

*И. А. Смольянов, Н. Р. Сафин, В. А. Прахт*  
*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Прези-  
дента*  
*России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург, Россия)*

## **АНАЛИЗ КПД АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ**

Обеспечение надежности функционирования асинхронных двигателей (АД) в промышленности является важнейшим условием их эффективной эксплуатации. Достижение этих требований в значительной мере зависит от качества работы подшипников, а именно от их характеристик, определяющих тепловые, вибрационные, шумовые и другие эффекты, возникающие в зоне контакта механических элементов [1]. В качестве критерия, характеризующего состояние подшипникового узла, наиболее целесообразно принять величину радиального зазора подшипника. Радиальным зазором в подшипнике является расстояние, при котором наружная обойма смещается в сторону внутренней. При этом номинальный радиальный зазор является необходимым для предотвращения нежелательного натяга между обоймами и телами качения. Возрастание величины радиального зазора подшипников свидетельствует об изнашивании беговых дорожек, и, как следствие, износа подшипника в целом.

Дефекты подшипников могут обуславливать ряд явлений в вращающихся машинах: колебания, нагрев, изменение частоты вращения, повышенный шум и т. д. В особенности можно отметить, что в этих случаях увеличиваются местные перегревы, возрастают механические потери, что в конечном счете обуславливает снижение коэффициента полезного действия (КПД) АД. В работе [2], отмечается, что в этих случаях возможно снижение КПД машины в пределах 1,6 – 2,4 %. Как правило, чем выше номинальная скорость электродвигателя, тем больше механических потерь.

Для рассмотрения оценки влияния технического состояния подшипников на КПД были проведены испытания АД при работе с различными подшипниками и исследованы полученные данные.

При испытаниях АД питался непосредственно от сети трехфазной сети, испытания проводились на стенде, где АД фиксировался на специальной раме, на которой тормозящий момент создавался балансирной динамо-машиной. Во время экспериментов выполнялись тепловизионные снимки с помощью тепловизора Testo 875-2i. Запись значений токов и напряжений, выполнялась с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) (USB3000) с частотой дискретизации 50 кГц и измерительной платы с тремя датчиками токов LEMHX 02-P и тремя датчиками напряжений LV25-PSP5. Мгновенные значения токов и напряжений оцифровывались АЦП и записывались на компьютер для обработки в пакете Matlab.

В качестве испытуемой машины был использован АД с номинальной мощностью 0,75 кВт и номинальной скоростью вращения 2820 об/мин, в котором используются подшипники марки 6204 (рисунок 1). Испытания АД проводились с исправным подшипником; с подшипником, имеющим отверстие по внешней обойме 4 мм (неисправный № 1); с подшипником, имеющим отверстие по внешней обойме 6 мм (неисправный № 2). В двух последних случаях также имелись небольшие выемки во внутренних обоймах. Применяемые способы искусственного получения дефек-

та для исследования режимов с поврежденными подшипниками описаны в работе [3].



Рис. 1. Испытуемые подшипники (слева - направо):

а) исправный, неисправный № 2 и № 1; б) неисправные № 2 и № 1 (вид сбоку)

Максимальная температура при тепловом обследовании (рисунок 2) соответствует внутренней обойме подшипников. При этом подшипники закрыты щитами, и с внешней стороны расположены уплотнения, т. е. армированные манжеты. Соответственно, на приведенных термограммах максимальная температура соответствует уплотнению АД (манжет с пружиной). ГОСТ 8752-79 регламентирует, что резиновые манжеты с пружиной, которые предназначены для уплотнения валов, защиты от попадания пыли и грязи могут эксплуатироваться при температурах от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $170^{\circ}\text{C}$ . Номинальная рабочая температура используемых подшипников 6204 составляет от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $120^{\circ}\text{C}$ .

