

2. Определение дисперсии ошибки оценки индуктивности ротора в момент времени $t+T_k$:

$$P(t+T_k) = \frac{P(t)}{\rho} - \frac{P^2(t)z^2(t+T_k)}{\rho[P(t)z^2(t+T_k)+\rho]}.$$

3. Переход момента времени t к следующему моменту времени $t+T_k$ и возвращение к первому пункту с последующим повторением цикла.

Следует отметить, что в начальный момент времени неизвестна оценка величин \hat{L}_2 и P , поэтому они задаются следующим образом: $\hat{L}_2(0)$ – произвольное действительное число, которое желательно выбирать ближе к предполагаемому значению индуктивности ротора; $P(0)$ – рекомендуется принимать достаточно большим действительным числом [4].

При выборе коэффициента забывания ρ следует обратить внимание на то, что при его увеличении улучшается сгла-



Рис.2. Процесс определения индуктивности ротора двигателя 4AX90L4Y3

живание ошибки, вызванной погрешностью измерения, но в то же время ухудшается отслеживание определяемого параметра в случае его изменения во времени.

Результаты применения рекуррентного метода наименьших квадратов для определения в реальном времени индуктивности ротора представлены на рис.2. Процедура оценки была

проведена при $\rho=0.998$, $P(0)=1000000$, $\hat{L}_2(0)=0.175$.

Большие отклонения оцениваемого параметра на начальном участке вызваны неточным заданием $\hat{L}_2(0)=$ и $P(0)$, при этом определение индуктивности ротора осуществляется в пределах 80 мс, что вполне приемлемо для практических целей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каширских В.Г., Завьялов В.М., Соколов Д.В. Идентификация параметров асинхронного электродвигателя с помощью метода наименьших квадратов // Вестн. КузГТУ, 2002. - №2. – С. 17-19.
2. Каширских В.Г., Завьялов В.М. Идентификация параметров обмотки статора и цепи намагничивания асинхронного двигателя с помощью расширенного фильтра Калмана // Вестн. КузГТУ, 2002. №3. – С. 17-21.
3. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов.-М.: Энергоатомиздат, 1985. 560с.
4. Эйхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. М.: Мир. 1975. 687с.

УДК 621.313.333.045.028

В.Г. Каширских, В.М. Завьялов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЕГО РАБОТЕ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

Развивающиеся в последнее время системы векторного управления АД требуют знания информации о векторе потокосцепления ротора. Прямое его измерение труднодоступно, поэтому на практике используют расчетные методы определения потокосцепления ротора по уравнениям динамики, измеряя фазные токи, напряжения статора и скорость вращения

ротора [2]. При этом точность определения потокосцепления напрямую зависит от точности задаваемых параметров двигателя, которые, как правило, определяются из каталожных данных, являющихся усредненными для партии или серии двигателей.

Использование датчика скорости также

желательно исключить, так как оно несет ряд отрицательных факторов, например, ухудшение надежности системы и массогабаритных показателей. Для электрооборудования во взрывозащищенном исполнении, используемого в горных условиях, эти факторы имеют существенное значение.

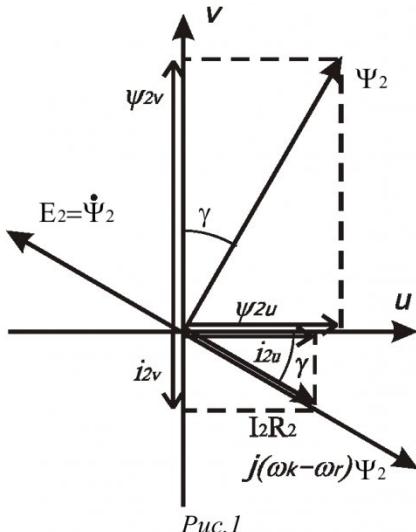


Рис. 1

В то же время известные методы оценки скорости без использования датчика [4, 5] используют в расчетных уравнениях активное сопротивление ротора, которое может в процессе работы изменяться более, чем в полтора раза [6]. Следовательно, необходима разработка методов одновременной оценки активного сопротивления ротора и бездатчиковой оценки его скорости вращения. Однако, в процессе исследований нами было установлено, что при работе двигателя на статическую нагрузку невозможна одновременная оценка активного сопротивления ротора и бездатчиковая оценка скорости вращения ротора АД.

