

УДК 621.313.333

В. В. ГЕРАЩЕНКО, А. В. СЕРКОВ

**ОБОСНОВАНИЕ ОБОБЩЕННОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Надежность является важнейшим технико-экономическим показателем качества любого технического устройства (в частности, электрической машины), определяющим ее способность безотказно работать с неизменными техническими характеристиками в течение заданного промежутка времени при определенных условиях эксплуатации. При широком применении электрических машин в различных системах электроприводов и автоматического регулирования производственными процессами технический уровень производства в значительной степени определяется надежностью этих машин. Как следствие, всякие отказы электрических машин наносят ощутимый материальный ущерб. Повышение надежности электрических машин, выпуск которых составляет десятки миллионов изделий в год, является важнейшей научно-технической проблемой [1].

Резерв для повышения надежности и снижения отказов находится в сфере эксплуатации за счет регулярного оценивания состояния оборудования [2], что показано на рис. 1. Кривая 1 иллюстрирует изменение безотказности оборудования, кривая 2 — резервированного оборудования, а кривая 3 — то же при регулярном оценивании состояния и необходимом восстановлении в течение времени t .

В настоящее время на практике применяют систему планово-предупредительного ремонта (ППР), предусматривающую периодическое проведение технического обслуживания и ремонтов через определенные, заранее устанавливаемые сроки. Недостатком системы ППР является сравнительно большая трудоемкость технического обслуживания ремонтов электродвигателей, так как многие работы являются регламентными. При проведении ремонтов через усредненные периоды без предварительного точного определения технического состояния каждого конкретного электродвигателя на практике приходится выполнять большой объем работ по разборке электрических машин для определения состояния узлов и деталей. Довольно часто после этого оказывается, что техническое состояние электродвигателя удовлетворительное, т.е. двигатель не требует ремонта.

Изложенное выше свидетельствует о необходимости совершенствования системы ППР путем разработки и применения ее новых форм, обеспечивающих снижение затрат на эксплуатацию при одновременном повышении надежности работы электродвигателей. Этим требованиям соответствует применение методов и средств безразборного определения технического состояния, что позволит проводить ремонты только в тех случаях, когда износ узлов и деталей достигает значений, при которых дальнейшая работа может привести к его отказу или будет экономически нецелесообразной.

Введение эксплуатационного контроля электродвигателей поможет своевременно и с меньшими затратами провести профилактические работы. Поэтому на основании конструктивных и эксплуатационных особенностей диагностируемого объекта авторы считают целесообразным проведение предварительной оценки технического состояния асинхронных электродвигателей по принципу исправен-неисправен в месте эксплуатации и передачу двигателя для дефектации в специализированные электроремонтные организации в случае необходимости.

В отличие от ряда других технических устройств, динамические свойства которых характеризуются лишь отдельными процессами (магнитными, механическими, акустическими, тепловыми и др.), в электрической машине динамические свойства функционирования характеризуются совокупностью всех этих процессов. Ввиду этого для общей оценки целесообразно проводить контроль по некоторому обобщенному параметру.

Для предварительного диагностирования асинхронных электродвигателей предлагается метод, заключающийся в том, что двигатель устанавливают на стенд и нагружают периодически пульсирующим моментом с заданными амплитудой и частотой переменной составляющей момента, измеряют амплитуду переменной составляющей частоты вращения вала электродвигателя и, сравнивая ее с нормативом, соответствующем исправному состоянию двигателя, принимают решение о его техническом состоянии.

