

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК.621.0

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ТРЕНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ С ПЛАСТИЧНЫМИ СМАЗКАМИ

**Л.В. Савченкова**

Московский государственный открытый университет  
им. В.С. Черномырдина  
*ул. П. Корчагина, 21, Москва, Россия*

Рассматриваются исследования режимов трения подшипниковых узлов с пластичными смазками с использованием емкостного метода измерения сопротивления смазочных пленок.

**Ключевые слова:** эксперимент, подшипник, смазка.

При проведении длительных ресурсных испытаний электродвигателей (ЭД) с пластичными смазками наряду с вибрационными методами применяется способ определения доли времени отсутствия металлического контакта (ОМК) тел и дорожек качения. Рассмотрим принципы контроля режима трения в подшипниках ЭД этими методами.

Сопротивление цепи «шарик—смазка—кольцо» представим в виде параллельного соединения емкостного  $X_c$  и активного  $R$  сопротивлений.

Заменяя криволинейные поверхности эквивалентными плоскопараллельными пластинами, получим (Ом):

$$X_a = \frac{h}{S} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f} \cdot \frac{1}{\epsilon}, \quad (1)$$
$$R = \frac{h}{S} \cdot \rho,$$

где  $S$  — приведенная площадь контакта, м<sup>2</sup>;  $h$  — приведенная толщина слоя смазки, м;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость смазки, Ф/м;  $\rho$  — удельное сопротивление смазки, Ом · м;  $f$  — частота напряжения при измерениях, Гц.

Емкостное сопротивление не всегда может быть использовано в качестве показателя, характеризующего среднюю толщину гидродинамической масляной пленки. Пластичные смазочные материалы, содержащие в своем составе эфиры и некоторые виды присадок, во время работы подшипника образуют на поверхности трения устойчивые пленки, электрически разделяющие тела и дорожки качения даже при остановленном электродвигателе. Параметром, характеризующим толщину масляных пленок в рабочей зоне подшипника, будем считать емкость между шариком и дорожкой качения. При этом деформацией шарика пренебрегаем, так как подшипники ЭД работают в основном при малых нагрузках.

Емкость шарика относительно кольца подшипника представим в виде двух параллельно соединенных емкостей: распределенной емкости и емкости контактной зоны. Вследствие больших геометрических размеров распределенная емкость мало зависит от весьма тонкого слоя смазки, разделяющего шарик и кольцо, поэтому определим только емкость контактной зоны вблизи наибольшего сближения по линии центров. Это позволит установить взаимосвязь емкости «шарик—кольцо» с толщиной пленки и оценить возможности изменения толщины пленки по изменению емкости.

Определим расстояние между точками контакта шарика и дорожки качения  $h$  в зависимости от координаты  $x$ , направленной перпендикулярно движению (рис. 1):

$$h = AB - BC, AB = h_0 + (R_{\text{ш}} - R_{\text{ж}} \cdot \cos \varphi).$$

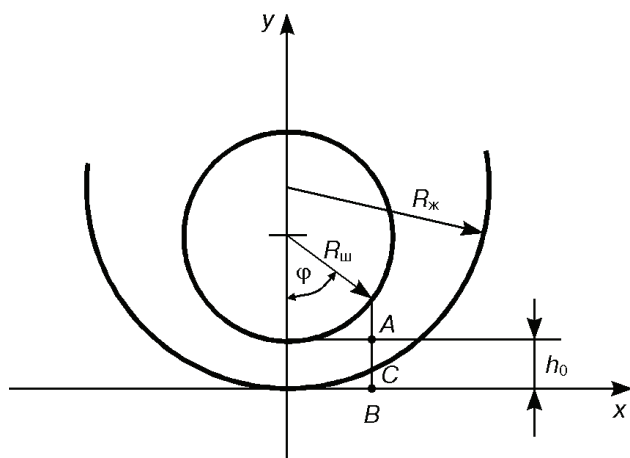


Рис. 1. К выводу формулы емкости «шарик — дорожка качения»:

$R_{\text{ж}}$  — радиус желоба;  $R_{\text{ш}}$  — радиус шарика;  
 $h_0$  — минимальная толщина слоя смазки

Учитывая, что для малых углов  $\varphi \approx \sin \varphi$ ,  $\cos \varphi \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2}$ , получим:

$$AB \approx h_0 + R_e \left[ 1 - \left( 1 - \frac{x^2}{2R_e^2} \right) \right] \approx h_0 + \frac{x^2}{2R_e}. \quad (2)$$

Аналогично

$$BC \approx \frac{x^2}{2R_j}, \text{ т.е. } h \approx h_0 + \frac{x^2}{2R_e} - \frac{x^2}{2R_j},$$

где  $R_{ш}, R_{ж}$  — соответственно радиусы шарика и желоба кольца.

