Исследование условий текущей идентифицируемости параметров асинхронного электропривода

КУЧЕР Е.С., ПАНКРАТОВ В.В.

Предложена методика анализа корректности постановки задач совместной текущей идентификации неизмеряемых координат и переменных параметров асинхронных электроприводов по основным рабочим гармоникам электрических величин. Получены условия разрешимости некоторых из них.

Ключевые слова*: регулируемый асинхронный электропривод, бездатчиковое векторное управление, текущая идентификация*

A procedure is proposed for analyzing how correctly the problems of jointly identifying the current nonmeasured coordinates and variable parameters of induction-motor electric drives from the fundamental working harmonic components of electrical quantities are formulated. Solvability conditions for some of these problems are obtained.

Key words: *induction-motor electric drive, sensorless vector control, current identification*

Одна из главных проблем построения высококачественных систем векторного управления электроприводами (ЭП) на базе асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым ротором – необходимость вычисления в реальном масштабе времени (текущая идентификация) координат опорного вектора потокосцеплений. Проблема традиционно решается с помощью тех или иных математических моделей АД как объекта управления, которые неизбежно оперируют значениями различных параметров машины. Вместе с тем, даже параметры классической Т-образной схемы замещения двигателя имеют значительный технологический разброс и, более того, изменяются в процессе функционирования ЭП в довольно широких диапазонах. Это не позволяет постоянно пользоваться их номинальными значениями, приведенными в справочной литературе или определенными из опытов в лабораторных условиях. Поэтому в адаптивных системах управления электроприводами реализуются автоматические процедуры активной предварительной идентификации начальных значений интервально неопределенных параметров машины, которые затем уточняются путем их текущей идентификации [1].

Задача текущей идентификации опорного вектора и изменяющихся параметров значительно усложняется в так называемых бездатчиковых ЭП, не имеющих сенсоров координат механического движения электропривода – скорости и положения ротора [2]. В таких системах приходится использовать исключительно результаты прямых измерений электрических величин, доступных во внутренней структуре и на выходных клеммах управляемого преобразователя электрической энергии – преобразователя частоты (ПЧ).

Известны три основных подхода к определению параметров электрических машин в процессе работы ЭП:

пассивная текущая идентификация на основе анализа информации об основных рабочих гармониках электрических величин;

пассивная текущая идентификация параметров на основе информации о неосновных (относительно высокочастотных) составляющих электрических величин, генерируемых зубцовыми пульсациями магнитного поля или импульсным характером выходного напряжения силового ПЧ;

активная текущая идентификация на основе анализа реакции объекта управления на инжектированные в статор двигателя тестовые воздействия (как правило, периодическую составляющую напряжения или тока по продольной оси магнитного поля ротора).

В большинстве практических разработок предпочтение отдается первому подходу, не приводящему к ухудшению энергетических характеристик электропривода, завышению установленной мощности элементов ПЧ, сложным вычислениям и использованию измерительных цепей высокой точности.

Авторами предпринята попытка на основе традиционной для задач векторного управления АД математической модели статики двигателя, представленной в двух различных формах (векторно-матричной и символической), проанализировать принципиальную возможность решения (иными словами, корректность постановки) некоторых имеющих реальный технический смысл задач совместной текущей идентификации координат и параметров двигателя в системе частотно-регулируемого электропривода, не выходя за рамки первого из перечисленных выше подходов.

Постановка задачи исследования и метод решения. При общепринятых допущениях электромагнитные процессы в АД с короткозамкнутым ротором могут быть описаны в произвольной вращающейся системе координат следующими дифференциальными уравнениями [3]:

$$L_{\sigma e} I_s = -R_s I_s - \frac{L_m}{L_r}\dot{\Psi}_r - \omega_k D\left(L_{\sigma e} I_s + \frac{L_m}{L_r}\Psi_r\right) + U_s;$$
$$\dot{\Psi}_r = \frac{L_m R_r}{L_r} I_s - (\omega_k - \omega_e) D\Psi_r = \frac{R_r}{L_r}\Psi_r, \qquad (1)$$

где I_s, Ψ_r — двумерные векторы-столбцы токов статора и потокосцеплений ротора; $\omega_k = \frac{d\gamma_k}{dt}$ — угловая скорость системы координат; $\omega_e = \frac{d\gamma_e}{dt}$ — «электрическая» частота вращения ротора; $D = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$; L_r, L_m, R_r, R_s, $L_{\sigma e}$ — параметры схемы замещения АД.

