

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.313.33:62-83

В.Г. Каширских

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ИХ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Эффективность работы угледобывающих предприятий в значительной степени определяется надежностью основного технологического оборудования, производящего разрушение и транспортирование угля и горной породы. Для шахт – это очистные и проходческие комбайны, скребковые и ленточные конвейеры, в которых в основном применяется нерегулируемый асинхронный электропривод.

Обеспечение высокой эксплуатационной надежности электроприводов горных машин (ЭПГМ) является трудной задачей в связи с особыми условиями работы в подземных выработках шахт, специфики технологического процесса и случайного характера резкопеременных нагрузок с большим разнообразием режимов работы, сопровождающихся повышенными вибрационной и ударной нагрузками во всех элементах ЭПГМ.

Эксплуатационная надежность ЭПГМ является системным понятием, так как она определяется уровнем надежности при проектировании и изготовлении, условиями эксплуатации и качеством обслуживания. В подавляющем большинстве случаев эксплуатационная надежность отечественных ЭПГМ значительно ниже проектной, что, в основном, обусловлено несоответствием условий эксплуатации и обслуживания требуемым в нормативно-технических документах (НТД) условиям. В результате это ведет к ускоренному исчерпанию ресурса оборудования, поломкам, авариям и большому экономическому ущербу.

Основой технического обслуживания и ремонтов (ТОР) ЭПГМ в настоящее время является система планово-предупредительных ремонтов (ППР), которая устанавливает содержание, объем и периодичность проведения ТОР в соответствии с НТД. Эта система является дорогостоящей и недостаточно эффективной, поэтому необходим переход от нее к более совершенной системе – обслуживанию оборудования по его фактическому состоянию на основе периодического или постоянно действующего функционального диагностирования. Такой переход является очевидным, однако он требует применения достоверной и надежной системы технического диагностирования, позволяющей в процессе работы оборудования обна-

руживать на этапе зарождения возникающие неисправности и заранее принимать необходимые меры по их устранению. При этом исключается необходимость в частичной или полной разборке оборудования для определения его технического состояния.

Известные методы функционального диагностирования, основанные на спектральном анализе токов и напряжений статора, вибраакустических и электромагнитных полей АД требуют применения специальной дорогостоящей аппаратуры, поэтому их использование для оперативного контроля состояния АД, работающих в подземных условиях угольных шахт в составе ЭПГМ, крайне ограничено.

Для функционального диагностирования асинхронных электродвигателей горных машин нами предлагается использовать информацию, которая может быть получена при мониторинге параметров и состояния АД, основанном на его динамической идентификации [1-3 и др.].

Асинхронный электродвигатель при этом представляется в виде компьютерного аналога на основе математической модели АД, позволяющего анализировать процессы, происходящие в двигателе. Для работы моделирующей системы используются измеряемые в процессе работы токи и напряжения статора АД, а также частота вращения ротора в случае использования статического режима.

Для динамической идентификации АД мы использовали модель в виде обобщенной электрической машины [4], уравнения которой в комплексной форме имеют следующий вид:

$$U_1 = I_1 R_1 + \dot{\Psi}_1 + j \cdot \omega_k \Psi_1 ;$$

$$U_2 = I_2 R_2 + \dot{\Psi}_2 + j(\omega_k - p\omega_r) \Psi_2 ;$$

$$M = \frac{3}{2} p \cdot \operatorname{Im}(\Psi_1^* I_1); \quad \dot{\omega}_r = \frac{1}{J} (M \pm M_c);$$

$$\Psi_1 = I_1 L_1 + L_2 L_m; \quad \Psi_2 = I_1 L_m + L_2 L_2 ;$$

$$L_1 = I_m + L_{\sigma 1} ; \quad L_2 = I_m + L_{\sigma 2} ,$$

где $U_1, U_2, I_1, I_2, \Psi_1, \Psi_2$ – соответственно векторы напряжений, токов и потокосцеплений обмоток статора и ротора; ω_k, ω_r – угловые частоты вращения координатных осей и ротора; R_1, R_2, L_1, L_2 –

активные сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора; L_m – индуктивность цепи намагничивания; $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; M – электромагнитный момент; M_c – момент сопротивления на валу; J – момент инерции ротора; p – число пар полюсов.

