

Применение фильтра Калмана в интеллектуальных системах управления электроприводами промышленных систем

А. М. Белов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

sana199706@mail.ru

М. П. Белов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

mpbelov@etu.ru

Аннотация. В промышленных системах на электроприводы воздействуют различные возмущающие воздействия, которые не позволяют обеспечить высокую точность управления, а также определенные динамические характеристики. Поэтому в докладе рассматривается применение фильтра Калмана и нейронных регуляторов в многоэлектроприводных промышленных системах с целью компенсации возмущающих воздействий и улучшения их динамических характеристик.

Ключевые слова: Фильтр Калмана; интеллектуальная система управления; электропривод

I. ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ПРИМЕНЕНИЮ ФИЛЬТРА КАЛМАНА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Фильтр Калмана является эффективным инструментом для оценки состояния системы и улучшения ее управления. В случае нейронных регуляторов электроприводов (ЭП), фильтр Калмана может быть использован для оценки состояния процесса управления, такого как скорость или положение вала двигателя.

Применение фильтра Калмана в нейронных регуляторах электроприводов позволяет уменьшить влияние шумов и ошибок измерений, что помогает повысить точность управления двигателем. Кроме того, фильтр Калмана позволяет предсказывать будущее состояние системы на основе ее текущего состояния и управляющего воздействия, что позволяет улучшить качество регулирования.

Таким образом, применение фильтра Калмана в нейронных регуляторах электроприводов существенно улучшает их эффективность и точность управления, что является важным преимуществом при проектировании и эксплуатации электроприводов.

Фильтр Калмана также может быть успешно применен в преобразователях частоты для улучшения процесса управления и регулирования работы энергосилового оборудования, такого как электродвигатели. Преобразователи частоты используются для регулирования скорости и частоты вращения двигателя, что является критическим для оптимальной работы привода.

Применение фильтра Калмана в преобразователях частоты позволяет улучшить оценку состояния

двигателя и идентификацию параметров системы, что в свою очередь повышает точность и стабильность управления. Фильтр Калмана также помогает уменьшить влияние шумов и помех в данных, что позволяет более точно следить за состоянием двигателя и реагировать на изменения в реальном времени.

Большинство промышленных механизмов, агрегатов имеют взаимосвязанные многомассовые механические подсистемы. Эти электромеханические объекты имеющие различную структуру построения таких подсистем. Управление ими осуществляется многодвигательными электроприводами.

A. Синтез интеллектуальной системы управления ЭП

В качестве примера можно привести одну из кинематических схем металлорежущих станков (рис. 1).

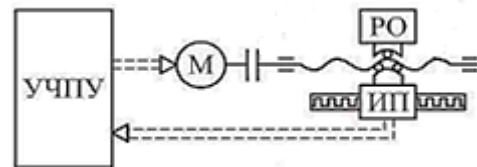


Рис. 1. Кинематическая схема металлорежущего станка

Система управления главным электроприводом подачи металлообрабатывающего станка представлена на рис. 2.

Взаимосвязанную механическую подсистему электропривода можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = J_1^{-1} (M_d - M_{21} - M_{f1}); \\ M_{21} = c_{21} (\varphi_1 - \varphi_2) + b_{21} (\omega_1 - \omega_2), \\ \dot{\omega}_2 = J_2^{-1} (M_{21} - M_{32} - M_{f2}), \\ M_{32} = c_{32} (\varphi_2 - \varphi_3) + b_{32} (\omega_2 - \omega_3), \\ \dot{\omega}_3 = J_3^{-1} (M_{32} - M_c) \end{cases}$$

Моменты M_{f1}, M_{f2} аппроксимируются с помощью функции \tanh [3]:

$$\begin{cases} M_{f1}(\omega_1) = M_{f01} \tanh(\sigma_2 \omega_1) \\ M_{f2}(\omega_2) = M_{f02} \tanh(\sigma_2 \omega_2) \end{cases}$$

где M_{f0i} – коэффициент момента кулоновского трения, который может быть выбран исходя из следующего выражения $M_{f0i} = (0, 1 \dots 0, 3) M_d$; σ_1, σ_2 – свободно выбираемые положительные коэффициенты.

