

## 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  $\omega_m$  – 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

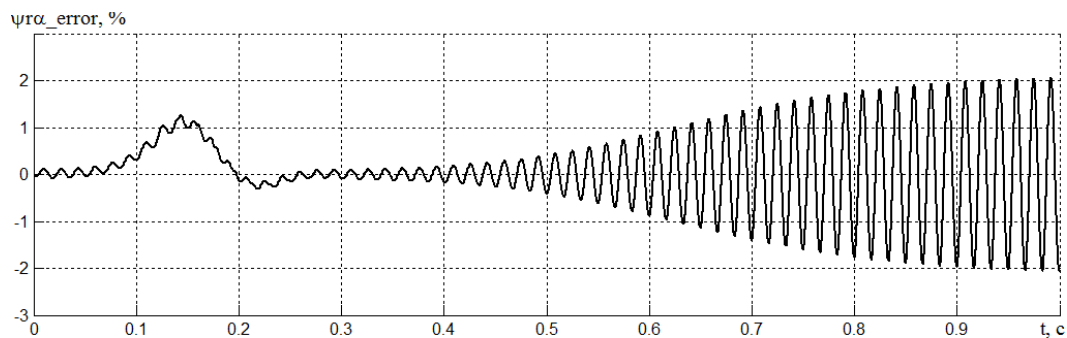
$$u_{comp,qs} = K_p (\psi_{qs}^{s,v} - \psi_{qs}^{s,i}) + K_i \int (\psi_{qs}^{s,v} - \psi_{qs}^{s,i}) dt; \quad (14)$$

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

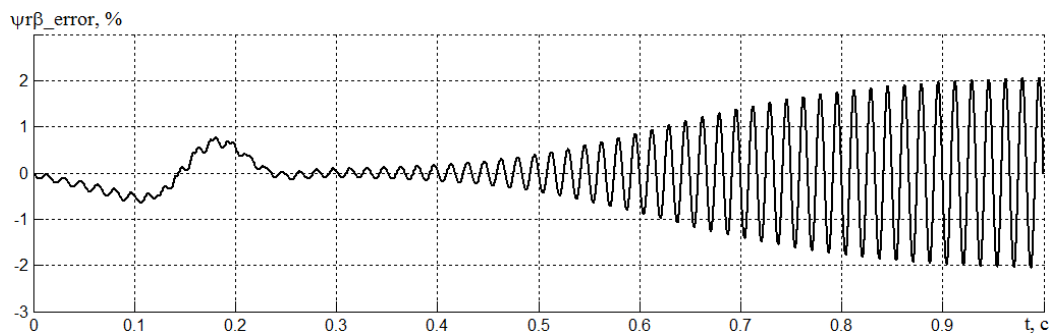
$$\Psi_{r\beta}^{Fe} = -\left(\frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m}\right) i_{s\beta} + \frac{L_r}{L_m} \Psi_{qs}^{s,v}; \quad (16)$$

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

где  $\theta_{\Psi_r}$  – 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).

