РАЗРАБОТКА БЕЗДАТЧИКОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМ МАГНИТАМИ ПОСРЕДСТВОМ ОЦЕНКИ ПОЛНОГО ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИГМА-ТОЧЕЧНОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА

А.Ю. Зарницын, С.В.Леонов
Фёдоров Д.Ф., Сидорова А. А.
Томский политехнический университет
ayz10@tpu.ru

Аннотация

На сегодняшний день наиболее популярно становится применение синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). Применение СДПМ обосновывается наличием явных преимуществ, таких как: отсутствие коллекторно–щеточного узла, отсутствие потерь на перемагничивание, наличие высоких моментных характеристик на всём диапазоне скоростей.

В работе будут кратко рассмотрен метод управления такими приводами на основе бездатчквой системы.

Алгоритм бездатчикового управления

Применение бездатчиковой системы управления синхронными приводами с постоянными магнитами обусловлено невозможностью физически установить датчик положения.

Для того, чтобы понять принцип оценки наблюдателем вектора состояния, опишем математически сам синхронный двигатель с постоянными магнитами.[1]

Уравнение напряжений статорной обмотки электродвигателя имеет следующий вид

$$\bar{U} = \bar{I}R_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt}, \tag{1}$$

где $\bar{U}$, $\bar{I}$, $\bar{\psi}_s$ - мгновенные значения напряжения, тока и потокосцепления статора, R_s - активное сопротивление статора.

Потокосцепление статорной обмотки определяется соотношением

$$\bar{\psi}_s = L_S\bar{I} + \bar{\psi}, \tag{2}$$

где $\bar{\psi}$ - потокосцепление статора с магнитным поле ротора. Тогда уравнение (1) примет вид

$$\bar{U} = \bar{I}R_s + L_s\frac{d\bar{I}}{dt} + \frac{d\bar{\psi}}{dt}. \tag{3}$$

Уравнение (3) представляет собой векторную запись, для перехода к скалярной форме запишем проекцию этого уравнения на неподвижные оси α и β

$$u_\alpha = i_\alpha R_s + L_s\frac{di_\alpha}{dt} + \frac{d\psi_\alpha}{dt}$$

$$u_\beta = i_\beta R_s + L_s\frac{di_\beta}{dt} + \frac{d\psi_\beta}{dt}. \tag{4}$$

Скалярные значения напряжений и токов по осям α и β получается по измеренным фазным значениям через координатные преобразователи.

Тогда решение уравнений (4) относительно ψ_α и ψ_β будет иметь вид

$$\psi_\alpha = \int(u_\alpha - i_\alpha R_s)dt - i_\alpha L_s$$

$$\psi_\beta = \int(u_\beta - i_\beta R_s)dt - i_\beta L_s. \tag{5}$$

Тогда оценку углового положения ротора можно определить следующим образом

$$\varphi = arctg\left(\frac{\psi_\beta}{\psi_\alpha}\right). \tag{6}$$

Чтобы в системе управления возможно было использовать обратную связь по состоянию, необходимо восстановить вектор состояния системы, недоступный для измерения. Восстановление вектора состояния называется его оценкой, а устройства, формирующие на выходе вектор оценки состояний, а также позволяющие отделить полезный сигнал от помех, наблюдателями (идентификаторами, фильтрами). Описанные выше уравнения позволяют настроить наблюдатель таким образом, что он восстанавливает вектор состояния системы. Восстановленный вектор позволяет максимально корректно выполнять управление электродвигателем.

Представленный метод оценки углового положения вала основан на предположении, что модель двигателя линейна, это предположение верно только в том случае если двигатель вошёл в синхронизм.

Если требуется знать оценку скорости на протяжении всего времени работы СДПМ, то возникает потребность ввести наблюдатели для нелинейных систем. В этом случае можно воспользоваться расширенным фильтром Калмана (EKF) или сигма – точеный фильтр Калмана. В дальнейшим под фильтром мы будем понимать не только как инструмент, который позволяет адекватно выделить полезную составляющую из сигнала, но и позволит оценивать вектор состояния системы, так как в случае фильтрации Калмана структура устройства в первом и втором случае одинакова.

Фильтр Калмана является наиболее распространённым инструментов оценки и отслеживания параметров модели, и её вектора состояния.

