

Алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного электродвигателя с использованием адаптивного БИХ-фильтра

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 предлагается алгоритм определения параметров асинхронного электродвигателя в режиме короткого замыкания с использованием адаптивного БИХ-фильтра. Предложенный алгоритм оценки параметров может быть использован для микропроцессорной реализации режима автоматического определения параметров электродвигателя для бездатчиковых систем управления электроприводом.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель; адаптивный фильтр; идентификация параметров; бездатчиковая система управления электроприводом

1. ВВЕДЕНИЕ

В [2] были получены дифференциальные уравнения, описывающие токи статора асинхронного электродвигателя в режиме короткого замыкания, в той же работе приведена передаточная функция, связывающая образ выходного сигнала тока короткого замыкания и образ входного сигнала напряжения. Коэффициенты данной передаточной функции позволяют оценить электрические параметры асинхронного электродвигателя с помощью уравнений связи, представленных в [2]. В данной работе предлагаются разностные уравнения, позволяющие реализовать цифровой адаптивный алгоритм идентификации параметров электродвигателя для наблюдателя скорости в составе бездатчиковой системы управления электроприводом [1].

2. УРАВНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ

На рис. 1 показана структура подсистемы управления электроприводом с адаптивным фильтром для моделирования электромагнитных процессов, протекающих в асинхронном электродвигателе.

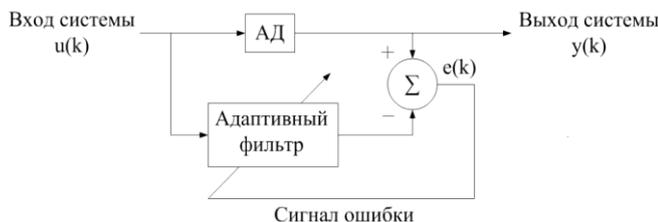


Рис. 1. Конфигурация адаптивного фильтра, где $u(k)$ – проекции векторов линейных напряжений в неподвижной системе координат (α, β) , $y(k)$ – проекции векторов фазных токов короткого замыкания в неподвижной системе координат (α, β)

Задача адаптивного фильтра заключается в определении коэффициентов z-передаточной функции

для дальнейшего определения параметров электродвигателя.

Математическая модель адаптивного фильтра наблюдателя основана на дифференциальных уравнениях асинхронного электродвигателя, записанных по току статора и потокосцеплению ротора, для неподвижной системы координат (α, β) :

$$\begin{bmatrix} di_{sa}/dt \\ di_{sb}/dt \\ d\psi_{ra}/dt \\ d\psi_{rb}/dt \\ d\omega_r/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/K_s & 0 & L_m/(L_{os}L_rT_r) & \omega_r L_m/(L_{os}L_r) & 0 \\ 0 & -1/K_s & -\omega_r L_m/(L_{os}L_r) & L_m/(L_{os}L_rT_r) & 0 \\ L_m/T_r & 0 & -1/T_r & -\omega_r & 0 \\ 0 & L_m/T_r & \omega_r & -1/T_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_{os} & 0 \\ 0 & 1/L_{os} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \end{bmatrix}$$

где u_{sa}, u_{sb} – проекции напряжений обмоток статора в неподвижной системе координат (α, β) ; i_{sa}, i_{sb} – проекции токов в обмотках статора в неподвижной системе координат (α, β) ; ψ_{ra}, ψ_{rb} – проекции потокосцепления ротора в неподвижной системе координат (α, β) ; $\omega_r = \omega_m p$ – электрическая угловая скорость вращения ротора, где ω_m – механическая угловая скорость вращения ротора, p – количество пар полюсов; $L_{os} = \sigma L_s$ – переходная индуктивность статора, где $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ – коэффициент рассеяния, L_s – индуктивность обмотки статора; L_m – индуктивность намагничивания; $L_r = L_{rl} + L_m$ – индуктивность обмотки ротора, где L_{rl} – индуктивность рассеяния обмотки ротора; $T_r = L_r / R_r$ – постоянная времени ротора; $K_s = L_{os} / (R_s + R_r (L_m / L_r)^2)$ – комбинированный параметр, где R_s – активное сопротивление обмотки статора, R_r – активное сопротивление обмотки ротора.

