

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Т. ОРЛОВСКА-КОВАЛЬСКА¹, С. Ю. ЛОВЛИН², М. Х. ЦВЕТКОВА²,
М. Е. КОНОНОВА², А. Г. МАМАТОВ²

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

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: seri-l@yandex.ru

Предложена модификация метода идентификации электрических параметров сервопривода на базе синхронной машины с постоянными магнитами и инвертора широтно-импульсной модуляции, основанная на методе приближения наименьших квадратов. В методе используется модель, учитывающая влияние „мертвого времени“ и падение напряжения на силовых ключах преобразователя. Его точность повышена за счет разделения процессов идентификации статического коэффициента передачи и электромагнитной постоянной времени на два этапа, в каждом из которых оценивается только один параметр. Показано, что предложенный метод обеспечивает более высокую точность оценки параметров, по сравнению с методами, использующими линейную модель сервопривода.

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

Введение. Новые возможности и новые методы интеллектуального управления функциональным движением мехатронных систем, применяемых в робототехнике, появились благодаря развитию преобразовательной техники [1]. Появление полностью управляемых преобразователей напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) класса D, широко используемых регулируемых электроприводах, позволило радикально повысить КПД (до 98 %) и расширить диапазон мощностей преобразовательных устройств.

Широтно-импульсные преобразователи — это нелинейные элементы, которые являются источником дополнительных проблем, возникающих при разработке систем управления. „Мертвое время“, которое вводится в сигнал ШИМ, чтобы предотвратить одновременное открытие ключей в стойке инвертора, и падение напряжения на ключах создают искажения напряжения на выходе ШИП и оказывают негативное влияние на работу алгоритмов управления, параметрической идентификации и диагностики электропривода [2—4].

Эти искажения влияют на токи машины, что приводит к искажениям фазного тока, пульсациям крутящего момента и ухудшению характеристик управления [5—8]. Результаты идентификации статического коэффициента передачи и электромагнитной постоянной времени электромеханического преобразователя, состоящего из ШИП и электрической машины, имеют погрешность в лучшем случае около 10 %, а в худшем — более 50 % [2]. Такие оценки параметров электромеханического преобразователя являются недопустимыми при синтезе бездатчикового управления и моделей для диагностики неисправностей.

Задача идентификации статического коэффициента передачи и электромагнитной постоянной времени, которые используются при синтезе контура тока системы управления электроприводом, наблюдателей при бездатчиковом управлении и диагностических моделей в задачах диагностики неисправностей электрической машины и ШИП, остается актуальной [6—8]. Традиционные методы частотной идентификации и идентификации по переходной

характеристике не учитывают наличия нелинейностей ШИП [5]. Анализ публикаций за последние 5 лет по параметрической идентификации электрических машин переменного тока [9, 10] и диагностике их неисправностей [11] показывает, что этой проблеме не уделяется внимание, при идентификации и диагностике используются линейные модели, а не более сложные нелинейные модели с „мертвым временем“ и падением напряжения на силовых ключах. В этих работах также не указывается причина отсутствия этих важных, на наш взгляд, особенностей ШИП.

Анализ работ по управлению электроприводами на базе машин переменного тока, наоборот, показывает большой интерес к данной проблеме [12, 13].

Работы [2—4] доказывают необходимость учета наличия нелинейностей ШИП при параметрической идентификации и диагностике электрических машин переменного тока, так как алгоритмы идентификации дают существенную погрешность. В этих статьях показано, что полученные результаты оценки параметров нельзя использовать при синтезе систем управления прецизионных электроприводов.

В [2] предложен метод оценки электрических параметров электропривода с учетом нелинейностей ШИП. Он позволяет повысить точность идентификации статического коэффициента передачи и электромагнитной постоянной времени электромеханического преобразователя по сравнению с существующими методами. Также указано, что у данного метода есть недостаток — если период тестового сигнала превышает оцениваемую постоянную времени, присутствуют большие погрешности.