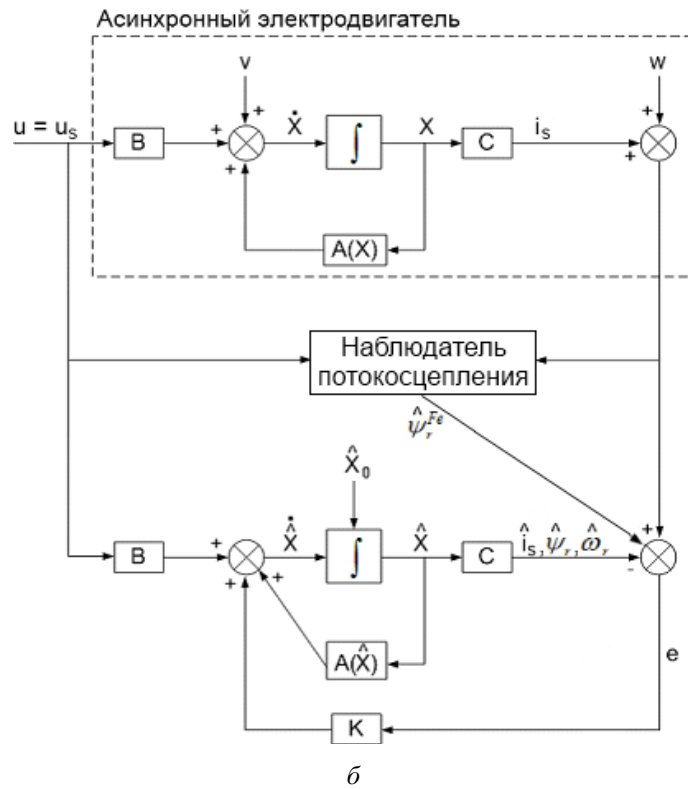
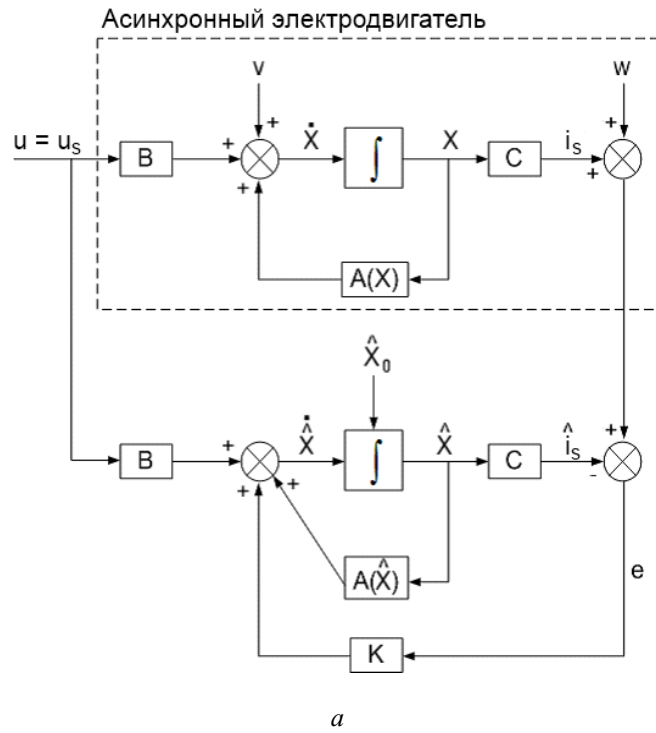


*a*



*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*



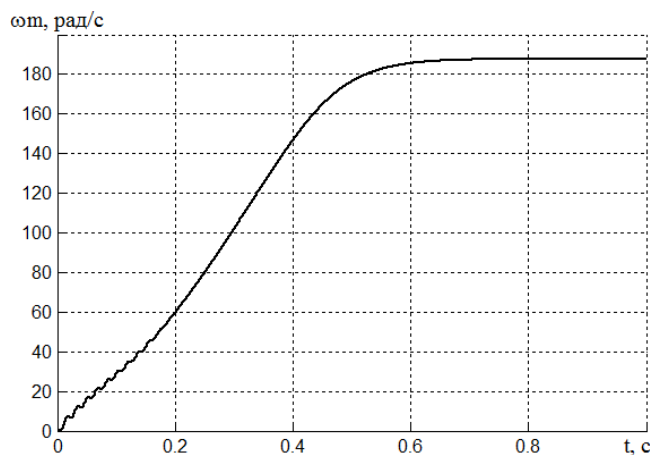
Р и с. 2. Сравнение структурных схем наблюдателей:  
*a* – расширенный фильтр Калмана;  
*б* – улучшенный наблюдатель на основе расширенного фильтра Калмана

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.

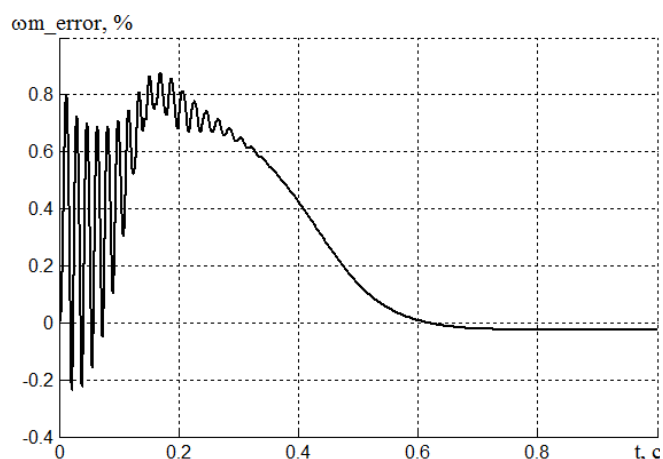
Структуры расширенного фильтра Калмана и улучшенного наблюдателя на его основе приведены на рис. 2, где  $u = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta}]^T$ ,  $i_s = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T$ ,  $v(k)$  – вектор возмущений;  $w(k)$  – вектор ошибок измерений;  $\hat{i}_s$  – вектор оценки  $i_s$ ;  $\hat{\psi}_r$  – 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  $\omega_r$ ;  $\hat{x}_0$  – 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.



