

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимович, Д. А. Математическое моделирование электромагнитных характеристик уединенных бесконечно длинных стержневых заземлителей при стекании переменного тока промышленной частоты / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 4. – С. 5–13.
2. Бургсдорф, В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
3. Лобода, М. Международные стандарты по качеству заземляющих электродов / М. Лобода, Р. Марциняк // Вторая Российская конференция по заземляющим устройствам: сб. докл. Новосибирск, 22–25 марта 2005 г. / Сибирская энергетическая академия; редкол.: Ю. В. Целебровский [и др.]. – Новосибирск, 2005. – С. 25–35.
4. Туровский, Я. Техническая электродинамика / Я. Туровский; пер. с польск. – М.: Энергия, 1974. – 488 с.
5. Карякин, Р. Н. Входное сопротивление протяженного вертикального заземлителя в многослойной земле / Р. Н. Карякин, В. К. Добрынин // Электричество. – 1975. – № 8. – С. 18–21.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 16.09.2010

УДК 656.132.6:621.33

## **ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С БЕЗДАТЧИКОВОЙ СИСТЕМОЙ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

**Канд. техн. наук, доц. ОПЕЙКО О. Ф.**

*Белорусский национальный технический университет*

**Инженеры ПТАШНИК А. И., ХИЛЬМОН В. И.**

*УП «Белкоммунмаш»*

Для повышения качества городского электротранспорта необходимо улучшение эксплуатационных характеристик и динамических свойств тягового электропривода. Важное требование к тяговому электроприводу – формирование режима постоянства мощности. Такой режим присущ приводу постоянного тока последовательного возбуждения, который широко применяется в городском электротранспорте. Асинхронный тяговый электродвигатель дает очевидные преимущества в простоте эксплуатации по сравнению с приводом постоянного тока. При частотном двухзонном регулировании скорости можно сформировать благоприятный режим, близкий к постоянству мощности как при скалярном, так и при векторном управлении. Предпочтение отдается векторному управлению, которое позволяет формировать благоприятные для работы транспорта динамические характеристики, а также создает условия для экономии электроэнергии.

Система векторного управления асинхронным двигателем (АД) может быть построена с применением датчика скорости и без него. Наличие датчика скорости удорожает систему и снижает надежность тягового привода. Поэтому актуальным является создание бездатчикового тягового электропривода. Векторное управление АД [1–5] допускает методы синтеза, основанные на функциях Ляпунова [6–8]. Для построения высококачественных систем векторного управления большое значение имеет оценивание параметров в процессе функционирования. В [9] метод наименьших квадратов применен для идентификации параметров АД. В [8, 10–15] для оценивания недоступных для измерения переменных используются методы адаптивного управления электроприводом. Проблема синтеза высокоэффективной системы бездатчикового векторного управления остается актуальной.

Цель данной работы – формирование структуры и анализ методом математического моделирования бездатчиковой системы векторного управления, предназначенной для тягового электропривода.

Система управления тяговым электроприводом должна обеспечивать постоянство мощности при изменении скорости как вниз, так и вверх от номинальной. Регулирование выше номинальной скорости выполняют ослаблением магнитного поля двигателя. Уровень потребляемой из сети мощности ограничен и зависит от напряжения сети, а поскольку управление скоростью выполняется путем задания момента, то при задании момента должны учитываться как фактическое напряжение в сети, так и ограничение момента допустимым значением.

Для формирования векторного управления необходимы величины модуля и фазы потокосцепления ротора, которые, как и скорость, должны быть оценены косвенно, на основании измеряемых переменных двигателя. Для этого обычно применяют модель АД в неподвижной системе координат ( $a$ ,  $b$ ) [4–8]. Изменяемыми переменными являются токи фазных обмоток статора.

Функциональная схема системы представлена на рис. 1.

