quad (9)$$

Если все измерения проводить с периодом дискретизации Δt , то

$$i_0(t + \Delta t) = K_1 i_0(t) + K_2 u_0(t), \quad (10)$$

где

$$K_1 = e^{-\frac{\Delta t}{T_e}},$$

$$K_2 = K_{об}(1 - K_1).$$

Такая задача параметрической идентификации решается МНК [17, 18]. Для линейной регрессии следующего вида:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X},$$

где \mathbf{Y} — вектор наблюдений, \mathbf{X} — вектор объясняемых переменных, \mathbf{H} — матрица наблюдений:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Y}, \quad (11)$$

при этом

$$\mathbf{Y} = [i_0(t_2) \quad i_0(t_3) \quad \dots \quad i_0(t_n)]^T,$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} i_0(t_1) & u_0(t_1) \\ i_0(t_2) & u_0(t_2) \\ \vdots & \vdots \\ i_0(t_{n-1}) & u_0(t_{n-1}) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{X} = [K_1 \quad K_2].$$

Неизвестные параметры в соответствии с формулой (10) вычисляются так:

$$\hat{T}_e = -\frac{\Delta t}{\ln(K_1)},$$

$$\hat{K}_{об} = \frac{K_2}{1 - K_1}. \quad (13)$$

Результаты идентификации по переходной характеристике $K_{об}$ и T_e приведены на рис. 2 (1 — без учета влияния „мертвого времени“, 2 — реальное значение параметра). Амплитуда скачка задания $u_{0\text{max}}$ во всех экспериментах $u_{0\text{max}} > 2\tau$, при $u_{0\text{max}} < 2\tau$ напряжение на фазах за период коммутации равно нулю. Данные результаты аналогичны результатам, представленным на рис. 1.

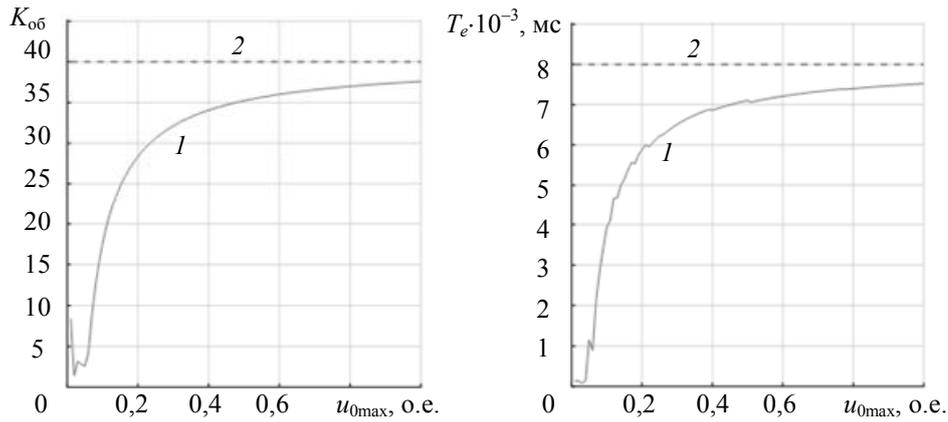


Рис. 2

Параметрическая идентификация с учетом нелинейностей инвертора. Введем в формулу (9) „мертвое время“ и падение напряжение на ключах:

$$i_0(t_1) = (i_0(t_0) - K_{об}(u_0(t_0) - \tau f_{МВ}(t_0))) e^{-\frac{t_1 - t_0}{T_e}} - K_{об}(u_0(t_0) - \tau f_{МВ}(t_0)), \quad (14)$$

где при синусоидальной ШИМ:

$$f_{МВ}(t) = \frac{4}{3} \left(\sin(p\alpha(t)) \text{sign}(i_a(t)) + \sin\left(p\alpha(t) + \frac{2\pi}{3}\right) \text{sign}(i_b(t)) + \sin\left(p\alpha(t) - \frac{2\pi}{3}\right) \text{sign}(i_c(t)) \right), \quad (15)$$

а при синусоидальной ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой и векторной ШИМ:

$$f_{МВ}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{3} \left(\sin(p\alpha(t)) \text{sign}(i_a(t)) + \sin\left(p\alpha(t) + \frac{2\pi}{3}\right) \text{sign}(i_b(t)) + \sin\left(p\alpha(t) - \frac{2\pi}{3}\right) \text{sign}(i_c(t)) \right). \quad (16)$$