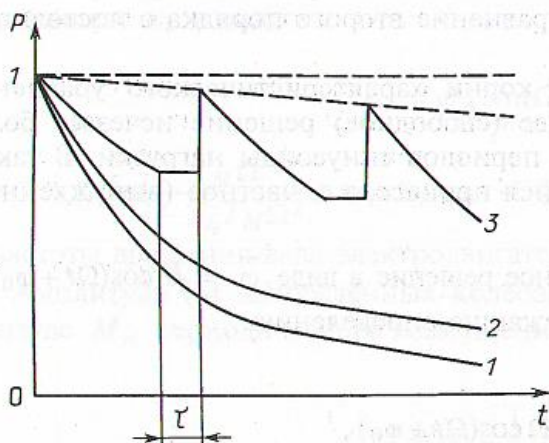


Рис. 1. Кривые безотказности оборудования

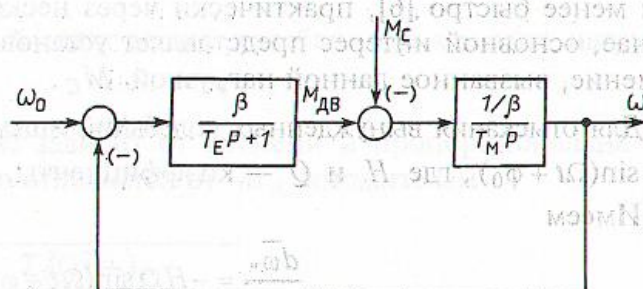


Рис. 2. Структурная схема линейризованного асинхронного электродвигателя

Структурная схема асинхронного электродвигателя, работающего на линейной части характеристики [3], приведена на рис.2. Соответствующее данной структурной схеме уравнение:

$$T_E T_M \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{T_E}{\beta} \frac{dM_C}{dt} + \frac{M_C}{\beta}, \quad (1)$$

где ω — частота вращения вала; T_E — электромагнитная постоянная времени; T_M — механическая постоянная времени; β — жесткость линейного участка статической характеристики электродвигателя; M_C — момент нагрузки. На рис. 2 $M_{дв}$ — момент двигателя; ω_0 — синхронная частота вращения двигателя.

В известной литературе произведен анализ механических (зависимость $M_{дв}$ от M_C) [4] и электромагнитных (зависимость ω от $M_{дв}$) [3] свойств электродвигателей под воздействием периодически пульсирующей нагрузки. Найдем зависимость ω от M_C , характеризующую свойства двигателя в целом, при периодически пульсирующей нагрузке. Выражение для периодически пульсирующего момента нагрузки имеет вид

$$M_C = M_{CP} + M_A \sin \Omega t, \quad (2)$$

где M_{CP} — постоянная составляющая момента нагрузки; M_A — амплитуда переменной составляющей момента нагрузки; Ω — частота пульсаций момента.

Подставив (2) в (1), получим

$$T_E T_M \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = T_E \Omega \frac{M_A}{\beta} \cos \Omega t + \frac{M_{CP}}{\beta} + \frac{M_A}{\beta} \sin \Omega t. \quad (3)$$

Перепишем выражение (3) в виде

$$T_E T_M \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{M_{CP}}{\beta} + \frac{M_A}{\beta} \sqrt{T_E^2 \Omega^2 + 1} \sin(\Omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

где $\varphi_0 = \arcsin \frac{T_E \Omega}{\sqrt{T_E^2 \Omega^2 + 1}}$.

Перенесем $\frac{M_{CP}}{\beta}$ в левую часть уравнения (4), обозначим $\omega - \frac{M_{CP}}{\beta} = \omega_*$ и, учитывая, что

$d\omega = d(\omega - \frac{M_{CP}}{\beta}) = d\omega_*$, $d^2 \omega = d^2(\omega - \frac{M_{CP}}{\beta}) = d^2 \omega_*$, приведем уравнение (4) к виду

$$T_E T_M \frac{d^2 \omega_*}{dt^2} + T_M \frac{d\omega_*}{dt} + \omega_* = \frac{M_A}{\beta} \sqrt{T_E^2 \Omega^2 + 1} \sin(\Omega t + \varphi_0). \quad (5)$$

Это — неоднородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами [5].

В большинстве электротехнических систем все корни характеристического уравнения имеют отрицательные действительные части и общее (свободное) решение исчезает более или менее быстро [6], практически через несколько периодов синусоиды нагрузки. В таком случае, основной интерес представляет установившийся процесс, т.е. частное (вынужденное) решение, вызванное данной нагрузкой M_C .