Для доказательства этого обратимся к векторной диаграмме (рис.1), которая отображает положение векторов роторных переменных в установившемся режиме работы АД. Как известно, в этом режиме, в отличие от работы при динамической нагрузке, угол сдвига между потокосцеплением ротора Ψ_2 и вызванной им ЭДС E_2 равен 90° , а так как внешнее напряжение к ротору не подводится, то уравновешивающие ЭДС векторы I_2R_2 и $j(\omega_k - \omega_r)\Psi_2$ находятся на одной прямой с ЭДС.

Запишем известные уравнения динамики ротора для осей координат u , v , вращающихся с произвольной скоростью ω_k :

$$\bar{\Psi}_{2u} = -I_{2u}R_2 + (\omega_k - \omega_r)\Psi_{2v}, \quad (1)$$

$$\bar{\Psi}_{2v} = -I_{2v}R_2 + (\omega_k - \omega_r)\Psi_{2u}. \quad (2)$$

где Ψ_{2u} , Ψ_{2v} , i_{2u} , i_{2v} – составляющие потокосцепления и тока ротора по осям u и v ; R_2 – активное сопротивление ротора; ω_r , ω_k – угловые скорости вращения ротора и осей u и v .

Выразив из (1) активное сопротивление ротора и подставив в (2), получим:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_{2u}i_{2v} + \bar{\Psi}_{2v} = \omega_k(\Psi_{2v}i_{2v} - \Psi_{2u}i_{2u}) - \\ - \omega_r(\Psi_{2v}i_{2v} - \Psi_{2u}i_{2u}). \end{aligned} \quad (3)$$

В то же время, из векторной диаграммы для установившегося режима работы можно получить следующее равенство:

$$\frac{\Psi_{2u}}{\Psi_{2v}} = \frac{i_{2v}}{i_{2u}},$$

которое можно представить в виде:

$$\Psi_{2v}i_{2v} - \Psi_{2u}i_{2u} = 0.$$

В результате получаем, что уравнение (3) не имеет решения относительно скорости вращения ротора. Такой же результат получается и при выражении активного сопротивления ротора из (1), (2).

Физически это можно представить так. ЭДС, вызванная изменением потокосцепления ротора, уравновешивается падением напряжения на активном сопротивлении ротора и ЭДС, вызванной вращением ротора. Все эти величины совпадают по фазе, причем две последние имеют прямую пропорциональную зависимость от величины активного сопротивления и скорости вращения ротора. Из этого следует, что условие электрического равновесия будет выполняться при любых значениях активного сопротивления и скорости вращения ротора, главное, чтобы выполнялось условие :

$$R_2 + \omega_r \frac{\Psi_2}{I_2} = \text{const}.$$

Таким образом, показано, что при установившемся режиме работы АД, одновременная оценка активного сопротивления ротора и бездатчиковая оценка скорости вращения ротора невозможна, в то время как при работе двигателя с динамической нагрузкой такого ограничения нет. Также для АД с короткозамкнутым ротором невозможно непосредственное измерение активного сопротивления ротора, тогда как отмечалось выше, оно может существенно меняться в процессе работы двигателя. В результате для установившегося режима приходится использовать канал измерения скорости.

Будем изначально считать, что потокосцепление и активное сопротивление статора, а также все индуктивности АД известны [7, 8]. Для оценки активного сопротивления и потокосцепления ротора воспользуемся расширенным фильтром Калмана, алгоритм работы которого рассмотрен в [8].

Математическая модель состояния

Математическую модель состояния АД получим из известной системы дифференциаль-

ных уравнений, описывающих роторные переменные двухфазной обобщенной машины [1]:

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_2\alpha &= -\frac{R_2}{L_2}\Psi_2\alpha - \omega_r\Psi_2\beta + \frac{R_2L_m}{L_2}i_1\alpha \\ \bar{\Psi}_2\beta &= -\frac{R_2}{L_2}\Psi_2\beta - \omega_r\Psi_2\alpha + \frac{R_2L_m}{L_2}i_1\beta\end{aligned}\quad (4)$$

где $\Psi_2\alpha$, $\Psi_2\beta$, $i_2\alpha$, $i_2\beta$ – составляющие потокосцепления и тока ротора по осям α и β ; L_2 – индуктивность ротора; L_m – индуктивность цепи намагничивания.

Приведем (4) к дискретному виду с добавлением дополнительной координаты вектора состояния – активного сопротивления ротора.

Рассмотрим для этого два варианта перехода от дифференциальных уравнений к разностным.