Обозначив  $\beta = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_e} - \frac{1}{R_j} \right)$ , окончательно имеем:

$$h_0 \approx h_0 + \beta x^2. \quad (3)$$

По оси  $y$  в направлении движения аналогично имеем:

$$h_0 \approx h_0 + ay^2,$$

где  $\lambda = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_e} \pm \frac{1}{R_g} \right)$ ,

где  $R_g$  — радиус дорожки качения.

Для внутреннего кольца берется знак + (плюс), для наружного — знак – (минус).

Принимаем, что геометрическим местом равноудаленных на расстоянии  $h$  точек шарика и дорожки качения является эллипс. Соотношение осей эллипса находим из равенства

$$h_0 + \beta x^2 = h_0 + ay^2.$$

Тогда

$$y = \sqrt{\frac{\beta}{a}} x = kx. \quad (4)$$

Находим площадь эллипса с полуосями  $a$  и  $b$ :

$$S = \pi \cdot a \cdot b.$$

Направив большую ось эллипса по оси  $x$ , перпендикулярной направлению движения, с учетом формулы (4) имеем:

$$S = \pi \cdot k \cdot x^2. \quad (5)$$

Электрическая емкость между двумя эллиптическими кольцами, ограниченными двумя эллипсами с большими полуосями  $(x; x + \Delta x)$  и расположенными на расстоянии  $(h + \Delta h)$ , если считать электрическое поле близким к плоскопараллельному, из формул (3) и (5) равна

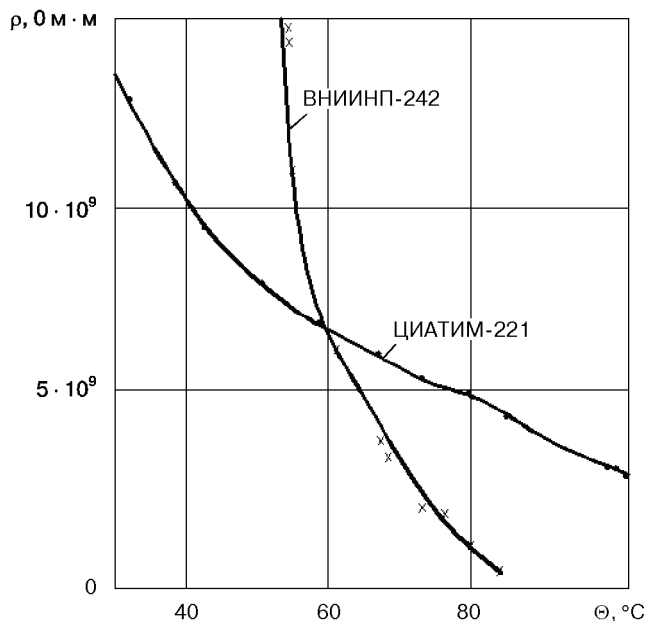
$$\Delta C = \epsilon \cdot k \cdot \pi \cdot \frac{(x + \Delta x)^2 - x^2}{h_0 + \beta \left( x + \frac{\Delta x}{2} \right)^2} \approx 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \epsilon \cdot \frac{x \cdot \Delta x}{h_0 + \beta x^2}.$$

Окончательно для емкости «шарик—кольцо» в области, близкой к точке контакта — точке максимального сближения, при  $x_{\max} = l$  имеем:

$$C \approx \frac{\pi \cdot \varepsilon \cdot k}{\beta} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\beta \cdot l^2}{h_0} \right). \quad (6)$$

В качестве примера рассмотрим подшипник типа 308 со смазкой марки ЦИАТИМ-221, состоящей из основы — полисилоксановой жидкости и загустителя — кальциевого мыла стеариновой и уксусной кислот.

Удельное сопротивление смазки ЦИАТИМ-221 при рабочей температуре 80 °С принимаем равным  $5 \cdot 10^9$  Ом · м (рис. 2). Относительную диэлектрическую проницаемость смазки выбираем равной диэлектрической проницаемости основы этой смазки, т.е. 2,5. Тогда на частоте 100 Гц при расчете по формуле (2) активная проводимость составит менее 2% от емкостной, и ею можно пренебречь. Приращение емкости между кольцами подшипника при уменьшении толщины пленки с 10 до 1 мкм с учетом того, что в контакте находится четыре шарика, по формуле (6) составит около 25 пФ. Моделью этой емкости служила прокладка из конденсаторной бумаги толщиной 10 мкм, установленная в радиальный зазор подшипника между шариками и дорожкой качения. Емкость подшипника с прокладкой под нагрузкой 100 Н составляет 50—60 пФ, что позволяет сделать вывод о возможности применения рассмотренного метода для контроля изменения толщины и сопротивления масляных слоев в подшипниках качения.