Систему управления электроприводом можно в общем виде описать как [1]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{d}(t)]; \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \end{cases} \quad (1)$$

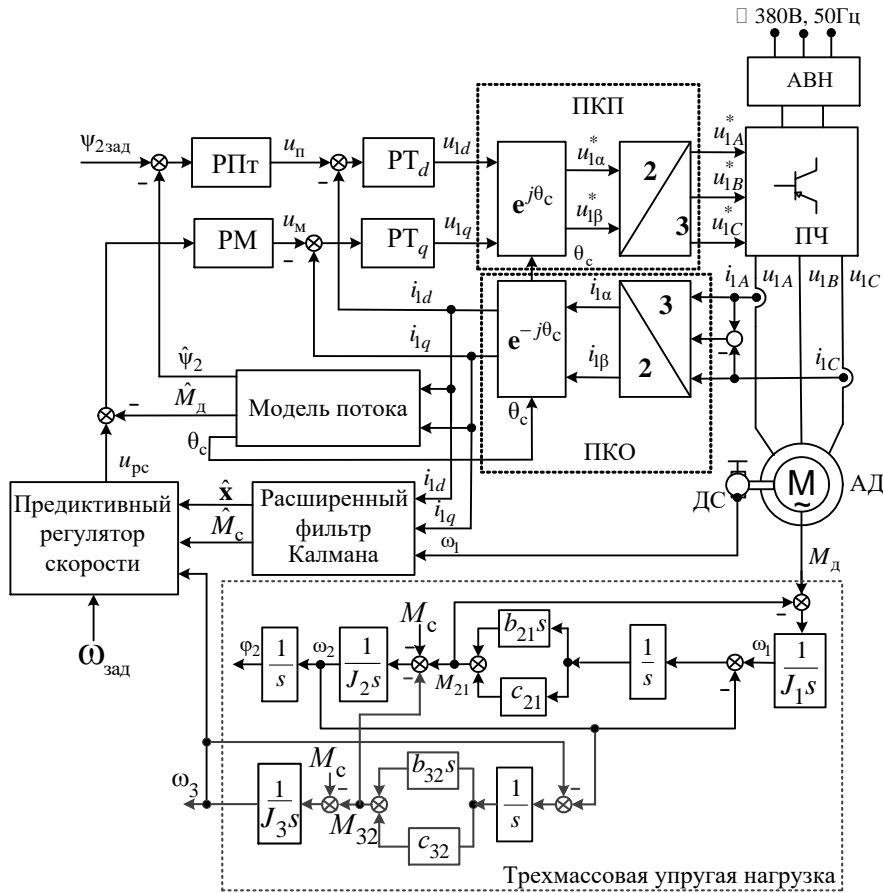


Рис. 2. Система управления главного электропривода подачи металлообрабатывающего станка

где $\mathbf{x}(t) = [i_{1d} \ i_{1q} \ \omega_1 \ M_{21} \ \omega_2 \ M_{32} \ \omega_3]$ вектор переменных состояния системы, $\mathbf{y}(t) = \omega_3$ вектор измеряемых переменных, $\mathbf{u}(t) = u_{pc}$ – вектор входных переменных; $\mathbf{C} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$ – масштабная матрица; $\mathbf{d}(t) = M_c$ – вектор возмущающих воздействий.

Функция $f_i[x(t), u(t), d(t)], i = 1 : 7$ является не линейной и может быть описана в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{i}_{1d} = d_1 i_{1d} + d_2 \omega_1 i_{1q} = f_1; \\ \dot{i}_{1q} = q_1 i_{1q} + q_2 i_{1d} \omega_1 + q_3 \omega_1 + q_4 u_{pc} = f_2; \\ \dot{\omega}_1 = a_1 i_{1q} + a_3 M_{21} = f_3; \\ \dot{M}_{21} = a_5 \omega_1 + a_6 \omega_2 = f_4; \\ \dot{\omega}_2 = a_7 M_{21} + a_8 \omega_2 + a_9 M_{32} = f_5; \\ \dot{M}_{32} = a_{10} \omega_2 + a_{11} \omega_3 = f_6; \\ \dot{\omega}_3 = a_{12} M_{32} + a_{13} M_c = f_7; \end{cases}$$