Вывод передаточной функции для непрерывной модели адаптивного фильтра представлен в работе [2].

Запишем уравнение z-передаточной функции и уравнения связи с передаточной функцией непрерывной модели адаптивного фильтра из работы [2]:

$$W(z) = (b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}) / (1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}) \quad (1)$$

$$b_0 = 0$$

$$b_1 = k_1 T$$

$$b_2 = k_0 T^2 - k_1 T$$

$$a_1 = -2 + T_1 T$$

$$a_2 = 1 + T_0 T^2 - T_1 T$$

откуда

$$k_0 = -a_{33} b_{11} = (b_1 + b_2) / T^2$$

$$k_1 = b_{11} = b_1 / T$$

$$T_0 = -(a_{13} a_{31} - a_{11} a_{33}) = (-a_1 - a_2 + 1) / T^2 \quad (2)$$

$$T_1 = -(a_{11} + a_{33}) = (2 - a_1) / T$$

где T – период дискретизации.

Получить оценку тока короткого замыкания предлагается с помощью разностного уравнения, составленного по z-передаточной функции (1):

$$\hat{y}(k) = a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2)$$

Запишем функционал, минимизирующий квадратичную ошибку между измеренным сигналом тока короткого замыкания и оценкой тока короткого замыкания:

$$J(k) = \sum_{k=3}^N [y(k) - [a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2)]]^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где N – размер вектора измеренных значений.

Структура дискретного БИХ-фильтра, соответствующего z-передаточной функции (1), показана на рис. 2. Коэффициенты БИХ-фильтра могут быть определены с помощью алгоритма наименьших квадратов.

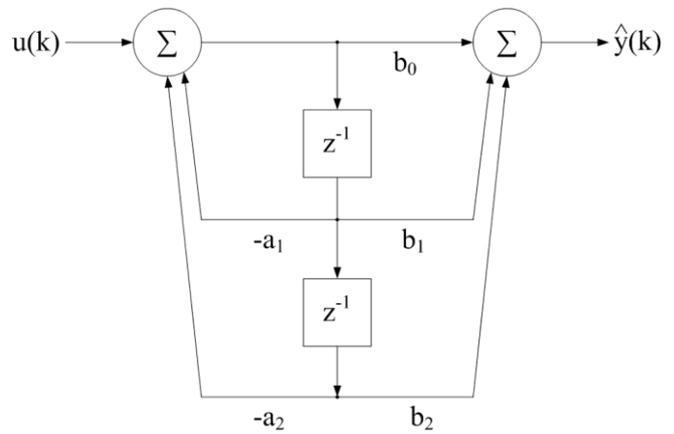


Рис. 2. Каноническая форма БИХ-фильтра, соответствующего z-передаточной функции (1), где $u(k)$ – проекции векторов линейных напряжений в неподвижной системе координат (α, β) , $\hat{y}(k)$ – оценка проекций векторов фазных токов короткого замыкания в неподвижной системе координат (α, β)

Минимизация функционала (3) сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений, составленных по частным производным по коэффициентам a_1, a_2, b_1, b_2 :

$$\partial J / \partial a_1 = -2 \sum_{k=3}^N [y(k) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) -$$

$$-b_1 u(k-1) - b_2 u(k-2)] y(k-1) = 0$$

$$\partial J / \partial a_2 = -2 \sum_{k=3}^N [y(k) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) -$$

$$-b_1 u(k-1) - b_2 u(k-2)] y(k-2) = 0$$

$$\partial J / \partial b_1 = -2 \sum_{k=3}^N [y(k) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) -$$

$$-b_1 u(k-1) - b_2 u(k-2)] u(k-1) = 0$$

$$\partial J / \partial b_2 = -2 \sum_{k=3}^N [y(k) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) -$$

$$-b_1 u(k-1) - b_2 u(k-2)] u(k-2) = 0$$

Таким образом, вектор неизвестных коэффициентов $X = [a_1, a_2, b_1, b_2]^T$ можно найти матричным методом решения систем алгебраических уравнений:

$$X = A^{-1} D, \quad (4)$$

где A – матрица коэффициентов при неизвестных, D – вектор свободных членов уравнения.