Для отыскания вынужденных колебаний ищем частное решение в виде $\bar{\omega}_* = H \cos(\Omega t + \varphi_0) + Q \sin(\Omega t + \varphi_0)$, где H и Q — коэффициенты, подлежащие определению.

Имеем

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{\omega}_*}{dt} &= -H\Omega \sin(\Omega t + \varphi_0) + Q\Omega \cos(\Omega t + \varphi_0), \\ \frac{d^2\bar{\omega}_*}{dt^2} &= -H\Omega^2 \cos(\Omega t + \varphi_0) - Q\Omega^2 \sin(\Omega t + \varphi_0).\end{aligned}$$

Сравнивая коэффициенты, получаем систему:

$$\begin{aligned}H(1 - T_E T_M \Omega^2) + T_M \Omega Q &= 0, \\ -T_M \Omega P + (1 - T_E T_M \Omega^2)Q &= \frac{M_A}{\beta} \sqrt{T_E^2 \Omega^2 + 1}.\end{aligned}$$

Так как

$$\begin{aligned}\begin{vmatrix} 1 - T_E T_M \Omega^2 & T_M \Omega \\ -T_M \Omega & 1 - T_E T_M \Omega^2 \end{vmatrix} &= (1 - T_E T_M \Omega^2)^2 + T_M^2 \Omega^2, \\ \begin{vmatrix} 0 & T_M \Omega \\ \omega_A \sqrt{T_E^2 \Omega^2 + 1} & 1 - T_E T_M \Omega^2 \end{vmatrix} &= -T_M \Omega \frac{M_A}{\beta} \sqrt{T_E^2 \Omega^2 + 1}, \\ \begin{vmatrix} 1 - T_E T_M \Omega^2 & 0 \\ -T_M \Omega & \omega_A \sqrt{T_E^2 \Omega^2 + 1} \end{vmatrix} &= (1 - T_E T_M \Omega^2) \frac{M_A}{\beta} \sqrt{T_E^2 \Omega^2 + 1},\end{aligned}$$

то

$$H = -\frac{M_A}{\beta} \frac{T_M \Omega \sqrt{T_E^2 \Omega^2 + 1}}{(1 - T_E T_M \Omega^2)^2 + T_M^2 \Omega^2}; \quad Q = \frac{M_A}{\beta} \frac{(1 - T_E T_M \Omega^2) \sqrt{T_E^2 \Omega^2 + 1}}{(1 - T_E T_M \Omega^2)^2 + T_M^2 \Omega^2}$$

и мы находим частное решение

$$\bar{\omega}_* = \frac{M_A}{\beta} \frac{\sqrt{T_E^2 \Omega^2 + 1}}{(1 - T_E T_M \Omega^2)^2 + T_M^2 \Omega^2} [-T_M \Omega \cos \Omega t + (1 - T_E T_M \Omega^2) \sin(\Omega t + \varphi_0)].$$

Преобразуем выражение $\bar{\omega}_*$ следующим образом:

$$\begin{aligned}\bar{\omega}_* &= \frac{M_A}{\beta} \sqrt{\frac{T_E^2 \Omega^2 + 1}{(1 - T_E T_M \Omega^2)^2 + T_M^2 \Omega^2}} \times \\ &\times \left[-\frac{T_M \Omega}{\sqrt{(1 - T_E T_M \Omega^2)^2 + T_M^2 \Omega^2}} \cos(\Omega t + \varphi_0) + \frac{1 - T_E T_M \Omega^2}{\sqrt{(1 - T_E T_M \Omega^2)^2 + T_M^2 \Omega^2}} \sin(\Omega t + \varphi_0) \right].\end{aligned}$$

Обозначив

$$\begin{aligned}\frac{M_A}{\beta} \sqrt{\frac{T_E^2 \Omega^2 + 1}{(1 - T_E T_M \Omega^2)^2 + T_M^2 \Omega^2}} &= \omega_A, \\ \frac{T_M \Omega}{\sqrt{(1 - T_E T_M \Omega^2)^2 + T_M^2 \Omega^2}} \sin \delta, \quad \frac{1 - T_E T_M \Omega^2}{\sqrt{(1 - T_E T_M \Omega^2)^2 + T_M^2 \Omega^2}} &= \cos \delta,\end{aligned} \quad (6)$$