где

$$\left\{ \begin{array}{l} d_1 = (-R_1 - k_T) L_1^{-1}; d_2 = p_{\Pi}; \\ q_1 = -\left(k_T + R_1 + \frac{3}{2} p_{\Pi} \Psi_r k_T k_M\right) L_1^{-1}; q_2 = -p_{\Pi}; \\ q_3 = -p_{\Pi} \Psi_r L_1^{-1}; q_4 = k_T k_M L_1^{-1}; \\ a_1 = \frac{3}{2} J_1^{-1} p_{\Pi} \Psi_r; \\ a_3 = -J_1^{-1}; \\ a_5 = c_{21}; a_6 = -c_{21}; \\ a_7 = J_2^{-1}; a_8 = -J_2^{-1} M_{f02} \sigma_2 \left(1 - \tanh^2(\sigma_2 \omega_2)\right); \\ a_9 = -J_2^{-1}; \\ a_{10} = c_{32}; a_{11} = -c_{32}; a_{12} = J_3^{-1}; a_{13} = -J_3^{-1}. \end{array} \right.$$

Тогда систему уравнений (1) можно переписать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{B}_d(k)\mathbf{d}(k); \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k), \end{array} \right.$$

где –

$$\mathbf{x}^T(k) = [i_{1d}(k) \quad i_{1q}(k) \quad \omega_1(k) \quad M_{21}(k) \quad \omega_2(k) \quad M_{32}(k) \quad \omega_3(k)]$$

$$\mathbf{A}(k) = \mathbf{I} + T \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{\text{рав}} \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}^{\text{рав}}}} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 + Td_1 & Td_2\omega_1 & Td_2i_{1q} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Tq_2\omega_1 & 1 + Tq_1 & Tq_2i_{1d} + Tq_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Ta_1 & 1 & Ta_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ta_5 & 1 & Ta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Ta_7 & 1 + Ta_8 & Ta_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Ta_{10} & 1 & Ta_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{12} & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}(k) = T \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \Big|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{\text{рав}} \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}^{\text{рав}}}} = [0 \quad Tq_4 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T;$$

$$\mathbf{B}_d^T(k) = T \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{d}} \Big|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{\text{рав}} \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}^{\text{рав}}}} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad a_{13}];$$

$$\mathbf{C}(k) = \mathbf{C} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$$

$\mathbf{x} = \mathbf{x}^{\text{рав}}$; $\mathbf{u} = \mathbf{u}^{\text{рав}}$ – равновесные точки системы управления.

Предиктивная модель по вектору измеряемых переменных строится по методике, изложенной в [2].

Целевую функцию критерия качества запишем в виде:

$$\mathbf{O}(\Delta \mathbf{P}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_p} \left[\left\| \omega_{\text{зад}}(k+i|k) - \omega_3(k+i|k) \right\|_{q_1}^2 + \left\| M_{32}(k+i|k) - M_c(k+i|k) \right\|_{q_2}^2 \right] + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_c} \left\| \Delta u_{\text{pc}}(k+j|k) \right\|_{r_1}^2,$$

Векторы предиктивных выходов по измеряемым переменным имеют вид:

$$\mathbf{y}^{*T}(k+i|k) = [\omega_3(k+i|k) \quad M_{32}(k+i|k)];$$

$$\mathbf{y}_{\text{зад}}^T(k+i|k) = [\omega_{\text{зад}}(k+i|k) \quad M_c(k+i|k)]; \quad i = 1 : N_p.$$

В целевой функции на величину момента и угловой скорости введены следующие ограничения:

$$\left\{ \begin{array}{l} -0,1M_{\text{дн}} \leq M_{32} \leq 0,1M_{\text{дн}}; \\ -\omega_{\text{дн}} \leq u_{\text{pc}} \leq \omega_{\text{дн}}, \end{array} \right.$$

Переходные характеристики угловых скоростей при наличии случайного возмущающего воздействия в виде белого шума показаны на рис. 3.

