

Идентификация параметров асинхронной машины в установившихся режимах

Водовозов А.М., канд. техн. наук, Елюков А.С., студ.

Предлагается новый алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя, полученный на основе анализа математической модели машины при установившейся частоте вращения.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, параметрическая идентификация.

Parameters Identification of Asynchronous Machine in Established Modes

A.M. Vodovozov, Candidate of Engineering, A.S. Elyukov, Student

A New algorithm of electric parameters identification of asynchronous motor, received on the basis of the analysis of machine mathematical model is offered at the established frequency of rotation.

Keywords: asynchronous electric drive, parametrical identification.

Введение. Развитие высокотехнологичных отраслей производства немислимо без внедрения в производственный процесс прецизионных электроприводов и устройств повышенной точности. Продукция таких производств отличается высоким качеством, которое, в свою очередь, обеспечивается точностью работы конкретных устройств и механизмов. Электропривод, будучи одним из ключевых звеньев любого производственного комплекса, должен в первую очередь жестко соответствовать заранее определенным критериям качества.

Качественное управление электроприводом, как и любой нелинейной стохастической системой, базируется на полном знании фазового вектора его математической модели [1]. Частичная наблюдаемость большинства реальных систем не позволяет напрямую получать фазовый вектор, поэтому одной из основных задач, возлагаемых на систему управления, является задача его идентификации, которая решается за счет использования различного рода наблюдателей [2].

Однако поскольку наблюдатели строятся на базе математических моделей асинхронной машины с известными структурами, то по своей природе они обладают чувствительностью к параметрам системы: сопротивлениям и индуктивностям статора и ротора электромеханического преобразователя. Параметры двигателя определяются его паспортными данными, но в ходе работы могут меняться в широких диапазонах, приводя к значительным ошибкам при определении фазового вектора. Изменения параметров связаны в основном с тепловым эффектом тока. Особенно неустойчивыми являются сопротивления проводников обмоток как статора, так и ротора. Для идентификации параметров по результатам наблюдения или восстановления фазового вектора применяются так называемые идентификационные модели [3] или расширенные наблюдатели, в которых

наряду с элементами фазового вектора восстанавливаются и параметры самой системы.

Достаточно часто в технических задачах идентификации используются оптимальные наблюдатели, которые также называются фильтрами Калмана-Бьюси. Модификаций подобных фильтров достаточно много, и под конкретную систему всегда можно выбрать соответствующий фильтр [1]. Основная сложность при его практической реализации в задачах управления электроприводом обуславливается большим числом выходных параметров как электрической, так и механической природы. Однако в установившемся режиме, при постоянной частоте вращения ротора, система уравнений может быть упрощена и задачи идентификации электрических и механических параметров разделены.

Раздельная идентификация электрических и механических параметров. Математическая модель асинхронной машины обычно описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} u_s &= R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + L_m \frac{di_r}{dt}, \\ 0 &= R_r i_r + L_r \frac{di_r}{dt} + L_m \frac{di_s}{dt} - \\ &\quad - j\omega p_\tau L_m i_s - j\omega p_\tau L_r i_r, \\ J \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3}{2} p_\tau L_m \operatorname{Im}(i_s^* \cdot i_r) - M_c, \end{aligned} \quad (1)$$

где R_r , R_s – сопротивления ротора и статора; L_r , L_s , L_m – индуктивности ротора, статора и магнитная индуктивность; J – момент инерции; M_c – момент сопротивления; u_s – напряжение питания; i_s , i_r – ток статора и ток ротора; ω – частота вращения вала электрической машины; p_τ – число пар полюсов; j – мнимая единица.

В электроприводах с обратными связями только по току возникает проблема идентификации не только фиктивных токов ротора, но и вполне реальной частоты вращения вала, что затруднено из-за неизвестного момента сопротивления механизма M_c . Построение итеративных идентификаторов позволяет решить эту

проблему, но значительно увеличивает время расчета одного шага наблюдателя и ставит под сомнение целесообразность реализации его в «железе». Когда же дело доходит до претворения в жизнь математических идей средствами микропроцессорной техники, зачастую выясняется их невыполнимость. Этим часто объясняется и невысокое качество работы асинхронных электроприводов с векторным управлением без датчика скорости.

С другой стороны, при известной скорости в установившемся режиме третье уравнение системы (1) теряет свой смысл и электромагнитные параметры машины могут идентифицироваться по первым двум уравнениям. Для идентификации момента инерции можно рассматривать отдельно третье уравнение системы (1) в переходных режимах. Если учесть слабую зависимость индуктивностей от температуры, то можно пренебречь ее изменением в процессе работы и идентифицировать ее только один раз, в процессе настройки привода перед работой. Следует подчеркнуть, что речь идет только о зависимости индуктивностей от температуры, тогда как зависимость от тока может быть легко учтена по кривым намагничивания.