Здесь индекс 1 соответствует принадлежности параметра или переменной к статору, а индекс 2 – к ротору. Индекс (*) показывает, что вектор является сопряженным. Принятые в модели допущения соответствуют стандартным допущениям обобщенной электрической машины. Адекватность такой модели для решения большинства практических задач подтверждается многими исследователями.

Динамическая идентификация АД производится в процессе функционирования путем определения его параметров (R_1 , R_2 , L_1 , L_2 , L_m , $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$) и состояния (Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_m , M_c , ω_r) на основе методов оценивания – метода наименьших квадратов и расширенного фильтра Калмана. Исходными данными при этом являются параметры цепи намагничивания магнитопровода и момент инерции ротора, определяемые по результатам предварительной идентификации на основе испытания АД на холостом ходе. Использовалась также идентификация АД на основе искусственных нейронных сетей и другие методы.

Математическая модель состояния АД с использованием координатных осей α , β при динамической нагрузке имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} x_{(k+1)} &= f(x_{(k)}, u_{(k)}, a_{(k)}, v_{(k)}, k); \\ x &= [\Psi_{2\alpha} \Psi_{2\beta} \omega_r R_1 R_2 M_c]^T; \\ f(x, u, a, v, k) &= [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6]^T = \\ &= \left[\begin{array}{l} \Psi_{2\alpha} + \left(-\frac{R_2}{L_2} \Psi_{2\alpha} - p\omega_r \Psi_{2\beta} + \frac{R_2 L_m}{L_2} i_{1\alpha} \right) T_k \\ \Psi_{2\beta} + \left(-\frac{R_2}{L_2} \Psi_{2\beta} - p\omega_r \Psi_{2\alpha} + \frac{R_2 L_m}{L_2} i_{1\beta} \right) T_k \\ \omega_r + \frac{1}{J} \left(\frac{3L_m}{2L_2} p(\Psi_{2\alpha} i_{1\beta} - \Psi_{2\beta} i_{1\alpha}) - M_c \right) T_k \\ R_1 \\ R_2 \\ M_c \end{array} \right] \end{aligned}$$

где x – вектор состояния системы; u – вектор наблюдаемого входного сигнала; a – вектор параметров объекта; v – вектор входного неизмеряемого шума; $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ – компоненты вектора тока статора; $\Psi_{2\alpha}$, $\Psi_{2\beta}$ – компоненты вектора потокосцепления ротора; T_k – период квантования; $k = 0, 1, 2 \dots$

Полученные выражения описывают состояние ротора, вектор которого включает в себя потокосцепление и частоту вращения ротора, а также расширен параметрами – активными сопротивлениями статора и ротора и внешним воздействием

M_c . Математическая модель состояния АД представлена в виде, необходимом для использования расширенного фильтра Калмана.

Соответствующая ей математическая модель цепи измерения также после преобразований в окончательном виде может быть записана так:

$$\begin{aligned} y_{(k)} &= g(x_{(k)}, u_{(k)}, a_{(k)}, n_{(k)}, k); \quad y = [u_{1\alpha} \ u_{1\beta}]^T; \\ g(x, u, a, n, k) &= \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \\ &= \left[\begin{array}{l} -\frac{R_2 L_m}{L_2^2} \Psi_{2\alpha} - p\omega_r \frac{L_m}{L_2} \Psi_{2\beta} + \\ + \left(R_1 + R_2 \frac{L_m^2}{L_2^2} \right) i_{1\alpha} + \frac{L_1 L_2 - L_m^2}{L_2} i_{1\alpha} \\ - \frac{R_2 L_m}{L_2^2} \Psi_{2\beta} + p\omega_r \frac{L_m}{L_2} \Psi_{2\alpha} + \\ + \left(R_1 + R_2 \frac{L_m^2}{L_2^2} \right) i_{1\beta} + \frac{L_1 L_2 - L_m^2}{L_2} i_{1\beta} \end{array} \right], \end{aligned}$$

где y – вектор наблюдаемого выходного сигнала; n – вектор помех измерений; $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ – компоненты вектора напряжения статора.

Для работы модели используются измеренные значения токов и напряжений обмотки статора в дискретные моменты времени, преобразованные в составляющие по осям α , β .

Эти и другие модели для определения остальных параметров и переменных АД, не представленные здесь из-за ограниченного объема статьи, входят в разработанную нами комплексную систему идентификации АД, которая представляет собой совокупность наблюдающих устройств, реализованных в виде программ, позволяющих путем вычислений определять текущие значения искомых величин, которые обычным образом измерить невозможно. Максимальное время определения одной величины при этом не превышает 20 мс.