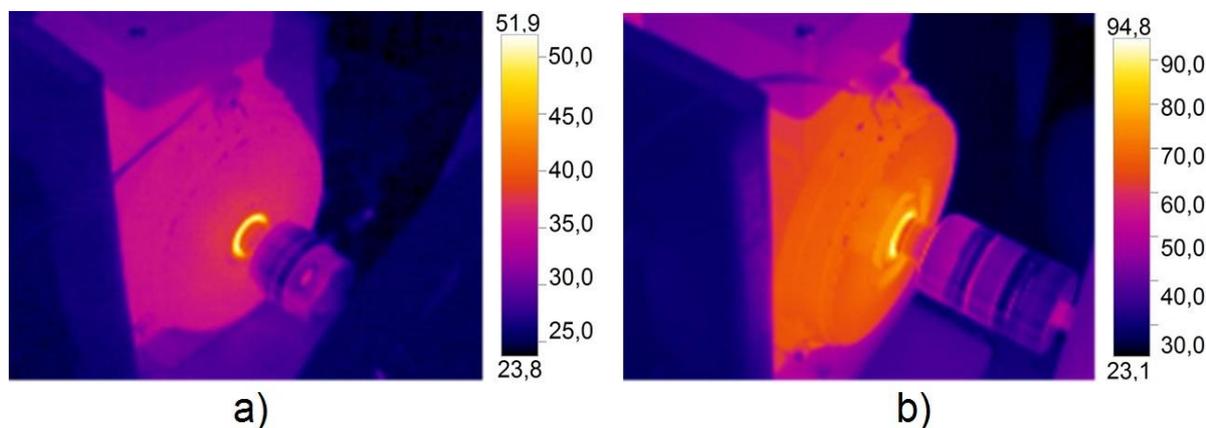


Рис. 2. Пример термограммы испытаний АД (время работы 15 мин):

а) с исправным подшипником; б) с неисправным подшипником № 2

Рассмотрим данные в таблице 1, занеся в каждую строку этапы одного испытания АД. Испытуемая машина с определенным подшипником эксплуатировалась непрерывно, через определенные интервалы времени регистрировались мгновенные значения токов и напряжений. В целом можно отметить, что КПД АД снижается при работе с неисправным подшипником. Кроме того, с увеличением периода эксплуатации с неисправным подшипником происходит возрастание тепловых потерь в зоне подшипникового узла, что обуславливает ещё большее снижение КПД.

Таблица 1

## Результаты экспериментов

Подшипник	Исправный		Неисправный №1		Неисправный №2	
	15	60	15	60	15	60
Время работы, мин	15	60	15	60	15	60
Номинальный ток, А	1.97	1.971	2.009	2.003	2.016	2.011
Скорость вращения ротора, об/мин	2755	2755	2737	2724	2725	2706
Входная мощность, Вт	1148.9	1151.9	1181.5	1185.7	1190.1	1192.5
Выходная мощность, Вт	708.3	708.2	703.64	700.31	700.5	695.7
Коэффициент мощности	0.853	0.854	0.860	0.865	0.863	0.868
Температура окружающей среды, °С	23,8	24,5	26,8	26,9	23,1	24,5
Максимальн. значение температуры, °С	51,9	71,0	94,6	104,6	94,8	105,5
КПД, %	0.63	0.625	0.6	0.59	0.59	0.583

Недопустимый износ подшипников искажает рабочий ток АД по следующим причинам [4, 5]: на фоне основного тока, обусловленного потреблением исполнительным механизмом, добавляются пульсации тока из-за бросков от трения. Трение в дефекте модулирует момент сопротивления при вращении машины, что влияет на появление дополнительных гармоник в питающем токе. Возмущения в механической части машины приводят к изменениям магнитного потока в воздушном зазоре и к слабой модуляции потребляемого тока.

Рассмотрим значения гармоник токов АД (таблица 2). Опыты показали, что в процессе испытаний АД неисправным подшипником происходит изменение параметров спектра гармоник токов, генерируемые в статоре испытуемой машины. Непосредственную статическую нагрузку в процессе испытаний получает только несколько тел качений подшипника, в то время как остальные прокатываются между кольцами. При этом возникающие переменные нагрузки достигают своего максимума и минимума в верхних и нижних точках тела качения. Можно допустить, что генерация колебаний будет усиливаться при работе АД с дефектными подшипниками. В полученных данных замечено, что информативными параметрами, реагирующими на изменение уровня дефекта элементов подшипника, являются амплитуды 3, 5, 7, 9 и 11 гармонических составляющих токов.