В настоящей статье предлагается повысить точность этого метода за счет разделения идентификации статического коэффициента передачи и электромагнитной постоянной времени на два этапа, в каждом из которых будет идентифицироваться только один параметр. Такой вариант позволяет подобрать наиболее подходящий тестовый сигнал для оценки статического коэффициента передачи и электромагнитной постоянной времени электромеханического преобразователя.

Постановка задачи. Суть модифицированного метода идентификации параметров синхронной машины с постоянными магнитами (СМПМ) с нелинейностями типа „мертвое время“ проиллюстрирована на модели трехфазного инвертора с подключенной нагрузкой в виде СМПМ в dq -координатах [2]:

$$\begin{cases} \left(1 + T_e \frac{d}{dt}\right) i_d(t) = \frac{(U_{DC} - 2\Delta u_{\text{тр}})}{\sqrt{3}R} u_d(t) + f_d(t), \\ \left(1 + T_e \frac{d}{dt}\right) i_q(t) = \frac{(U_{DC} - 2\Delta u_{\text{тр}})}{\sqrt{3}R} u_q(t) + f_q(t), \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{p\Omega L}{R} i_q + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\tau(U_{DC} - 2\Delta u_{\text{тр}})}{R} \left(\sin\left(p\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \text{sign}(i_a) + \right. \\ &+ \left. \sin(p\alpha) \text{sign}(i_b) - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin\left(p\alpha + \frac{\pi}{6}\right) (\text{sign}(i_a) + \text{sign}(i_b) + \text{sign}(i_c)) \right), \\ f_q &= -\frac{p\Omega L}{R} i_d + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\tau(U_{DC} - 2\Delta u_{\text{тр}})}{R} \left(\text{sign}(i_a) \cos\left(p\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + \right. \\ &+ \left. \text{sign}(i_b) \cos(p\alpha) - \frac{1}{\sqrt{3}} \cos\left(p\alpha + \frac{\pi}{6}\right) (\text{sign}(i_a) + \text{sign}(i_b) + \text{sign}(i_c)) \right) - \frac{p\Omega\Psi}{R}, \end{aligned}$$

R — электрическое сопротивление фазы СМПП; T_e — электромагнитная постоянная времени СМПП; L — индуктивность фазы СМПП; Ψ — потокосцепление постоянных магнитов с обмотками статора; u_d, u_q — dq -составляющие напряжений СМПП; i_a, i_b, i_c — мгновенные значения токов в соответствующих фазах СМПП; i_d, i_q — dq -составляющие токов СМПП; τ — относительная задержка включения силовых ключей, „мертвое время“; $\Delta u_{гр}$ — падение напряжения на силовых ключах; p — число пар полюсов СМПП; Ω — скорость вращения ротора СМПП; α — угол поворота ротора СМПП.

Момент СМПП рассчитывается следующим образом [2]:

$$M = p\Psi i_q. \quad (2)$$

т.е. управляя величиной $i_q(t)$, можно однозначно задавать момент $M(t)$.

Дифференциальное уравнение для токов i_d и i_q , можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \left(1 + T_e \frac{d}{dt}\right) i_d(t) = K_{об} u_d(t) + f_d(t), \\ \left(1 + T_e \frac{d}{dt}\right) i_q(t) = K_{об} u_q(t) + f_q(t), \end{cases} \quad (3)$$

где $K_{об} = \frac{U_{DC} - 2\Delta u_{гр}}{\sqrt{3}R}$ — статический коэффициент передачи электромеханического преобразователя.

Использование линейных моделей для параметрической идентификации объектов такого типа при настройке регуляторов дает значительные погрешности [2—4]. Далее будет показано, как за счет разделения процедуры идентификации статического коэффициента передачи $K_{об}$ и электромагнитной постоянной времени T_e на два этапа можно повысить точность представленного метода идентификации в статье [2].

Модифицированный метод параметрической идентификации. Погрешность метода [2] связана с тем, что „мертвое время“ оказывает на объект управления такое же воздействие, как и управляющий сигнал. Дифференцировать эти воздействия можно, если сравнимы промежутки времени, на которых у них знаки разные и одинаковые. Искажение напряжения, связанное с „мертвым временем“, меняется при изменении знаков токов. Время от изменения знака управляющего сигнала до изменения знака токов сравнимо с Δt , даже если T_e на порядок больше Δt , что приводит к плохо обусловленной задаче [2].