Идентификационная модель для определения электрических параметров. После очевидных преобразований первых двух уравнений (1), предполагая, что $\omega = \text{const}$, т. е. рассматривая установившийся режим, получим следующее уравнение:

$$0 = \frac{R_r}{L_m} \left(u_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt} \right) + \frac{L_r}{L_m} \left(\frac{du_s}{dt} - R_s \frac{di_s}{dt} - L_s \frac{d^2 i_s}{dt^2} \right) + L_m \frac{d^2 i_s}{dt^2} - j\omega p_\tau L_m \frac{di_s}{dt} - j\omega p_\tau \frac{L_r}{L_m} \left(u_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt} \right). \quad (2)$$

Выражение (2), однако, нельзя признать полноценной идентификационной моделью, так как оно содержит производные от токов статора. На практике это может привести к значительным ошибкам, так как сигналы с датчиков, как правило, сильно зашумлены. Для устранения подобных ошибок должны использоваться так называемые помехозащищенные алгоритмы [3].

Согласно [1], идентификационная модель (2) может быть приведена к виду

$$i_s = R_r f_1 + R_r R_s f_2 + R_s f_3 + f_4, \quad (3)$$

где

$$f_1 = \frac{u_{s2} - L_s i_{s1}}{L_r L_s - L_m^2}; \quad f_2 = \frac{i_{s2}}{L_r L_s - L_m^2};$$

$$f_3 = \frac{j\omega p_\tau L_r i_{s2} - L_r i_{s1}}{L_r L_s - L_m^2};$$

$$f_4 = \frac{1}{L_r L_s - L_m^2} \begin{pmatrix} L_r (u_{s1} + L_s (\alpha_1 i_{s1} + \alpha_2 i_{s2})) - \\ -L_m^2 (\alpha_1 i_{s1} + \alpha_2 i_{s2}) - \\ -j\omega p_\tau L_m^2 i_{s1} - \\ -j\omega p_\tau L_r (u_{s2} - L_s i_{s1}) \end{pmatrix};$$

$$u_{s1} = \frac{p u_s}{p^2 + \alpha_1 p + \alpha_2}; \quad u_{s2} = \frac{u_s}{p^2 + \alpha_1 p + \alpha_2},$$

$$i_{s1} = \frac{p i_s}{p^2 + \alpha_1 p + \alpha_2}; \quad i_{s2} = \frac{i_s}{p^2 + \alpha_1 p + \alpha_2};$$

p – оператор Лапласа; α_1, α_2 – параметры фильтра второго порядка, предназначенного для устранения шумов в сигналах токов и напряжений.

Параметры фильтра могут выбираться в зависимости от зашумленности сигналов датчиков. Общей теории их выбора не существует, известно лишь, что они все же влияют на сходимость алгоритма идентификации.

Модель (3) нелинейна относительно искомого параметров, поэтому для решения ее необходимо прибегнуть к численным алгоритмам. Существуют различные алгоритмы идентификации, например градиентный, наименьших квадратов, а также целый класс алгоритмов с потерей памяти [1]. Выбор алгоритма – задача практическая и зависит от конкретного устройства. Для большинства реальных систем не всегда актуально уточнять параметры на каждом шаге, достаточно усреднять их на некотором интервале.

Экспериментальная проверка работоспособности модели. Для проведения эксперимента использовался асинхронный двигатель марки 5АИ80В2У3 с системой сбора информации на базе персонального компьютера и быстродействующей платы аналогового ввода данных. Параметры двигателя: $R_r = 2,166$, $R_s = 3,421$ – сопротивления ротора и статора; $L_r = 406$ мГн, $L_s = 401$ мГн, $L_m = 394$ мГн – индуктивности ротора, статора и магнитная индуктивность. В ходе эксперимента проводился пуск двигателя от сети и исследования в установившемся режиме работы без нагрузки.

Полученные токи обрабатывались в соответствии с моделью (3), по которой был построен функционал невязки

$$\Omega(R_r, R_s) = \sum_{i=1}^n (R_r f_{1i} + R_r R_s f_{2i} + R_s f_{3i} + f_{4i})^2, \quad (4)$$

где n – число снятых точек.

Выражение (4) представляет собой функционал, определяющий метод наименьших квадратов, применение которого для реальных систем оправдано отсутствием данных о распределении шума возмущений, или хотя бы первых моментов шума наблюдения. Применение фильтров Калмана-Бьюси для подобных случаев приводит к погрешностям, возникающим из незнания корреляционных матриц внутрисистемных флуктуаций. В то же время метод наименьших квадратов является простым, устойчивым и достаточно точным методом идентификации. Аналитическое решение функционала (4) затруднено, так как он включает в себя нелинейную комбинацию искомого параметров и для численного решения выбран метод Ньютона.