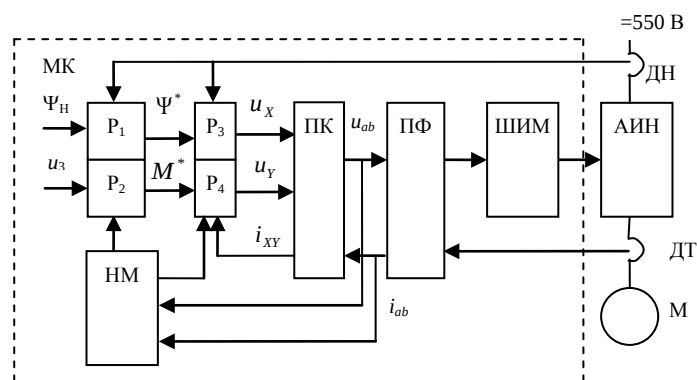


Рис. 1. Функциональная схема системы

Система содержит силовую часть (преобразователь АИН и двигатель М), датчики напряжения ДН и тока ДТ и микроконтроллер МК, формирующий сигналы управления программным способом. Регуляторы скорости  $P_1$ ,  $P_2$  формируют сигналы задания  $\Psi^*$ ,  $M^*$  на входы регуляторов  $P_3$ ,  $P_4$  потоко-

сцепления и момента соответственно. Модуль ПК выполняет координатные, а ПФ – фазные преобразования векторного управления. Микроконтроллер содержит аппаратный ШИМ, формирующий трехфазную последовательность модулированных по ширине синусоидальных сигналов управления преобразователем. Настраиваемая модель НМ (фильтр Калмана) выполняет оценивание (идентификацию) величин потокосцепления ротора  $\Psi$  и скорости  $\omega$ .

Представим электромагнитные процессы АД в неподвижной системе координат  $(a, b)$  уравнениями [6–9]:

$$\begin{aligned}\dot{\Psi}_a &= -\alpha\Psi_a - \bar{\omega}\Psi_b + \alpha L_{12}i_a; \\ \dot{\Psi}_b &= -\alpha\Psi_b + \bar{\omega}\Psi_a + \alpha L_{12}i_b; \\ \frac{di_a}{dt} &= -R_1K_4i_a + K_4u_a - \beta\dot{\Psi}_a; \\ \frac{di_b}{dt} &= -R_1K_4i_b + K_4u_b - \beta\dot{\Psi}_b.\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь  $\alpha = R_2/L_2$ ;  $K_4 = 1/\sigma L_1$ ;  $\beta = k_2K_4$ ;  $i_a, i_b$  – ток статора;  $\Psi_a, \Psi_b$  – потокосцепление ротора. Если ввести обозначения  $x^T = [i_a, \Psi_a, i_b, \Psi_b]$  для переменных состояния,  $u_{ab}^T = [u_a, u_b]$  – для напряжения статора,  $y^T = [i_a, i_b]$ ,  $\alpha_1 = R_1/\sigma L_1$ , то систему (1) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu_{ab}; \\ y &= Cx.\end{aligned}\tag{2}$$

Здесь

$$A = \begin{bmatrix} -\alpha_1 - k_2 k_1 \alpha / \sigma & k_2 K_4 \alpha & 0 & k_2 K_4 \bar{\omega} \\ \alpha L_{12} & -\alpha & 0 & -\bar{\omega} \\ 0 & -k_2 K_4 \bar{\omega} & -\alpha_1 - k_1 k_2 \alpha / \sigma & k_2 K_4 \alpha \\ 0 & \bar{\omega} & \alpha L_{12} & -\alpha \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} K_4 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

В уравнениях величина  $\bar{\omega} = z\omega$ , где  $z$  – число пар полюсов;  $\omega$  – угловая скорость ротора, может рассматриваться как переменный параметр. Тогда уравнения (1) и (2) линейны относительно переменных  $x$  и позволяют построить фильтр Калмана [10]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu_{ab} + K(i_{ab} - Cx); \\ y &= Cx.\end{aligned}\tag{3}$$

Здесь и далее переменные  $x, y$  принадлежат фильтру Калмана. Переменные  $u_{ab} = (u_a, u_b)$ ,  $i_{ab} = (i_a, i_b)$  принадлежат объекту управления, тяго-

вому электроприводу, представленному в неподвижной системе координат  $(a, b)$ , причем  $u_{ab} = (u_a, u_b)$  – вектор сигнала управления;  $i_{ab} = (i_a, i_b)$  – вектор токов статора, полученный от датчиков фазных токов в результате фазного преобразования. Матрица  $K$  коэффициентов усиления определяется в зависимости от критерия качества, которому должен удовлетворять фильтр Калмана. В [10] для этого предлагается использовать минимизацию интегральной квадратичной оценки идентификации переменных. Выражения (3) определяют структуру фильтра. На рис. 1 фильтр Калмана (3) представлен звеном НМ.