В модифицированном методе идентификации параметры $K_{об}$ и τ оцениваются по установившимся значениям i_q при варьировании управляющего сигнала. Фазные напряжения СМПП в этом эксперименте формируются следующим образом:

$$\begin{cases} u_a(t) = u_0(t) \frac{U_{DC}}{\sqrt{3}} \sin(p\alpha(t)), \\ u_b(t) = u_0(t) \frac{U_{DC}}{\sqrt{3}} \sin\left(p\alpha(t) - \frac{2\pi}{3}\right), \\ u_c(t) = u_0(t) \frac{U_{DC}}{\sqrt{3}} \sin\left(p\alpha(t) + \frac{2\pi}{3}\right), \end{cases} \quad (4)$$

а dq -составляющие напряжений рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{2}{U_{DC}} \left(u_a \sin\left(p\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + u_b \sin(p\alpha) \right), \\ u_q &= \frac{2}{U_{DC}} \left(u_a \cos\left(p\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + u_b \cos(p\alpha) \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Эти напряжения принимают значение 1 при максимально возможных напряжениях в фазах СМПМ.

В первом эксперименте в управляющем сигнале варьируется не параметр u_0 , как в статье [2], а параметр α в уравнениях (4) по следующему закону:

$$\begin{aligned} u_0 &= u_{0\max}, \\ \alpha &= \omega t, \end{aligned} \tag{6}$$

где ω выбирается из условия $\frac{\omega L}{R} \ll u_{q\max} \frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$ и $\frac{\omega \Psi}{R} \ll u_{q\max} \frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$, $u_{q\max}$ — амплитуда q -составляющей тестового сигнала, а параметр $u_{0\max}$ выбирается максимально близким к единице. Параметры L и R могут быть заранее неизвестны, но их можно приблизительно оценить менее точными алгоритмами идентификации.

Параметр T_e оценивается по результатам второго эксперимента по реакции на скачок задающего сигнала u_d при известных параметрах $K_{об}$ и τ . В этом эксперименте:

$$\begin{aligned} u_q &= 0, \\ u_d &= u_{d\max} \theta(t), \\ \alpha &= \text{const}, \end{aligned} \tag{7}$$

где $\theta(t)$ — функция Хевисайда, а значение $u_{d\max}$ выбирается максимально близким к единице.

Ток i_q в установившемся режиме может быть получен по результатам первого эксперимента на основании формулы (3):

$$i_q(t) = K_{об}(u_q(t) - \tau f_{\tau,q}(t, \alpha)), \tag{8}$$

где

$$\begin{aligned} f_{\tau,q} &= 2 \left(\text{sign}(i_a) \cos\left(p\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + \text{sign}(i_b) \cos(p\alpha) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{3}} \cos\left(p\alpha + \frac{\pi}{6}\right) (\text{sign}(i_a) + \text{sign}(i_b) + \text{sign}(i_c)) \right). \end{aligned}$$

Такая задача параметрической идентификации решается МНК [14, 15]. Для линейной регрессии следующего вида:

$$Y = HX,$$

где Y — вектор наблюдений, X — вектор объясняемых переменных, H — матрица наблюдений, решение выглядит так:

$$X = (H^T H)^{-1} H^T Y. \tag{9}$$

В случае линейной регрессии (8):

$$\begin{aligned} Y &= [i_q(t_1) \quad i_q(t_2) \quad \dots \quad i_q(t_n)]^T, \\ H &= \begin{bmatrix} u_q(t_1) & f_{\tau,q}(t_1, \alpha_1) \\ u_q(t_2) & f_{\tau,q}(t_2, \alpha_2) \\ \vdots & \vdots \\ u_q(t_n) & f_{\tau,q}(t_n, \alpha_n) \end{bmatrix}, \\ X &= [K_1 \quad K_2]. \end{aligned}$$

Неизвестные параметры $K_{об}$ и τ в соответствии с формулой (8) вычисляются следующим образом:

$$\hat{K}_{об} = K_1, \quad \hat{\tau} = \frac{K_2}{K_1}. \tag{10}$$

В первом эксперименте система находится в квазиустановившемся режиме, т.е. влияние индуктивности и запаздывания цифровой системы незначительно из-за низкой скорости изменения тестового сигнала.