Требуется определить, по меньшей мере, необходимые условия, при выполнении которых входящие в систему (1) параметры, в том числе для бездатчиковых ЭП — «электрическую» частоту вращения, принципиально возможно вычислить по измерениям лишь токов и напряжений статора в установившихся режимах работы электропривода.

Для формализации методики решения поставленной задачи запишем уравнения (1) в системе координат (1, 2), вращающейся с синхронной скоростью ($\omega_k = \omega_0$), и перейдем к модели установившегося режима:

$$U_s = R_s I_s + \omega_0 D L_{\sigma e} I_s + \omega_0 D \frac{L_m}{L_r}\Psi_r;$$
$$0 = \frac{L_m}{T_r} I_s - (\omega_0 - \omega_e) D\Psi_r - \frac{1}{T_r}\Psi_r, \qquad (2)$$

где $T_r = L_r / R_r$ — постоянная времени цепи ротора АД.

Из второго уравнения системы (2) выразим вектор потокосцеплений ротора:

$$\Psi_r = \frac{L_m}{T_r} I_s \left(\omega_s D + \frac{E}{T_r}\right)^{-1}, \qquad (3)$$

где $\omega_s = \omega_0 - \omega_e$ — частота скольжения; E — единичная матрица.

Подставив (3) в (2), получим

$$U_s = \left[R_s E + \omega_0 \left(L_{\sigma e} D + \frac{L_m^2}{L_r T_r} D \left(\omega_s D + \frac{E}{T_r}\right)^{-1}\right)\right] I_s, \qquad (4)$$

причем

$$\left(\omega_s D + \frac{E}{T_r}\right)^{-1} = \left(\omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{T_r}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\right)^{-1} =$$
$$= \begin{bmatrix} 1/T_r & -\omega_s \\ \omega_s & 1/T_r \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1/T_r & \omega_s \\ -\omega_s & 1/T_r \end{bmatrix} \frac{T_r^2}{(1+\omega_s^2 T_r^2)}.$$

Следовательно, (4) имеет вид:

$$U_s = \left[R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \omega_0 \left(L_{\sigma e}\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + \frac{L_m^2}{L_r T_r}\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \times \right.\right.$$
$$\left.\left. \times \begin{bmatrix} 1/T_r & \omega_s \\ -\omega_s & 1/T_r \end{bmatrix} \frac{T_r^2}{(1+\omega_s^2 T_r^2)}\right)\right] I_s$$

или

$$U_s = Z I_s, \qquad (5)$$

где $Z =$

$$= \begin{bmatrix} \dfrac{R_s R_r (1+\omega_s^2 T_r^2) + L_m^2 \omega_s \omega_0}{R_r (1+\omega_s^2 T_r^2)} & \dfrac{-\omega_0 (L_m^2 + L_{\sigma e} L_r (1+\omega_s^2 T_r^2))}{L_r (1+\omega_s^2 T_r^2)} \\ \dfrac{\omega_0 (L_m^2 + L_{\sigma e} L_r (1+\omega_s^2 T_r^2))}{L_r (1+\omega_s^2 T_r^2)} & \dfrac{R_s R_r (1+\omega_s^2 T_r^2) + L_m^2 \omega_s \omega_0}{R_r (1+\omega_s^2 T_r^2)} \end{bmatrix}$$

— полное сопротивление двигателя, представленное в матричной форме.

Если вращающуюся систему координат (1, 2) сориентировать по вектору напряжений статора, то

$$U_s = \begin{bmatrix} U_{sm} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad I_s = \begin{bmatrix} I_{sm}\cos\varphi \\ I_{sm}\sin\varphi \end{bmatrix},$$

где U_{sm}, I_{sm} — модули векторов напряжений и тока статора АД.

