

Предлагаемый электродвигатель может быть рекомендован для применения в регулируемом электроприводе машин и механизмов, в частности, наиболее целесообразно его использование в электроприводе различного рода нагнетателей, в подъемно-транспортных машинах, работающих в режиме частых пуско-тормозных циклов.

УДК 621.313.333 (075.8)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

*Ковалев Л.М., Жидунова С.Е., Бураковский С.А.*

*Могилевский машиностроительный институт*

Одним из широко распространённых методов диагностирования асинхронных электродвигателей (АД) является метод ненагруженного двигателя. Этот метод позволяет определить постоянные потери в двигателе (механические и в стали) и получить характеристики холостого хода, имеющие самостоятельное значение при контроле качества. По результатам такого диагностирования можно не только выявить соответствие показателей АД техническим требованиям, но и по их сочетанию ориентировочно диагностировать ход технологического процесса по изготовлению двигателей.

Для определения механических потерь, потерь в стали и полных характеристик холостого хода в процессе диагностирования АД работает на холостом ходу при изменении питающего напряжения от наибольшего допустимого (обычно 130% от номинального) до наименьшего, при котором ещё возможно устойчивое вращение диагностируемой машины с заданной частотой (у АД- это момент, когда начинает расти ток статора из-за увеличения скольжения). При этом рекомендуется включать двигатель при номинальном напряжении, затем увеличивать его до максимального, а затем

## 8. Современные проблемы электроники и автоматики

уже снижать, снимая 9-11 отсчётов. При каждом отсчёте измеряются среднее значение напряжения и тока статора  $I_0$  в трёх фазах, частота питающего напряжения, потребляемая мощность  $P_1$ , сопротивление  $R$  фазы обмотки статора при температуре опыта. Суммарные потери холостого хода  $P_0$  определяются по формуле:

$$P_0 = P_1 - I_0^2 R \quad (1)$$

Экстраполяция нижней прямолинейной части зависимости потерь  $P_0$  от квадрата отсекает по оси ординат величину механических потерь  $P_{мх}$ .

При автоматизации рассмотренного процесса диагностирования следует ожидать значительного увеличения его производительности при применении ускоренного метода, когда приложенное к двигателю напряжение будет непрерывно изменяться по линейному закону:

$$U(t) = U_0 - a \cdot t, \quad (2)$$

где  $U_0$  - наибольшее допустимое напряжение;

$a$  - скорость изменения напряжения.

При этом скорость изменения напряжения " $a$ " должна быть подобрана такой, чтобы минимизировать появление динамических факторов в исследуемых характеристиках. Эту задачу можно решить путём математического моделирования процесса диагностирования в режиме ненагруженного двигателя.

Считая потери в стали сосредоточенными и осуществляя обратный переход от установившегося режима к дифференциальным уравнениям, получим следующую модель АД в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Psi_{\alpha 1}}{dt} &= U_m \cos \omega_0 t - R_1 i_{\alpha 1} - R_m (i_{\alpha 1} + i_{\alpha 2}); \\
 \frac{d\Psi_{\beta 1}}{dt} &= U_m \sin \omega_0 t - R_1 i_{\beta 1} - R_m (i_{\beta 1} + i_{\beta 2}); \\
 \frac{d\Psi_{\alpha 2}}{dt} &= -R_2 i_{\alpha 2} - \omega \Psi_{\beta 2} - R_m \frac{\omega}{\omega_0} (i_{\alpha 1} + i_{\alpha 2}); \\
 \frac{d\Psi_{\beta 2}}{dt} &= -R_2 i_{\beta 2} - \omega \Psi_{\alpha 2} - R_m \frac{\omega}{\omega_0} (i_{\beta 1} + i_{\beta 2}); \\
 i_{\alpha 1} &= \frac{\omega_0 \alpha_s}{R_1} (\Psi_{\alpha 1} - \Psi_{\alpha 2} k_r); \\
 i_{\alpha 2} &= \frac{\omega_0 \alpha_r}{R_2} (\Psi_{\alpha 2} - \Psi_{\alpha 1} k_s); \\
 i_{\beta 1} &= \frac{\omega_0 \alpha_s}{R_1} (\Psi_{\beta 1} - \Psi_{\beta 2} k_r); \\
 i_{\beta 2} &= \frac{\omega_0 \alpha_r}{R_2} (\Psi_{\beta 2} - \Psi_{\beta 1} k_s); \\
 M &= \frac{3}{2} P_0 \omega_0 \frac{k_r}{x_s \sigma} (\Psi_{\alpha 2} \Psi_{\beta 1} - \Psi_{\alpha 1} \Psi_{\beta 2}); \\
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{P_0}{J} (M - M_{MX}); \\
 \alpha_s &= \frac{R_1}{x_s \sigma}; \quad k_s = \frac{x_m}{x_s}; \quad \alpha_r = \frac{R_2}{x_r \sigma}; \quad k_r = \frac{x_m}{x_r}; \\
 \sigma &= 1 - k_r k_s; \quad x_s = x_m + x_1; \quad x_r = x_m - x_2
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где

