

Модель векторной системы управления электродвигателями с сигма-точечным фильтром Калмана

М. В. Таланов, В. М. Таланов

Национальный-исследовательский мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва
г. Саранск, Республика Мордовия
mvtal@mail.ru

Аннотация. В работе приводится имитационная модель бездатчиковой системы векторного управления асинхронным электродвигателем. Представлен алгоритм оценивания скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя на основе сигма-точечного фильтра Калмана. В статье описаны результаты экспериментальной апробации модели системы управления с предложенным алгоритмом оценки скорости вращения.

Ключевые слова: система векторного управления; сигма-точечный фильтр Калмана; асинхронный электродвигатель; алгоритм оценивания скорости вращения ротора

I. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] приводится сравнение использования расширенного фильтра Калмана (РФК), сигма-точечного фильтра Калмана (СТФК) и отказоустойчивого фильтра Калмана для оценки вектора состояния нелинейного объекта управления. В данной работе предлагается модифицировать способ расчета матрицы усиления СТФК для восстановления дополнительного вектора состояния: скорости вращения ротора. Так же предлагается использовать дополнительный наблюдатель потокосцепления ротора асинхронного электродвигателя на этапе коррекции вектора состояния. СТФК способен обеспечить более высокий порядок аппроксимации оценки математического ожидания вектора состояния объекта управления по сравнению с РФК при той же вычислительной сложности.

II. УРАВНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ

Особенностью СТФК является то, что в алгоритме производится оценка первых двух моментов распределения вектора состояния с помощью unscented-преобразования [2]. Это означает, что нелинейная функция системы не линеаризуется, вместо этого выбирается и анализируется набор сигма-точек вокруг полученной оценки вектора состояния системы.

С основными уравнениями СТФК можно ознакомиться в работе [3]. В качестве математической модели дискретной стохастической системы $f(x[k], u_s[k])$ используются дифференциальные уравнения асинхронного

электродвигателя с короткозамкнутым ротором [4]. Вектор состояния системы $x[k]$ задается разностным уравнением:

$$x[k+1] = f(x[k], u_s[k]) + w[k],$$

где $w[k] = (0, Q[k])$ – белый шум с нулевым математическим ожиданием и матрицей ковариации Q ; $u_s[k]$ – управляющее воздействие.

Вектор измерений описывается следующим уравнением:

$$y[k] = h(x[k], u_m[k]) + v[k]$$

где $v[k] = (0, R[k])$ – белый шум с нулевым математическим ожиданием и матрицей ковариации R ; $u_m[k]$ – вектор управления.

Перед началом выполнения алгоритма фильтрации СТФК необходимо задать начальные значения прогноза вектора состояния \hat{x} и матрицы ковариации ошибки экстраполяции P :

$$\hat{x}[0/-1] = E(x[0])$$

$$P[0/-1] = E(x[0] - \hat{x}[0/-1])(x[0] - \hat{x}[0/-1])^T$$

Первый этап фильтрации СТФК состоит в обработке измерений. Коррекция оценки вектора состояния \hat{x} на основе измеренного вектора значений y :

$$\hat{x}[k/k] = \hat{x}[k/k-1] + K(y[k] - \hat{y}[k]) \quad (1)$$

В уравнении (1) y – это вектор измеренных токов статора асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат.

Второй этап фильтрации СТФК состоит из экстраполяции вектора состояния и расчета матрицы ковариации ошибки экстраполяции. После завершения

второго этапа переходим к первому этапу коррекции спрогнозированного значения вектора состояния \hat{x} .

В описании модели асинхронного электродвигателя присутствуют неизмеряемые величины – это потокосцепление ротора и угловая скорость вращения ротора. Таким образом, предлагается модифицировать этап коррекции по уравнению (1). Значение потокосцепления ротора, с которым выполняется сравнение, предлагается вычислить с помощью дополнительного наблюдателя потокосцепления ротора [5, 6]. При расчете матрицы усиления СТФК предлагается использовать переходную матрицу состояния F объекта управления [4], записанную с учетом дополнительной переменной состояния – скорости ротора. Матрица V рассчитывается с учетом матрицы ковариации ошибки экстраполяции P по формуле:

$$V = F(x[k | k - 1])P[k | k - 1]F(x[k | k - 1])^T.$$

Матрица L рассчитывается по формуле:

$$L = VH^T \left\| HVH^T + R[k] \right\|^{-1}$$

где $H = \frac{dh}{dx} \Big|_{\hat{x}[k|k-1]}$ – матрица чувствительности, которая составляется по уравнению выхода объекта управления.