В данном случае выражение (5) может быть переписано в виде:

$$\begin{bmatrix} U_{sm} \\ 0 \end{bmatrix} =$$
$$= \begin{bmatrix} \dfrac{R_s R_r (1+\omega_s^2 T_r^2) + L_m^2 \omega_s \omega_0}{R_r (1+\omega_s^2 T_r^2)} & \dfrac{-\omega_0 (L_m^2 + L_{\sigma e} L_r (1+\omega_s^2 T_r^2))}{L_r (1+\omega_s^2 T_r^2)} \\ \dfrac{\omega_0 (L_m^2 + L_{\sigma e} L_r (1+\omega_s^2 T_r^2))}{L_r (1+\omega_s^2 T_r^2)} & \dfrac{R_s R_r (1+\omega_s^2 T_r^2) + L_m^2 \omega_s \omega_0}{R_r (1+\omega_s^2 T_r^2)} \end{bmatrix} \times$$
$$\times \begin{bmatrix} I_{sm}\cos\varphi \\ I_{sm}\sin\varphi \end{bmatrix}. \qquad (6)$$

Понятно, что из условий совместности уравнений (6) могут быть однозначно определены лишь какие-то два неизвестных параметра, входящих в матричное полное сопротивление. При этом необходимым и достаточным условием идентифицируемости каждой возможной пары параметров АД является невырожденность матрицы Якоби [4] для системы (6):

$$Y = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial F_1}{\partial \alpha_1} & \dfrac{\partial F_1}{\partial \alpha_2} \\ \dfrac{\partial F_2}{\partial \alpha_1} & \dfrac{\partial F_2}{\partial \alpha_2} \end{bmatrix}, \ \det Y \neq 0, \qquad (7)$$

где α_1, α_2 — идентифицируемые параметры АД; $F = \begin{bmatrix} F_1(\alpha_1, \alpha_2) \\ F_2(\alpha_1, \alpha_2) \end{bmatrix}$ — вектор-столбец функций — левая часть уравнения $F = U_s - I_s Z = 0$:

$$F_1 = U_{sm}(1+\omega_s^2 T_r^2) - \left(R_s(1+\omega_s^2 T_r^2) + \frac{L_m^2}{R_r}\omega_s\omega_0 \right)\times$$

$$\times I_{sm}\cos\varphi + \omega_0\left(\frac{L_m^2}{L_r} + L_{\sigma e}(1+\omega_s^2 T_r^2) \right) I_{sm}\sin\varphi;$$

$$F_2 = \left(R_s(1+\omega_s^2 T_r^2) + \frac{L_m^2}{R_r}\omega_s\omega_0 \right) I_{sm}\sin\varphi +$$

$$+\omega_0\left(\frac{L_m^2}{L_r} + L_{\sigma e}(1+\omega_s^2 T_r^2) \right) I_{sm}\cos\varphi.$$

Получить аналогичную матрицу Якоби на основе комплексной формы записи системы уравнений (1) можно также путем замены двумерных векторов электромагнитных переменных, представленных в неподвижной системе координат (α,β) при $\omega_k = 0$, комплексными функциями времени, вещественные части которых равны проекциям соответствующих векторов на ось α, а мнимые — на ось β. В этом случае [3]:

$$U_s = U_{sm} e^{j\omega_0 t}; \ I_s = I_{sm} e^{j(\omega_0 t + \varphi)};$$

$$\Psi_r = \psi_{rm} e^{j(\omega_0 t + \gamma)},$$

где U_{sm}, I_{sm}, ψ_{rm} — модули векторов напряжений и тока статора, потокосцеплений ротора АД; φ, γ — фазы векторов токов и потокосцеплений ротора относительно вектора напряжений статора; j — мнимая единица.

