

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.313.33:62-83

В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский

ЭТАП ПОДГОТОВКИ К ДИНАМИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (АД) на основе предложенного нами поискового метода оценивания [1], заключающаяся в определении параметров и переменных состояния электродвигателя в процессе его эксплуатации, предполагает наличие исходных данных: значения активного сопротивления статора, индуктивности цепи намагничивания, формы истинной кривой намагничивания магнитопровода и момента инерции ротора.

Эти данные определяются на этапе предварительной идентификации на основе информации, полученной при пуске АД «вхолостую», в режиме холостого хода, а также при его работе в статическом режиме.

Активное сопротивление обмотки статора доступно для прямого измерения и определяется в процессе приемо-сдаточных испытаний электродвигателя, однако это значение может отсутствовать в паспортных данных, а измерение его известными способами в производственных условиях, например в подземных выработках угольных шахт, является недопустимым.

Кроме того, величина активного сопротивления статора изменяется в процессе работы электродвигателя и зависит от его теплового состояния, режима работы и может изменяться на 20-30 %, поэтому для построения современной системы управления электроприводом необходимо знать не только

значение сопротивления вnominalном режиме, но и определять его текущее значение.

Однако достоверное оценивание величины активного сопротивления статора в реальном времени в процессе работы электродвигателя является затруднительным. Для подтверждения этого рассмотрим модель АД, которая для установившегося режима работы может быть представлена общепринятой Т-образной схемой замещения (рис. 1).

Из этой схемы следует, что определение величины активного сопротивления статора на основе измеренных значений фазных токов и напряжений при работе АД в установившемся режиме возможно лишь при знании значений активного сопротивления ротора R_2 , индуктивных сопротивлений ротора и цепи намагничивания, а также скольжения S . Это вызвано тем, что в соответствии с формулой

$$Z = R_1 + jX_1 + \frac{jX_m \cdot \left(\frac{R_2}{S} + jX_2 \right)}{\frac{R_2}{S} + j(X_m + X_2)},$$

полное комплексное сопротивление обмотки статора Z зависит от индуктивного сопротивления и величины $R_1 R_2$, которая, в свою очередь, зависит также и от перечисленных выше величин. Здесь X_1 , X_2 , X_m – соответственно индуктивные

сопротивления статора, ротора и цепи намагничивания.

Для решения задачи идентификации параметров и переменных состояния АД в реальном времени в различных режимах работы АД в системе должен присутствовать канал прямого или косвенного определения величины активного сопротивления статора. Знание значения этого параметра позволит при измеренных фазных токах и напряжениях определить, например, потокосцепление статора и электромагнитный момент АД.

Нами разработан способ определения значения активного сопротивления статора R_1 на основе введения постоянных составляющих в фазные напряжения с последующей обработкой данных, полученных измерительной системой, используемой также и при динамической идентификации АД.

Одним из наиболее простых из известных способов определения величины активного сопротивления статора при работе АД является способ с введением постоянной составляющей в фазные напряжения. В этом случае по обмоткам одновременно с переменным током протекает измерительный по-

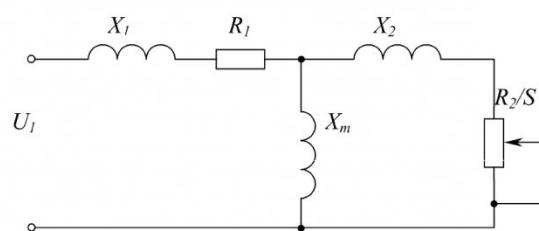


Рис. 1. Схема замещения АД

стационарный ток гораздо меньшей величины (порядка 2-5% от номинального), чтобы не вызвать повышения температуры обмотки и насыщения магнитопровода АД.

Данный способ сравнительно легко реализуется при работе АД в составе регулируемого электропривода, но требует изменения системы управления. В некоторых случаях это может оказаться нецелесообразным, либо невозможным, и тогда требуется изменение силовой схемы питания АД. Современная элементная база позволяет реализовать данный способ гораздо проще, чем это описано в ряде источников, например в [2], и не требует специальных блоков питания постоянным током и блоков компенсации напряжения переменного тока.

