

ПРИМЕНЕНИЕ РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ ОЦЕНКИ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

М.В. Таланов, А.В. Карасев, В.М. Таланов

Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева
430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68

E-mail: mvtal@mail.ru

Предлагается методика оценки угловой скорости вращения ротора с использованием расширенного фильтра Калмана на основе анализа потокосцепления ротора.

Ключевые слова: неподвижная система координат, расширенный фильтр Калмана, асинхронный электродвигатель, библиотека Digital Motor Control, MATLAB, датчик скорости.

Во многих случаях применение датчика скорости в системах управления асинхронным электродвигателем невозможно из-за технических сложностей (установка датчика, надежность датчика, условия эксплуатации электродвигателя) или стоимости такого датчика [1]. Одним из способов оценки угловой скорости вращения ротора является использование расширенного фильтра (наблюдателя) Калмана [1, 2].

Для использования такого фильтра необходима модель электродвигателя в режиме реального времени [1].

Далее приводится математическая модель асинхронного электродвигателя в пространстве состояний, которая дополнена неизмеряемой величиной – электрической угловой скоростью вращения ротора [1, 2]:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu ; \quad (1)$$

$$y = Cx, \quad (2)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -1/T_s^* & 0 & L_m/(L'_s L_r T_r) & \omega_r L_m/(L'_s L_r) & 0 \\ 0 & -1/T_s^* & -\omega_r L_m/(L'_s L_r) & L_m/(L'_s L_r T_r) & 0 \\ L_m/T_r & 0 & -1/T_r & -\omega_r & 0 \\ 0 & L_m/T_r & \omega_r & -1/T_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1/L'_s & 0 \\ 0 & 1/L'_s \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$x = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta} \quad \omega_r]^T$ – вектор состояния, $u = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta}]^T$ – вектор управления, A – матрица состояний, C – матрица выхода, $L'_s = \sigma L_s$ – переходная индук-

Михаил Викторович Таланов, аспирант.

Александр Вениаминович Карасев (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Промышленная электроника».

Виктор Михайлович Таланов (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

тивность статора, где $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ – коэффициент рассеяния, L_s – индуктивность обмотки статора; L_m – индуктивность намагничивания; $L_r = L_{lr} + L_m$ – индуктивность обмотки ротора, где L_{lr} – индуктивность рассеяния обмотки ротора; $T_r = L_r / R_r$ – постоянная времени ротора; $\omega_r = \omega_m p$ – электрическая угловая скорость вращения ротора, где ω_m – механическая угловая скорость вращения ротора, p – число пар полюсов электродвигателя; $T_s^* = L_s' / (R_s + R_r (L_m / L_r)^2)$ – комбинированный параметр, где R_s – активное сопротивление обмотки статора, R_r – активное сопротивление обмотки ротора; $i_{s\alpha}$ и $i_{s\beta}$ – проекции токов в обмотках статора на оси неподвижной системы координат, $u_{s\alpha}$ и $u_{s\beta}$ – проекции линейных напряжений обмоток статора на оси неподвижной системы координат, $\psi_{r\alpha}$ и $\psi_{r\beta}$ – проекции вектора потокосцепления ротора на оси неподвижной системы координат.

Проверка алгоритма фильтрации с моделью электродвигателя из [1, 2] (см. формулы (1) и (2)) в среде MATLAB показала большую погрешность в оценке угловой скорости вращения ротора. С целью уменьшения этой погрешности предлагается использовать дополнительный наблюдатель потокосцепления. В качестве такого наблюдателя был взят наблюдатель из библиотеки Digital Motor Control от фирмы Texas Instruments [3]. Математическая модель этого наблюдателя может быть представлена следующей системой уравнений:

$$i_{ds}^e = i_{s\alpha} \cos(\theta_{\psi_r}) + i_{s\beta} \sin(\theta_{\psi_r}), \quad (3)$$

$$i_{qs}^e = -i_{s\alpha} \sin(\theta_{\psi_r}) + i_{s\beta} \cos(\theta_{\psi_r}); \quad (4)$$

$$\frac{d\psi_{dr}^{e,i}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{ds}^e - \frac{1}{T_r} \psi_{dr}^{e,i}, \quad (5)$$

$$\psi_{qr}^{e,i} = 0; \quad (6)$$

$$\psi_{dr}^{s,i} = \psi_{dr}^{e,i} \cos(\theta_{\psi_r}) - \psi_{qr}^{e,i} \sin(\theta_{\psi_r}); \quad (7)$$

