

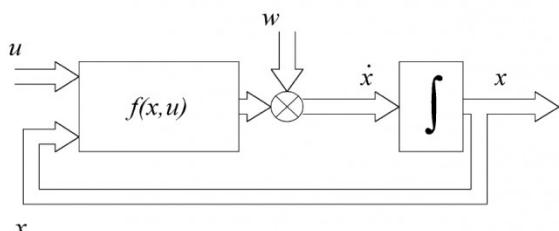
## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

**УДК 621.313.33:62-83**

**В.Г. Каширских, А.В.Нестеровский**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ РАБОТЫ НА ОСНОВЕ ПОИСКОВОГО АЛГОРИТМА ОЦЕНИВАНИЯ**

Для динамической идентификации параметров и переменных состояния асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (АД), особенно в производственных условиях, когда после замены одного электродвигателя на другой требуется автоматическое обеспечение устойчивости вычислительных процессов оценивания, могут быть использованы поисковые алгоритмы оценивания.



*Рис. 1. Модель стохастической управляемой системы*

Как и при идентификации на основе фильтра Калмана, поисковые алгоритмы должны реализовывать минимум расхождения (невязки) выходных сигналов модели и объекта. В качестве модели объекта (рис. 1) в этом случае целесообразно использовать модель стохастической управляемой системы в форме Ленжевена [1]: где  $x$  – вектор состояния системы;  $u$  – вектор управляемых воздействий;  $f$  – векторная функция переменных состояния и управления;  $w(t)$  – вектор возмущающих воздействий.

Для решения задачи оценивания параметров и состояния эта модель должна быть дополнена моделью цепи измерения, аналогично используемой в фильтре Калмана:

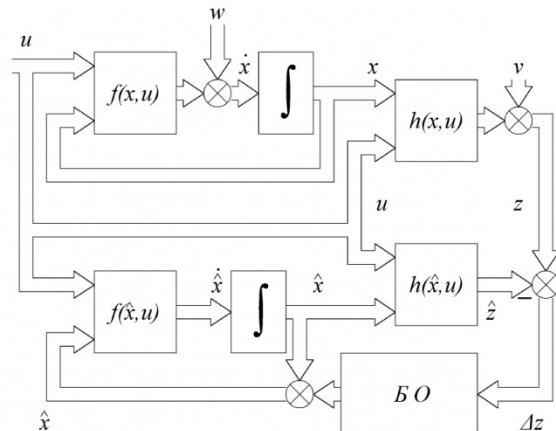
$$z = h(x, u) + v(t),$$

где  $z$  – вектор измерения,  $h$  – векторная функция,  $v(t)$  – вектор погрешности измерения.

На рис. 2 представлена структура поискового алгоритма, используемого нами для оценивания параметров и состояния АД. Алгоритм содержит модель оцениваемого процесса, которая косвенно охвачена многомерной обратной связью по вектору невязки  $\Delta z$  через блок оптимизации (БО), который решает задачу минимизации критерия

$Q(\Delta z)$ , представляющего собой некоторую положительную функцию. Минимизация в каждом конкретном случае может выполняться различными методами.

Наличие в структуре обратной связи не означает, что этот контур замкнут постоянно и осуществляет коррекцию оцененного состояния объекта  $\hat{x}$  на каждом шаге. Напротив, вычисление критерия  $Q(\Delta z)$  должно производиться в течение некоторого конечного интервала времени – окна, размер которого в каждом конкретном случае определяется динамикой объекта, а также имеющимися в системе шумами.



*Рис. 2. Структура поискового алгоритма*

В качестве критерия  $Q(\Delta z)$  нами была использована квадратичная функция, что вызвано несколькими причинами. Во-первых, она гарантирует наилучшую точность оценивания в минимаксном смысле (минимальные ошибки в наиболее неблагоприятной ситуации) для распределений шумов с ограниченными средними квадратами отклонений. Во-вторых, поскольку блок оптимизации в таком случае будет минимизировать среднеквадратичное отклонение, то по своим свойствам данный алгоритм будет близок к методу наименьших квадратов, но применительно к системам, описываемым дифференциальными уравнениями.

Известно, что метод наименьших квадратов не

требует априорной информации о характере шумов в системе, если они имеют нулевое математическое ожидание. Следовательно, поисковый алгоритм также будет иметь пониженную чувствительность к виду закона распределения плотностей вероятностей шумов, в том числе и коррелированных, при условии, что интервал корреляции будет существенно меньше времени вычисления критерия  $Q(\Delta z)$ , которое определяется постоянными времени объекта идентификации.

Кроме того, достоинством поисковых алгоритмов является возможность нахождения глобального экстремума в пространстве параметров объекта идентификации при наличии локальных экстремумов. Как и при использовании расширенного фильтра Калмана, для одновременного оценивания состояния и параметров объекта к вектору состояния необходимо добавить элементы вектора параметров, оценки которых требуется определить.