Вариант 1. Путем аналитического решения системы уравнений (4):

$$\begin{aligned}\Psi_{2\alpha}(k+1) &= \\ &= a_1(k)\Psi_{2\alpha}(k) - a_2(k)\Psi_{2\beta}(k) + \\ &+ a_3(k)i_1\alpha(k) - a_4(k)i_1\beta(k);\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\Psi_{2\beta}(k+1) &= \\ &= a_2(k)\Psi_{2\alpha}(k) + a_1(k)\Psi_{2\beta}(k) + \\ &+ a_4(k)i_1\alpha(k) + a_3(k)i_1\beta(k);\end{aligned}\quad (6)$$

$$R_{2(k+1)} = R_{2(k)};\quad (7)$$

$$\begin{aligned}a_1(k) &= e^{-\frac{R_{2(k)}T_k}{L_{2(k)}}}\cos(p\omega_{r(k)}T_k); \\ a_2(k) &= e^{-\frac{R_{2(k)}T_k}{L_{2(k)}}}\sin(p\omega_{r(k)}T_k); \\ a_3(k) &= \frac{R_{2(k)}L_{m(k)}}{L_{2(k)}\left(\left(\frac{R_{2(k)}}{L_{2(k)}}\right)^2 + \omega_{r(k)}^2\right)} \times\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&\times \left(-\frac{R_{2(k)}}{L_{2(k)}} - e^{-\frac{R_{2(k)}T_k}{L_{2(k)}}} \times \right. \\ &\left. \times \left(\frac{R_{2(k)}}{L_{2(k)}} \cos(p\omega_{r(k)}T_k) - \right. \right. \\ &\left. \left. - p\omega_{r(k)} \sin(p\omega_{r(k)}T_k) \right) \right);\end{aligned}$$

$$a_{4(k)} = \frac{R_{2(k)}L_{m(k)}}{L_{2(k)}\left(\left(\frac{R_{2(k)}}{L_{2(k)}}\right)^2 + \omega_{r(k)}^2\right)} \times$$

$$\begin{aligned}&\times \left(-\frac{R_{2(k)}T_k}{L_{2(k)}} \times \right. \\ &\left. \times \left(\frac{R_{2(k)}}{L_{2(k)}} \sin(p\omega_{r(k)}T_k) + \right. \right. \\ &\left. \left. + p\omega_{r(k)} \cos(p\omega_{r(k)}T_k) \right) \right),\end{aligned}$$

где T_k – время дискретизации.

Вариант 2. Аппроксимацией дифференциальных уравнений (4) на основе численного метода Эйлера [9]:

$$\begin{aligned}\Psi_{2\alpha}(k+1) &= \Psi_{2\alpha}(k) + \\ &+ \left(b_1(k)\Psi_{2\alpha}(k) - \omega_r(k)\Psi_{2\beta}(k) + \right. \\ &\left. + b_2(k)i_1\alpha(k) \right) T_k;\end{aligned}\quad (8)$$

$$\begin{aligned}\Psi_{2\beta}(k+1) &= \Psi_{2\beta}(k) + \\ &+ \left(b_1(k)\Psi_{2\beta}(k) + \omega_r(k)\Psi_{2\alpha}(k) + \right. \\ &\left. + b_2(k)i_1\beta(k) \right) T_k;\end{aligned}\quad (9)$$

$$R_{2(k+1)} = R_{2(k)};\quad (10)$$

$$b_1(k) = -\frac{R_{2(k)}}{L_{2(k)}}; \quad b_2(k) = \frac{R_{2(k)}L_{m(k)}}{L_{2(k)}}.$$

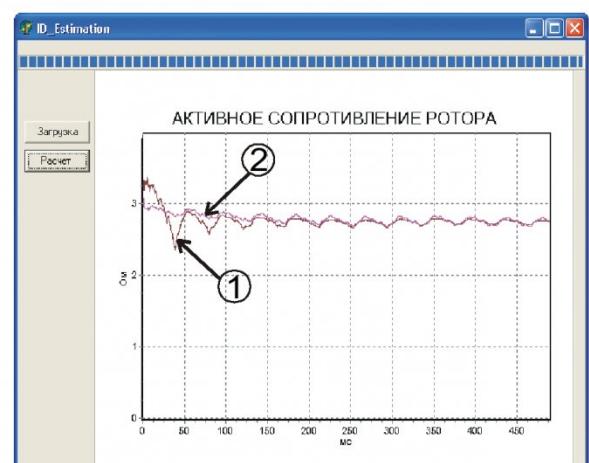


Рис.2 Результаты определения активного сопротивления ротора: 1 – расчет по модели состояния (5)–(7); 2 – расчет по модели состояния (8)–(10)