В систему идентификации входят два независимых алгоритма – для статического и динамического режимов работы АД.

Первый алгоритм позволяет определить вектор параметров и переменных АД

$$\theta_s = [\Psi_1, \Psi_2, \Psi_{1m}, R_1, R_2, L_1, L_2, L_m, L_{1\sigma}, L_{2\sigma}],$$

а второй – вектор

$$\theta_d = [\Psi_1, \Psi_2, \Psi_{1m}, I_1, R_1, R_2, L_1^*, L_2^*, L_m, \omega_r, M_c].$$

Здесь L_1^* , L_2^* – переходные индуктивности статора и ротора.

Статические режимы работы характерны для таких горных установок, как, например, вентиляторы, насосы, подъемные машины, а динамические – для очистных и проходческих комбайнов, скребковых конвейеров, работающих со случайной резкопеременной нагрузкой.

Комплексная система идентификации АД является хорошей основой для создания устройства

компьютерного мониторинга, результаты которого далее могут быть использованы для решения ряда задач в асинхронном электроприводе горных машин. В структуру экспериментального образца этого устройства входит совокупность наблюдателей, объединенных управляемым устройством, производящим сканирование параметров и переменных АД, накапливающая матрица, анализатор текущих значений и их приращений относительно значений предыдущих тактов и матрица с набором эталонных значений, которые вводятся в нее в начале эксплуатации заведомо исправного АД. Отличительной особенностью данного устройства является то, что оно реализовано в основном программным образом, а физически состоит лишь из ноутбука с измерительной системой, в которую входят датчики тока, напряжения, частоты вращения и плата аналого-цифрового преобразования.

Устройство позволяет осуществлять функциональное диагностирование и прогнозирование состояния АД, а также может быть использовано для превентивной защиты АД от аварийных ситуаций. При использовании в составе горных машин частотно-регулируемого электропривода оно может быть использовано в качестве его информационной части. В этом случае могут использоваться лишь часть компонентов векторов θ_s и θ_d .

Таким образом, применение современных компьютерных технологий, в том числе с использованием представленных в данной статье решений, может перевести эксплуатацию и обслуживание асинхронных электроприводов горных машин на более высокий качественный уровень и повысить тем самым их функциональную надежность и эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каширских В.Г. Определение в реальном времени активного сопротивления и потокосцепления ротора асинхронного двигателя при его работе в установившемся режиме / В.Г. Каширских, В.М. Завьялов // Вестн. КузГТУ, 2003. - №1. – С. 21-24.
2. Каширских В.Г. Оценка активного сопротивления ротора асинхронного электродвигателя с помощью нейронной сети / В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-17: Сб. трудов 17-й Международ. науч. конф.: В 10 т. Т. 5 Секция 5 / Под общ. ред. В.С. Балакирева. – Кострома: изд-во Костромского Гос. технол. ун-та, 2004. – С. 161-163.
3. Каширских В.Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей с учетом значимости параметров / В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский // Вестн. КузГТУ, 2005. – С. 73-74.
4. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

□ Автор статьи :

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

УДК 621.313.33

Е.В. Каширских, М.В. Бердников

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Для эффективного управления асинхронными электродвигателями (АД) и двигателями постоянного тока (ДПТ) необходимо знать их реальные параметры, поскольку данные из каталогов являются проектными. Для нахождения значений параметров, а также для комплексных исследований различных режимов работы двигателей с целью оптимизации систем защиты, управления и диагностики необходим испытательный стенд с универсальным нагрузочным

устройством.

Разработанный и изготовленный нами для этих целей стенд позволяет:

- испытывать любые двигатели постоянного тока и асинхронные двигатели мощностью до 5 кВт, со скоростью вращения до 6000 об/мин и обеспечивать при этом значения момента сопротивления на валу испытуемого двигателя в пределах до 25 Нм с возможностью изменения характеристик нагрузления как автоматически, так и

вручную;

- проводить испытания различных режимов и устройств пуска АД при разных условиях нагружения;

- проводить испытания устройств для мониторинга параметров и состояния АД и ДПТ в процессе работы;

- проводить исследования регулируемых электроприводов на основе АД и ДПТ с различными преобразователями и системами управления для разных режимов нагружения.