Расширенный фильтр Калмана (EKF)

Как и в линейной оценки параметров посредством фильтра Калмана базовой основой является оценка параметров, только для нелинейной дискретной системы уравнение динамики которой в общем виде выглядит следующим образом:

$$\mathbf{x}_{k+1} = F(\mathbf{x}_k, \mathbf{v}_k)$$
$$\mathbf{y}_k = H(\mathbf{v}_k, \mathbf{n}_k),$$

где $\mathbf{x}_k$ - ненаблюдаемый вектор состояния системы, $\mathbf{y}_k$ - наблюдаемы выход системы, $\mathbf{v}_k$ - шумы которые возникают в динамической системе, $\mathbf{n}_k$ - шумы при измерении сигнала.

Основная структура оценки вектора состояния представлена в виде

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k(\mathbf{y}_k - \mathbf{y}_k^-)$$
$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = E[F(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \hat{\mathbf{v}}_{k-1})]$$
$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{x_k y_k} \mathbf{P}^{-1}_{\tilde{y}_k \tilde{y}_k}$$
$$\hat{\mathbf{y}}_k^- = E[H(\hat{\mathbf{x}}_k^-, \mathbf{n}_k)], \qquad (7)$$

где $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ - оценка текущего значения вектора состояния которая соответствует математическому ожиданию нелинейной функции $F(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \hat{\mathbf{v}}_{k-1})$, $\mathbf{K}_k$ - оптимальный коэффициент усиления Калмана который есть произведение ковариационных матриц ($\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k$).

По формулам (7) расчёты параметров будет происходить точно в случае линейных систем, если модель нелинейна, то формулы (7) будут аппроксимированы до вида

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = F(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \bar{\mathbf{v}})$$
$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{x_k y_k} \mathbf{P}^{-1}_{\tilde{y}_k \tilde{y}_k}$$
$$\hat{\mathbf{y}}_k^- = H(\hat{\mathbf{x}}_k^-, \bar{\mathbf{n}}),$$

то есть значения вычисляются как функции предыдущих средних значений.

Иными словами, в расширенном фильтре Калмана распределение значений аппроксимируется функцией распределения Гаусса. Эти приближения могут привести к истинным ошибкам в апостериорных значениях матрицы ковариации, что может привести к ложным оптимальным результатам или к расхождению фильтра. Эти нюансы можно разрешить применяя сигма – точечный фильтр Калмана (UKF).

Сигма – точечный фильтр Калмана (UKF)

В сигма–точечном фильтре Калмана распределение параметров определяющих состояние системы также представлено распределение Гаусса, однако это распределение задаётся минимальным набором тщательно выбранных точек выборки. Эти точки выборки полностью отображает истинное значение ковариации и среднего. В UKF применяется метод вычисления статистических характеристик случайной величины (размерности N), которая проходит через нелинейную систему.

Анализ работ [2] показал, что сигма – точечный фильтр Калмана даёт наилучший результат, это представлено на рисунке 1 на примере уравнения Макки-Гласса. Из вышесказанного следует, что для проектирования наблюдателя у СДПМ на всех режимах его работы можно применить сигма – точечный фильтр Калмана.

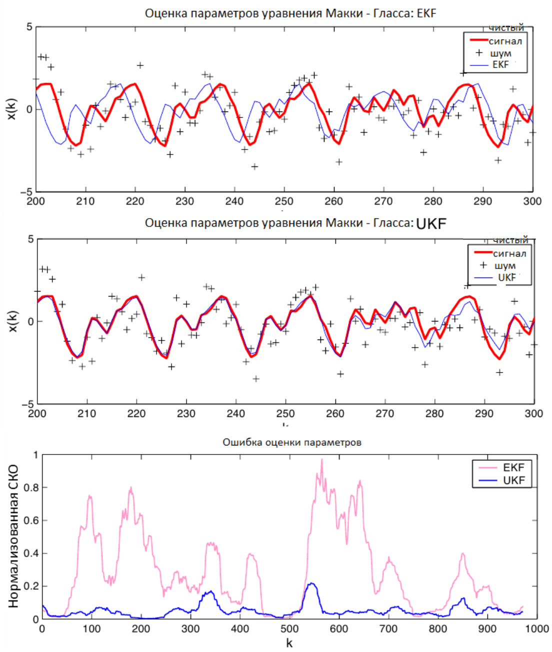

Рис.1. Результат работы сигма-точечного фильтра Калмана

Список использованных источников

1. Букреев В.Г., Леонов С.В., Богданов А.А., Чарухин А.Г. Некоторые вопросы моделирования бесконтактных двигателей постоянного тока с распределенными обмотками // Депонированная рукопись, № 1075-В2003, 02.06.2003
2. The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation Oregon Graduate Institute of Science & Technology 20000 NW Walker Rd, Beaverton, Oregon 970