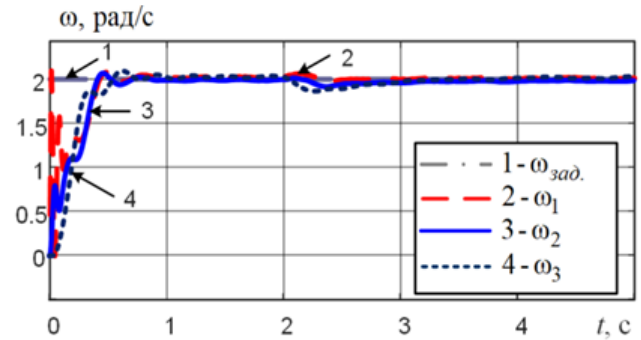


Рис. 3. Переходные процессы угловых скоростей

Синтез наблюдателя Калмана в трехмассовой упругой системе. Для создания дискретного предиктивного регулятора скорости синтезируем наблюдатель с фильтром Калмана. Структурная схема с наблюдателем на основе фильтра Калмана представлена на рис. 4.

Наблюдатель с фильтром Калмана запишем в векторно-матричной форме

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x}_p^*(k+1) = \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p^*(k) + \mathbf{L}_p (\mathbf{y}(k) - \mathbf{y}_p^*(k)) + \\ + \mathbf{B}_p \mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k); \\ \mathbf{y}_p^*(k) = \mathbf{C}_p \mathbf{x}_p^*(k) + \mathbf{v}(k), \end{array} \right.$$

где $\mathbf{x}_p^*(k) = [\omega_1^* \quad M_{21}^* \quad \omega_2^* \quad M_{32}^* \quad \omega_3^*]$ – вектор оценки переменных состояния системы;

$\mathbf{V}_p(k) = [0 \quad Tq_4 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$, $\mathbf{C}_p(k) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$ – матрицы оценки управляющих сигналов и масштабной матрицы выхода соответственно;

$\mathbf{L}_p(k) = [l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4 \quad l_5]^T$ – матрица коэффициентов наблюдателя с фильтром Калмана;

$$\mathbf{A}_p(k) = \begin{bmatrix} 1 & Ta_2 & 0 & 0 & 0 \\ Ta_3 & 1 & Ta_4 & 0 & 0 \\ 0 & Ta_5 & 1 & Ta_6 & 0 \\ 0 & 0 & Ta_7 & 1 & Ta_8 \\ 0 & 0 & 0 & Ta_9 & 1 \end{bmatrix} \text{ – матрица}$$

состояния расширенной системы объекта управления.

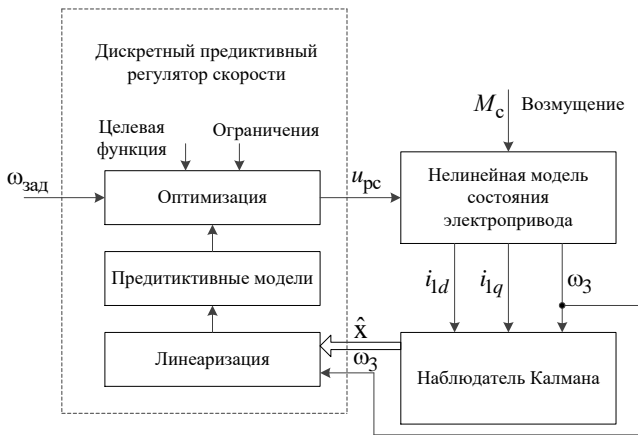


Рис. 4. Структурная схема с наблюдателем на основе фильтра Калмана

Подробно о синтезе наблюдателя с фильтром Калмана написано в [3].

