

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТА КАЧЕНИЯ РОЛИКОПОДШИПНИКА КАК АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА МОДЕЛИ ОПОРЫ РОТОРНОЙ МАШИНЫ

Воронцов А.Г., канд. техн. наук, доц.,  
Донецкий государственный технический университет

*Получено математическое описание процесса формирования силы, возбуждающей высокочастотную вибрацию в контакте ролика и обоймы роликоподшипника, представленных шероховатыми цилиндрами. Приведены зависимости для результирующего спектра возбуждающей силы как функции режимных и конструктивных параметров подшипника.*

*The mathematical description of high frequency excitation force producing process in contact roll and ring elements of bearing is made. Last one as rough cylinders are presented. Expressions for average spectrum of excitation force as function of mode and construction bearing parameters are adduced*

В [1] изложены результаты разработки модели опоры качения как датчика относительных изменений воспринимаемой ею нагрузки. Модель построена на основе метода электромеханических аналогий и предполагает известными характеристики первичного силового воздействия, возникающего в контакте трения качения и возбуждающего высокочастотную вибрацию. Данная работа направлена на развитие предложенной в [1] модели и посвящена получению математического описания процесса формирования силы, возбуждающей высокочастотную вибрацию в контакте качения роликоподшипника.

Если рассматривать ролик и обойму роликоподшипника как два абсолютно гладких цилиндрических тела, сжимаемых статической силой  $P_k$ , то площадку контакта можно считать прямоугольной, а распределение напряжений в контакте равномерным вдоль осей цилиндров и косинусоидальным – по направлению вектора скорости качения [2,3]. Масляная пленка в контакте имеет значительно меньшую толщину, чем деформации контактирующих тел и не влияет на распределение усилий в контакте [4]. При идеальной форме тел качения, их перекатывание не приводит к изменению картины распределения

напряжений и сил в контактной зоне, причина возникновения вибрации отсутствует.

В действительности поверхности тел качения несовершенны и имеют волнистость и микронеровности [5]. Микровыступы на поверхностях шероховатых тел качения в общем случае имеют разную высоту, поэтому при вступлении поверхностей во взаимодействие первоначально контактируют более высокие микронеровности. По мере их продвижения к центру пятна контакта происходит деформация поверхностных слоев шероховатых тел и в контакт вступают новые микровыступы, имеющие меньшую высоту. Деформация микровыступов сопровождается локальными нарушениями в картине статического распределения напряжений в околосконтактных слоях тел качения и возбуждением упругих волн напряжения в них.

С учетом косинусоидального закона распределения давления в контактной зоне и линейной зависимости числа контактирующих микровыступов от давления [5] среднее количество микроконтактов на единицу площади (средняя плотность контактирования) определится как

$$n(P_0, y) = P_0 C_n \cos \frac{\pi}{2b} y,$$

где  $P_0$  – давление в центре контактной зоны;

$2b$  – протяженность контакта в направлении качения;

$y$  – координата центра элементарной площадки по направлению вектора скорости качения ( $-b < y < b$ ).

Продифференцировав  $n_0(P_0, y)$  по  $y$ , получим скорость изменения плотности контактирования от координаты  $y$

$$n_0(P_0, y) = \frac{\partial}{\partial y} n(P_0, y) = -\frac{\pi}{2b} P_0 C_n \sin \frac{\pi}{2b} y.$$

Задав в окрестности выбранного значения координаты  $y = y_j$  ( $-b < y_j < 0$ ), площадку малой ширины  $\Delta y$ , определим количество микроконтактов вступивших во взаимодействие на этой площадке

$$\Delta n(P_0, y_j) = n_0(P_0, y_j) \Delta y l = -\Delta y l \frac{\pi C_n P_0}{2b} \sin \frac{\pi}{2b} y_j, \quad (1)$$

где  $l$  – длина ролика.

Поскольку сила деформации каждого микровыступа при прохождении его через пятно контакта изменяется незначительно [5], каждый микровыступ формирует силовой импульс, близкий к прямоугольному.

Для малых значений  $\Delta y \ll y_j$ , что справедливо почти везде на интервале  $(-b; b)$  кроме окрестности точки  $y = 0$ , где  $n_0(P_0, y = 0) = 0$ , может быть определена длительность силового импульса, формируемого микроконтактом, возникающим при  $y = y_j$  и исчезающим при  $y = -y_j$

$$t_j = \frac{2y_j}{v} = \frac{4y_j}{D_s \omega_s}, \quad (2)$$

где  $v = \frac{D_s \omega_s}{2}$  - линейная скорость качения;  $D_s > 0$  - диаметр тела качения;  $\omega_s > 0$  - угловая скорость тела качения.

