

УДК 621.3.07: 681.5.015

**Н.В. МЕЗЕНЦЕВ**, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",  
**А.Ю. ЗАКОВОРОТНЫЙ**, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",  
**Г.В. ГЕЙКО**, ст. преп., НТУ "ХПИ"

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ПРИВОДА ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА**

Предлагается идентификация параметров тягового асинхронного привода дизель-поезда на основе метода наименьших квадратов. Выполнено преобразование исходной математической модели тягового привода к модели, в которой исключены неподдающиеся прямому измерению величины. Приводятся результаты имитационного моделирования, подтверждающие правильность предложенной параметрической идентификации. Ил.: 1. Библиогр.: 9 назв.

**Ключевые слова:** идентификация, метод наименьших квадратов, тяговый асинхронный привод, имитационное моделирование.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Качественное управление электроприводом основывается на точном знании его фазовых координат. В тяговом приводе дизель-поезда используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, измерение части фазовых координат которого напрямую невозможно [1]. Поэтому одной из основных задач, возлагаемых на систему управления, является задача идентификации данных, которая решается за счет использования различного рода наблюдателей [2 – 6]. Наблюдатели строятся на базе математических моделей асинхронного двигателя с известной структурой. Однако параметры двигателя (в большей степени сопротивления обмоток статора и ротора) могут меняться в широких диапазонах, что в конечном итоге приводит к ошибкам при определении фазовых координат. На сегодняшний день для идентификации параметров объектов существует ряд методов, большинство из которых основаны на использовании фильтров Калмана [7] и метода наименьших квадратов (МНК) [8 – 9]. Основная сложность практической реализации методов на основе фильтров Калмана в задачах управления электроприводом обуславливается большим числом выходных параметров как электрической, так и механической природы. Поэтому в работе предлагается идентификация параметров тягового асинхронного привода дизель-поезда на основе МНК.

**Целью статьи** является параметрическая идентификация тягового

---

© Н.В. Мезенцев, А.Ю. Заковоротный, Г.В. Гейко, 2014

асинхронного привода дизель-поезда на основе МНК.

Математическая модель тягового асинхронного привода при общеизвестных допущениях может быть представлена в неподвижной системе координат  $(\alpha, \beta, 0)$  следующим образом:

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\alpha} - \gamma i_{s\alpha} + \frac{\beta}{T_r} \Psi_{r\alpha} + p\beta\omega\Psi_{r\beta}; \quad (1)$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\beta} - \gamma i_{s\beta} + \frac{\beta}{T_r} \Psi_{r\beta} + p\beta\omega\Psi_{r\alpha}; \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{\Psi_{r\alpha}}{T_r} - p\omega\Psi_{r\beta}; \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\beta} - \frac{\Psi_{r\beta}}{T_r} - p\omega\Psi_{r\alpha}; \quad (4)$$

$$M = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_r} (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}); \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M - M_c), \quad (6)$$

где  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$  – соответственно проекции тока статора на оси  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $t$  – время;  $\sigma = 1 - k_s k_r = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$  – полный коэффициент рассеивания;  $L_m$ ,  $L_s$ ,  $L_r$  – соответственно взаимная индуктивность, индуктивности статора и ротора;  $U_{s\alpha}$ ,  $U_{s\beta}$  – соответственно проекции напряжения статора на оси  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $\gamma = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2}$ ;  $R_s$ ,  $R_r$  – активные сопротивления статора и ротора;  $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$ ;  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  – постоянная времени ротора;  $p$  – число пар полюсов;  $\Psi_{r\alpha}$ ,  $\Psi_{r\beta}$  – соответственно проекции потокосцеплений ротора на оси  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $\omega$  – частота вращения ротора;  $J$  – приведенный момент инерции двигателя;  $M$  – электромагнитный момент;  $M_c = b_0 + b_1\omega + b_2\omega^2$  – момент сопротивления движению;  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – коэффициенты, которые зависят от характеристик дизель-поезда и условий движения.

Для выполнения идентификации по МНК необходимо выполнить преобразование модели (1)–(6) к виду, в котором исключены

неподдающиеся измерению проекции потокосцепления ротора. Для этого объединив попарно уравнения (1) с (3) и (2) с (4), получим:

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{1}{K_r} \left( U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} - \sigma L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} \right); \quad (7)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{1}{K_r} \left( U_{s\beta} - R_s i_{s\beta} - \sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} \right). \quad (8)$$

Далее, продифференцировав обе части выражений (1) и (2), получим:

$$\frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} = \frac{1}{\sigma L_s} \frac{dU_{s\alpha}}{dt} - \gamma \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \frac{\beta}{T_r} \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + p\beta\omega \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + p\beta \frac{d\omega}{dt} \Psi_{r\beta}; \quad (9)$$

$$\frac{d^2 i_{s\beta}}{dt^2} = \frac{1}{\sigma L_s} \frac{dU_{s\beta}}{dt} - \gamma \frac{di_{s\beta}}{dt} + \frac{\beta}{T_r} \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + p\beta\omega \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + p\beta \frac{d\omega}{dt} \Psi_{r\alpha}. \quad (10)$$

