

В. Г. Макаров, В. В. Тамбов

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАБОТ ПО БЕЗДАТЧИКОВОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Ключевые слова: трехфазный асинхронный двигатель, обобщённая электрическая машина, идентификация параметров, бездатчиковое определение скорости.

Проводится анализ состояния работ в области идентификации параметров и переменных величин электропривода. Для идентификации параметров и бездатчикового определения скорости предлагается использовать функции чувствительности асинхронного электропривода к изменению параметров.

Keywords: three-phase asynchronous motor, generalized electric machine, identification of parameters, sensorless current speed detection.

The analysis of the state of work on the identification of parameters and variables of the electric drive is held. For the identification parameters and determine the speed without sensors is proposed use the of the sensitivity function the asynchronous electric drive to change of parameters.

Введение

Эффективность работы систем управления частотно-регулируемых электроприводов зависит от объема и точности информации о текущем состоянии привода, то есть о его параметрах и переменных величинах.

В большинстве случаев для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором доступны только паспортные данные. Значения параметров, указанные в каталогах являются расчетными и могут сильно отличаться от реальных значений параметров конкретного двигателя. В первую очередь это относится к сопротивлению обмотки ротора, так как технологический процесс его изготовления влияет на проводимость стержней обмотки ротора.

Кроме того, параметры асинхронного двигателя (активные сопротивления и индуктивности фаз обмоток статора и ротора, взаимная индуктивность, суммарный момент инерции подвижных частей, статический момент) в процессе работы не остаются равными расчётным значениям, они зависят от режима работы двигателя и его теплового состояния. Большая часть параметров и переменных состояния двигателей не доступна прямому измерению.

Поэтому в настоящее время актуальной является задача идентификации параметров и переменных величин асинхронного двигателя [1 - 4].

Теоретические положения

Известно значительное количество публикаций, предлагающих методы решения задач идентификации параметров и переменных величин двигателей, а также технических решений для их реализации.

Методы предварительной идентификации параметров, идентификации на основе методов оценивания, на основе поисковых методов и на основе искусственных нейронных цепей приведены в [5].

Идентификация асинхронного двигателя на основе методов оценивания его параметров и переменных состояния в реальном времени осуществляется при помощи таких математических методов

как расширенный фильтр Калмана и рекуррентный метод наименьших квадратов с использованием уравнений динамики обобщённой электрической машины. При этом информация о процессах в электродвигателе получается путём измерения текущих значений фазных токов и напряжений статора, а в установившемся режиме необходимо также измерение частоты вращения ротора.

Достоинствами приведённых методов являются относительно невысокие требования к вычислительным ресурсам и возможность нахождения оценок параметров и переменных состояния электродвигателя в реальном времени при минимальном наборе измерительной информации.

Однако при использовании рекуррентного метода наименьших квадратов необходимо описание объекта идентификации алгебраическими уравнениями, а расширенный фильтр Калмана, по сути, является градиентным методом и даёт строгое решение задачи оптимального оценивания только для линейных объектов, а в применении к нелинейным объектам, к которым относятся асинхронные двигатели, в процессе оценивания возможно не только попадание в локальный экстремум, но и возникновение неустойчивого процесса оценивания.

В [6] предложено устройство оценивания параметров электродвигателя постоянного тока. Идентификация параметров осуществляется с помощью непрерывного градиентного метода поиска минимума определённо положительной функции от невязок уравнений двигателя. Устройство содержит датчик напряжения, датчик тока, датчик производной от тока, датчик угловой скорости, датчик углового ускорения и позволяет оценивать активное сопротивление обмотки якоря, индуктивность обмотки якоря, момент инерции и статический момент нагрузки.

В [7] представлено устройство оценивания параметров асинхронного двигателя. Реализован аналоговый метод идентификации. Устройство позволяет оценивать активные сопротивления фаз статора и ротора, индуктивности фаз статора и ротора, взаимную индуктивность, момент инерции, статический момент, а также токи ротора.

В настоящее время большое внимание уделяется бездатчиковым электроприводам. Особое значение подобные электроприводы имеют в установках, работающих в пожароопасных, взрывоопасных, химических и радиоактивных средах, в условиях повышенных вибраций и ударных механических нагрузок. В таких электроприводах, в основном, применяются двигатели без датчиков механических переменных.