Непосредственное вычисление весовых коэффициентов БИХ-фильтра по формуле (4) связано с трудоемкими операциями, более предпочтительным

методом решения (4) является рекурсивный метод наименьших квадратов. Запишем функционал с применением экспоненциально затухающих коэффициентов «забывания» λ , чтобы уменьшить влияние предыдущих измерений на оценку коэффициентов БИХ-фильтра:

$$J(k) = \sum_{i=3}^k \lambda^{k-i} [y(i) - [a_1 y(i-1) + a_2 y(i-2) + b_1 u(i-1) + b_2 u(i-2)]]^2 \rightarrow \min,$$

где λ задается $0,98 \leq \lambda \leq 1$.

Итак, рекурсивный алгоритм оценки весовых коэффициентов БИХ-фильтра можно представить следующими соотношениями:

$$G(k) = P(k-1)R^T(k)(\lambda + R(k)P(k-1)R^T(k))^{-1}$$

$$P(k) = (P(k-1) - G(k)R(k)P(k-1)) / \lambda$$

$$X(k) = X(k-1) + G(k)(y(k) - R(k)X(k-1)),$$

где $R = [y(k-1), y(k-2), u(k-1), u(k-2)]^T$, $k=1..N$, $P = \delta^{-2}I$, $\delta^2 > 0,01\sigma_u^2$, σ_u^2 – дисперсия входного сигнала $u(k)$, $X(k)$ – вектор неизвестных коэффициентов $X(k) = [a_1(k), a_2(k), b_1(k), b_2(k)]^T$.

В работе [2] предложена передаточная функция для непрерывной модели адаптивного фильтра, которая может быть представлена в виде произведения передаточных функций элементарных звеньев. На рис. 3 представлена возможная реализация передаточной функции из работы [2] в виде электрической схемы.

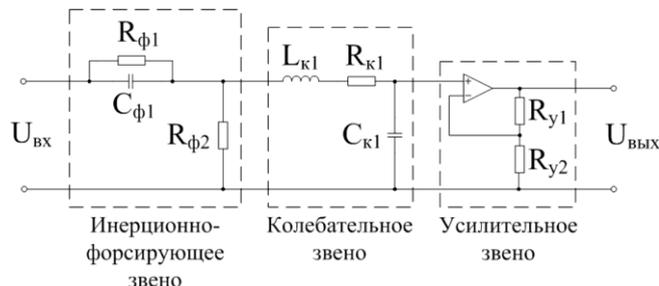


Рис. 3. Схематическая реализация передаточной функции

Номиналы компонентов в электрической схеме на рис. 3 определяют значения коэффициентов передаточной функции из [2]. В [2] было доказано, что наилучшая оценка параметров электродвигателя достигается при частоте питающего напряжения равной резонансной частоте колебательного звена. Резонансную частоту предлагается определить из коэффициентов передаточной функции для непрерывной модели по формуле:

$$f_{рез} = 1 / \sqrt{2\pi/T_0}, \text{ Гц} \quad (5)$$

где T_0 – рассчитывается по (2).

Оценку резонансной частоты колебательного звена (5) предлагается получить по результатам измерения токов короткого замыкания двигателя на его рабочей частоте, например, 50 Гц, используя уравнение (2). Затем выполняется оценка параметров электродвигателя при питании двигателя на рассчитанной резонансной частоте.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В таблице представлена оценка параметров электродвигателя на частоте питающего напряжения равной $f_{рез}$, рассчитанной по формуле (5). Параметры схемы замещения электродвигателя RA132MB2 были рассчитаны по паспортным данным по методике из [5].