$$\psi_{qr}^{s,i} = \psi_{dr}^{e,i} \sin(\theta_{\psi_r}) + \psi_{qr}^{e,i} \cos(\theta_{\psi_r}); \quad (8)$$

$$\psi_{ds}^{s,i} = \left(\frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} \right) i_{s\alpha} + \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr}^{s,i}; \quad (9)$$

$$\psi_{qs}^{s,i} = \left(\frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} \right) i_{s\beta} + \frac{L_m}{L_r} \psi_{qr}^{s,i}; \quad (10)$$

$$\psi_{ds}^{s,v} = \int (u_{s\alpha} - i_{s\alpha} R_s - u_{comp,ds}) dt; \quad (11)$$

$$\psi_{qs}^{s,v} = \int (u_{s\beta} - i_{s\beta} R_s - u_{comp,qs}) dt; \quad (12)$$

$$u_{comp,ds} = K_p (\psi_{ds}^{s,v} - \psi_{ds}^{s,i}) + K_i \int (\psi_{ds}^{s,v} - \psi_{ds}^{s,i}) dt; \quad (13)$$

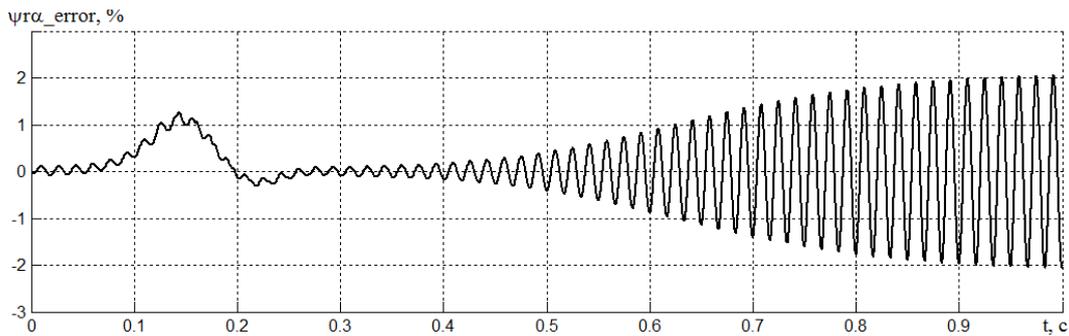
$$u_{comp,qs} = K_p (\psi_{qs}^{s,v} - \psi_{qs}^{s,i}) + K_i \int (\psi_{qs}^{s,v} - \psi_{qs}^{s,i}) dt; \quad (14)$$

$$\Psi_{r\alpha}^{Fe} = -\left(\frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m}\right) i_{s\alpha} + \frac{L_r}{L_m} \Psi_{ds}^{s,v}; \quad (15)$$

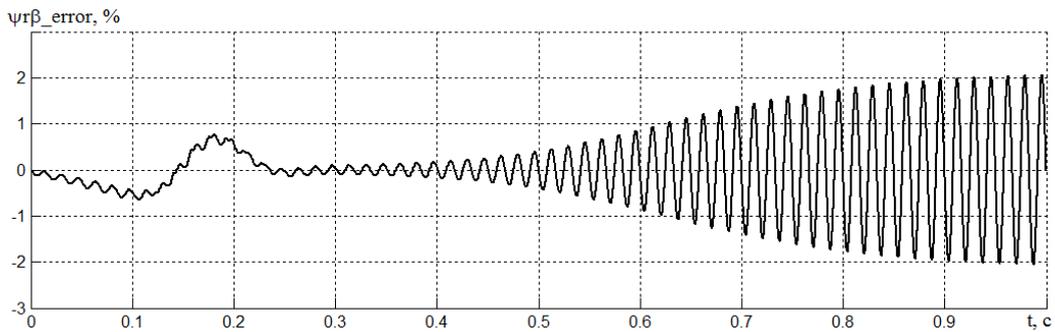
$$\Psi_{r\beta}^{Fe} = -\left(\frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m}\right) i_{s\beta} + \frac{L_r}{L_m} \Psi_{qs}^{s,v}; \quad (16)$$

$$\theta_{\Psi_r} = \arctan\left(\frac{\Psi_{r\alpha}^{Fe}}{\Psi_{r\beta}^{Fe}}\right), \quad (17)$$

где θ_{Ψ_r} – угол вектора потокосцепления ротора; коэффициенты K_p и K_i подбираются опытным путем таким образом, чтобы обеспечить удовлетворительную динамику и точность восстановления потокосцепления ротора. Приведенная математическая модель наблюдателя потокосцепления была реализована в среде MATLAB. Для проверки этой модели было проведено восстановление измеренного вектора потокосцепления ротора. На рис. 1 приведены графики ошибок оценки вектора потокосцепления ротора (изображены погрешности относительно амплитудных значений измеренных потокосцеплений в установившемся режиме).