В рамках указанного направления развития электропривода ведутся исследования и разрабатываются методы бездатчикового измерения скорости, позволяющие осуществлять оценку скорости косвенным путем через доступные измерению электрические переменные. Такими величинами являются, в первую очередь, напряжения и токи фаз обмотки статора. При таком подходе функции вращающегося датчика передаются электронной части системы. Это ведет к ее усложнению, однако выполнение системы управления на микропроцессорной основе не приводит к существенному удорожанию привода. Следует отметить, что при этом отпадает необходимость в проводах, соединяющих датчик скорости с системой управления, которая может находиться на значительном расстоянии от двигателя и датчика.

Бездатчиковые алгоритмы векторного управления используются в электроприводах, которые не требуют предельного быстродействия, работают преимущественно в установившемся режиме и не обладают широкими диапазонами регулирования скорости (до 1:100).

Таким образом, возникает необходимость идентификации параметров и переменных величин асинхронного электродвигателя на основании информации о токах и напряжениях фаз обмотки статора без использования датчиков механических переменных.

Бездатчиковое определение скорости может выполняться с использованием различных методов, сложность которых в значительной степени определяется требуемым диапазоном регулирования привода и требованиями к точности измерения скорости [8]. В [9] приведена классификация, в соответствии с которой методы определения скорости асинхронного двигателя подразделяются на пять групп.

К первой группе относятся неадаптивные методы, в которых скорость определяется непосредственно через измеряемые напряжение и ток статора, и методы, основанные на определении скорости через рассчитываемые в схеме частоты напряжения питания и роторной ЭДС. Вторую группу составляют адаптивные методы. Они ориентированы на замкнутые системы регулирования электропривода, в которых адаптация применена для повышения точности измерительной системы. В третью группу входят методы, основанные на конструктивных особенностях двигателя и использующие, например, информацию, которую несет в себе кривая намагничивания машины. Четвертая группа – это нелинейные методы, базирующиеся на теории нейронных цепей, а последняя, пятая, группа – группа методов, использующих для повышения точности дополни-

тельные высокочастотные сигналы или другую дополнительную информацию.

В основу принципа построения схем бездатчикового определения скорости положено векторное математическое описание асинхронного двигателя в неподвижной системе координат. Скорость может рассчитываться через величины, записанные во вращающейся системе координат, в неподвижной системе координат, в неподвижной и во вращающейся системах координат.

В [10] рассматривается способ оптимальной оценки частоты вращения асинхронного двигателя и система для его реализации.

Оценка частоты вращения осуществляется на основании измеряемых текущих значений напряжений и токов статора двигателя, производится прямое и косвенное вычисления значений реактивной мощности, пропорционально-интегральное преобразование на основе минимизации критерия качества, определяемого по сохраненным ранее двум предыдущим значениям оценки частоты вращения и разности значений прямого и косвенного вычислений реактивной мощности.

В [11] предложен способ определения оценки частоты вращения асинхронного двигателя.

Оценка частоты вращения осуществляется на основании измеряемых мгновенных величин токов и напряжений статора асинхронного двигателя с помощью предварительно обученной искусственной нейронной сети.

Анализ данных, предоставляемых производителями преобразователей частоты, показывает, что бездатчиковые электроприводы производятся серийно многими фирмами [12 - 14].

Шведско-швейцарской компанией ABB производятся преобразователи частоты ACS350 с бездатчиковым векторным управлением, ACS1000 с непосредственным управлением моментом (DTC) которые гарантируют самую высокую точность контроля без применения датчиков скорости, несмотря на колебания входного напряжения и случайные перегрузки.

Преобразователи частоты компании Control Technics (Великобритания) серии Commander SK предназначены для управления асинхронными двигателями без датчика обратной связи.

Преобразователи частоты Siemens Micromaster 440 с бездатчиковым способом векторного регулирования (Vector Control Sensorless) применяются для процессов с высокой динамикой и повышенными требованиями к стартовому моменту и перегрузке.

Компания Mitsubishi Electric выпускает преобразователи частоты серии FR-A740 с системой бездатчикового векторного регулирования (Real Sensorless Vector Control), преобразователи FR-D700 с коррекцией изменяющихся в процессе работы параметров.

Бездатчиковые асинхронные электроприводы серии ЭПВ с адаптивно-векторной системой управления разработаны НТЦ Электропривода «Вектор» Ивановского государственного энергети-

ческого университета и выпускаются ООО «ЭЛ-ПРИ» Чебоксарского электроаппаратного завода.

Задачу бездатчикового определения скорости целесообразно решать параллельно с задачей идентификации параметров асинхронного двигателя. Одним из способов решения этих задач является применение функций чувствительности асинхронного двигателя к изменению параметров.