перепишем $\bar{\omega}_*$ в виде:

$$\bar{\omega}_* = \omega_A \sin(\Omega t + \varphi_0 - \delta) = \omega_A \sin(\Omega t - \psi), \quad (7)$$

где $\delta = \arctg \frac{T_M \Omega}{1 - T_E T_M \Omega^2}$; $\psi = \delta - \varphi_0$ — фазовый сдвиг между колебаниями момента нагрузки и частоты вращения вала электродвигателя.

Амплитуда (6) вынужденных колебаний не зависит от времени и пропорциональна амплитуде M_A периодического возмущения. Она отличается от M_A множителем

$$A(\Omega) = \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{T_E^2 \Omega^2 + 1}{(1 - T_E T_M \Omega^2)^2 + T_M^2 \Omega^2}}, \quad (8)$$

характеризующим зависимость амплитуды вынужденного колебания от частоты возмущающей силы.

Определим максимум этой амплитуды. Для этого найдем производную функции (8). Положив $A'(\Omega) = 0$, получим уравнение $(1 - T_E T_M \Omega^2)^2 - 2T_M^2 = 0$ (случай $\Omega = 0$ отбрасывается

как невозможный), корень которого дает частоту внешних сил: $\Omega_{\max} = \sqrt{\frac{1}{T_E T_M} - \frac{T_M}{2T_E}}$, при которой, как показывает проверка достаточных условий экстремума, амплитуда вынужденных колебаний будет максимальной. Подача нагрузки с частотой пульсаций $\Omega_{\max}$ упростит обработку информации о значении амплитуды переменной составляющей частоты ω_A .

На рис. 3 показаны статическая 1 и динамическая 2 характеристики асинхронного электродвигателя и временные диаграммы, соответствующие (2), (7). Механическая инерция электродвигателя вызывает уменьшение амплитуды и фазовый сдвиг момента $M_{дв}$, развиваемого двигателем, от момента нагрузки M_C . Электромагнитная инерция вызывает отклонение динамической характеристики двигателя от статической.

Таким образом, амплитуда переменной составляющей частоты вращения является обобщенным диагностическим параметром, так как она зависит от показателей, характеризующих состояние как механической, так и электрической частей двигателя.

На основе предложенного метода разработан диагностический стенд [7] для контроля исправности электродвигателей. Нагрузочное устройство выполнено на базе электромагнитного порошкового тормоза ПТ-250М, что позволяет нагружать двигатели до 60 кВт и обеспечивать частоту пульсаций нагрузки до 35 с⁻¹. Система управления стендом обеспечивает варьирование параметров нагружения. Для измерения амплитуд переменных составляющих момента и частоты вращения созданы измерительные преобразователи, выполняющие функции преобразователей частоты вращения [8, 9] и преобразователей крутящего момента [10, 11].

Для проверки адекватности теоретических положений на диагностическом стенде проведены исследовательские испытания асинхронных двигателей при номинальных значениях параметров и при изменениях в электрической и механической частях. Изменения в электрической части проводились путем введения в цепь статора двигателей активного сопротивления, равного половине номинального. Изменения в механической части проводились путем установки на валу маховика с моментом инерции, равным моменту инерции ротора двигателя. Полученные в результате экспериментов данные о значении амплитуды переменной составляющей частоты вращения приведены в таблице. Там же приведены данные, по-