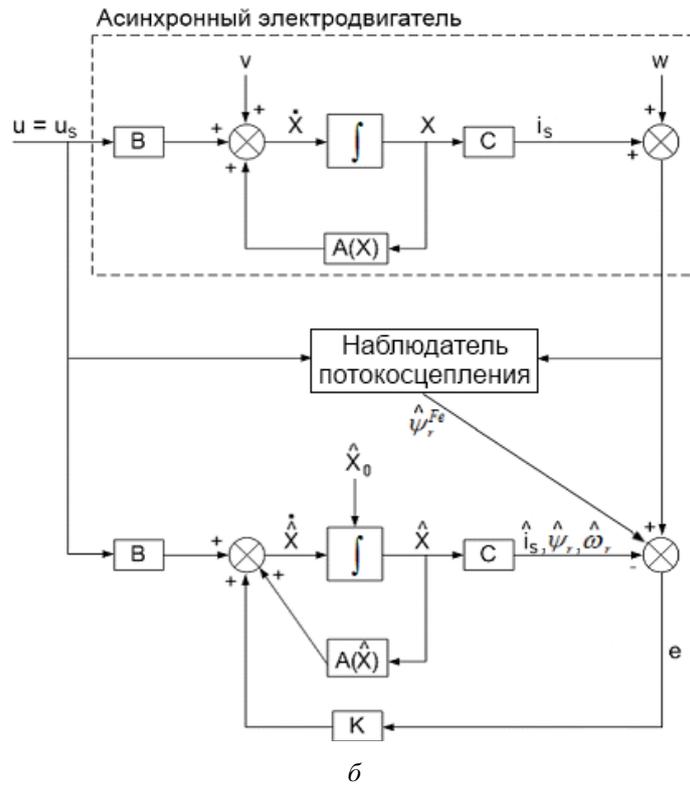
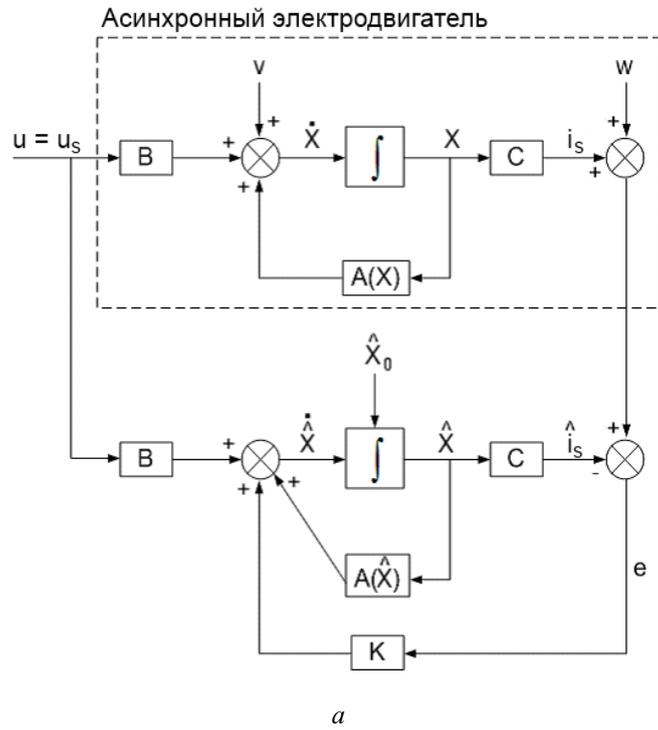


a



б

Р и с. 1. Ошибки оценки вектора потокосцепления ротора:
a – ошибка оценки проекции вектора потокосцепления ротора на ось *d*;
б – ошибка оценки проекции вектора потокосцепления ротора на ось *q*