Графики токов, полученные в результате этого эксперимента, приведены на рис. 1. Результаты идентификации $K_{об}$ и τ в зависимости от амплитуды u_{0max} синусоидального задания приведены на рис. 2, а и б соответственно (пунктир — метод параметрической идентификации по линейной модели, штрихпунктир — метод [2], сплошная кривая — предложенный в настоящей статье метод).

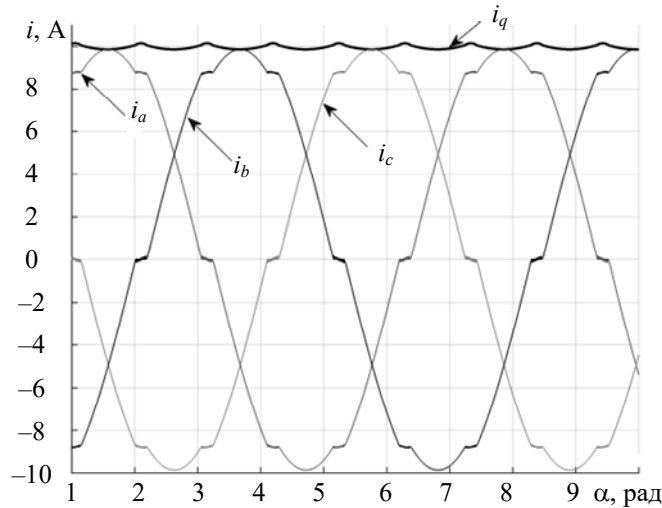


Рис. 1

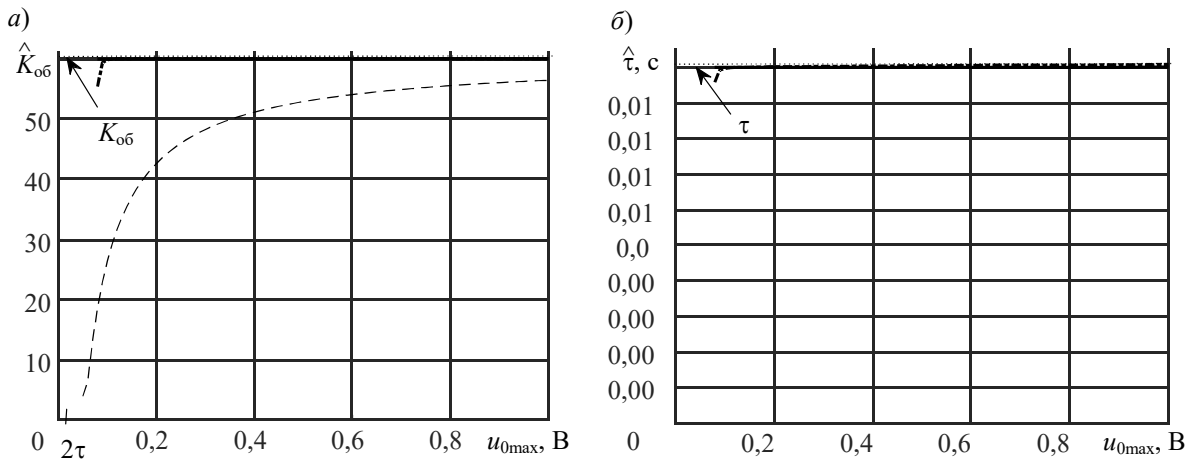


Рис. 2

Параметры определяются с высокой точностью на всем диапазоне значений u_{0max} . Данные используются только на участках времени, на которых токи во всех фазах СМПМ не были равны нулю. Это связано с тем, что когда один из фазных токов равен нулю, искажение напряжения в этой фазе уже не рассчитывается по формуле (1), оно равно значению, достаточному для компенсации фазного напряжения.

