ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.3:007; 621.3:001.891.57

А. М. Водовозов, А. С. Елюков

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предложен новый алгоритм параметрической идентификации электромеханических систем с известной структурой. Построена обобщенная математическая модель электромеханической системы, позволяющая проводить идентификацию частично наблюдаемых систем по результатам испытаний, искаженным вследствие шумов.

Ключевые слова: *параметрическая идентификация, электромеханическая система, математическая модель.*

Параметрическая идентификация является ключевой задачей синтеза математической модели электромеханической системы. Несмотря на то, что структура электромеханической системы при идентификации, как правило, считается априори известной, физические параметры системы с течением времени изменяются и поэтому их нельзя рассматривать как стационарные переменные.

Построение общих алгоритмов параметрической идентификации электромеханической системы в общем случае предполагает выбор математической модели, определенной системой уравнений в форме Коши:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{dx_1}{dt}=\sum_{i=1}^{m} a_{1i} f_{1i}\left(x_1, x_2, \ldots, x_n\right)+b_1 u_1(t);\\
&\frac{dx_2}{dt}=\sum_{i=1}^{m} a_{2i} f_{2i}\left(x_1, x_2, \ldots, x_n\right)+b_2 u_2(t);\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&\frac{dx_n}{dt}=\sum_{i=1}^{m} a_{ni} f_{ni}\left(x_1, x_2, \ldots, x_n\right)+b_n u_n(t),
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где a_{ji} — идентифицируемые параметры, $f_{ji}\left(x_1, x_2, \ldots, x_n\right)$ — функции вектора состояния, $u_i(t)$ — входное воздействие; начальные условия вектора состояния $x_1^0, x_2^0, \ldots, x_n^0$ предполагаются известными.

Система (1) далеко не всегда имеет аналитическое решение в общем виде, поэтому выражение $x_i(t, A)$, где A — матрица параметров, получить не удается. Кроме того, крайне редко встречается идеальный случай полной наблюдаемости электромеханической системы, и общие алгоритмы идентификации должны быть ориентированы на частично наблюдаемые объекты, в которых вектор $x_1, x_2, \ldots, x_q$, $q<n$, известен. Все наблюдаемые переменные могут быть использованы в модели для минимизации функционала относительно матрицы параметров A.

Наличие производных в системе (1) усиливает погрешности вектора наблюдения. Пусть вектор наблюдения $x_1, x_2, \ldots, x_q = \hat{x}_1, \hat{x}_2, \ldots, \hat{x}_q + \delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_q$, где $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \ldots, \hat{x}_q$ — точные значения, $\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_q$ — флюктуационные составляющие. Тогда среднеквадратическое отклонение первой производной

$$\sqrt{D\left(\frac{d\delta_i}{dt}\right)} = \frac{\sqrt{2D(\delta_i)}}{\Delta t},$$

где Δt — период дискретизации, D — символ дисперсии.

При малых значениях Δt погрешность, обусловленная наличием производных в математической модели, значительна, а при больших интервалах квантования Δt невозможно отслеживать динамику быстрых процессов.

Вышеизложенная проблема может быть решена путем конструирования помехозащищенных алгоритмов параметрической идентификации, использующих интеграл системы (1) с учетом начальных условий:

$$\left.\begin{aligned}
x_1 &= \sum_{i=1}^{m} a_{1i} \int_0^t f_{1i}(x_1, x_2, \ldots, x_n)\,dt + x_1^0 + b_1 \int_0^t u_1(t)\,dt;\\
x_2 &= \sum_{i=1}^{m} a_{2i} \int_0^t f_{2i}(x_1, x_2, \ldots, x_n)\,dt + x_2^0 + b_2 \int_0^t u_2(t)\,dt;\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
x_n &= \sum_{i=1}^{m} a_{ni} \int_0^t f_{ni}(x_1, x_2, \ldots, x_n)\,dt + x_n^0 + b_n \int_0^t u_n(t)\,dt.
\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Полученная система (2) не усиливает погрешность, поэтому является помехозащищенной. Важно также заметить, что идентификация согласно системе уравнений (2) не уступает по быстродействию идентификации, осуществляемой в соответствии с системой уравнений (1). Интеграл вычисляется по рекуррентной формуле на основе квадратуры прямоугольников:

$$I_{kji} = \int_0^t f_{ji}(x_1, x_2, \ldots, x_n)\,dt \approx \Delta t \sum_{h=1}^{k} f_{ji}(x_1^h, x_2^h, \ldots, x_n^h) \Rightarrow I_{kji} = \Delta t f_{ji}(x_1^k, x_2^k, \ldots, x_n^k) + I_{k-1\,ji},$$

и требует столько же времени, сколько алгоритм вычисления производной.

Форма функционала ошибки для полностью наблюдаемых систем имеет следующий вид:

$$F(A) = \sum_{h=1}^{k} \sum_{i=1}^{n} \left(x_h^0 - x_1^0 - \sum_{j=1}^{m} a_{ij} I_{hji} - b_i \int_0^t u_i(t)\,dt \right)^2. \tag{3}$$

Функционал (3) является линейным относительно a_{ij}, что определяет его преимущество перед функционалами ошибки, записанными в частотной или операторной области для линейных систем [1]. Даже если система уравнений (1) имеет аналитическое решение $x_i(t, A)$, то его использование в решении общей задачи идентификации, скорее всего, приведет к функционалу ошибки, нелинейному относительно a_{ij}.