Зависимость характеристик системы от изменения каких-либо ее параметров оценивают чувствительностью [15-17].

Под чувствительностью понимают свойство системы изменять режим работы вследствие отклонения каких-либо параметров от номинальных значений. Для числовой оценки чувствительности используют функции чувствительности, определяемые как частные производные от координат системы или показателей качества процессов управления по вариациям параметров:

$$u_{ij} = (\partial x_i / \partial \alpha_j)^0,$$

где x_i – координаты системы, α_j – параметр системы.

Индекс 0 означает, что функция u_{ij} вычисляется при номинальных значениях параметров.

При идентификации параметров асинхронного двигателя целесообразно использовать математическое описание обобщенной электрической машины в осях d, q :

$$\begin{cases} u_{1d} = R_1 i_{1d} + L_1 \frac{di_{1d}}{dt} + M_m \frac{di_{2d}}{dt} - \omega_1 (L_1 i_{1q} + M_m i_{2q}); \\ u_{1q} = R_1 i_{1q} + L_1 \frac{di_{1q}}{dt} + M_m \frac{di_{2q}}{dt} + \omega_1 (L_1 i_{1d} + M_m i_{2d}); \\ 0 = R_2 i_{2d} + L_2 \frac{di_{2d}}{dt} + M_m \frac{di_{1d}}{dt} - \omega_2 (L_2 i_{2q} + M_m i_{1q}); \\ 0 = R_2 i_{2q} + L_2 \frac{di_{2q}}{dt} + M_m \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_2 (L_2 i_{2d} + M_m i_{1d}); \\ J_z \frac{d\omega}{dt} = p_n (p_n M_m (i_{1q} i_{2d} - i_{1d} i_{2q}) - M_c) \end{cases}$$

где u_{1d}, u_{1q} – фазные напряжения обмотки статора; i_{1d}, i_{1q} – фазные токи обмотки статора; R_1, R_2 – активные сопротивления фаз обмотки статора и ротора; L_1, L_2 – индуктивности фаз обмотки статора и ротора; M_m – взаимная индуктивность; ω_1 – угловая скорость системы координат d, q , эл. рад/с; ω_2 – угловая скорость скольжения; J_z – суммарный момент инерции подвижных частей; p_n – число пар полюсов; M_c – статический момент.

Генерирование функций чувствительности можно осуществить путём решения системы дифференциальных уравнений относительно вариаций всех переменных величин, получаемых за счёт изменения одного из параметров.

Например, функции чувствительности по активному сопротивлению R_1 могут быть получены с помощью следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} R_1 i_{1d} + L_1 \frac{di_{1d}}{dt} + M_m \frac{di_{2d}}{dt} - \omega_1 (L_1 i_{1q} + M_m i_{2q}) = \\ = F_1 = -i_{1d}; \\ R_1 i_{1q} + L_1 \frac{di_{1q}}{dt} + M_m \frac{di_{2q}}{dt} + \omega_1 (L_1 i_{1d} + M_m i_{2d}) = \\ = F_2 = -i_{1q}; \\ R_2 i_{2d} + L_2 \frac{di_{2d}}{dt} + M_m \frac{di_{1d}}{dt} - \omega_2 (L_2 i_{2q} + M_m i_{1q}) + \\ + \omega_1 (L_1 i_{1q} + M_m i_{2q}) = F_3 = 0; \\ R_2 i_{2q} + L_2 \frac{di_{2q}}{dt} + M_m \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_2 (L_2 i_{2d} + M_m i_{1d}) - \\ - \omega_1 (L_1 i_{1d} + M_m i_{2d}) = F_4 = 0; \\ J_z \frac{d\omega}{dt} + p_n (p_n M_m (i_{1q} i_{2d} - i_{1d} i_{2q}) - M_c) = \\ = F_5 = 0, \end{cases}$$

где $i_{1d}, i_{1q}, i_{2d}, i_{2q}, \omega_1, \omega_2$ – малые приращения, полученные соответствующими переменными величинами из-за вариации параметра.

