

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ УПРУГОЙ ОПОРЫ КАЧЕНИЯ В ДЕМПФЕРЕ СО СДАВЛИВАЕМОЙ ПЛЕНКОЙ И НЕОДНОРОДНОЙ ПОРИСТОЙ ОБОЙМОЙ С УЧЕТОМ ПОДАЧИ СМАЗКИ

ANALYTICAL PREDICTION TRANSFER COEFFICIENT OF THE ELASTIC SUPPORT ROLLING WITH DAMPER COMPRESSES FILM AND INHOMOGENEOUS POROUS STRIPS IN VIEW OF OIL SUPPLY

Задорожная Н.С., Елманов И.М., Поляков Е.В., Мукутадзе А.М.

(РГУПС, г. Ростов-на-Дону, РФ)

Zadorozhnaya N.S., Elmanov I.M., Polyakov E.V., Mukutadze A.M.

(Rostov State Transport University)

В работе аналитически прогнозируются передаточные характеристики центрально нагруженного демпфера со сдавливаемой пленкой и неоднородной двухслойной пористой обоймой при наличии источника смазки. Дана оценка влияния значений отношения проницаемостей слоев, характера подачи смазки, а также параметра, характеризующего изменение проницаемостей пористых слоев в осевом направлении, на эффективность ослабления передаваемых усилий дисбаланса по сравнению с демпферами со сплошной обоймой.

In this paper we analytically predicted transmission characteristics of centrally loaded damper compresses with a two-layer film and heterogeneous porous collar in presence of lubricant. The influence of the values of the permeation layer, nature lubrication, as well as the parameter characterizing the change in permeability of porous layers in the axial direction, the effectiveness of reducing transmitted forces imbalance compared with dampers with continuous clip.

Ключевые слова: аналитическое прогнозирование; коэффициент передачи; пористая обойма

Key words: analytical forecasting; transfer coefficient; porous clip

Аналитическому исследованию передаточных характеристик центрально нагруженного демпфера со сдавливаемой пленкой и пористой обоймой, в котором установлен подшипник качения, посвящены работы [1,2,3].

Существенным недостатком предложенных в этих работах расчетных моделей является то, что проницаемости пористых слоев считаются постоянными и, кроме того, не учитывается влияние источника смазки. Решение рассматриваемой задачи, с учетом анизотропии проницаемости пористого слоя, а также наличия источника смазки, приведено в работе [4]. В ней рассматривается случай, когда пористая втулка является однослойной, а проницаемость изменяется в радиальном направлении. Целью данного исследования является обобщение приведенного в работе [4] решения для случая двухслойной по-

ристой обоймы с проницаемостью, изменяющейся в осевом направлении по нормальному закону (рис. 1).

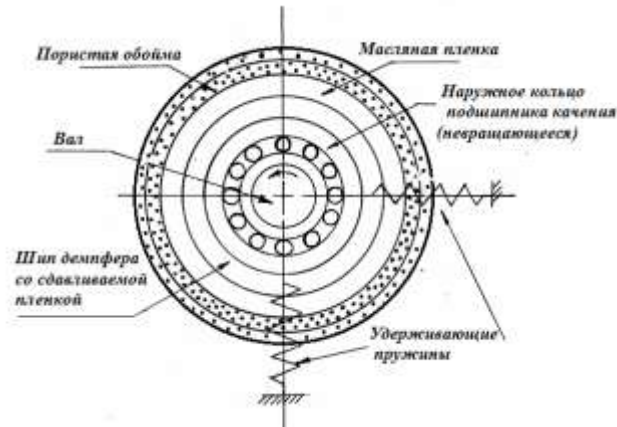


Рисунок 1 - Схематическое изображение демпфера со сдвливаемой пленкой и двухслойной пористой обоймой

Уравнения движения ротора в направлениях r и t (рис. 1) могут быть записаны, соответственно, в виде [3]

$$m \left[\frac{d^2 e}{dt^2} - e \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \right] = F_r - [W - K_Y (Y + \delta_Y)] \sin \varphi - K_X (X + \delta_X) \cos \varphi + \omega^2 \cos(\varphi - \omega t), \quad (1)$$

$$m \left[e \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2 \left(\frac{de}{dt} \right) \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) \right] = F_t - [W - K_Y (Y + \delta_Y)] \cos \varphi + K_X (X + \delta_X) \sin \varphi - u \omega^2 \sin(\varphi - \omega t). \quad (2)$$

Здесь m – масса ротора, приходящаяся на подшипник, кг; e – эксцентриситет, м; φ – угол между линиями центров и положительным направлением оси x , отсчитываемой против часовой стрелки, рад; F_t – составляющая усилия пленки, нормальная к линии центров, Н; F_r – составляющая усилия пленки вдоль линии центров, Н; W – вес ротора, приходящийся на подшипник, Н; K_X , K_Y – жесткость пружин, удерживающих подшипник в направлении X и Y , соответственно, Н/м; δ_X , δ_Y – начальные смещения удерживающих пружин, соответственно, в направлениях X и Y , м; ω – угловая частота ротора, рад/с; t – время, с; C – радиальный зазор в демпфере, $\varepsilon = \frac{e}{C}$ – относительный эксцентриситет; u – момент дисбаланса, Н · с².