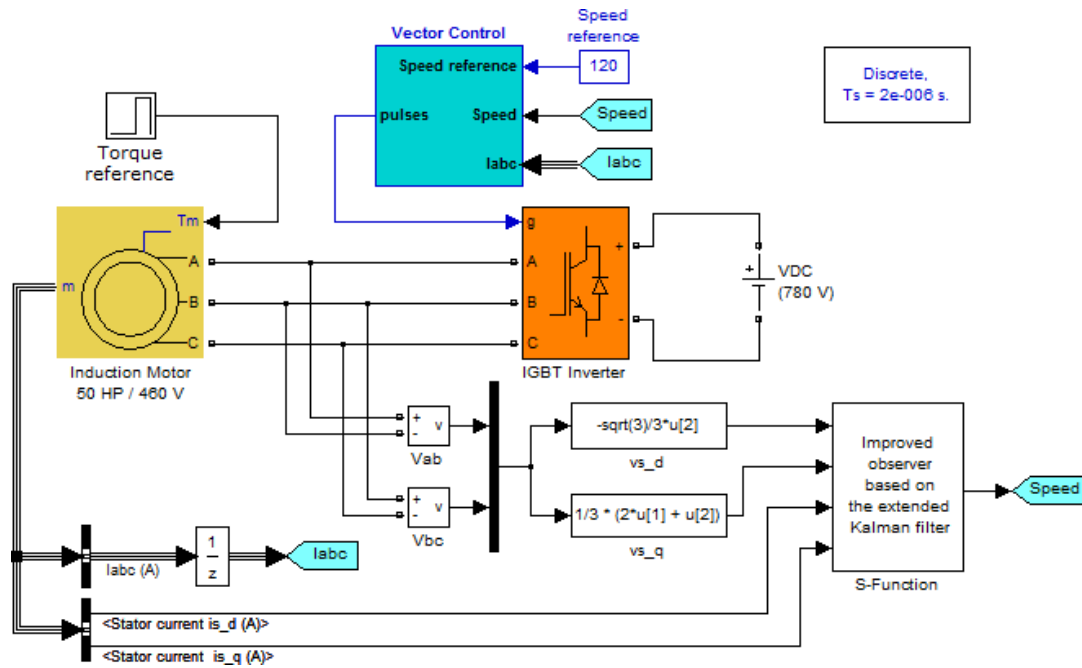
Р и с. 3. Оценка угловой скорости вращения ротора



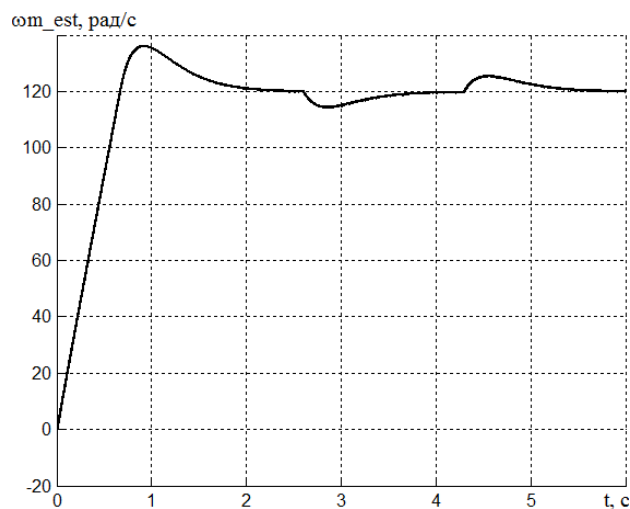
Р и с. 4. Ошибка оценки угловой скорости вращения ротора

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.*