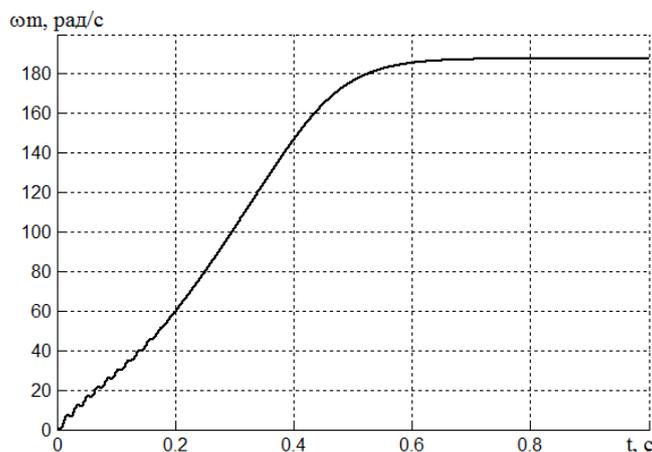
Р и с. 2. Сравнение структурных схем наблюдателей:
a – расширенный фильтр Калмана;
б – улучшенный наблюдатель на основе расширенного фильтра Калмана

Из результатов моделирования видно, что дополнительный наблюдатель с высокой точностью восстановил потокосцепление ротора – ошибка оценки составляет не более 1,5 % при переходном режиме и не более 2,1 % в установившемся режиме.

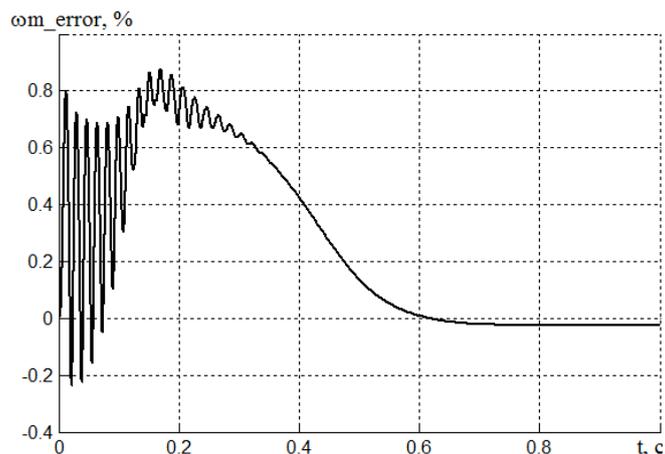
Структуры расширенного фильтра Калмана и улучшенного наблюдателя на его основе приведены на рис. 2, где $u = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta}]^T$, $i_s = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T$, $v(k)$ – вектор возмущений; $w(k)$ – вектор ошибок измерений; \hat{i}_s – вектор оценки i_s ; $\hat{\psi}_r$ – вектор оценки $\psi_{r\alpha}$ и $\psi_{r\beta}$; $\hat{\psi}_r^{Fe} = [\psi_{r\alpha}^{Fe} \quad \psi_{r\beta}^{Fe}]^T$ – вектор оценки $\psi_{r\alpha}$ и $\psi_{r\beta}$, полученный с помощью дополнительного наблюдателя потокосцепления; $\hat{\omega}_r$ – оценка ω_r ; \hat{x}_0 – начальная оценка вектора состояния x ; \hat{x} – оценка x .

Далее приведены результаты оценки переменных состояния электродвигателя с помощью улучшенного наблюдателя на основе расширенного фильтра Калмана.

На рис. 3 показана восстановленная наблюдателем механическая угловая скорость вращения ротора.



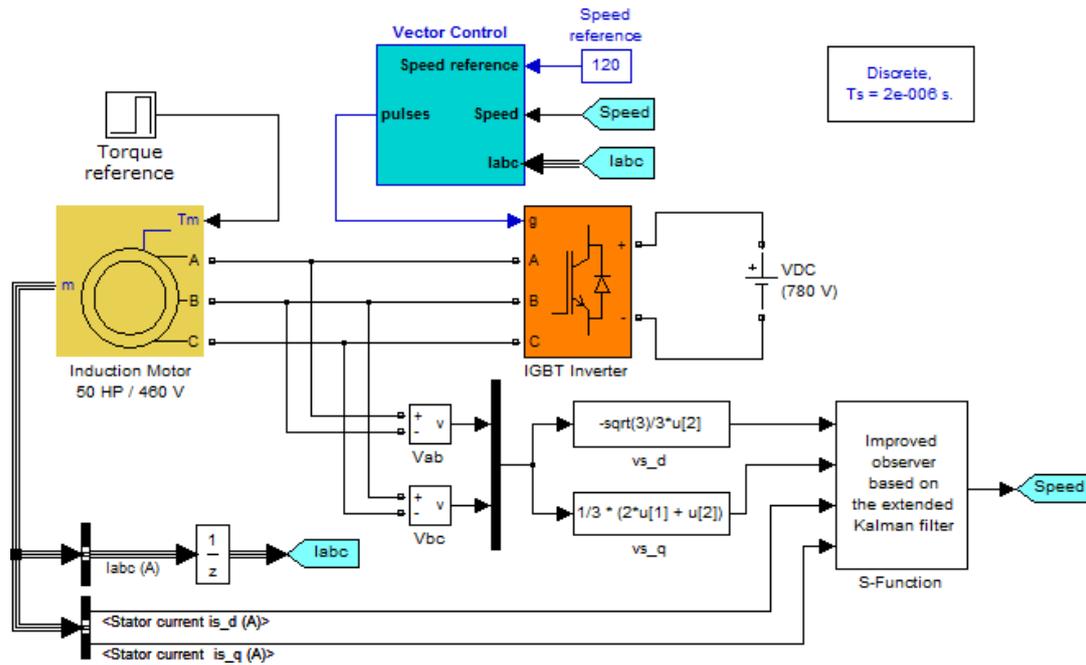
Р и с. 3. Оценка угловой скорости вращения ротора