Подставив выражения (7) в (9), а (8) в (10) и выполнив соответствующие преобразования, с учетом того, что  $\frac{d\omega}{dt} \approx 0$ , имеем

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} + p\omega \frac{di_{s\beta}}{dt} &= K_1 i_{s\alpha} + K_2 U_{s\alpha} + K_3 p\omega i_{s\beta} + \\ &+ K_4 \left( \frac{dU_{s\alpha}}{dt} + U_{s\beta} \right) + K_5 \frac{di_{s\alpha}}{dt}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_{s\beta}}{dt^2} + p\omega \frac{di_{s\alpha}}{dt} &= K_1 i_{s\beta} + K_2 U_{s\beta} + K_3 p\omega i_{s\alpha} + \\ &+ K_4 \left( \frac{dU_{s\beta}}{dt} + U_{s\alpha} \right) + K_5 \frac{di_{s\beta}}{dt}, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $K_1 = -\frac{R_s}{\sigma L_s T_r}$ ;  $K_2 = \frac{1}{\sigma L_s T_r}$ ;  $K_3 = -\frac{R_s}{\sigma L_s}$ ;  $K_4 = \frac{1}{\sigma L_s}$ ;  
 $K_5 = -\frac{(L_r R_s + L_s R_r)}{\sigma L_s L_r}$ .

На основе коэффициентов  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  могут быть получены основные параметры привода, которых достаточно для построения идентификатора. Эти параметры определяются следующим образом:

$$R_s = -\frac{K_3}{K_4}, L_s = \frac{K_3 - K_5}{K_2}, T_r = \frac{K_4}{K_2}, \sigma = -\frac{K_2}{K_4(K_3 - K_5)}.$$

Кроме идентификации параметров электрической части привода необходимо также выполнять идентификацию параметров его механической части, а именно, момента сопротивления движению.

Как известно, в математических моделях момент сопротивления движению  $M_c$  аппроксимируется полиномом второй степени с постоянными коэффициентами  $b_0, b_1, b_2$ , которые рассчитываются заранее и остаются постоянными при движении поезда по конкретному перегону. Однако, в процессе движения дизель-поезда по перегону, при изменении дорожной обстановки (погодные условия, изменения расписания и т.д.) эти коэффициенты могут изменяться. Поэтому необходимо выполнять их уточнение при движении подвижного состава по железнодорожному перегону.

Уточнённый момент сопротивления  $M_c^*$  может быть представлен следующим образом:

$$M_c^* = b_0 + b_1\omega + b_2\omega^2 + \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – составляющая, которая учитывает изменение дорожной обстановки. Тогда, используя МНК, могут быть рассчитаны новые коэффициенты  $b_0^*, b_1^*, b_2^*$ , в которых учтена составляющая  $\varepsilon$ .

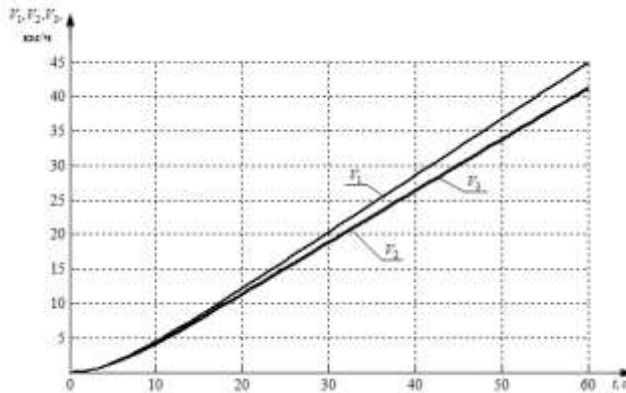


Рис. Изменение скорости движения дизель-поезда

На рис. приведены изменения во времени следующих скоростей движения дизель-поезда:  $V_1$  – расчётная скорость при известных

параметрах движения по перегону (при известном  $M_c$ );  $V_2$  – реальная скорость дизель-поезда;  $V_3$  – скорость, рассчитанная с учётом  $M_c^*$ . Как видно из рис., скорости  $V_2$  и  $V_3$  практически совпадают, что свидетельствует о правильности нахождения коэффициентов  $b_0^*$ ,  $b_1^*$ ,  $b_2^*$  методом наименьших квадратов, а следовательно, и оценки момента сопротивления  $M_c^*$ .

**Выводы.** С помощью метода наименьших квадратов выполнена идентификация параметров тягового асинхронного привода дизель-поезда. На основе данного подхода может быть создан наблюдатель для системы управления движением подвижного состава.