Наиболее предпочтительным является применение схемы, представленной на рис. 2. Величина добавочного сопротивления R выбирается такой, чтобы падение напряжения на нем было достаточным для отпирания диода VD , но не вносило бы значительной несимметрии в питающие напряжения.

Математическая обработка данных, полученных с помощью измерительной системы, в этом случае сводится к вычислению постоянных составляющих за несколько периодов сетевого напряжения в фазных токах и напряжениях и дальнейшему расчету сопротивления одной фазы обмотки статора в соответствии с выражением:

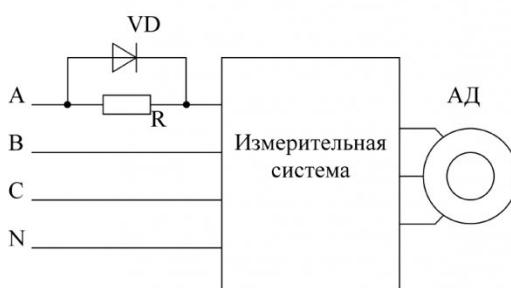


Рис. 2. Схема подключения АД и измерительной системы

Таблица
Результаты определения сопротивления статора

Двигатель	R_1 , Ом определенное	R_1 , Ом измеренное	Погрешность, %
4AMX90L2У3	1,751	1,725	1,5
4AM80A4СУ1	7,48	7,5	0,26

$$R_1 = \frac{(U_{AP} - U_{BP}) + (U_{AP} - U_{CP})}{2I_{AP}}$$

где U_{AP} , U_{BP} , U_{CP} , I_{AP} – постоянные составляющие фазных напряжений и токов.

Результаты определения активного сопротивления статора для двух электродвигателей представлены в таблице.

При работе АД в динамическом режиме для вычисления постоянных составляющих требуется применение цифрового фильтра низких частот (ФНЧ) с малым значением коэффициента передачи в диапазоне рабочих частот, т.е. с большим наклоном ЛАЧХ. Это может быть, например, фильтр с конечной импульсной характеристикой [3]. С другой стороны, поскольку активное сопротивление статора меняется во времени очень медленно, то от фильтра не требуется малое время установления, и ФНЧ с требуемыми свойствами может быть реализован гораздо проще – путем последовательного соединения апериодических звеньев. Под временем установления фильтра подразумевается время, необходимое для получения на выходе фильтра величины, соответствующей постоянной составляющей входного сигнала. Практическая проверка показала, что хорошие результаты дает применение апериодического звена четвертого порядка. Передаточная функция этого звена имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{1}{(T \cdot p + 1)^4},$$

$$R_1 = \frac{\frac{\int_{t_1}^{t_2} u_{l\alpha}(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} u_{l\alpha}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} i_{l\alpha}(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} i_{l\alpha}(t) dt}}{180^\circ},$$

где t_1 , t_2 – сдвинутые на угол 180° моменты времени после выхода АД на статический режим, который определяется при анализе модуля вектора тока статора.

При известной величине R_1 потокосцепление статора может

чении постоянной времени $T = 0,067$ с коэффициент передачи на частоте 50 Гц составляет $5,17 \cdot 10^6$, а коэффициент передачи постоянной составляющей равен 1. При упрощении фильтра до апериодического звена первого порядка передаточная функция приобретает вид:

$$W(p) \approx \frac{1}{4T \cdot p + 1}.$$

Время установления соответствует времени переходного процесса звена при реакции на ступенчатое воздействие и будет равным трем постоянным времени, т.е. $12T$. При $T = 0,067$ с время установления составляет 0,8 с, что вполне приемлемо для определения величины активного сопротивления статора с учетом возможной скорости его изменения при изменении температуры в процессе работы АД.