Систему уравнений по оценке переменных состояния зап в виде [4]:

$$\begin{cases} \omega_1^*(k) = \omega_1^*(k-1) + l_1 (\omega_3(k) - \omega_3^*(k-1)); \\ M_{21}^*(k) = M_{21}^*(k-1) + l_2 (\omega_3(k) - \omega_3^*(k-1)); \\ \omega_2^*(k) = \omega_2^*(k-1) + l_3 (\omega_3(k) - \omega_3^*(k-1)); \\ M_{32}^*(k) = M_{32}^*(k-1) + l_4 (\omega_3(k) - \omega_3^*(k-1)); \\ \omega_3^*(k) = \omega_3^*(k-1) + l_5 (\omega_3(k) - \omega_3^*(k-1)). \end{cases}$$

Вектор коэффициентов наблюдателя с фильтром Калмана рассчитывается исходя из алгоритма (рисунок 5) и значений весовых матриц $\mathbf{Q}_p(0) = \text{diag}[0, 25]_{5 \times 5}$,

$\mathbf{R}_p(0) = \begin{bmatrix} 0,28 & 0 \\ 0 & 0,45 \end{bmatrix}$. В результате получим следующий вектор коэффициентов наблюдателя с фильтром Калмана:

$$\mathbf{L}_p = [-120,5 \quad 85,14 \quad -110,2 \quad -21,04 \quad 35,4].$$

Результаты моделирования показаны на рис. 5.

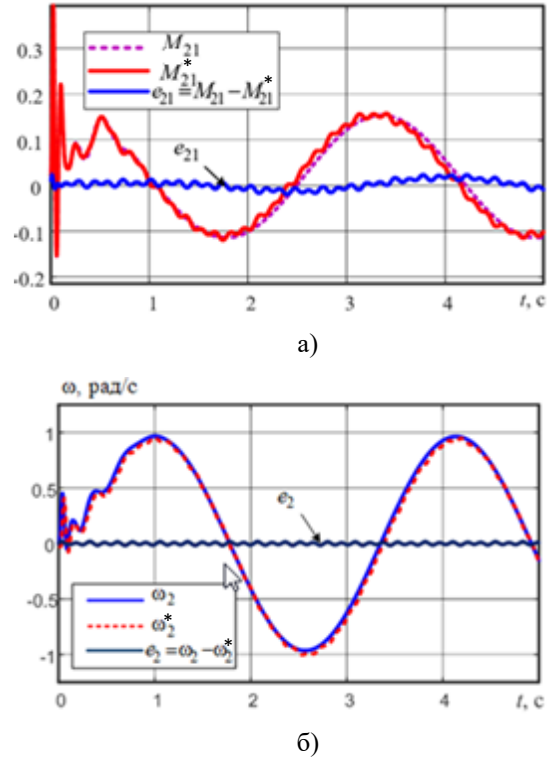


Рис. 5. Переходные процессы по моменту (а), угловой скорости (б) и ошибки их оценивания

II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение нейронных регуляторов и фильтра Калмана в системах управления электроприводами позволяет увеличить точность и эффективность управления, снижению энергопотребления и увеличению срока службы оборудования.

Нейронные регуляторы обладают способностью обрабатывать нечеткую информацию и справляться с внешними воздействиями, шумами или неопределенностью в модели системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Тхан Нгок Хоан; Нгуен Тиен Бан. Автоматическое управление системами электропривода». Вьетнамское издательство науки и технологий, 2007 г.
- [2] B. Ekstrand. Equation of Motion for A 2 Axes Gimbal System, Trans. On Aerospace and Electronic systems, IEEE Vol.37, 20011083-1091p.
- [3] Nguyen Van Lanh. Sensorless Vector Control of a Permanent-Magnet Synchronous Motor Based on an Extended Adaptive Kalman Filter/ M.P. Belov, A.M. Belov, Nguyen Van Lanh. // Springer: Russian Electrical Engineering (Q3). Vol. 93 (No. 3). 2022, 148-154 p.
- [4] Н.В. Лань. Синтез наблюдателя Калмана системы нелинейного электропривода оптико-механического комплекса / Н.В. Лань, А.М. Белов, Нгуен Зуй Хань. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб.: 2022. Т. 15, № 10. С.79–86.