В формулах (15) и (16) не учитывается противоЭДС, так как эксперимент проводится при неподвижном роторе. В таком случае формула (10) имеет следующий вид:

$$i_0(t + \Delta t) = K_1 i_0(t) + K_2 u_0(t) + K_3 f_{МВ}(t), \quad (17)$$

где

$$K_1 = e^{-\frac{\Delta t}{T_e}},$$

$$K_2 = K_{об}(1 - K_1),$$

$$K_3 = K_{об}\tau(1 - K_1).$$

В случае линейной регрессии (17) следующие:

$$\mathbf{Y} = [i_0(t_2) \quad i_0(t_3) \quad \dots \quad i_0(t_n)]^T,$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} i_0(t_1) & u_0(t_1) & f_{МВ}(t_1) \\ i_0(t_2) & u_0(t_2) & f_{МВ}(t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ i_0(t_{n-1}) & u_0(t_{n-1}) & f_{МВ}(t_{n-1}) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\mathbf{X} = [K_1 \quad K_2 \quad K_3].$$

Неизвестные значения параметров в соответствии с формулой (17) могут быть оценены как:

$$\begin{aligned} \hat{T}_e &= -\frac{\Delta t}{\ln(K_1)}, \\ \hat{K}_{об} &= \frac{K_2}{1-K_1}, \\ \hat{\tau} &= \frac{K_3}{K_2}. \end{aligned} \tag{19}$$

Результаты идентификации $K_{об}$ и T_e при различных амплитудах скачка задания u_{0max} в системе с мертвым временем по модели (14) (1) и по модели (9) (2) приведены на рис. 3. Видно, что точность идентификации $K_{об}$ и T_e выше, чем на рис. 2.

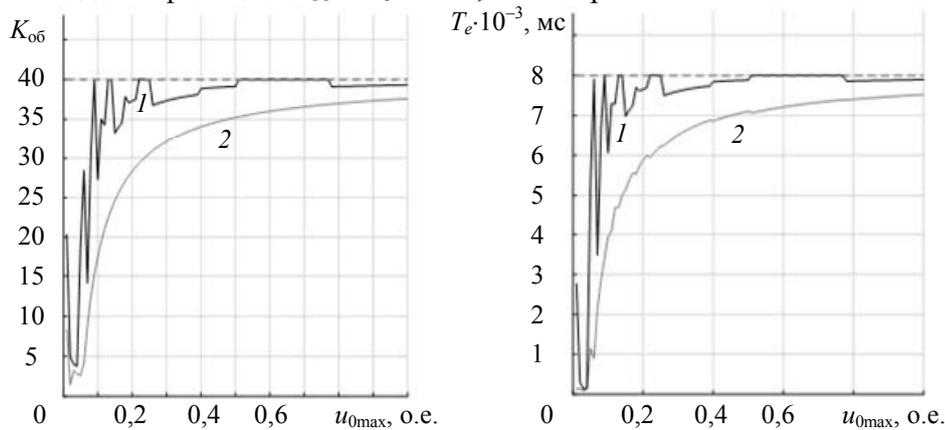


Рис. 3

Повысить точность оценки параметров можно, увеличив период тестового сигнала u_0 до значений, существенно превышающих время переходного процесса. Это иллюстрирует рис. 4, на котором приведены результаты идентификации при периоде тестового сигнала $3T_e$ (1) и $10T_e$ (2).