При известных оценках $\hat{K}_{об}$ и $\hat{\tau}$ формула (3) для дискретных моментов времени с периодом Δt принимает вид:

$$i_d(t + \Delta t) - \hat{K}_{об}(u_0(t) - \hat{\tau}f_{\tau,d}(t)) = (i_d(t) - \hat{K}_{об}(u_d(t) - \hat{\tau}f_{\tau,d}(t)))K_1, \tag{11}$$

где

$$f_{\tau,d} = 2 \left(\sin \left(p\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \text{sign}(i_a) + \sin(p\alpha) \text{sign}(i_b) - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \left(p\alpha + \frac{\pi}{6} \right) (\text{sign}(i_a) + \text{sign}(i_b) + \text{sign}(i_c)) \right),$$

$$K_1 = e^{-\frac{\Delta t}{T_e}}. \tag{12}$$

Вектор наблюдений Y , вектор объясняемых переменных X и матрица наблюдений H в случае линейной регрессии (10) следующие:

$$Y = \begin{bmatrix} i_d(t_2) - \hat{K}_{об}(u_0(t_1) - \hat{t}f_{\tau,d}(t_1)) \\ i_d(t_3) - \hat{K}_{об}(u_0(t_2) - \hat{t}f_{\tau,d}(t_2)) \\ \vdots \\ i_d(t_n) - \hat{K}_{об}(u_0(t_{n-1}) - \hat{t}f_{\tau,d}(t_{n-1})) \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} i_d(t_1) - \hat{K}_{об}(u_0(t_1) - \hat{t}f_{\tau,d}(t_1)) \\ i_d(t_2) - \hat{K}_{об}(u_0(t_2) - \hat{t}f_{\tau,d}(t_2)) \\ \vdots \\ i_d(t_{n-1}) - \hat{K}_{об}(u_0(t_{n-1}) - \hat{t}f_{\tau,d}(t_{n-1})) \end{bmatrix},$$

$$X = [K_1].$$

Неизвестный параметр \hat{T}_e в соответствии с формулой (12) вычисляется:

$$\hat{T}_e = -\frac{\Delta t}{\ln(K_1)}. \tag{13}$$

В данном эксперименте функции u_0 и $f_{\tau,d}$ имеют кусочно-постоянный характер. На рис. 3 приведены результаты оценки T_e при различных амплитудах задания u_{dmax} методом параметрической идентификации по линейной модели (пунктир), предложенным в статье [2] методом (штрихпунктир) и предложенным в настоящей статье методом (сплошная кривая).

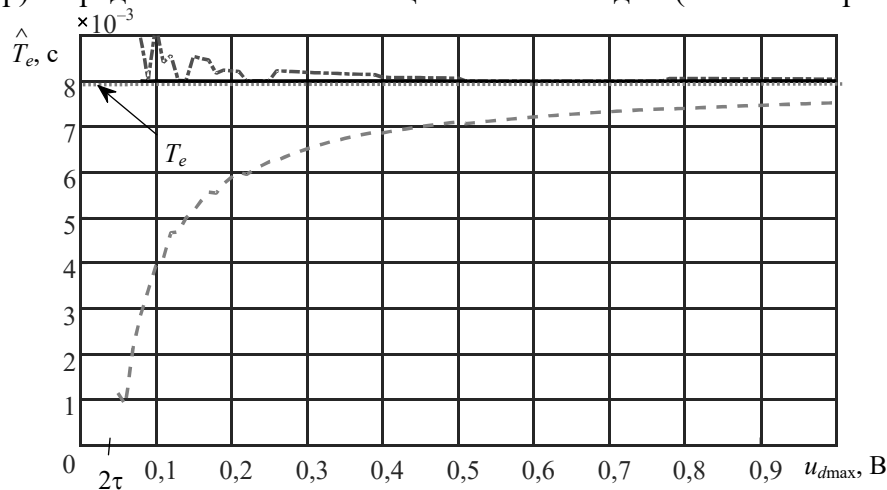


Рис. 3

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 (с учетом интерполирующего механизма).

СМПИМ 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. Частота коммутации ШИП 10кГц. Напряжение в звене постоянного тока 48 В.