Далее необходимо пятую строку матрицы усиления K СТФК заменить пятой строкой матрицы L .

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проверка предложенного алгоритма оценки скорости проводилась на модели электродвигателя RA132MB2 с короткозамкнутым ротором. Были рассчитаны параметры схемы замещения электродвигателя, которые приведены в таблице.

ТАБЛИЦА I ПАРАМЕТРЫ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ RA132MB2

| | |
|---|--------|
| Мощность, кВт | 11 |
| Номинальная скорость вращения, об/мин | 2905 |
| Сопrotивление обмотки статора, Ом | 0.4291 |
| Сопrotивление обмотки ротора, Ом | 0.3751 |
| Индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн | 0.0018 |
| Индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн | 0.0018 |
| Индуктивность намагничивания, Гн | 0.0924 |
| Инерция, кгм ² | 0.0195 |
| Коэффициент вязкого трения | 0.0025 |
| Количество пар полюсов | 1 |

Для первоначальной проверки имитационной модели электродвигателя был смоделирован прямой пуск электродвигателя от сети с одновременной оценкой скорости вращения ротора. Имитационная модель показана на рис. 1.

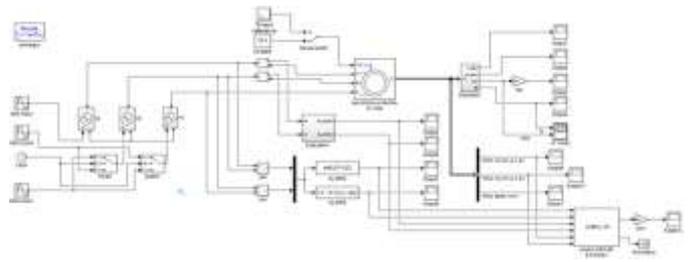
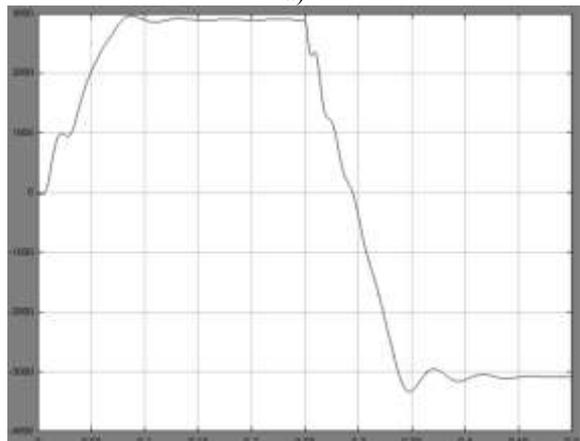


Рис. 1. Модель прямого пуска электродвигателя

В момент времени 0,25 с моделировался режим реверса электродвигателя. В модели на рис. 1 проводятся измерения вектора потокосцепления ротора для коррекции вектора состояния по уравнению (1). Результаты пуска до номинальной скорости с номинальной нагрузкой 36,2 Нм показаны на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Пуск-реверс электродвигателя: а) скорость с модели электродвигателя; б) оценка скорости

Проверка предложенного алгоритма оценки скорости ротора проводилась в составе системы векторного управления, которая показана на рис. 3.

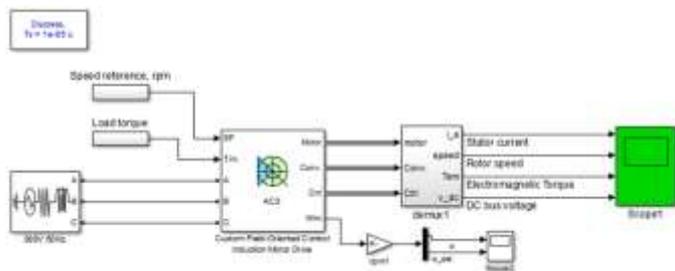


Рис. 3. Система векторного управления асинхронным электродвигателем

В модели на рис. 3 использовался дополнительный наблюдатель потокосцепления для коррекции вектора состояния согласно уравнению (1). Система управления была замкнута на наблюдатель скорости ротора. Моделировался разгон электродвигателя до 1000 об/мин с нагрузкой 10 Нм, в момент времени 0,7 с производился наброс нагрузки в 36,2 Нм. Сравнение результатов моделирования показано на рис. 4.