Матрица  $A$  содержит неизвестные величины – это угловая скорость  $\omega$  ротора и изменяющиеся в процессе функционирования параметры электродвигателя, в первую очередь  $\alpha = R_1/\sigma L_1$ ;  $\alpha_1 = R_2/L_2$ . Для обеспечения заданной точности оценивания  $\Psi$  и  $\omega$  желательна автоматическая идентификация параметра  $\alpha = R_1/\sigma L_1$  в структуре фильтра Калмана. Для идентификации параметров АД на практике применяются разнообразные методы в [15]. Метод наименьших квадратов, основанный на измерениях переменных в разные моменты времени в процессе функционирования, применяется в [9]. В [14] использован метод вычисления параметров, основанный на использовании соотношений переменных в двигателе. Альтернативой этим методам может служить самонастройка (адаптация) на основании метода скоростного градиента [16, 17]. Применение методов самонастройки дает преимущество в отношении робастности системы.

Критерий качества адаптации представим в виде

$$Q = \Delta i^2 + \lambda \Delta \Psi^2. \quad (4)$$

Здесь  $\Delta i^2 = (i_{ab} - y)^2$ ;  $\Delta \Psi^2 = (\Psi_{ab} - \hat{\Psi}_{ab})^2$ ;  $\Psi$  – оцениваемое значение потокосцепления ротора;  $\lambda$  – постоянный коэффициент. Производная  $Q$  по времени в силу системы уравнений (3) принимает вид

$$W = \dot{Q} = \left( \frac{\partial Q}{\partial x} \right)^T \dot{x} = \left( \frac{\partial Q}{\partial x} \right)^T (Ax + Bu_{ab} + K(i_{ab} - Cx)). \quad (5)$$

Здесь

$$\left( \frac{\partial Q}{\partial x} \right)^T = 2 \left( -(i_a - x_1), -\lambda \Delta \Psi_a, -(i_b - x_3), -\lambda \Delta \Psi_b \right).$$

Скоростной градиент по отношению к параметрам  $\alpha$ ,  $\bar{\omega}$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \nabla_{\alpha} W &= \left( \frac{\partial Q}{\partial x} \right)^T \frac{\partial}{\partial \alpha} (Ax + Bu_{ab} + K(i_{ab} - Cx)); \\ \nabla_{\bar{\omega}} W &= \left( \frac{\partial Q}{\partial x} \right)^T \frac{\partial}{\partial \bar{\omega}} (Ax + Bu_{ab} + K(i_{ab} - Cx)). \end{aligned} \quad (6)$$

Адаптация (автоматическая настройка параметра  $\alpha$ ) должна происходить в соответствии с [16, 17]:

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= -\gamma_1 \nabla_{\alpha} W; \\ \dot{\bar{\omega}} &= -\gamma_2 \nabla_{\bar{\omega}} W. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $\gamma_1, \gamma_2$  – коэффициенты, выбираемые в зависимости от желаемой интенсивности процесса самонастройки.

Математическое имитационное моделирование системы бездатчикового управления тяговым электроприводом выполнено для асинхронного тягового электродвигателя мощностью 150 кВт, 1500 об/мин, 460 В, 50 Гц в соответствии с функциональной схемой, показанной на рис. 1 при учете синусоидальной трехфазной ШИМ с частотой 1 КГц. Моделирование выполнено для различных значений сопротивлений обмоток двигателя в пределах от 0,5 до 1,5 от расчетных значений, что соответствует температурным изменениям [14]. Увеличение сопротивлений не оказывает существенного влияния на динамику модели, а при уменьшении сопротивлений динамика несколько ухудшается, что видно из рис. 2 и 3.