Нами разработан также другой способ определения величины R_1 [4] – по результатам опыта пуска на основе предположения, что в установившемся режиме работы АД постоянная составляющая потокосцепления статора отсутствует. Основой вычислительного процесса для определения величины R_1 в этом случае является выражение:

$$R_1 = \frac{\frac{\int_{t_1}^{t_2} u_{l\alpha}(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} u_{l\alpha}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} i_{l\alpha}(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} i_{l\alpha}(t) dt}}{180^\circ},$$

Наклон ЛАЧХ такого фильтра составляет -80дб/дек . При зна-

быть вычислено по формуле:

$$\Psi_I(t) = \int_0^t U_I dt - \int_0^t I_I R_I dt.$$

Вместо интегрирования, которое может дать большую погрешность из-за шумов в измерительной системе, используется демпфирование на основе выражения:

$$W(p) = \frac{1}{p + \omega_c} \cdot \frac{\sqrt{\omega^2 + \omega_c^2}}{\omega} e^{-p(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\omega}{\omega_c}) \frac{1}{\omega}},$$

где ω_c – частота сопряжения ($\omega_c \approx 5$ рад/с).

Для уменьшения погрешностей, возникающих в динамических режимах работы АД из-за этой замены, и уточнения расчетов была использована искусственная нейронная сеть (ИНС), предварительно обученная на математической модели АД.

Для определения индуктивности цепи намагничивания, представленной в виде отношения основного потокосцепления АД к току намагничивания, используется способ, основанный на результатах опыта холостого хода с использованием значе-

ний параметров статора.

Реактивная составляющая I_{IP} тока намагничивания определяется из анализа векторной диаграммы АД в режиме холостого хода и использования теории обобщенной электрической машины [5] с переходом от неподвижных осей α, β к врашающимся – u, v и последующим совмещением оси u с вектором потокосцепления статора Ψ_I . Для использования рекуррентного метода наименьших квадратов (РМНК) зависимость

$$L_m = \frac{\Psi_I}{I_{IP}} - L_{I\sigma} \quad \text{приводится}$$

к стандартному виду [6]: $Y = Z\beta + V$, где $Z = 1$; $\beta = L_m$. Здесь $L_{I\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора.

Для определения формы кривой намагничивания АД используется метод, основанный на сопоставлении во времени графиков тока и потокосцепления статора в режиме холостого хода [7]. При этом потокосцепление статора может быть вычислено рассмотренным выше способом или оценено в процессе динамической идентификации

параметров и состояния АД. Для исключения погрешностей, вызванных потерями в АД, максимумы значений тока и потокосцепления статора совмещаются во времени. Значения тока и потокосцепления табулируются по времени в течение одного периода с получением массива данных, который может быть представлен в виде таблицы или графика кривой намагничивания АД.

Определение момента инерции ротора осуществляется также на этапе предварительной идентификации способом, изложенным в [8].

Все разработанные способы предварительной идентификации прошли практическую проверку с получением приемлемых результатов. Они позволяют уменьшить размерность вектора параметров и состояния АД и повысить тем самым устойчивость процессов оценивания и точность получаемых в результате динамической идентификации оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каширских В.Г. Динамическая идентификация параметров и состояния асинхронного электродвигателя на основе поисковых методов / В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы Международ. науч.-техн. конф. (20-22 октября 2005 г.). – Томск, ТПУ, 2005. – С. 225-228.
2. Коварский Е.М. Испытание электрических машин / Е.М. Коварский, Ю.И. Янко – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320с.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 608 с.
4. Каширских В.Г. Определение активного сопротивления обмотки статора асинхронного двигателя по опыту пуска / В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский // Вестн. КузГТУ, 2004. – № 6.2. – С. 64-65.
5. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
6. Эйхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 687 с.
7. Каширских В.Г. Определение кривой намагничивания магнитопровода асинхронного электродвигателя по результатам испытания на холостом ходе / В.Г. Каширских, В.М. Завьялов, Д.В. Соколов // Вестн. КузГТУ, 2002. – №2. – С. 14-16.
8. Алешин Д.А. Разработка высокопроизводительного комплекса оценки качества асинхронных электродвигателей: Дис... канд. техн. наук: 05.09.03 / Кузбасс. гос. техн.ун-т. – Кемерово, 1997. – 140 с.

□ Авторы статьи:

Каширских
Вениамин Георгиевич
- канд. техн. наук, доц., зав. каф.
электропривода и автоматизации

Нестеровский
Александр Владимирович
- канд. техн. наук, ст. преп. каф.
электропривода и автоматизации