Тогда система (1) примет вид:

$$U_{sm} e^{j\omega_0 t} = L_{\sigma e} j\omega_0 I_{sm} e^{j(\omega_0 t+\varphi)} + R_s I_{sm} e^{j(\omega_0 t+\varphi)} +$$

$$+\frac{L_m}{L_r} j\omega_0 \psi_{rm} e^{j(\omega_0 t+\gamma)};$$

$$j\omega_0 \psi_{rm} e^{j(\omega_0 t+\gamma)} = \frac{1}{T_r}(L_m I_{sm} e^{j(\omega_0 t+\varphi)} -$$

$$-\psi_{rm} e^{j(\omega_0 t+\gamma)}) + j\omega_0 \psi_{rm} e^{j(\omega_0 t+\gamma)}.$$

Разделим ее почленно на $e^{j\omega_0 t}$ и из второго уравнения выразим

$$\psi_{rm} e^{j\gamma} = \frac{L_m I_{sm} e^{j\varphi}}{(1 + j\omega_s T_r)},$$

после чего получим выражение комплексной функции напряжения статора АД:

$$U_{sm} = Z I_{sm} e^{j\varphi} = Z(\cos\varphi + j\sin\varphi) I_{sm}, \qquad (8)$$

где

$$Z = (R_s R_r(1+\omega_s^2 T_r^2) + L_m^2 \omega_0 \omega_s \frac{1}{R_r(1+\omega_s^2 T_r^2)} +$$

$$+ j\omega_0 (L_{\sigma e} L_r (1+\omega_s^2 T_r^2) + L_m^2) \frac{1}{L_r(1+\omega_s^2 T_r^2)}$$

— полное сопротивление АД в комплексной форме.

Определим функции F_1 и F_2 для матрицы Якоби (7) путем разложения (8) на мнимую и вещественную составляющие и, учитывая, что система координат (1,2) ориентирована по вектору напряжения статора, найдем проекции:

на вещественную ось

$$F_1 = U_{sm} - \mathrm{Re} Z I_{sm}\cos\varphi - \mathrm{Im} Z I_{sm}\sin\varphi;$$

на мнимую ось

$$F_2 = \mathrm{Re} Z I_{sm}\sin\varphi + \mathrm{Im} Z I_{sm}\cos\varphi.$$

В результате получаем вектор-столбец F, имеющий тот же вид, что и при использовании первого способа определения якобиана.

Таким образом, для анализа корректности различных постановок задачи идентификации параметров асинхронного электропривода можно использовать как первый подход, так и второй, при этом уравнения для определения условий идентифицируемости параметров совпадают.

Основные результаты. Целью проведенного исследования было получение условий совместной идентифицируемости технически целесообразных пар параметров ЭП. Для бездатчикового асинхронного ЭП такими парами могут быть:

активное сопротивление обмотки статора и «электрическая» частота вращения ротора АД (R_s и ω_e);

эквивалентная индуктивность рассеяния и «электрическая» частота вращения ротора АД ($L_{\sigma e}$ и ω_e);

постоянная времени цепи ротора и «электрическая» частота вращения ротора АД (T_r и ω_e);

взаимная индуктивность и «электрическая» частота вращения ротора АД (L_m и ω_e), а для ЭП с датчиком частоты вращения или угла поворота ротора — L_m и T_r, используемые для косвенной автоматической ориентации вращающейся системы координат в направлении вектора потокосцеплений ротора посредством модели цепи ротора двигателя.

Проанализируем указанные выше технически целесообразные пары параметров. Первая пара R_s и ω_e — типичные идентифицируемые величины для бездатчикового ЭП.

Для получения определителя матрицы Якоби вычислим частные производные функций F_1 и F_2 от $\alpha_1=\omega_e$ и $\alpha_2=R_s$; в данном случае выражение (7) примет вид:

$$Y=\begin{bmatrix} U_{sm}T_r^2(-2\omega_s)-aI_{sm}\cos\varphi+bI_{sm}\sin\varphi & (1+\omega_s^2T_r^2)I_{sm}\cos\varphi \\ aI_{sm}\sin\varphi+bI_{sm}\cos\varphi & (1+\omega_s^2T_r^2)I_{sm}\sin\varphi \end{bmatrix},$$

где $a=R_sT_r^2(-2\omega_s)-\dfrac{L_m^2}{R_r}\omega_0$; $b=\omega_0L_{\sigma e}T_r^2(-2\omega_s)$.