Необходимо идентифицировать статический коэффициент передачи и электромагнитную постоянную времени, которые по паспорту равны: $K_{об} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{U_{DC}}{R} = 46,18$, $T_e = 8$ мс.

Параметры падения напряжения на ключах $\Delta u_{гр}$ и „мертвое время“ τ не известны. Есть только сведения о том, что $\tau > 0,01$, т.е. больше 1 мкс.

В качестве данных для идентификации использовались только те измерения, при которых все токи были не равны нулю. Получены следующие оценки статического коэффициента передачи и относительной задержки на переключение ключей:

$$\hat{K}_{об} = 47,05,$$

$$\hat{\tau} = 0,029.$$

Видно, что результат идентификации $\hat{K}_{об}$ практически не отличается от реального значения $K_{об}$. График фазного тока i_a , построенный по результатам идентификации (рис. 4, а), совпадает с графиком измеренного тока.

Результаты второго этапа идентификации приведены на рис. 4, б. Получена следующая оценка электромагнитной постоянной времени: $\hat{T}_e = 0,0078$ мс. График d -составляющей тока i_d , построенный по результатам идентификации, совпадает с графиком измеренного тока.

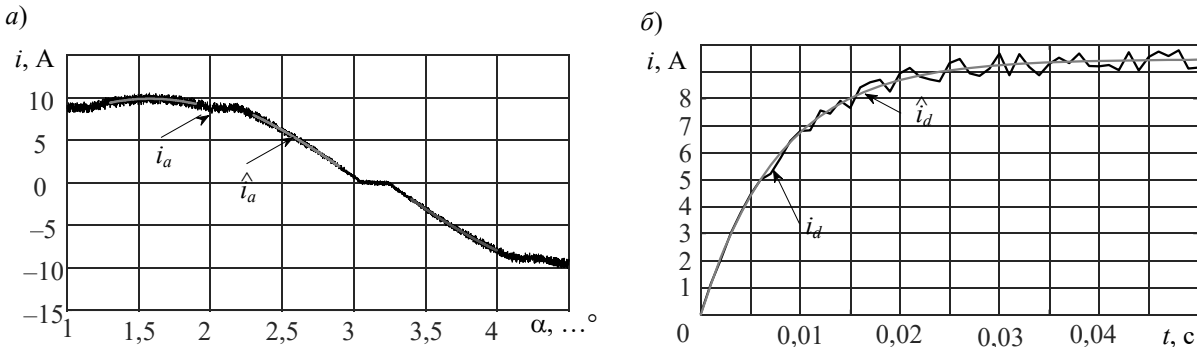


Рис. 4

Заключение. Предложенная модификация метода параметрической идентификации [2] позволяет повысить точность оценки параметров при существенном влиянии „мертвого времени“ и падении напряжения на ключах.

В методе используется наиболее подходящий тестовый сигнал для оценки каждого параметра. На первом этапе идентификации по результатам эксперимента с управляющим воздействием на стойки инвертора в виде трех синусоид, сдвинутых по фазе на 120° , определяются параметры $K_{об}$ и τ . Затем с учетом полученных значений параметров $K_{об}$ и τ определяется параметр T_e по переходной характеристике объекта управления.

Разработанный метод параметрической идентификации электрических параметров электропривода рекомендуется использовать как при синтезе систем управления, так и при технической диагностике. Результаты статьи представляют интерес для разработчиков и настройщиков электроприводов, которые занимаются проектированием, настройкой, диагностикой и их вводом в эксплуатацию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-11-2018-037 от 28 апреля 2017 г. (внутренний номер договора 03.G25.31.0251) „Создание высокотехнологичного производства конфигурируемых преобразователей частоты для синхронных прецизионных быстродействующих силовых электромеханических приводов нового поколения в наукоемких областях промышленности (станкостроительная, авиастроительная, судостроительная, электротехническая, нефтегазовая) и энергетики“).