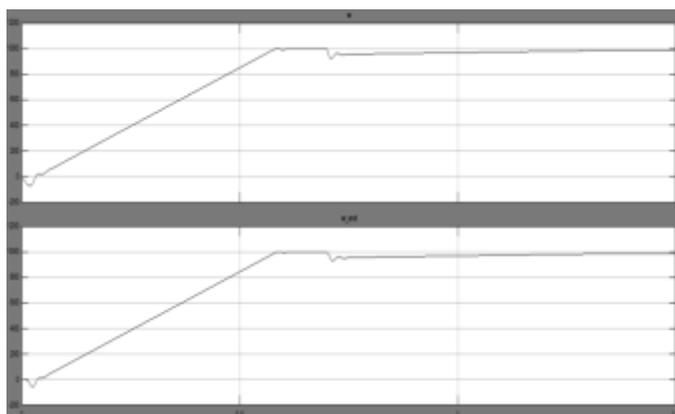


Рис. 4. Моделирование наброса нагрузки

На рис. 4 на верхнем графике показана скорость ротора, полученная с модели электродвигателя, на нижнем графике показана оценка скорости вращения ротора, полученная с помощью предложенного алгоритма оценки скорости.

На рис. 5 показаны проекции вектора тока статора на оси неподвижной системы координат α , β .

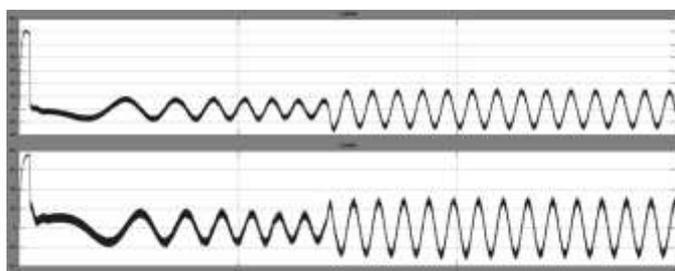


Рис. 5. Проекция вектора тока статора на оси α , β .

Проекция вектора напряжения и тока статора и на оси α , β используются для работы дополнительного наблюдателя потокосцепления ротора.

На рис. 6 показаны проекции вектора потокосцепления ротора на оси неподвижной системы координат α , β , полученные с помощью наблюдателя потокосцепления.

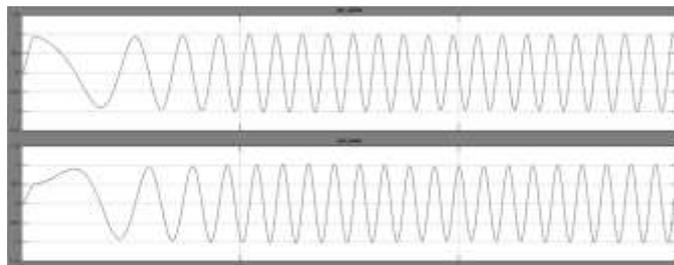


Рис. 6. Проекция вектора потокосцепления ротора на оси α , β

Проекция вектора тока статора и потокосцепления ротора используются для коррекции вектора состояния согласно уравнению (1).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен алгоритм оценки скорости ротора на основе сигма-точечного фильтра Калмана. Предложена модель бездатчиковой системы векторного управления электродвигателем. Приведены результаты моделирования алгоритма оценки скорости при различных режимах работы электропривода. Результаты моделирования подтверждают корректность работы наблюдателя скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Park J.B., Wang X. Sensorless Direct Torque Control of Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors with Nonlinear Kalman Filtering. // Energies 2018, 11, 969. <https://doi.org/10.3390/en11040969>
- [2] Julier S.J., Uhlmann J.K. A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems // Proc. of the Intern. Conf. "Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition". Orlando FL, 1997. P. 182–193.
- [3] R. Van der Merwe, Wan E.A. "The square-root unscented Kalman filter for state and parameter-estimation" // 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221), 2001, pp. 3461-3464 vol.6, doi: 10.1109/ICASSP.2001.940586.
- [4] Talanov M.V., Talanov V.M. Software and hardware solution for digital signal processing algorithms testing // E3S Web Conf., Volume 124, 2019, International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), Article number 03006. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912403006>
- [5] Таланов М.В. Таланов В.М. Карасев А.В. Численная реализация наблюдателя потокосцепления ротора асинхронного двигателя в среде MATLAB для микропроцессорной системы векторного управления. // Электротехнические комплексы и системы управления, 2014, №1 (33). С. 34-37
- [6] Talanov M.V., Karasev A.V., Talanov V.M. Implementation of extended Kalman filtering algorithm with improved flux estimator on TMS320F28335 processor for induction sensorless drive // Proceedings of the 6th European Embedded Design in Education and Research Conference 11-12 September 2014. Milan, Italy. IEEE. С. 119-123. doi:<http://dx.doi.org/10.1109/EDERC.2014.6924371>