Запишем функции чувствительности тока i_{1d} по параметрам асинхронного электродвигателя:

$$\begin{aligned} S(i_{1d}, R_1) &= \frac{\partial i_{1d}}{\partial R_1}; \quad S(i_{1d}, R_2) = \frac{\partial i_{1d}}{\partial R_2}; \quad S(i_{1d}, L) = \frac{\partial i_{1d}}{\partial L}; \\ S(i_{1d}, M_m) &= \frac{\partial i_{1d}}{\partial M_m}; \quad S(i_{1d}, M_c) = \frac{\partial i_{1d}}{\partial M_c}. \end{aligned}$$

Составим систему дифференциальных уравнений относительно оценок параметров:

$$\begin{aligned} \frac{dR_1}{dt} &= -\mu_{R_1} [S(i_{1d}, R_1) \Delta i_{1d} + S(i_{1d}, R_1) \Delta i_{1q}], \\ \frac{dR_2}{dt} &= -\mu_{R_2} [S(i_{1d}, R_2) \Delta i_{1d} + S(i_{1d}, R_2) \Delta i_{1q}], \\ \frac{dL}{dt} &= \frac{dL_1}{dt} = \frac{dL_2}{dt} = -\mu_L [S(i_{1d}, L) \Delta i_{1d} + S(i_{1d}, L) \Delta i_{1q}], \\ \frac{dM_m}{dt} &= -\mu_{M_m} [S(i_{1d}, M_m) \Delta i_{1d} + S(i_{1d}, M_m) \Delta i_{1q}], \\ \frac{dM_c}{dt} &= -\mu_{M_c} [S(i_{1d}, M_c) \Delta i_{1d} + S(i_{1d}, M_c) \Delta i_{1q}], \end{aligned}$$

где $\mu_{R_1}, \mu_{R_2}, \mu_L, \mu_{M_m}, \mu_{M_c}$ – положительные коэффициенты, определяющие скорости изменения оценок параметров; $\Delta i_{1d}, \Delta i_{1q}$ – погрешности по токам статора.

Применение предлагаемого метода позволит обеспечить более высокую помехозащищённость, снизить массу и габариты, а также расширить область применения асинхронного электропривода за счёт отсутствия датчиков механических переменных.

Выводы

1. Проведённый анализ научно-технической литературы показывает целесообразность разработки алгоритмов бездатчикового определения скорости в электроприводах с различными типами двигателей.

2. В связи с широким применением частотно-регулируемых электроприводов с асинхронными двигателями актуальной является задача бездатчикового определения скорости, которую целесообразно решать параллельно с задачей идентификации параметров асинхронного электродвигателя.

3. Идентификация параметров и процессов асинхронного электропривода может быть успешно осуществлена с помощью непрерывного градиентного метода поиска минимума определённой положительной функции от невязок уравнений электропривода.

4. Предлагается для идентификации параметров и бездатчикового определения скорости использовать функции чувствительности асинхронного электропривода к изменению параметров.

Литература

1. Ю. А. Яковлев, *Вестник Казанского технологического университета*, 9, 418-425 (2010).
2. Ю. А. Яковлев, *Вестник Казанского технологического университета*, 14, 1, 134-144 (2011).
3. В. Г. Макаров, *Вестник Казанского технологического университета*, 14, 6, 79-93 (2011).
4. В. Г. Макаров, *Вестник Казанского технологического университета*, 14, 6, 109-120 (2011).
5. В. Г. Каширских, *Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей*. ГУ КузГТУ, Кемерово, 2005. 139 с.
6. Пат. РФ 2366070 (2008).
7. Пат. РФ 2426219 (2010).
8. Г. Г. Соколовский, *Электроприводы переменного тока с частотным регулированием*. Изд. центр «Академия», Москва, 2006. 265 с.
9. Schröder P. *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*. Springer, Berlin, 2001, S. 1172.
10. Пат. РФ 2385529 (2008).
11. Пат. РФ 2476983 (2011).
12. Преобразователи частоты (<http://chastotnik.com/>).
13. Преобразователи частоты Mitsubishi FR-A740 (<http://amkt.ru/chastotnyie-preobrazovateli/chastotnyie-preobrazovateli-mitsubishi/preobrazovateli-chastoty-mitsubishi-fr-a740/>).
14. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ (<http://www.vectorgroup.ru/articles/article12>).
15. А. В. Башарин, Ю. В. Постников, *Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ*. Энергоатомиздат, Ленинград, 1990. 512 с.
16. Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов, *Чувствительность систем управления*. Наука, главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1981. 464 с.
17. А. Ю. Афанасьев, *Моментный электропривод*. КГТУ им. А. Н. Туполева, Казань, 1997. 250 с.

© В. Г. Макаров – д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой электропривода и электротехники КНИТУ, electroprivod@list.ru;
В. В. Тамбов – магистрант той же кафедры, 112108@rambler.ru.