ТАБЛИЦА I. ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ RA132MB2

Параметры схемы замещения электродвигателя RA132MB2	Теор. парам.	Оценка парам.	Отн. ошиб. δ , %
Мощность, кВт	11		
Номинальная скорость вращения, об/мин	2905		
Сопrotивление обмотки статора, Ом	0.4291	0.435	-1.4
Сопrotивление обмотки ротора, Ом	0.3751	0.369	1.6
Индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн	0.0018	0.00177	-1.1
Индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн	0.0018	0.00177	-1.1
Индуктивность намагничивания, Гн	0.0924	0.091	1.0
Инерция, кгм ²	0,0195		
Коэффициент вязкого трения	0.0025		
Количество пар полюсов	1		

Результаты моделирования показывают, что с помощью предложенного алгоритма адаптивной фильтрации можно получить оценку параметров электродвигателя с погрешностью в пределах 5%. На рис. 4 показан процесс сходимости оценок коэффициентов z-передаточной функции, полученных с помощью рекурсивного алгоритма.

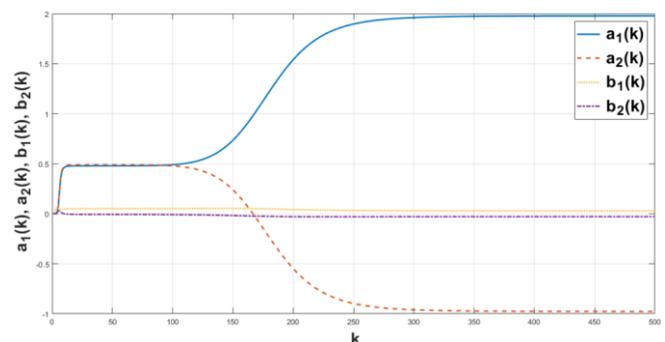


Рис. 4. Оценка коэффициентов z-передаточной функции адаптивного фильтра

На рис. 5 показано сравнение графиков скорости вращения ротора при теоретических параметрах модели электродвигателя и параметрах, полученных с помощью адаптивного алгоритма.

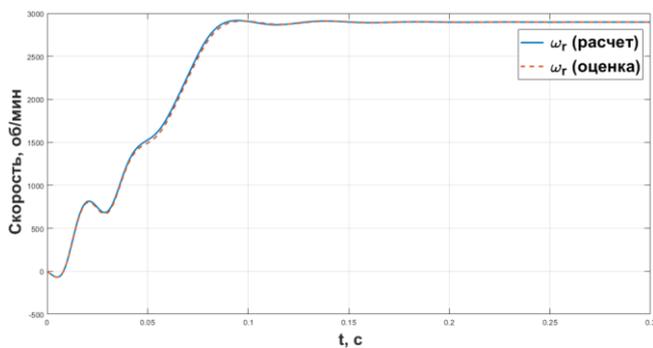


Рис. 5. Сравнение графиков скорости

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена структура адаптивного БИХ-фильтра. Приведены разностные уравнения для расчета коэффициентов адаптивного БИХ-фильтра. Предложенный алгоритм адаптивной фильтрации позволяет получить оценку параметров асинхронного электродвигателя. Оценка электрических параметров электродвигателя может использоваться для построения наблюдателя скорости в составе бездатчиковой системы управления электроприводом. Результаты моделирования алгоритма фильтрации подтверждают

корректность оценки параметров по предлагаемому алгоритму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Таланов М.В. Таланов В.М. Бездатчиковая система векторного управления асинхронным электродвигателем на основе сигматочечного фильтра Калмана. // Научно-технический вестник Поволжья, 2021, №8. С. 39-44
- [2] Таланов М.В. Таланов В.М. Регрессионная модель для идентификации электрических параметров асинхронного электродвигателя в бездатчиковых системах управления электроприводом // Научно-технический вестник Поволжья, 2022, №4. С. 30-33
- [3] 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>
- [4] 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>
- [5] Терехин В.Б., Дементьев Ю.Н. Компьютерное моделирование систем электропривода в Simulink: учеб. пособие для СПО / В.Б. Терехин, Ю.Н. Дементьев. М.: Изд-во Юрайт, 2019. 306 с.