

УДК621.34

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА В БЕЗДАТЧИКОВЫХ СИСТЕМАХ ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ СДПМ

Левкович В.Ю.

Научный руководитель – Улащик Н.М., ст. преподаватель

Управление моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами(СДПМ) требует знания позиции ротора для эффективного управления током, более того, обратная связь по скорости также нужна для контроля скорости. Поэтому, обычно синхронные двигатели переменного тока оборудованы электромеханическими сенсорами, установленными на роторе(ресолверами или абсолютными энкодерами). В целом, электромеханические сенсоры используются для получения скорости и/или положения ротора. Момент СДПМ обычно контролируется наблюдением над токами обмоток, так как они пропорциональны электромагнитному моменту двигателя. Для повышения эффективности расчётов, обычно они выполняются в системе счисления привязанной к ротору, вращающейся с синхронной скоростью. В ней индуктивности обмоток и взаимоиндукция постоянны, если противоэдс имеют синусоидальную форму.

С развитием вычислительной мощи цифровых микроконтроллеров метод прямого управления моментом получил некоторую популярность для управления СДПМ. Базовый принцип этого метода – прямой выбор вектора напряжения на основе разницы между моментом задания и фактическим значением момента, а также на основе потока. Регулятор тока с последующим ШИМ в системах прямого управления моментом не используется, как и параметры двигателя (за исключением сопротивления обмотки).

Таким образом, прямое управление моментом обладает рядом преимуществ, таких как меньшая зависимость от параметров двигателя и быстрым откликом момента по сравнению с ШИМ. К сожалению, эти механические сенсоры увеличивают стоимость системы и уменьшают её надёжность, а в некоторых случаях их использование невозможно. С этой стороны, внимание исследователей и инженеров привлекают бездатчиковые методы управления. Было разработано немало таких методов, основная идея которых состоит в преобразовании уравнений двигателя для выражения скорости и положения ротора в измеряемых переменных. Благодаря способности оценивать состояние нелинейных систем Расширенный Фильтр Калмана (РФК) получил широкое распространение в деле оценки позиции ротора и его скорости. К

сожалению, требования к вычислительной мощности системы несколько ограничивают возможность его применения.

В матричной форме динамическая модель СДПМ имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d}\omega_r & 0 & 0 \\ -\frac{L_d}{L_q}\omega_r & -\frac{R_s}{L_q} & -\frac{K_e}{L_q} & 0 \\ N^2_p \frac{L_d - L_q}{J} i_q & N^2_p \frac{K_e}{J} & -\frac{f}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{N_p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ T_1 \end{bmatrix}$$

Тогда после преобразования в стационарную систему счисления:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \\ \dot{\omega}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ T_1 \end{bmatrix}$$

, где

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{R_s}{2L_\Pi} (L_\Sigma - L_\Delta \cos 2\theta_r) + \frac{\omega_r L_\Sigma}{2L_\Pi} L_\Delta \sin 2\theta_r; \\ a_{12} &= \frac{\omega_r L_\Delta}{2L_\Pi} (L_\Delta - L_\Sigma \cos 2\theta_r) + \frac{R_s}{2L_\Pi} L_\Delta \sin 2\theta_r; \\ a_{13} &= \frac{K_e}{L_q} \sin \theta_r; a_{14} = 0; \\ a_{21} &= -\frac{\omega_r L_\Delta}{2L_\Pi} (L_\Delta + L_\Sigma \cos 2\theta_r) + \frac{R_s}{2L_\Pi} L_\Delta \sin 2\theta_r; \\ a_{22} &= -\frac{R_s}{2L_\Pi} (L_\Sigma + L_\Delta \cos 2\theta_r) - \frac{\omega_r L_\Sigma}{2L_\Pi} L_\Delta \sin 2\theta_r; \\ a_{23} &= -\frac{K_e}{L_q} \cos \theta_r; a_{24} = 0; \\ a_{31} &= -\frac{N^2_p}{J} \left(K_e \sin \theta_r + \frac{L_\Delta}{2} i_\alpha \sin 2\theta_r \right); a_{33} = -\frac{f}{J}; \\ a_{32} &= \frac{N^2_p}{J} \left[K_e \cos \theta_r + \frac{L_\Delta}{2} (i_\beta \sin 2\theta_r + 2i_\alpha \cos 2\theta_r) \right]; \\ a_{34} &= 0; a_{41} = 0; a_{42} = 0; a_{43} = 1; a_{44} = 0; \\ b_{11} &= \frac{1}{2L_\Pi} (L_\Sigma - L_\Delta \cos 2\theta_r); b_{12} = \frac{L_\Delta}{2L_\Pi} \sin 2\theta_r; b_{13} = 0; \\ b_{21} &= -\frac{L_\Delta}{2L_\Pi} \sin 2\theta_r; b_{22} = \frac{1}{2L_\Pi} (L_\Sigma + L_\Delta \cos 2\theta_r); \\ b_{23} &= 0; b_{31} = 0; b_{32} = 0; b_{33} = -\frac{N_p}{J}; \end{aligned}$$

Эта модель может быть использована для оценки скорости и положения ротора наблюдателем РФК.

Расширенный Фильтр Калмана это оптимальный рекурсивный алгоритм для оценки состояния динамических нелинейных систем, то есть расчёта медианы и дисперсии Гауссианы, представляющей переменную.

Дискретная стохастическая модель СДПМ имеет следующую форму:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= F(k) \cdot x(k) + G(k) \cdot u(k) \\y(k) &= H(k) \cdot x(k)\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}x(k) &= [i_d(k) \ i_q(k) \ \omega_r(k) \ \theta_r(k) \ R(k)]^T \\u(k) &= [V_d(k) \ V_q(k) \ T_1(k)]^T, y(k) = [i_d(k) \ i_q(k)]^T\end{aligned}$$

Процедура оценки состоит из двух фаз:

-предсказание;

-коррекция.

А) Фаза предсказания:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1/k) &= F(k) \cdot \hat{x}(k/k) + G(k) \cdot u(k) \\P((k+1)/k) &= F(k) \cdot P(k/k) \cdot F^T(k) + Q\end{aligned}$$

Б) Фаза коррекции:

$$\begin{aligned}\hat{x}((k+1)/(k+1)) &= \hat{x}(k+1/k) + K(k+1) \cdot \\&\quad [y(k+1) - H(k+1) \cdot \hat{x}((k+1)/k)]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}K(k+1) &= P((k+1)/k) \cdot H^T(k+1) \cdot \\&\quad [H(k) \cdot P((k+1)/k) \cdot H^T(k) + R]^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P((k+1)/(k+1)) &= P((k+1)/k) - \\&\quad K(k+1) \cdot H(k+1) \cdot P((k+1)/k)\end{aligned}$$

Матрица ковариантности погрешности оценки:

$$P(k/k) = E\{(x(k) - \hat{x}(k)) \cdot (x(k) - \hat{x}(k))^T\}$$

Литература

1. Vas P. Sensorless vector and direct torque control. – Oxford Univ. Press, 1998.
2. Bolognani S., Tubiana L., Zigliotto M. Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drives //Industry Applications, IEEE Transactions on. – 2003. – Т. 39. – №. 6. – С. 1741-1747.
3. Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor //Industry Applications, IEEE Transactions on. – 1986. – №. 5. – С. 820-827.