На рис. 1 показаны полученные в ходе эксперимента, практически синусоидальные кривые трехфазного напряжения питания двигателя, а на рис. 2 – кривые тока в цепи статора.

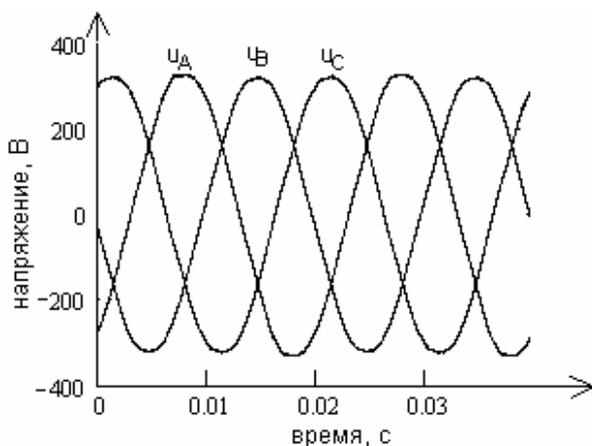


Рис. 1. Графики напряжения питания

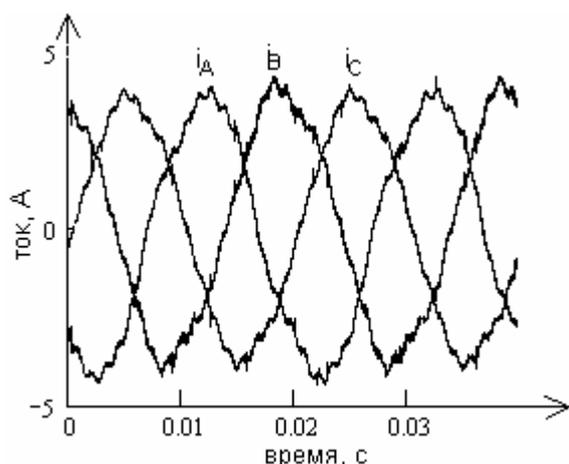


Рис. 2. Графики тока статора

Анализ графиков (рис. 2) показывает, что токи значительно зашумлены, что говорит о невозможности применения модели (2) непосредственно к снятым токам. После предварительной фильтрации токи очищаются от вредных быстро осциллирующих флуктуаций.

Алгоритм идентификации имеет следующий вид:

Водовозов Александр Михайлович,
Вологодский государственный технический университет,
кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Управляющие и вычислительные системы»,
телефон (8172) 72-14-11,
адрес: г. Вологда, ул. Ленина, д. 15,
e-mail: amv@vstu.edu.ru

Елюков Александр Сергеевич,
Вологодский государственный технический университет,
студент,
e-mail: aelyukov@yandex.ru

1. Регистрация значений напряжений и токов с соответствующих датчиков.

2. Преобразование токов и напряжений в двухфазную систему координат.

3. Предварительная фильтрация, реализация которой вполне возможна на аналоговой технике, что должно повысить быстродействие работы системы идентификации.

4. Вычисление вспомогательных функций f_1, f_2, f_3, f_4 .

5. Минимизация функционала (4).

Все расчеты проведены в среде MathCAD 11. В качестве начального приближения в при численном решении выбраны справочные значения. Идентифицированные параметры следующие: $R_r = 1,87$; $R_s = 3,42$. Относительная погрешность оценки сопротивления статора меньше 5 %, однако сопротивление ротора меньше справочного на 14 %.

Заключение

Получение модели в виде системы уравнений (3) позволяет проводить разделенную идентификацию электрических и механических параметров асинхронной машины. Полученное экспериментальное подтверждение позволяет применять вышеописанный алгоритм на практике. Результаты показывают, что предлагаемый алгоритм обладает требуемой робастностью к помехам и заведомой устойчивостью.

Список литературы

1. Воронов А.А. Теория автоматического управления. Т.2. – М.: Высш. шк., 1977.
2. Лебедев С.К., Коротков А.А. Алгоритмы синтеза наблюдателей нагрузки электропривода // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 3. – С. 5–8.
3. Водовозов А.М., Елюков А.С. Помехозащищенные алгоритмы параметрической идентификации электромеханических систем // Известия вузов. Приборостроение. – 2009. – Вып. 12. – С. 40–43.
4. Водовозов А.М., Елюков А.С. К вопросу об идентификации линейных динамических систем по результатам экспериментальных исследований // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – 2.2(32). – С. 253–256.
5. Каширских В.Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2005.