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. 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.
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: Proceedings of the 16th International Conference 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 // Вестн. Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 1. С. 84—87.
5. Jul-Ki Seok, Seung-Ill Moon and Seung-Ki Sul. Induction machine parameter identification using PWM inverter at standstill // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1997. Vol. 12, N 2, June. P. 127—132.
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. Dilys J. and Baskys A. Self-identification of permanent magnet synchronous motor inductance for efficient sensorless control // 2017 Open Conf. of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream). Vilnius, 2017. P. 1—4.
10. Delgado F. A. P., Reed D. M., Hofmann H. F. and Sun J. Simultaneous Identification and Torque Control of Surface-Mount Permanent Magnet Synchronous Machines with Inverter Current and Voltage Constraints," 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Copenhagen, 2018, pp. 1185-1190.
11. Yang S., Hsu Y., Chou P., Chen G. and Jian D. Online Open-Phase Fault Detection for Permanent Magnet Machines with Low Fault Harmonic Magnitudes // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65, N 5, May. P. 4039—4050.
12. Bedetti N., Calligaro S. and Petrella R. Self-Commissioning of Inverter Dead-Time Compensation by Multiple Linear Regression Based on a Physical Model // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51, N 5. P. 3954—3964.
13. Townsend C. D., Mirzaeva G. and Goodwin G. C. Deadtime Compensation for Model Predictive Control of Power Inverters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2017. Vol. 32, N 9. P. 7325—7337.
14. Ljung L. System Identification: Theory for the User. Cambridge, MA: MIT Press, 1980.
15. Omrane I., Etien E., Bachelier O., and Dib W. 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
- Мария Евгеньевна Кононова** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: sergeeva.maria@mail.ru
- Александр Геннадьевич Маматов** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: amamatov@corp.ifmo.ru

Поступила в редакцию
16.03.2020 г.

Ссылка для цитирования: Орловска-Ковальска Т., Ловлин С. Ю., Цветкова М. Х., Кононова М. С., Маматов А. Г. Модификация метода параметрической идентификации синхронной машины с постоянными магнитами // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 6. С. 528—537.

**MODIFICATION OF THE METHOD OF PARAMETRIC IDENTIFICATION
OF A SYNCHRONOUS MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS**

**T. Orłowska-Kowalska¹, S. Yu. Lovlin², M. H. Tsvetkova²,
M. S. Kononova², A. G. Mamatov²**

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

²ITMO University, 197101, St. Petetsburg, Russia

E-mail: seri-l@yandex.ru

A modified method of identification of electrical parameters of a servo drive and a PWM inverter, based on the least square method, is proposed. The proposed identification method uses a model that considers the effect of "dead time" and the voltage drop on the power switches of the converter. The method accuracy is improved by separating the identification of the static transmission coefficient and the electromagnetic time constant into two stages, in each of the stages only one parameter is evaluated. The new method is shown to achieve a higher accuracy of parameter estimation compared to existing methods using a linear model of servo drive.

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. Orłowska-Kowalska T., Lovlin S.Yu., Tsvetkova M.Kh., Abdullin A.A., Mamatov A.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 6(62), pp. 576–584 (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. Jul-Ki Seok, Seung-Il Moon and Seung-Ki Sul. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1997, no. 2(12), pp. 127–132.
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 Applcat. Power Electron. Conf.*, 1998, pp. 95–100.
9. Dilys J. and Baskys A. *2017 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*, Vilnius, 2017, pp. 1–4.
10. Delgado F.A.P., Reed D.M., Hofmann H.F. and Sun J. *2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Copenhagen, 2018, pp. 1185–1190.
11. Yang S., Hsu Y., Chou P., Chen G. and Jian D. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, no. 5(65), pp. 4039–4050.
12. Bedetti N., Calligaro S. and Petrella R. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, no. 5(51), pp. 3954–3964.

13. Townsend C.D., Mirzaeva G. and Goodwin G.C. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, no. 9(32), pp. 7325–7337.
14. Ljung L. *System Identification: Theory for the User*, MIT Press, Cambridge, MA, 1980.
15. 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 |
| Maria S. Kononova | — | PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: sergeeva.maria@mail.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., Kononova M. S., Mamatov A. G. Modification of the method of parametric identification of a synchronous machine with permanent magnets. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 6. P. 528—537 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-6-528-537