$x_s(x_r)$  - синхронное реактивное сопротивление обмотки статора (ротора); учитывающее магнитную связь с двумя другими фазными обмотками статора (ротора);

$x_m$  - индуктивное сопротивление взаимной индукции;

$x_l(x_2)$  - индуктивное сопротивление рассеяния статора (ротора);

$\omega_0, \omega$  - угловая скорость соответственно поля статора и ротора;

$J$  - момент инерции ротора АД;

$P_0$  - число пар полюсов.

Для реальной машины мгновенные значения токов фаз статора и ротора определяется как:

$$\left. \begin{aligned} i_A &= i_{a1}; \\ i_B &= i_{a1} \cos(-120^\circ) - i_{\beta 1} \sin(-120^\circ); \\ i_C &= i_{a1} \cos(120^\circ) - i_{\beta 1} \sin(120^\circ). \end{aligned} \right\} (4)$$

Модель в виде уравнений (3) и (4) дополняется уравнениями изменения амплитуды питающего напряжения:

$$\left. \begin{aligned} U_m &= U_{m0} \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq t_n; \\ U_m &= U_{m0} - a(t - t_n) \quad \text{при} \quad t > t_n, \end{aligned} \right\} (5)$$

где

$U_m(U_{m0})$  - максимальная амплитуда напряжения питания, с которой начинается процесс диагностирования ( $1,3U_{ном} \sqrt{2}$ );

$t_n$  - время, необходимое для выхода на установившейся режим при максимальном напряжении питания.

Для определения характеристик двигателя из его мгновенных значений используем расчёт средних за период интегральных энергетических показателей. В качестве периода усреднения выбран период основной гармоники электромагнитного поля статора

$$T = 2\pi / \omega_0. (6)$$

Такой подход согласуется с процессом получения нижеприведенных величин при использовании измерительных преобразователей.

Так, средняя за период потребляемая активная мощность двигателя определяется как:

$$P_{ly}(t) = \sum_{k=1}^m \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} U_k(t) \cdot i_k(t) dt, (7)$$

где

$m$  - число фаз;

$U_k(t)$  - мгновенное значение напряжения  $k$ -ой фазы;

$i_k(t)$  - мгновенное значение тока статора  $k$ -ой фазы.

Действующее (среднее квадратичное) значение тока статора  $k$ -ой фазы определяется по выражению:

$$I_{ky}(t) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} i_k^2(t) dt}, (8)$$

Потери холостого хода  $P_{oy}$  при ускоренном диагностировании определяются в соответствии с выражением (1). Полученные значения позволяют построить зависимости, необходимые для анализа  $I_{oy}(U)$ ,  $P_{oy}(U)$ ,  $P(U^2)$ .

Анализ характеристик, полученных на модели для АД различной мощности и при различных "а" показывает, что отставание динамических характеристик от статических составляет в среднем величину

$$\Delta U = \alpha T_0, (9)$$

где  $T_0 = (x_1 - x_m) / (R_1 + R_m) \omega_0$  - электромагнитная постоянная времени АД в режиме холостого хода.

Минимизируя  $\Delta U$ , можно определить допустимую скорость изменения напряжения. Если задать ошибку в определении  $P_{mxy}$  5% от  $P_{mxc}$  в статике, то достаточно задать  $\Delta U = 1-3\%$  от  $U_{ном}$  и определить соответствующую скорость изменения напряжения при ускоренном диагностировании.