Математическая модель цепи измерения

В качестве модели цепи измерения используем выражения, полученные из уравнений, выражающих токи статора через потокосцепления и индуктивности [10]:

$$\psi_{2\alpha} = \frac{L_2}{L_m} \psi_{1\alpha} - \frac{L_1 L_2 - L_m^2}{L_m} i_{1\alpha},$$

$$\psi_{2\beta} = \frac{L_2}{L_m} \psi_{1\beta} - \frac{L_1 L_2 - L_m^2}{L_m} i_{1\beta}.$$

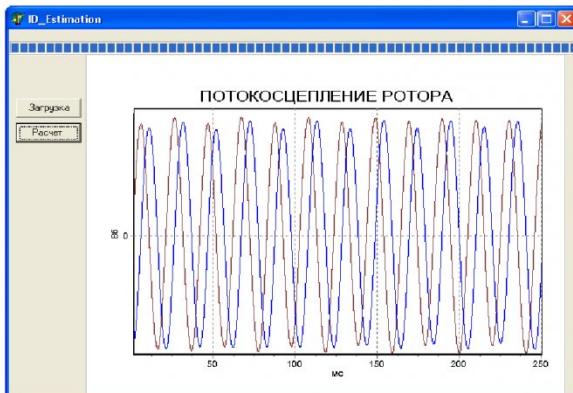


Рис.3. Изменение потокосцепления ротора при работе двигателя

Результаты оценки

Представленная методика использования расширенного фильтра Калмана для оценки потокосцепления и активного сопротивления ротора проверена на двигателе 4AX90L4Y3 мощностью 2,2 кВт (рис.2-

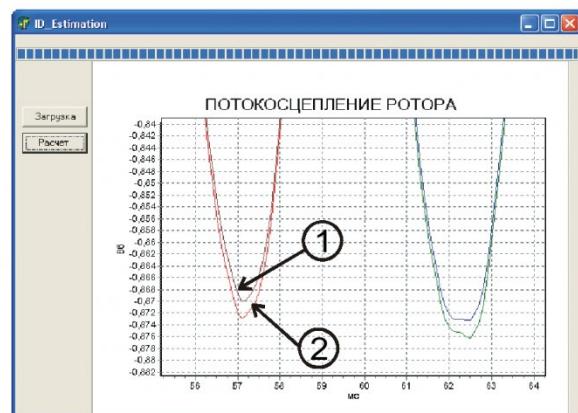


Рис.4 Результаты определения потокосцепления:
1 – расчет по модели состояния (5)–(7); 2 – расчет по модели состояния (8)–(10)

4). Каталожная величина активного сопротивления ротора - 2,63 Ом. Эксперимент проводился на специализированном стенде, состоящем из испытуемого асинхронного двигателя, нагружочного генератора постоянного тока, управляющей части, блока датчиков, а также ПК с платой АЦП ЛА2М2 и необходимого программного обеспечения.

Из графиков видно, что и первый и второй варианты получения модели состояния дают практически одинаковый результат.

Полученное таким образом потокосцепление ротора можно использовать в системах векторного управления. При этом изменение активного сопротивления ротора в процессе работы не будет влиять на качество управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов.-М.: Энергоатомиздат, 1985. 560с.
2. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 66с.
3. Ковбаса С.Н. Исследование грубости наблюдателей магнитного потока асинхронного двигателя// <http://www.el-drive.com.ua>.
4. Дарьенков А.Б., Марков В.В. Титов В.Г. Бездатчиковая система векторного управления с ориентацией по вектору потокосцепления ротора// <http://www.electro.nizhny.ru/papers/5/00506.html>.
5. Zadan H. Fujii S. Hanamoto T. Tsuji T. A sample sensor-less vector control system for variable speed induction motor drives. T.IEE Japan, vol. 120-D, No.10, 200, p. 1165-1170.
6. Иванов В.М. Компенсация переменных параметров в системах векторного управления// Электротехника. 2001. №5. – С.22-24.
7. Каширских В.Г., Завьялов В.М., Соколов Д.В. Определение кривой намагничивания асинхронного электродвигателя по результатам испытания на холостом ходе// Вестн. КузГТУ, 2002. - №2. – С.14-16.
8. Каширских В.Г., Завьялов В.М. Идентификация параметров обмотки статора и цепи намагничивания асинхронного двигателя с помощью расширенного фильтра Калмана // Вестн. КузГТУ, 2002. №3. – С.17-21.
9. Амосов А.А., Дубинский Ю.А. Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров: Учеб. пособие. – М.: Выш. шк., 1994. – 544 с.
10. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин:– М.: Выс. шк., 2001.–327с.

Авторы статей:

Каширских
Вениамин Георгиевич
- канд. техн.наук, доц., зав. каф.
электропривода и автоматизации

Завьялов
Валерий Михайлович
- аспирант каф. электропривода
и автоматизации