Комплексный спектр для эквивалентного силового импульса прямоугольной формы, сформированного на  $j$ -ой элементарной площадке ( $\Delta s = \Delta y l$ ) с координатой  $y_j$  может быть представлен в виде

$$S(\omega, y_j) = q_0 \frac{2 \sin \frac{2\omega y_j}{D_s \omega_s}}{\omega}, \quad (3)$$

где  $q_0$  - средняя амплитуда силового импульса деформирующего микровыступ.

Результирующий спектр, связанный с контактированием микро-неровностей на  $j$ -ой элементарной площадке, равен

$$S_{\Delta y}(\omega, y_j, P_0) = \Delta n(P_0, y_j) S(\omega, y_j). \quad (4)$$

Для нахождения результирующего спектра всех импульсов, возникающих на участке  $(-b; 0)$  зоны контакта, просуммируем спектры импульсов для всех элементарных площадок контактной зоны, пронумеровав их от  $j = 1$  до  $j = J = \text{int} \frac{b}{\Delta y}$ . С учетом (1), (3) и (4), полу-

чим

$$S_{\Sigma}(\omega, P_0) = \sum_{j=1}^J \left( -l \frac{C_n P_0 \pi}{2b} \sin \frac{\pi}{2b} y_j \right) \left( \frac{2q_0}{\omega} \sin \frac{2\omega y_j}{D_s \omega_s} \right) \Delta y.$$

При  $\Delta y \rightarrow 0$  конечная сумма переходит в интеграл

$$S_{\Sigma}(\omega, P_0) = \int_{-b}^0 \left( -l \frac{C_n P_0 \pi}{2b} \frac{2q_0}{\omega} \right) \left( \sin \frac{\pi}{2b} y \right) \left( \sin \frac{2\omega y}{D_s \omega_s} \right) dy =$$

$$= \frac{8C_n P_0 q_0}{\pi D_\epsilon \omega_\epsilon} \frac{1}{1 - \frac{16b^2 \omega^2}{\pi^2 D_\epsilon^2 \omega_\epsilon^2}} \cos \frac{2}{D_\epsilon \omega_\epsilon} \omega b. \quad (5)$$

Учтем что, ширина зоны контактирования  $b$  является функцией, приложенной к контакту силы  $P_\kappa$  [2]

$$b = C_\epsilon P_\kappa^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

где  $P_\kappa = l \int_{-b}^b P(y) dy = l \int_{-b}^b P_0 \left( \cos \frac{\pi}{2b} y \right) dy = \frac{4blP_0}{\pi},$

$C_\epsilon$  - постоянная величина, зависящая от диаметров контактирующих тел и модуля упругости материала [2].

С учетом (6) из выражения (5) можно получить спектр амплитуд силового возмущения

$$S_\Sigma(S_0, \varphi) = S_0 \left| \frac{\cos \varphi}{1 - \left( \frac{2}{\pi} \right)^2 \varphi^2} \right|, \quad (7)$$

где

$$S_0 = \frac{2C_n q_0 P_\kappa^{\frac{2}{3}}}{D_\epsilon \omega_\epsilon l C_\epsilon} \quad (8)$$

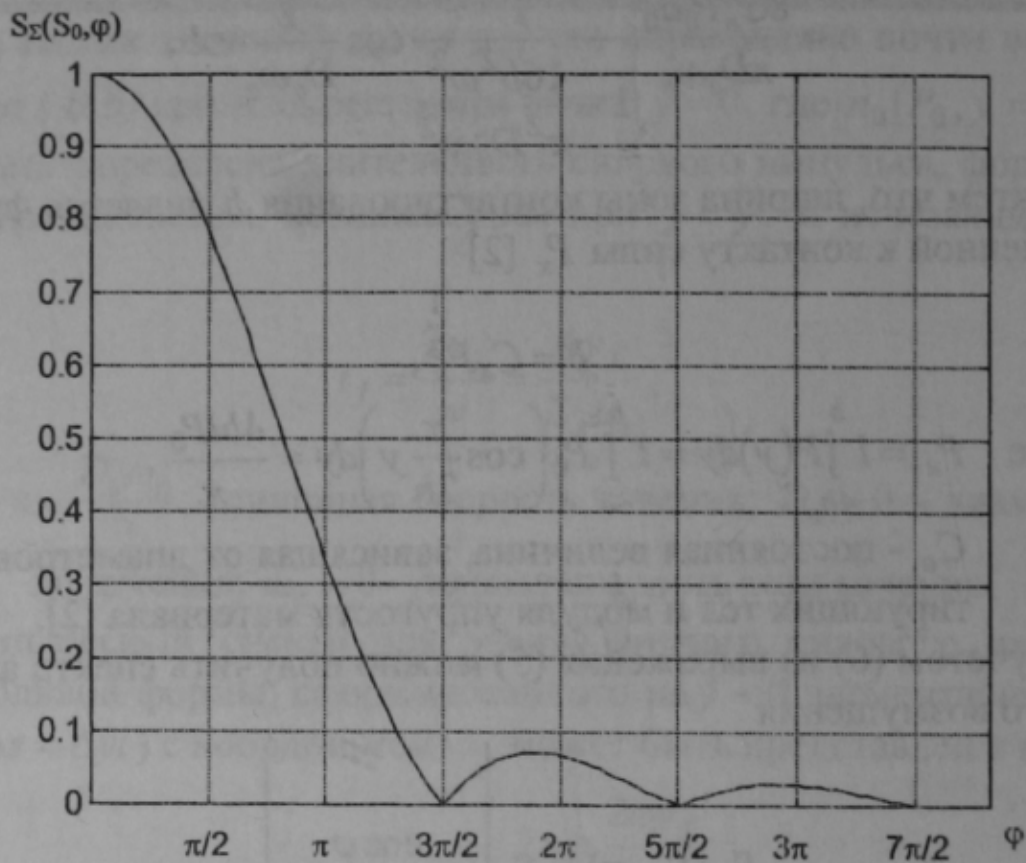
постоянная составляющая спектра возмущающей силы;