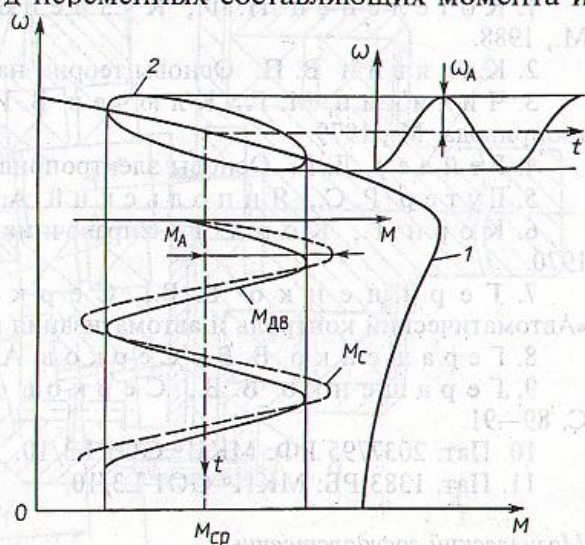


Рис. 3. Статическая и динамические характеристики асинхронного электродвигателя

Значения амплитуды переменной составляющей частоты вращения

(Т) Тип и мощность двигателя	Параметры нагружения			ω_d, c^{-1}								
				Нормативное значение			При изменении параметров электрической части			При изменении параметров механической части		
	Ω, c^{-1}	$M_{CP},$	M_d	по формуле (6)	на модели MathLab	на стенде	по формуле (6)	на модели MathLab	на стенде	по формуле (6)	на модели MathLab	на стенде
4A71A4 0,55 кВт	30	4,15	4,15	14,9	15,3	16,4	21,1	21,7	22,4	18,0	18,3	19,3
4A100S4 3,0 кВт		24,0	24,0	11,8	11,9	12,5	18,1	18,2	18,9	13,4	13,4	14,8
4A132M4 11,0 кВт		108,0	108,0	6,9	6,9	7,3	10,3	10,2	11,0	7,9	7,9	8,8

лученные по формуле (6) и в результате моделирования двигателей по полной структурной схеме с помощью пакета MathLab / Asynchronous Machine. Различия между теоретическими и экспериментальными данными объясняются влиянием упругих свойств элементов стенда, расположенных между двигателем и нагрузателем (соединительные муфты, элементы для установки датчиков преобразователей частоты вращения и крутящего момента). На стенде также проведены испытания асинхронных электродвигателей с искусственно созданными дефектами в механической и электрической частях (междувитковые и междупазные замыкания в обмотке статора, неравномерность воздушного зазора между статором и ротором, обрыв стержней короткозамкнутого ротора). В результате получены ощутимые (10—35%) отклонения значения ω_d от нормативных.

Таким образом, метод контроля технического состояния асинхронных электродвигателей по амплитуде переменной составляющей частоты вращения позволяет производить общую оценку состояния двигателя. Следует отметить, что ряд механизмов, например кривошипно-шатунные, сами по себе нагружают приводной электродвигатель периодически пульсирующим моментом. В таких случаях возможна экспресс-оценка текущего состояния двигателей в процессе работы, без их демонтажа и установки на диагностический стенд.

Summary

The correlation between the alternating component amplitudes of electric motor rotation frequency and pulsing load torque is obtained. The possibility of the technical state inspection of induction motors based on this correlation is shown.

Литература

1. Котеленец Н. Ф., Кузнецов Н. Л. Испытания и надежность электрических машин. М., 1988.
2. Калявин В. П. Основы теории надежности и диагностики. СПб., 1998.
3. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода. М., 1979.
4. Гейлер Л. Б. Основы электропривода. Мн., 1972.
5. Гутер Р. С., Янпольский А. Р. Дифференц. уравнения. М., 1976.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1970.
7. Геращенко В. В., Серков А. В. // Тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов». Мн., 1998. С. 34—35.
8. Геращенко В. В., Серков А. В. // Механизация строительства. 1998. № 10. С. 16—17.
9. Геращенко В. В., Серков А. В. // Материалы, технологии, инструменты. 1999. № 2. С. 89—91.
10. Пат. 2037795 РФ: МКИ⁶ G01 L3/10.
11. Пат. 1383 РБ: МКИ⁶ G01 L3/10.

Могилевский государственный
технический университет

Поступила в редакцию
16.09.99