Несмотря на отмеченные достоинства поисковых алгоритмов оценивания, из-за сложности вычислительных процедур они пока не нашли широкого применения для идентификации параметров и переменных состояния электродвигателей в реальном времени.

В основе предложенного алгоритма оценивания лежит упрощенная математическая модель электродвигателя, преобразованная к более удобному эквивалентному виду. Из уравнений АД [2] для определения потокосцеплений статора  $\Psi_1$  и ротора  $\Psi_2$  получены зависимости для токов:

$$I_1 = \frac{\Psi_1 - K_2 \Psi_2}{L'_1}; \quad I_2 = \frac{\Psi_2 - K_1 \Psi_1}{L'_2}, \text{ где } K_1, K_2, L'_1, L'_2 - \text{коэффициенты}$$

электромагнитной связи и переходные индуктивности статора и ротора. Для упрощения модели также принято, что  $K_1 = K_2$ ,  $L'_1 = L'_2$ . Это обусловлено тем, что величина  $L_m$  значительно больше значений  $L_{1\sigma}$  и  $L_{2\sigma}$ . Данное упрощение справедливо для реальных АД, особенно для режимов их работы с большими нагрузками. Допустимость этого упрощения обоснована результатами вычислительных экспериментов, проведенных нами для ряда АД при моделировании процессов пуска и работы со статической и резкопеременной нагрузками. При этом максимальная погрешность вычислений значений  $I_2$ ,  $\Psi_2$  по упрощенной модели АД относительно его полной модели не превышала 5%.

При работе АД в динамических режимах для идентификации параметров и состояния были использованы математическая модель состояния:

$$\dot{\Psi}_2 = -\frac{R_2}{L'_2}(\Psi_2 - K_1 \Psi_1) + j\omega_r \Psi_2 \text{ и модель цепи измерения: } \Psi_1 = K_2 \Psi_2 + I_1 L'_1. \quad R_2 - \text{активное сопротивление ротора.}$$

Для использования поискового метода оценивания модель АД в осях  $\alpha, \beta$  была приведена к виду:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u); \\ \hat{x} = [\hat{\Psi}_{2\alpha} \quad \hat{\Psi}_{2\beta} \quad \hat{\omega}_r \quad \hat{R}_2 \quad \hat{L}'_2 \quad \hat{K}_1]^T; \\ u = [\Psi_{1\alpha} \quad \Psi_{1\beta} \quad I_{1\alpha} \quad I_{1\beta}]^T, \end{cases}$$

где  $\hat{x}$  - вектор оценок состояния и параметров,  $u$  - вектор входных воздействий,  $R_2$  - активное сопротивление ротора,  $\omega_r$  - частота вращения ротора.

При этом векторная функция, связывающая производную вектора состояния по времени с вектором входных воздействий и вектором состояния, имеет вид:

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{R}_2}{\hat{L}'_2}(\hat{\Psi}_{2\alpha} - \hat{K}_1 \Psi_{1\alpha}) + p\hat{\omega}_r \hat{\Psi}_{2\beta} \\ -\frac{\hat{R}_2}{\hat{L}'_2}(\hat{\Psi}_{2\beta} - \hat{K}_1 \Psi_{1\beta}) - p\hat{\omega}_r \hat{\Psi}_{2\alpha} \\ \dot{\hat{\omega}}_r \\ \dot{\hat{R}}_2 \\ \dot{\hat{L}}'_2 \\ \dot{\hat{K}}_1 \end{bmatrix}$$

Здесь  $p$  - число пар полюсов.

Для выявления ошибки оценивания использована векторная функция, связывающая определяемую величину с управляемым воздействием и состоянием:

$$h(x, u) = \Psi_2 = (\Psi_1 - \hat{L}'_1 I_1) / \hat{K}_2,$$

а также соответствующая ей функция  $h(\hat{x}, u) = \hat{\Psi}_2$ , определяющая ту же величину, но полученную из вектора оценок состояния и параметров.