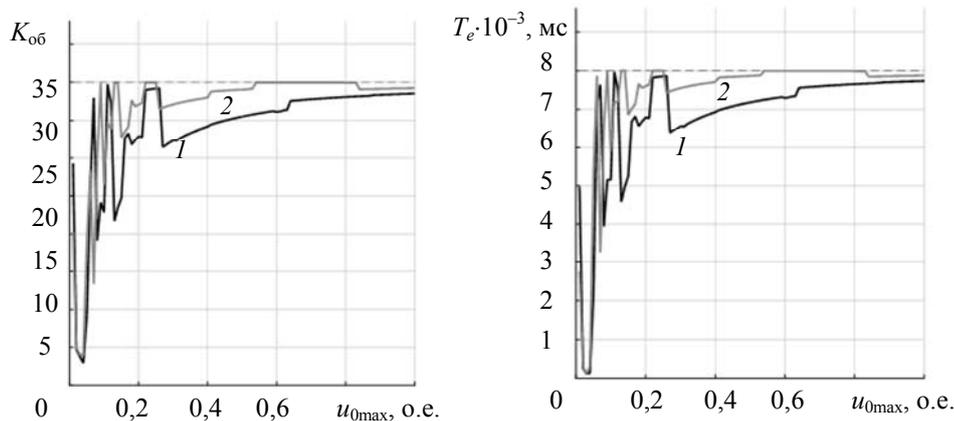


Рис. 4

Заключение. Объект управления, состоящий из двигателя и ШИМ-инвертора, является нелинейным. Использование частотного метода идентификации и метода идентификации по переходной характеристике на базе линейной модели приводит к существенным погрешностям в оценке параметров двигателя. Значение погрешности увеличивается с уменьшением амплитуды тестового сигнала. Разработанный метод параметрической идентификации, учитывающий влияние „мертвого времени“ и падение напряжения на ключах, позволяет повысить точность оценки параметров. Хорошие результаты могут быть достигнуты при значениях периода тестового сигнала, существенно превышающих время переходного процесса.

Повысить точность метода позволят два этапа идентификации статического коэффициента передачи $K_{об}$ и электромагнитной постоянной времени T_e , на каждом будет определяться только один параметр. Такой вариант позволит подобрать наиболее подходящий тестовый сигнал для оценки конкретного параметра.

Стоит обратить внимание, что „мертвое время“ и падение напряжения на ключах влияют не только на параметрическую идентификацию двигателя. Наблюдатели, построенные на базе линейных моделей, также будут работать с погрешностью, причем достаточно высокой, так как используют не специально подобранные тестовые сигналы, а рабочие сигналы функционирующего электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Ловлин С. Ю., Поляков Н. А., Абдуллин А. А., Лукичев Д. В., Демидова Г. Л. Метод ограничения действующего значения токов моментного двигателя следящего электропривода // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 8. С. 706—712.
3. 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.
4. Томасов В. С., Ловлин С. Ю., Тушев С. А., Смирнов Н. А. Искажение выходного напряжения широтно-импульсного преобразователя прецизионного электропривода // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 1. С. 84—87.
5. Krause P. C. Analysis of Electric Machinery. NY: McGraw-Hill, 1986.
6. Si G., Shen Z., Zhang Z. and Kennel R. Investigation of the limiting factors of the dead time minimization in a H-bridge IGBT inverter // 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC). Auckland, 2016. P. 1—6.
7. Anuchin A., Gulyaeva M., Briz F. and Gulyaev I. Modeling of AC voltage source inverter with dead-time and voltage drop compensation for DPWM with switching losses minimization // 2017 Intern. Conf. on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, 2017. P. 1—6.
8. Munoz-Garcia A. and Lipo T. A. On-line dead-time compensation technique for open-loop PWM-VSI drives // Proc. IEEE Applicat. Power Electron. Conf. 1998. P. 95—100.
9. Urasaki N., Senjyu T., Uezatoand K., and Funabashi T. Adaptive deadtime compensation strategy for permanent magnet synchronous motor drive // IEEE Trans. Energy Convers. 2007. Vol. 22. P. 271—280.
10. Qiu T., Wen X. and Zhao F. Adaptive-Linear-Neuron-Based Dead-Time Effects Compensation Scheme for PMSM Drives // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. Vol. 31, N 3. P. 2530—2538.
11. Alawieh H., Riachy L., Arab Tehrani K., Azzouz Y. and Dakyo B. A new dead-time effect elimination method for H-bridge inverters // IECON 2016 — 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, 2016. P. 3153—3159.
12. Alexandrou A. D., Adamopoulos N. K. and Kladas A. G. Development of a Constant Switching Frequency Deadbeat Predictive Control Technique for Field-Oriented Synchronous Permanent-Magnet Motor Drive // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63, N 8. P. 5167—5175.
13. Attaianesse C., Nardi V., and Tomasso G. A novel SVM strategy for VSI dead-time-effect reduction // IEEE Trans. Ind. Appl. 2005. Vol. 41. P. 1667—1674.
14. Pillai M. S. and Vijina K. Efficient Commutation and Torque Ripples Minimization in BLDC Motor for Hoist Applications // 2018 Intern. Conf. on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT). Kannur, 2018. P. 405—409.
15. Xiao L., Tao W., and Wei F. Adaptive parameter identification based on dead-time compensation for permanent magnet synchronous machines for the 2011 // Proc. of the 11th Intern. Conf. on Control, Automation and Systems (ICCAS 2011). 2011. P. 1570—1575.