**Рис. 2.** Изменение удельного сопротивления смазки ЦИАТИМ-221 и ВНИИНП-242 от температуры

Измерение сопротивления или емкости смазочных слоев в подшипниках электродвигателей имеет ряд особенностей. Подшипники большинства ЭД не изоли-

рованы от корпуса и включены для измерительного тока параллельно. В электродвигателях имеются цепи, шунтирующие подшипники, в виде емкости между статором и ротором. Между концами вала, а также валом и корпусом имеется напряжение, которое в неблагоприятных случаях может вызвать появление подшипниковых токов. Схема замещения электродвигателя приведена на рис. 3. В асинхронных двигателях мощностью 2,2 кВт с частотой вращения 3000 об/мин напряжение  $E_1$  между концами вала составляет 20—30 мВ, напряжение  $E_2$  между валом и корпусом — 1,2—1,5 В, сопротивление  $Z_1$  составляет единицы Ом, сопротивление  $Z_2$  — порядка сотен кОм. Общая емкость «вал-корпус»  $C_{BK}$  находится в пределах 1700—2000 пФ, что значительно превышает емкость между кольцами подшипников  $C_{II}$  (рис. 4).

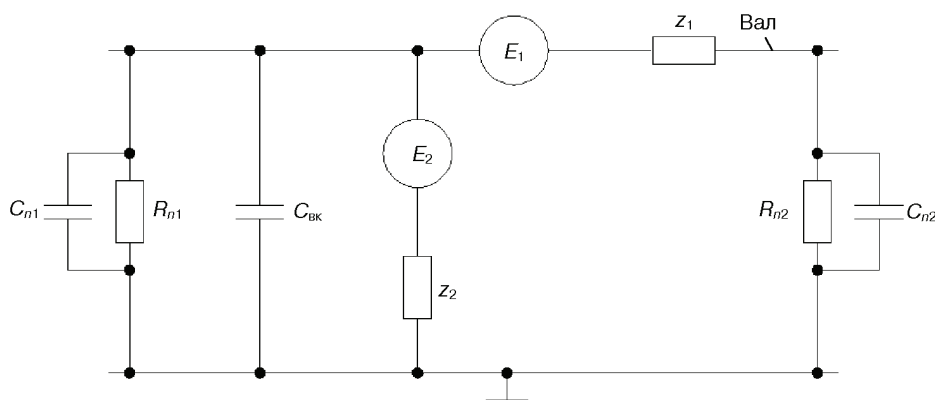


Рис. 3. Схема замещения «вал-корпус» электродвигателя

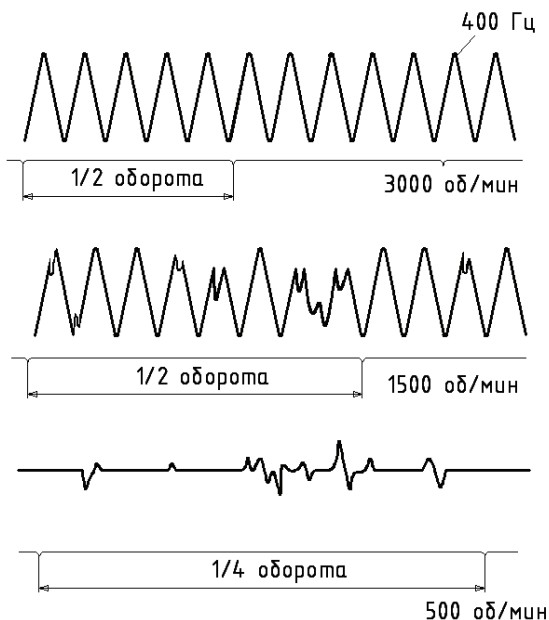


Рис. 4. Нарушение гидродинамического режима смазки подшипников электродвигателя при уменьшениях частоты вращения с 3000 об/мин до 500 об/мин

В связи с этим для проведения измерений толщины смазочных слоев этим методом наружное кольцо подшипника изолировалось от корпуса. Кроме того, для предотвращения пробоя масляных слоев переменное напряжение, подаваемое от генератора на подшипники, не превышало 100 мВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Горбунов А.Г., Савченкова Л.В. Малошумные электровентильаторы на подшипниках качения // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2001. — № 2. — С. 92—94.
- [2] Савченкова Л.В. Методика обработки вибрационных характеристик при диагностике электрических машин // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2001. — № 1. — С. 86—87.

### EXPERIMENTAL STUDIES OF FRICTION MODES OF BEARING NODES WITH PLASTICIZED LUBRICANTS

**L.V. Savchenkova**

Moscow State Open University n.a. V.S. Chernomirdin  
*P. Corchagina Str., 21, Moscow, Russia, 129626*

The matter of the paper is experimental studies of friction modes of bearing nodes with plasticized lubricants by method of measuring the capacities of lubricant films.

**Key words:** experiment, bearing, lubricant.