При этом целевая функция  $Q(\Delta z)$  имеет вид:

$$Q(\Delta z) = Q(h(x, u) - h(\hat{x}, u)) =$$

$$= \sum_{i=0}^N (|\Psi_2[i] - \hat{\Psi}_2[i]|)^2.$$

Для уменьшения размерности пространства поиска число параметров в модели уменьшено

$$\text{вводом величины } Y = \frac{R_2}{L'_2}.$$

Алгоритм оценивания параметров и переменных состояния электродвигателя содержит подпрограмму расчета величин  $\hat{\Psi}_2$  и  $\hat{L}'_2$ . Вход-

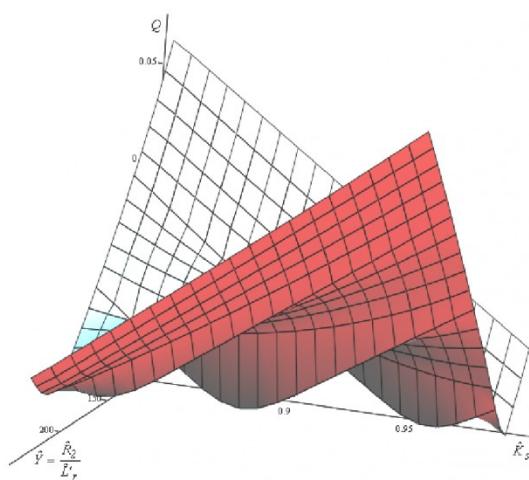


Рис. 3. Зависимость  $Q(\hat{Y}, \hat{K}_1)$   
для электродвигателя 4AM80A4СУ1

ными данными для нее являются массивы текущих значений тока статора  $I_1[0...N]$ , потокосцепления статора  $\Psi_1[0...N]$ , величины  $\dot{\omega}_r, \hat{Y}, \hat{K}_1$ , а также начальные значения параметров и состояния  $\hat{\omega}[0], \hat{Y}[0], \hat{K}_1[0], \Psi_2[0]$ .

Выходные данные – рассчитанный массив

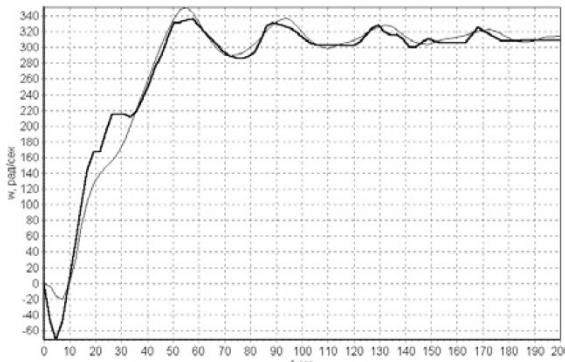


Рис. 4. Сравнение оцененной измеренной (тонкая линия) частоты вращения ротора

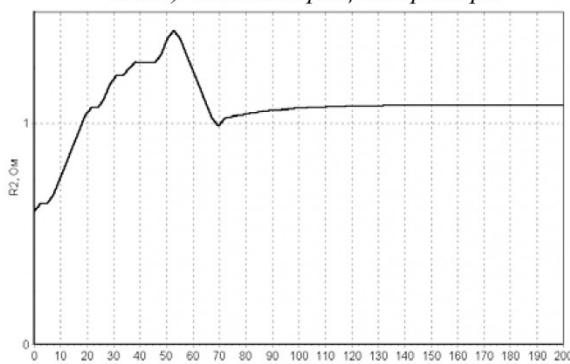


Рис. 5. Процесс оценивания  
активного сопротивления ротора

значений потокосцепления ротора  $\Psi_2[0...N]$ , величина переходной индуктивности ротора  $\hat{L}'_2$  и значение критерия  $Q$ , которое определяет степень достоверности заданных значений параметров и переменных состояния АД. Все массивы имеют одинаковое число элементов  $N$ , соответствующее выборке по времени в диапазоне 1-10 мс.

Практическое исследование характера функции  $Q(\Delta z)$  для различных электродвигателей показало, что она является многоэкстремальной и имеет, как правило, несколько локальных минимумов (рис. 3). Для поиска глобального экстремума такой функции наилучшим оказался следующий подход: на первом этапе используется многомерный перебор в пространстве варьируемых параметров для локализации минимума, а затем – метод покоординатного спуска для уточнения найденного экстремума.

Из-за меньшей информативности токов и напряжений статора при идентификации АД в *статических режимах* размерность пространства поиска была уменьшена. Для этого величины  $K_1, K_2, L_1', L_2'$  были приняты постоянными.

В этом случае изменяется алгоритм оценивания с изменением вектора оценок параметров и состояния АД:  $\hat{x} = [\hat{\Psi}_{2\alpha} \quad \hat{\Psi}_{2\beta} \quad \hat{\omega}_r \quad \hat{R}_2]^T$ .

Векторная функция, связывающая производную вектора состояния по времени с вектором управления и состояния, в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= f(\hat{x}, u) = \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{\hat{R}_2}{L'_2}(\hat{\Psi}_{2\alpha} - K_1 \Psi_{1\alpha}) + p \hat{\omega}_r \hat{\Psi}_{2\beta} \\ -\frac{\hat{R}_2}{L'_2}(\hat{\Psi}_{2\beta} - K_1 \Psi_{1\beta}) - p \hat{\omega}_r \hat{\Psi}_{2\alpha} \\ \dot{\hat{\omega}}_r \\ \dot{\hat{R}}_2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Исследование характера функции  $Q(\Delta z)$  для различных типов электродвигателей показало, что она имеет один экстремум в области возможных значений варьируемых параметров. Поиск минимума для этого алгоритма производится методом покоординатного спуска с достижением экстремума за 2-3 цикла поиска.