Таблица 2

Числовые значения гармоник токов АД (время работы 60 мин)

Номера гармоник	АД с исправным подшипником			АД с неисправным подшипником № 1			АД с неисправным подшипником № 2		
	гармоники токов по фазам, А			гармоники токов по фазам, А			гармоники токов по фазам, А		
№	А	В	С	А	В	С	А	В	С
$f_1$	1,37	1,37	1,36	1,41	1,418	1,409	1,419	1,423	1,407
$f_3$	0,0215	0,0310	0,0215	0,0219	0,0342	0,0246	0,0231	0,0335	0,0234
$f_5$	0,0362	0,0302	0,0329	0,0710	0,0599	0,0622	0,0689	0,0584	0,0611
$f_7$	0,00088	0,00062	0,0015	0,0016	0,0044	0,0060	0,0022	0,0032	0,0055
$f_9$	0,00066	0,00016	0,00019	0,0022	0,0048	0,0027	0,0018	0,0038	0,0021
$f_{11}$	0,00079	0,00057	0,00044	0,0035	0,0021	0,0026	0,0023	0,0013	0,0017
№	усредненное значение, А			усредненное значение, А			усредненное значение, А		
$f_1$	1,367			1,414			1,416		
$f_3$	0,0247			0,027			0,027		
$f_5$	0,033			0,064			0,063		
$f_7$	0,001			0,004			0,0036		
$f_9$	0,00033			0,0032			0,0026		
$f_{11}$	0,0006			0,0027			0,0018		

При неравномерном воздушном зазоре, обусловленном износом подшипников, снижаются технико-экономические показатели АД. Искажается магнитное поле в воздушном зазоре, КПД снижается на 1,5 - 2%, появляются дополнительные выс-

шие гармоник поля, растут местные нагревы [6]. При увеличении неравномерности воздушного зазора повышается вероятность задевания ротора за статор, что со временем влечет к полному выходу из строя АД.

Можно предположить, что механические потери, которые включают трение в подшипниках, вентиляционные потери становятся значительными в машинах средней и большей мощности. В проведенных экспериментах (таблица 1) нагрузочный момент при испытаниях задавался равным номинальному  $M_H = 2.5 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . В результате КПД АД при работе с исправным подшипником в периоде от 15 мин до 60 мин снизился на 0.8 %; в аналогичном интервале времени при работе АД с неисправным подшипником № 1 КПД снизился на 1,67 %; при работе с неисправным подшипником № 2 КПД снизился на 1,2 %. Механические потери увеличиваются при эксплуатации АД с неудовлетворительными в техническом состоянии подшипниками.

Необходимость мониторинга неисправностей АД, в частности, технического состояния подшипников, напрямую связана с задачами энергоресурсосбережения во многих отраслях промышленности. Таким образом, эффективная диагностика АД во многом определяет бесперебойную работу производственных процессов, снижению, энергоёмкости, оптимизацию ремонтных расходов и продление их срока службы.

#### Список использованных источников

6. Малафеев С. И., Копейкин А. И. Идентификация механических потерь в подшипниках электрических машин в режиме колебаний // Электротехника. - 2006. - № 4. – С. 57-60.
7. Safin N., Prakht V., Dmitrievskii V.. Bearing fault diagnostic of induction motor by stator currents analysis based on Park's vectors approach // Applied Mechanics and Materials. - 2015. Vol. 698. - P. 83-89.
8. Obaid R. R, Habetler T.G., Stack J.R. Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors // 4<sup>th</sup> IEEE International symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives, SDEMPED 2003, Proceedings. – New Jersey, 2003. - P.182-187.
9. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока. Новости электротехники, № 1(31), 2005, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php> (дата обращения: 05.04.15).
10. Ярошенко И.В. Повышение эффективности функционирования высоковольтных мехатронных модулей на основе диагностики технического состояния: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05 – Новочеркасск, 2014. – 171 с.
11. Рогачев В.А. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей по гармоническому составу тока статора: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 – Новочеркасск, 2008. - 173 с.