Тогда определитель матрицы Якоби будет вычисляться по формуле:

$$\det Y=(U_{sm}T_r^2(-2\omega_s)-aI_{sm}\cos\varphi+bI_{sm}\sin\varphi)\times$$
$$\times(1+\omega_s^2T_r^2)I_{sm}\sin\varphi-(aI_{sm}\sin\varphi+bI_{sm}\cos\varphi)\times$$
$$\times(1+\omega_s^2T_r^2)I_{sm}\cos\varphi$$

или после несложных преобразований:

$$\det Y=2I_{sm}T_r^2(-\omega_s)(1+\omega_s^2T_r^2)\times$$
$$\times(\omega_0L_{\sigma e}I_{sm}-U_{sm}\sin\varphi).$$

Приравняв это выражение нулю, можно сделать вывод, что возможность совместной идентификации R_s и ω_e отсутствует в режиме идеального холостого хода ($\omega_s=0$), т.е. на синхронной скорости, и при выбеге ($I_{sm}=0$).

Для пары $L_{\sigma e}$ и ω_e матрица Якоби принимает вид:

$$Y=\begin{bmatrix} U_{sm}2T_r^2(-\omega_s)-aI_{sm}\cos\varphi+bI_{sm}\sin\varphi & (1+\omega_s^2T_r^2)\omega_0I_{sm}\cos\varphi \\ aI_{sm}\sin\varphi+bI_{sm}\cos\varphi & (1+\omega_s^2T_r^2)\omega_0I_{sm}\sin\varphi \end{bmatrix}.$$

Записав выражение для ее определителя, после преобразований окончательно получим:

$$\det Y=-(1+\omega_s^2T_r^2)\omega_0I_{sm}\omega_s\times$$
$$\times\left(2U_{sm}T_r^2-R_sT_r^2I_{sm}-\frac{L_m^2}{R_r}\frac{\omega_0}{\omega_s}I_{sm}\right).$$

Таким образом, эквивалентную индуктивность рассеяния и «электрическую» частоту вращения ротора можно совместно идентифицировать во всех режимах работы АД, кроме режимов холостого хода, выбега и динамического торможения ($\omega_0=0$).

Рассмотрим также возможность совместной идентификации частоты вращения и постоянной времени цепи ротора АД. Матрица Якоби, сформированная описанным выше способом, примет вид:

$$Y=\begin{bmatrix} U_{sm}2T_r^2(-\omega_s)-aI_{sm}\cos\varphi+bI_{sm}\sin\varphi & U_{sm}2T_r\omega_s^2-rI_{sm}\cos\varphi+mI_{sm}\sin\varphi \\ aI_{sm}\sin\varphi+bI_{sm}\cos\varphi & mI_{sm}\cos\varphi+rI_{sm}\sin\varphi \end{bmatrix},$$

где $r=R_s\omega_s^2 2T_r$; $m=\omega_0L_{\sigma e}2T_r\omega_s^2$.

Выразив ее определитель, после преобразований получим конечную формулу для якобиана:

$$\det Y=\frac{L_m^2}{R_r}\omega_s^2I_{sm}2T_r\omega_0\times$$
$$\times(U_{sm}T_r^2\omega_s\sin\varphi+I_{sm}\omega_0L_{\sigma e}).$$

Отсюда следует, что выбранные параметры невозможно идентифицировать в режимах динамического торможения ($\omega_0=0$), выбега и холостого хода ($\omega_s=0$), во всех остальных режимах идентификация возможна.