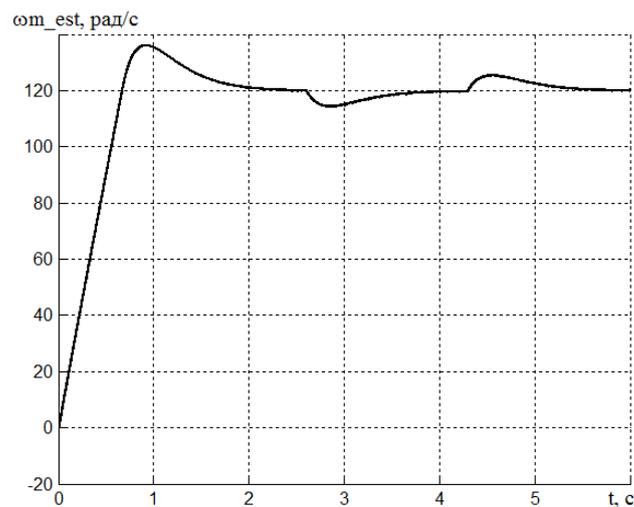
Р и с. 4. Ошибка оценки угловой скорости вращения ротора

На рис. 4 показана ошибка оценки механической угловой скорости вращения ротора (изображена погрешность относительно амплитудного значения в установившемся режиме измеренной угловой скорости вращения ротора).

Далее приведены результаты исследования улучшенного наблюдателя на основе расширенного фильтра Калмана в составе замкнутой системы векторного управления (см. рис. 5) при набросе (50 % от базового вращающего момента в момент времени $t = 2,6$ с) и сбросе (50 % от базового вращающего момента в момент времени $t = 4,3$ с) нагрузки (рис. 6).



Р и с. 5. Система векторного управления асинхронным двигателем с реализованным в виде S-функции наблюдателем угловой скорости вращения ротора



Р и с. 6. Результат оценки угловой скорости вращения ротора асинхронного двигателя улучшенным наблюдателем в составе системы векторного управления в переходных режимах

Выводы

Предложена структура наблюдателя на основе расширенного фильтра Калмана, которая позволяет получить оценку угловой скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя с точностью до 1,0 % для переходного режима и с точностью 0,025 % для установившегося режима, что исключает необходимость использования датчика скорости. Проведено исследование работы наблюдателя в составе системы векторного управления асинхронным двигателем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Texas Instruments*. Sensorless Control with Kalman Filter on TMS320 Fixed-Point DSP. – Texas Instruments, Literature Number: BPRA057, July 1997. – 92 p.
2. *Vas P.* Sensorless Vector and Direct Torque Control. – Oxford University Press, 1998. – 729 p.
3. *Akin B., Bhardwaj M.* Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Induction Motors. – Texas Instruments, Feb. 2010. – 43 p.

Статья поступила в редакцию 7 мая 2013 г.

APPLICATION OF THE EXTENDED KALMAN FILTER FOR THE ESTIMATION OF THE ROTOR SPEED OF AN INDUCTION MOTOR

M.V. Talanov, A.V. Karasev, V.M. Talanov

Ogarev Mordovia State University
68, Bolshevistskaya st., Saransk, 430005

In this paper the estimation method of the rotor angular velocity by means of the rotor flux linkage analysis using the extended Kalman filter is suggested.

Keywords: stationary reference frame, extended Kalman filter, induction motor, Digital Motor Control library, MATLAB, speed sensor.

Mikhail V. Talanov, Postgraduate student.

Alexander V. Karasev (Ph. D. (Techn.)), Associate Professor.

Viktor M. Talanov (Ph. D. (Techn.)), Associate Professor.