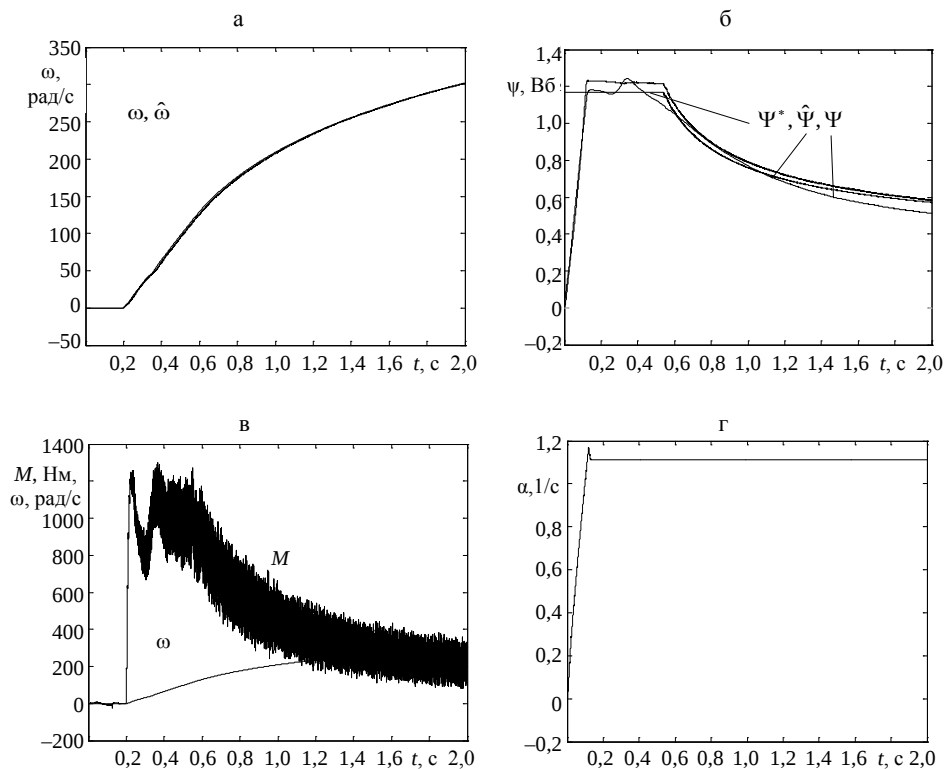


Рис. 2. Процесс разгона при расчетных параметрах

Результаты математического имитационного моделирования системы представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2 показан процесс разгона при расчетных значениях параметров двигателя. На рис. 2а представлены истинное  $\omega$  и оцениваемое  $\hat{\omega}$  значения скорости при разгоне, на рисунке 2б – заданное  $\Psi^*$ , истинное  $\Psi$  и оцениваемое  $\hat{\Psi}$  значения потокосцепления. На рис. 2в изображены электромагнитный момент и скорость при разгоне, а на рис. 2г – процесс оценивания параметра  $\alpha$ .

На рис. 3а–г показаны те же кривые процесса разгона при значениях сопротивлений обмоток ротора и статора, вдвое меньших чем расчетные. Анализ переходных процессов показывает, что погрешность оценивания параметра  $\alpha$  приводит к неточному оцениванию потокосцепления ротора  $\Psi$ .

Последнее отражается на качестве формирования электромагнитного момента  $M$  (рис. 2в, 3в), который при разгоне имеет колебания. Указанные погрешности находятся в допустимых пределах, что подтверждается приемлемым качеством идентификации и регулирования скорости на всем интервале разгона.