$$\varphi = \frac{2C_\epsilon P_\kappa^{\frac{1}{3}}}{D_\epsilon \omega_\epsilon} \omega \quad (9)$$

нормированная частота.

График зависимости  $S_\Sigma(S_0, \varphi)$  приведен на рис. 1.

Характерные точки графика  $S_0 \sim \omega = \varphi = 0$  - (постоянная составляющая в спектре возбуждения) и  $\omega = \omega_1 \sim \varphi = \frac{3}{2} \pi$  (первый минимум зависимости) являются функциями приложенной контактной нагрузки.

Рисунок 1 - Графік залежності  $S_{\Sigma}(S_0, \varphi)$  при  $S_0 = 1$ 

$$\omega_1(P_k) = \frac{3}{4} \frac{\pi D_v \omega_v}{C_v} P_k^{\frac{1}{3}} = A_{\omega} P_k^{\frac{1}{3}}, \quad (10)$$

$$S_0(P_k) = \frac{2C_n q_0 P_k^{\frac{2}{3}}}{D_v \omega_v l C_v} = A_S P_k^{\frac{2}{3}}. \quad (11)$$

Анализ полученных зависимостей (7-11), позволяет установить что:

1. Высокочастотная граница существенной области спектра возбуждающей силы находится в пропорциональной зависимости от линейной скорости качения ( $v = \frac{D_v \omega_v}{2}$ ) и изменяется по закону степени  $-\frac{1}{3}$  от приложенной к контакту нагрузки;
2. Спектральная плотность возбуждающей силы в области низких частот изменяется по закону степени  $\frac{2}{3}$  в зависимости от нагрузки на контакт;

3. С повышением линейной скорости качения происходит перераспределение энергии также за счет снижения уровней низкочастотных компонент вибрации по закону  $\frac{1}{v}$ .

### Заклучение

Нагруженный контакт трения качения роликоподшипника работает как активный нелинейный преобразователь приложенной к нему нагрузки в параметры спектра силы, возбуждающей вибрации в контактирующих телах. Зависимости, описывающие характеристики такого преобразователя, однозначны для ограниченной области изменения параметров, хотя и нелинейны. Вид нелинейности таков, что увеличение нагрузки на контакт приводит к увеличению уровня низкочастотных компонент и уменьшению высокочастотных.

Полученные зависимости позволяют уточнить модель опоры качения как датчика относительных изменений приложенной к ней нагрузки и на этой основе усовершенствовать алгоритмы обработки виброметрической информации в системах виброакустической диагностики машин.

### Список источников

1. Воронцов А.Г. Разработка модели для исследования преобразовательных свойств опоры качения как датчика воспринимаемой ею нагрузки// Наукові праці Донецького державного технічного університету. -Випуск 16.-Серія. – Гірничо – електромеханічна.- . Донецьк.: ДонДТУ, 2000.- С.47 – 54.
2. Галахов М.А., Гусятников П.Б, Новиков А.П. Математические модели контактной гидродинамики. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. – 296 с.
3. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
4. Кельзон А.С., Цимлянский Ю.П., Яковлев В.И. Динамика роторов в упругих средах. – М.: Наука, 1982.- 280 с.
5. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 302 с.