16. Ловлин С. Ю., Маматов А. Г. Идентификация частотных характеристик прецизионных электроприводов квантово-оптических комплексов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 10. С. 897—907.
17. Ljung L. System Identification: Theory for the User. MIT Press, Cambridge, MA, 1980.
18. Omrane I., Etien E., Bachelier O., and W. Dib. A simplified least squares identification of permanent magnet synchronous motor parameters at standstill // Proc. 39th Annu. IEEE IECON. 2013. P. 2578—2583.

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

Поступила в редакцию
10.04.19 г.

Ссылка для цитирования: Орловска-Ковальска Т., Ловлин С. Ю., Цветкова М. Х., Абдуллин А. А., Маматов А. Г. Параметрическая идентификация модели сервопривода с нелинейностями типа „мертвое время“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 6. С. 576—584.

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF A SERVO DRIVE MODEL WITH DEADTIME-TYPE NONLINEARITIES

**T. Orłowska-Kowalska¹, S. Yu. Lovlin², M. H. Tsvetkova²,
A. A. Abdullin², A. G. Mamatov²**

¹Wroclaw University of Science and Technology, 50-370, Wroclaw, Poland

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

An approach to automatic identification of electrical parameters of a servo drive and a PWM inverter, based on least squares method, is proposed. It is noted that existing methods of parametric identification of servo drives use a linear mathematical model of the object and do not consider nonlinearity, due to the "dead time" and the voltage drop on the power switches of the converter. The output voltage of the PWM inverter is significantly distorted due to these features, which deteriorate the identification results. The proposed identification method uses a model that considers the deadtime effect and the voltage drop on the converter power switches. The new method is shown to enable a higher accuracy of parameter estimation than the method with linear servo drive model.

Keywords: identification, servo drive, dead time, PWM - inverter, least squares method

REFERENCES

1. Sadovnikov M.A., Tomasov V.S., Tolmachev V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 6(54), pp. 81–86. (in Russ.)
2. Lovlin S.Yu., Polyakov N.A., Abdullin A.A., Lukichev D.V., Demidova G.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 8(61), pp. 706–712. (in Russ.)
3. 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.
4. Tomasov V.S., Lovlin S.Yu., Tushev S.A., Smirnov N.A. *Vestnik IGEU*, 2013, no. 1, pp. 84–87. (in Russ.)
5. Krause P.C. *Analysis of Electric Machinery*, NY, McGraw-Hill, 1986.
6. Si G., Shen Z., Zhang Z. and Kennel R. *2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, Auckland, 2016, pp. 1–6.
7. Anuchin A., Gulyaeva M., Briz F. and Gulyaev I. *2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, Cluj-Napoca, 2017, pp. 1–6.

8. Munoz-Garcia A. and Lipo T.A. *Proc. IEEE Applicat. Power Electron. Conf.*, 1998, pp. 95–100.
9. Urasaki N., Senjyu T., Uezatoand K., and Funabashi T. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2007, vol. 22, pp. 271–280.
10. Qiu T., Wen X. and Zhao F. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, no. 3(31), pp. 2530–2538.
11. Alawieh H., Riachy L., Arab Tehrani K., Azzouz Y. and Dakyo B. *IECON 2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, 2016, pp. 3153–3159.
12. Alexandrou A.D., Adamopoulos N.K. and Kladas A.G. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, no. 8(63), pp. 5167–5175.
13. Attaianese C., Nardi V., and Tomasso G. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2005, vol. 41, pp. 1667–1674.
14. Pillai M.S. and Vijina K. *2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICPCCT)*, Kannur, 2018, pp. 405–409.
15. Xiao L., Tao W., and Wei F. *Proc. 11th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2011)*, 2011, pp. 1570–1575.
16. Lovlin S.Yu., Mamatov A.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 10(61), pp. 897–907.
17. Ljung L. *System Identification: Theory for the User*, MIT Press, Cambridge, MA, 1980.
18. Omrane I., Etien E., Bachelier O., and Dib W. *Proc. 39th Annu. IEEE IECON*, 2013, pp. 2578–2583.

Data on authors

Teresa Orłowska-Kowalska	—	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
Sergey Yu. Lovlin	—	PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: seri-l@yandex.ru
Madina H. Tsvetkova	—	PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: madinatcvetkova@corp.ifmo.ru
Artur A. Abdullin	—	PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: artur.abdullin@corp.ifmo.ru
Alexander G. Mamatov	—	Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: amamatov@corp.ifmo.ru

For citation: Orłowska-Kowalska T., Lovlin S. Yu., Tsvetkova M. H., Abdullin A. A., Mamatov A. G. Parametric identification of a servo drive model with deadtime-type nonlinearities. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 6. P. 576—584 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-6-576-584