**Список литературы:** 1. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Х.: Изд. центр "НТМТ", 2013. – 248 с. 2. Бешта А.С. Идентификация координат асинхронного двигателя в условиях дрейфа активных сопротивлений / А.С. Бешта, А.В. Валахонцев, Е.Г. Худой // Электротехника та електроенергетика. – 2005. – № 2. – С. 52-64. 3. Афанасьев К.С. Идентификация скорости асинхронного электродвигателя лабораторного стенда с помощью фильтра Калмана и наблюдателя Льюенбергера / К.С. Афанасьев, А.С. Глазырин // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – № 4. – С. 66-69. 4. Водовозов А.М. Идентификация параметров асинхронной машины в установившихся режимах / А.М. Водовозов, А.С. Елюков // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 3. – С. 69-71. 5. Ha I.-J. An online identification method for both stator and rotor resistances of induction motor without rotational transducers / I.-J. Ha, S.-H. Lee // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2000. – Vol. 47. – № 4. – P. 842-852. 6. Duran M.J. Induction-motor sensorless vector control with online parameter estimation and overcurrent protection / M.J. Duran, J.L. Duran, F. Perez, J. Fernandez // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2006. – Vol. 53. – № 1. – P. 154-161. 7. Афанасьев К.С. Применение расширенного фильтра Калмана для улучшения параметрической робастности бездатчикового асинхронного электропривода / К.С. Афанасьев, А.С. Глазырин // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – № 1. – С. 2-7. 8. Зоркальцев В.И. Метод наименьших квадратов: геометрические свойства, альтернативные подходы, приложения / В.И. Зоркальцев. – Новосибирск: ВО Наука. – 1995. – 220 с. 9. Лоусон Ч. Численное решение задач методом наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. – М.: Наука. – 1986. – 232 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Dmitrienko V.D. Modelirovanie i optimizacija processov upravlenija dvizheniem dizel'-poezdov / V.D. Dmitrienko, A.Ju. Zakovorotnyj. – H.: Izd. centr "НТМТ", 2013. – 248 p. 2. Beshita A.S. Identifikacija koordinat asinhronnogo dvigatelja v uslovijah drejfa aktivnyh soprotivlenij / A.S. Beshita, A.V. Valahoncev, E.G. Hudoy // Elektrotehnika ta elektroenergetika. – 2005. – № 2. – P. 52-64. 3. Afanas'ev K.S. Identifikacija skorosti asinhronnogo jelektrodvigatelja laboratornogo stenda s pomoshh'ju fil'tra Kalmana i nabljudatelja Ljubenbergera / K.S. Afanas'ev, A.S. Glazyrin // Jelektrotehnicheskie komplekсы i sistemy upravlenija. – 2012. – № 4. – P. 66-69. 4. Vodovozov A.M. Identifikacija parametrov asinhronnoj mashiny v ustanovivshijsja rezhimah / A.M. Vodovozov, A.S. Eljukov // Vestnik IGJeU. – 2010. – Vyp. 3. – P. 69-71. 5. Ha I.-J. An online identification method for both stator and rotor resistances of induction motor without rotational transducers / I.-J. Ha, S.-H. Lee // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2000. – Vol. 47. – № 4. – P. 842-852. 6. Duran M.J.

Induction-motor sensorless vector control with online parameter estimation and overcurrent protection / *M.J. Duran, J.L. Duran, F. Perez, J. Fernandez* // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2006. – Vol. 53. – № 1. – P. 154-161. 7. *Afanas'ev K.S.* Primenenie rasshirenogo fil'tra Kalmana dlja uluchsheniya parametricheskoj robnosti bezdatchikovogo asinhronnogo jelektroprivoda / *K.S. Afanas'ev, A.S. Glazyrin* // Jelektrotehnicheskie komplekxy i sistemy upravlenija. – 2012. – № 1. – P. 2-7. 8. *Zorkal'cev V.I.* Metod naimen'shih kvadratov: geometricheskie svoystva, al'ternativnye podhody, prilozhenija / *V.I. Zorkal'cev*. – Novosibirsk: VO Nauka. – 1995. – 220 p. 9. *Louson Ch.* Chislennoe reshenie zadach metodom naimen'shih kvadratov / *Ch. Louson, R. Henson*. – M.: Nauka. – 1986. – 232 p.

*Поступила (received) 19.06.2014*

*Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Дмитриенко В.Д.*

Mezentsev Nikolay, Cand.Tech.Sci., Docent  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
Str. Frunze, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002  
tel./phone: +38 (067) 782-88-41, e-mail: besitzer@rambler.ru  
ORCID ID: 0000-0001-7834-2797

Zakovorotnyy Alexandr, Cand.Tech.Sci., Docent  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
Str. Frunze, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002  
tel./phone: +38 (067) 546-35-27, e-mail: arcade@i.ua  
ORCID ID: 0000-0003-4415-838X

Gejko Gennadij, senior lecturer  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute "  
Str. Frunze, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002  
tel./phone: +38 (098) 929-85-28, e-mail: e2901@rambler.ru  
ORCID ID: 0000-0001-6958-8306