Последней парой анализа для бездатчикового ЭП являются L_m и ω_e. В этом случае

$$\det Y=I_{sm}2L_m\omega_0\omega_s\times$$
$$\times\left[-U_{sm}\frac{2T_r^2}{\omega_0}\left(\frac{\omega_0}{L_r}\cos\varphi+\frac{1}{R_r}\sin\varphi\right)+\right.$$
$$\left.+I_{sm}\left(\frac{R_s}{L_r}2T_r^2+\frac{L_m^2\omega_0}{R_rL_r\omega_s}-\frac{L_{\sigma e}}{R_r}2T_r^2\right)\right].$$

Условия идентифицируемости и этих параметров совпадают с предыдущими.

В заключение рассмотрим адаптивную систему с датчиком частоты вращения при косвенном способе автоматической ориентации по полю. Здесь целесообразно идентифицировать постоянную времени ротора и взаимную индуктивность двигателя (T_r и L_m). Окончательное выражение для якобиана:

$$\det Y=2T_r^2\omega_s^2I_{sm}\omega_0 2L_m\times$$
$$\times(U_{sm}(R_r\cos\varphi+L_r\omega_s\sin\varphi)-$$
$$-R_rL_rI_{sm}(L_r\omega_s\omega_0L_{\sigma e}-R_rR_s)).$$

Получен такой же результат, как и в предыдущих случаях.

Заключение. Предложенная методика анализа корректности постановки задач текущей идентификации неизмеряемых координат и изменяющихся параметров АД в системах частотно-регулируемого ЭП по основным рабочим гармоникам электрических переменных позволяет получить условия, при выполнении которых искомые величины могут быть определены однозначно. Это, отнюдь, не означает, что в «неблагоприятных» для решения задачи идентификации режимах работы ЭП (выбег, холостой ход, динамическое торможение) каждая конкретная параметрически адаптивная система регулирования окажется неработоспособной. Привод может продолжать функционировать в соответствии с предъявляемыми технологическим процессом требованиями, но вычисляемые алгоритмом идентификации значения изменяющихся параметров, а в бездатчиковых системах — и частоты вращения, могут быть далеки от истинных.

Как правило, в окрестности соответствующих квазиравновесных состояний ситуацию могут несколько улучшить возникающие автоколебательные режимы с небольшой амплитудой, которые подобно тестовым воздействиям при активной идентификации «обогащают» гармонический состав электрических переменных настолько, чтобы обеспечить как минимум устойчивость процесса адаптивного управления.

Режимы работы ЭП, в которых однозначное вычисление требуемых величин в процессе их текущей идентификации невозможно, а также близкие к ним с инженерной точки зрения, когда обусловленность системы уравнений (6) относительно искомых параметров недопустимо снижается, видимо, должны выделяться алгоритмом адаптивного управления электроприводом с целью перехода к другим законам управления, например при «замороженных» параметрах, значения которых были определены до вхождения системы в «неблагоприятную» область пространства состояний [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Панкратов В.В.** Тенденции развития общепромышленных электроприводов переменного тока на основе современных устройств силовой электроники. — Силовая интеллектуальная электроника. Специализированный информационно-аналитический журнал, 2005, № 2.

2. **Sensorless** Control of AC Motor Drives. Speed and Position Sensorless Operation/Ed. by K. Rajashekara, A. Kawamura, K. Matsuse. — IEEE Press, 1996.

3. **Панкратов В.В.** Векторное управление асинхронными электроприводами: Учебное пос. — Новосибирск: НГТУ, 1999.

4. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров/Под. ред. И.Г. Арамовича. — М.: Наука, 1984.

5. **Панкратов В.В., Маслов М.О.** Синтез и исследование алгоритма идентификации частоты вращения асинхронного электропривода. — Электричество, 2008, № 4.

[25.11.10]

*Авторы: **Кучер Екатерина Сергеевна** окончила магистратуру НГТУ по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии в 2008 г. Аспирантка кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).*

***Панкратов Владимир Вячеславович** окончил Новосибирский электротехнический институт по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок» в 1988 г. В 1997 г. защитил докторскую диссертацию «Методы синтеза систем автоматического управления электроприводами переменного тока, малочувствительных к изменениям параметров». Профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок НГТУ.*

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;

место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4—5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.