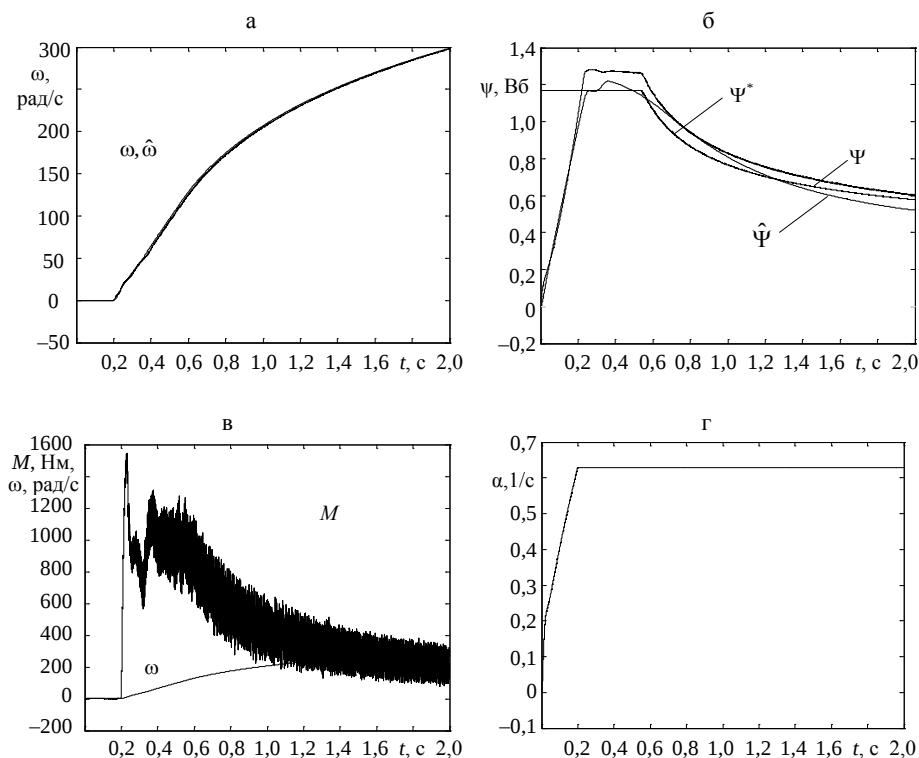


Рис. 3. Процесс разгона при  $\alpha, \alpha_1$  вдвое меньших, чем расчетные

## ВЫВОД

Качество переходных процессов в бездатчиковой системе векторного управления асинхронным электродвигателем в значительной степени определяется точностью оценивания переменных состояния системы и параметров фильтром Калмана.

Адаптация параметров фильтра Калмана способствует стабильности динамических показателей системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. B l a s c h k e, F. Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asynchronmaschine / F. Blaschke // Siemens-Forsch und Entwicklungsber. – 1972. – No. 1. – S. 184–193.
2. С и с т е м ы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентилями преобразователями / О. В. Слежановский [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
3. Ф и р а г о, Б. И. Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию по теории электропривода / Б. И. Фираго. – Минск: БНТУ, 2005. – 126 с.
4. Ф и р а г о, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2004. – 527 с.

5. Ф и р а г о, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2004. – 527 с.
6. S t e p h a n, J. Real Time Estimation of the Parameters and Flux of Induction Motors / J. Stephan, M. Bodson, J. Chiasson // IEEE Trans. On Industry Applications. Vol. IA-30, 1994. – No. 3. – P. 745–759.
7. E l b u l u k, M. Design and Implementation of a Closed-Loop Observer and Adaptive Controller for Induction Motor Drives / M. Elbuluk, N. Langovsky, M. D. Kankam // IEEE Trans. On Industry Applications. Vol. IA-34, 1998. – No. 3. – P. 435–442.
8. M a r i n o, R. Global Adaptive Output Feedback Control of Induction Motors with Uncertain Rotor Resistance / R. Marino, S. Peresada, P. Tomei // IEEE Trans. On Automatical Control. Vol. AC-44, 1999. – No. 5. – P. 745–759.
9. A N o n l i n e a r Least-Squares Approach for Identification of the Induction Motor Parameters / J. Kaiyu Wang [et al.] // IEEE Trans. On Autom. Control, Vol. AC-50, 2005. – No. 10. – P. 1622–1628.
10. S e n s o r l e s s Control with Kalman Filter on TMS320 Fixed-Point DSP. Literatur Number: BPRA057, Texas Instruments Europe July 1997.
11. И н ь к о в, Ю. М. Системы управления для электроприводов с асинхронными тяговыми двигателями / Ю. М. Иньков, Г. А. Федяева, В. П. Феоктистов // Электротехника. – 2009. – № 4. – С. 8–12.
12. П а н к р а т о в, В. В. Синтез адаптивных алгоритмов вычисления скорости асинхронного электропривода на основе второго метода Ляпунова / В. В. Панкратов, Д. А. Котин // Электричество. – 2007. – № 8. – С. 48–53.
13. В и н о г р а д о в, А. Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов / А. Виноградов, А. Сибирцев, С. Журавлев // Силовая электроника. – 2007. – № 1. – С. 46–52.
14. В о л к о в, А. В. Идентификация потокоцепления ротора и скорости асинхронного двигателя с учетом изменений его активных сопротивлений / А. В. Волков, Ю. С. Скалько // Электротехника. – 2009. – № 11. – С. 2–12.
15. A R e v i e w of RFO Induction Motor Parameter Estimation Techniques / A. Hamid [et al.] // IEEE Trans. On Energy Conversion. – 2003. – Vol. 18, No. 2. – P. 271–283.
16. Ф о м и н, В. Н. Адаптивное управление динамическими системами / В. Н. Фомин, А. Л. Фрадков, В. А. Якубович. – М.: Наука, 1981.
17. Ф р а д к о в, А. Л. Адаптивное управление в сложных системах / А. Л. Фрадков. – М.: Наука, 1990.

Представлена кафедрой электропривода  
и автоматизации промышленных установок  
и технологических комплексов

Поступила 02.02.2010