Для частично наблюдаемых объектов, к которым относятся, например, электроприводы, построение функционала достигается аналитическими преобразованиями системы (2), исключающими ненаблюдаемые переменные. При этом линейность функционала не гарантирована. Если преобразование системы (2) невозможно, то идентификация в этом случае весьма затруднена.

В качестве примера рассмотрим задачу параметрической идентификации асинхронной машины с короткозамкнутым ротором по кривой переходного процесса прямого пуска с нагрузкой M_c = 4 Н·м. Система уравнений, описывающая функционирование асинхронной машины в неподвижной относительно наблюдателя системе координат $[\alpha,\beta]$, согласно работе [2] имеет следующий вид:

$$\left.\begin{aligned} &u_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + L_m \frac{di_r}{dt};\\ &R_r i_r + L_m \frac{di_s}{dt} + L_r \frac{di_r}{dt} - j\omega L_m i_s - j\omega L_r i_r = 0;\\ &J\frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} p_\tau^2 L_m \operatorname{Im}\left(\bar{i}_s i_r\right) - M_c p_\tau, \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

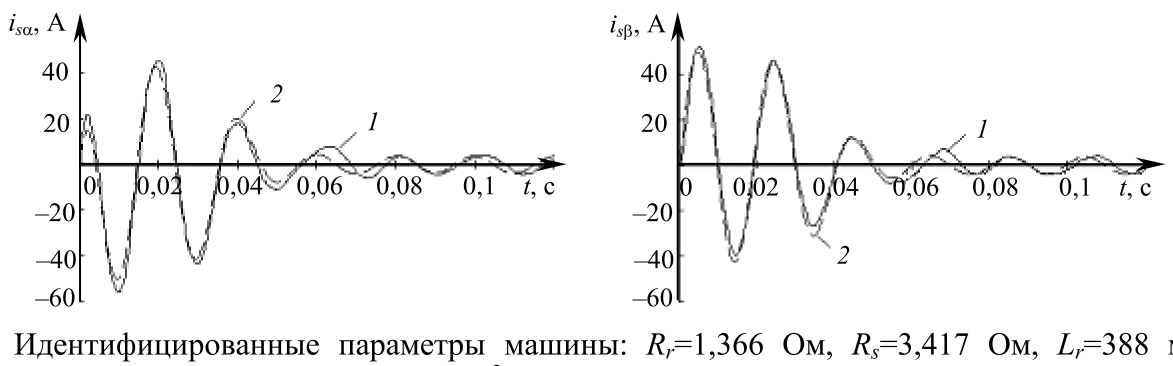
где R_r=2,166 Ом, R_s=3,421 Ом — сопротивления ротора и статора; L_r=406 мГн, L_s=401 мГн — индуктивности ротора и статора; L_m=394 мГн — взаимоиндуктивность; J=0,0021 кг·м^2 — момент инерции; u_s — напряжение питания; i_s, i_r — ток статора и ток ротора; ω — частота вращения ротора; $p_\tau = 1$ — число пар полюсов. (Указанные числовые значения параметров машины марки 5АИ80В2У3 взяты из документации и использованы как начальные условия при численной минимизации функционала ошибки.)

Наблюдаемыми величинами в асинхронной машине обычно являются u_s, M_c и i_s, поэтому из системы (4) исключаются параметры i_r и ω:

$$\left.\begin{aligned} &i_r = \frac{1}{L_m}\left(\int_0^t u_s dt - R_s \int_0^t i_s dt - L_s i_s\right),\\ &\omega = \frac{1}{J}\left(\frac{3}{2} p_\tau^2 L_m \int_0^t \operatorname{Im}\left(\bar{i}_s i_r\right) dt - p_\tau \int_0^t M_c dt\right). \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

После подстановки выражений (5) во второе уравнение системы (4) получается уравнение, квадрат которого дает функционал ошибки.

На рисунке показаны результаты эксперимента по определению токов $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ статора электрической машины, где $i_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}$ (кривая *1*), и результаты расчета токов модели с определенными по предложенной методике параметрами (кривая *2*).



Идентифицированные параметры машины: R_r=1,366 Ом, R_s=3,417 Ом, L_r=388 мГн, L_s=400 мГн, L_m=388 мГн, J=0,0022 кг·м^2. Отличие полученных значений от указанных в документации (справочных) составляет меньше 5 %, лишь только реальное сопротивление ротора больше справочного на 36 %, что может быть связано с незаявленными в справочнике потерями на вихревые токи.

Полученные результаты исследования позволяют сделать вывод о целесообразности использования предложенного алгоритма идентификации в реальных условиях работы электромеханических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Елюков А. С., Водовозов А. М.* К вопросу об идентификации линейных динамических систем по результатам экспериментальных исследований // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 2.2 (32). С. 253—256.

2. *Копылов И. П.* Электрические машины. М.: Высш. школа, 2006.

Сведения об авторах

Александр Михайлович Водовозов — канд. техн. наук, доцент; Вологодский государственный технический университет, кафедра управляющих и вычислительных систем; E-mail: amv@vstu.edu.ru

Александр Сергеевич Елюков — студент; Вологодский государственный технический университет, кафедра управляющих и вычислительных систем; E-mail: aelyukov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой управляющих и вычислительных систем

Поступила в редакцию 01.06.09 г.