Для определения индуктивности цепи намагничивания определены векторы и векторная функция в виде:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= [\hat{\Psi}_{2\alpha} \quad \hat{\Psi}_{2\beta} \quad \check{L}_m]^T; \\ u &= [\Psi_{1\alpha} \quad \Psi_{1\beta} \quad i_{1\alpha} \quad i_{1\beta}]^T; \end{aligned}$$

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) = \begin{cases} -\frac{\hat{R}_2}{L'_2}(\hat{\Psi}_{2\alpha} - K_1 \Psi_{1\alpha}) + p\hat{\omega}_r \hat{\Psi}_{2\beta} \\ -\frac{\hat{R}_2}{L'_2}(\hat{\Psi}_{2\beta} - K_1 \Psi_{1\beta}) - p\hat{\omega}_r \hat{\Psi}_{2\alpha} \\ 0 \end{cases}$$

Математическая модель цепи измерения и целевая функция имеют вид:

$$h(\hat{x}, u) = \hat{I}_1 = \frac{\Psi_1 - K_2 \hat{\Psi}_2}{L'_1};$$

$$Q(\Delta z) = Q(h(x, u) - h(\hat{x}, u)) = \sum (|I_1 - \hat{I}_1|)^2.$$

Для примера на рис. 4 и 5 представлены процессы оценивания значений активного сопротивления ротора  $R_2$  и частоты вращения  $\omega_r$  в процессе пуска электродвигателя 4AMX90L2Y3. Несмотря на то, что используемый в этом случае алгоритм предназначен для статического режима, получены результаты, близкие к измеренным данным и результатам, определенным с помощью других методов.

Предложенный подход к динамической идентификации АД может быть использован для построения системы мониторинга с использованием получаемой при этом информации для управления и функционального диагностирования асинхронных электроприводов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов.-2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

□ Авторы статьи:

Каширских Вениамин Георгиевич - докт. техн. наук, проф., зав. каф. электропривода и автоматизации	Нестеровский Александр Владимирович - канд. техн. наук, доц. каф. электропривода и автоматизации
--	--

**УДК 621.313.333:045.028**

**В.М.Завьялов, А.В. Нестеровский, Д.О. Мефферт**

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МНОГОМАССОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В задачах управления электроприводами с многомассовыми механическими передачами необходимо знать текущие значения механических переменных, таких как частоты вращения масс и моменты упругих напряжений. К тому же в таких системах нужно знать момент сопротивления, если в процессе работы он меняется случайно.

Измерение этих величин на практике, как правило, затруднительно в силу особенностей конструкции механических передач, и поэтому встает задача оценки этих величин.

Рассмотрим вариант оценки переменных состояния на примере трехмассовой механиче-

ской системы.

Воспользуемся уравнением движения такой системы:

$$\left. \begin{array}{l} J_1 \cdot \dot{\omega}_1 = M_{\text{ЭМ}} - M_{12}; \\ J_2 \cdot \dot{\omega}_2 = M_{12} - M_{23}; \\ J_3 \cdot \dot{\omega}_3 = M_{23} - M_C; \\ \dot{M}_{12} = C_{12}(\omega_1 - \omega_2); \\ \dot{M}_{23} = C_{23}(\omega_2 - \omega_3), \end{array} \right\} \quad (1)$$

где  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – скорости вращения первой, второй и третьей масс;  $M_{12}, M_{23}$  – моменты упругих сил между массами;  $M_C$  – момент сопротивления;  $J_1, J_2, J_3$  – моменты инерции;  $C_{12}, C_{23}$  – коэффициенты жесткости упругих связей.

Примем, что нам известны

частота вращения первой массы и момент сил, на валу двигателя. Тогда подлежащими оценке величинами будут частоты вращения второй и третьей масс, упругие моменты и момент сопротивления.

Преобразуем (1) так, чтобы переменные, подлежащие оценке, оказались в левой части:

$$\left. \begin{array}{l} M_{12} = M_{\text{ЭМ}} - \dot{\omega}_1 \cdot J_1; \\ \omega_2 = \omega_1 - \dot{M}_{12}/C_{12}; \\ M_{23} = M_{12} - \dot{\omega}_2 \cdot J_2; \\ \omega_3 = \omega_2 - \dot{M}_{23}/C_{23}; \\ M_C = M_{23} - \dot{\omega}_3 \cdot J_3, \end{array} \right\}$$

Основной проблемой применения данного выражения на