Замечая, что $X = e \cos \varphi$ и $Y = e \sin \varphi$, переписываем уравнения (1) и (2), соответственно, в виде

$$m \left[\frac{d^2 e}{dt^2} - e \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \right] = F_r - [W + K_Y (e \sin \varphi - \delta_Y)] \sin \varphi - K_X (e \cos \varphi + \delta_X) \cos \varphi + u \omega^2 \cos(\varphi - \omega t), \quad (3)$$

$$m \left[e \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2 \left(\frac{de}{dt} \right) \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) \right] = F_t - [W + K_Y (e \sin \varphi - \delta_Y)] \cos \varphi + \\ + K_X (e \cos \varphi + \delta_X) \sin \varphi - u \omega^2 \sin(\varphi - \omega t). \quad (4)$$

Примем, что нагрузка W не вращается и направлена, как показано на рис. 2. Тогда условие центральной пригрузки демпфера со сдвливаемой пленкой требует $\delta_x = 0$ и $\delta_y = \frac{W}{K_Y}$. Полагая $K_x = K_y = K$, $T = \omega_r \cdot t$, можно представить уравнения (3) и (4) следующим образом

$$\ddot{\varepsilon} - \varepsilon \dot{\varphi}^2 = \frac{F_r}{mC\omega_r^2} - \frac{K_\varepsilon}{m\omega_r^2} + \frac{u}{mC} \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^2 \cos \left[\varphi - \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right) T \right], \quad (5)$$

$$\ddot{\varepsilon} + 2\dot{\varepsilon}\dot{\varphi} = \frac{F_t}{mC\omega_r^2} - \frac{u}{mC} \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^2 \sin \left[\varphi - \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right) T \right], \quad (6)$$

где точкой обозначено дифференцирование по T .

Силы F_r и F_t получаются интегрированием давления масляной пленки по площади обоймы, соответственно, в направлениях r и t . Для определения давления масляной пленки нужно решить уравнение для давлений в пористых слоях обоймы и в пленке и согласовать решение вдоль общей поверхности раздела.

Рассмотрим кратко уравнения, определяющие давления, и их решения при следующих допущениях. Силы F_r и F_t определяются при следующей постановке задачи.

Постановка задачи. Рассматривается неустановившееся течение вязкой несжимаемой жидкости в зазоре радиального двухслойного пористого подшипника конечной длины. Подшипник с двухслойным пористым слоем переменной проницаемости в осевом направлении считается неподвижным, а движение вала считается известным.

Проницаемости пористых слоев задаются следующими зависимостями

$$k_i' = k_i e^{\varphi \left(\frac{z}{L} \right)}, \quad i = 1, 2. \quad (7)$$

Здесь k_i' - проницаемости пористых слоев; k_i - характерные проницаемости; $\varphi \left(\frac{z}{L} \right)$ - известная безразмерная функция z ; L - длина подшипника.

Уравнения, определяющие течение смазки в пористых слоях, представляются в виде

$$\frac{\partial^2 p_i^*}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p_i^*}{\partial z^2} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{\partial p_i^*}{\partial z} = 0, \quad i = 1, 2, \quad (8)$$

где y, z - прямоугольные координаты (рис. 2); p_i^* - гидродинамическое давление в пористых слоях.

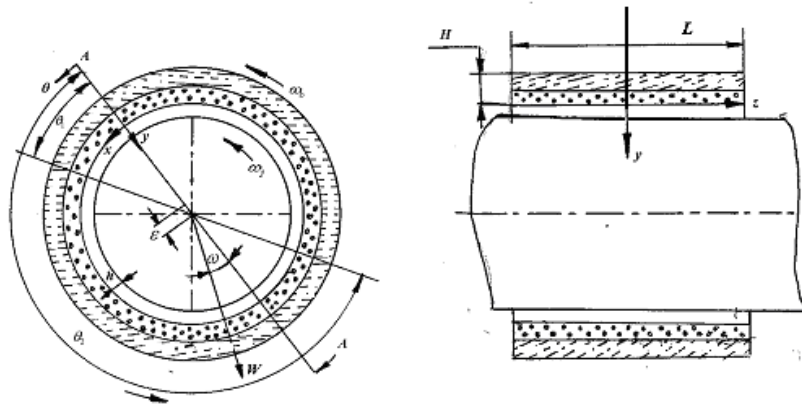


Рисунок 2- Радиальный подшипник конечной длины с двухслойной пористой обоймой при подаче смазки перпендикулярно оси подшипника

Для определения давления в зазоре радиального подшипника (между шипом и подшипником) будем исходить из модифицированного уравнения Рейнольдса

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \varepsilon \mu \left(\left(\omega_b + \omega_j - 2\omega_L - 2 \frac{d\varphi}{dt} \right) \frac{dh}{d\theta} + 2 \frac{de}{dt} \cos \theta \right) - 12 \mu v_0 \Big|_{y=0}, \quad (9)$$

где $h = C(1 + \varepsilon \cos \theta)$ – толщина пленки смазки, C – радиальный зазор, ε – относительный эксцентриситет, θ – угловая координата, p – давление в пленке смазки, μ – динамический коэффициент вязкости, $\omega_b, \omega_j, \omega_L$ – угловые скорости соответственно подшипника, шипа и нагрузки, φ – угол положения, t – время, v_0 – компонента скорости в направлении y на внутренней границе пористого слоя, прилегающая к зазору:

$$v_i = - \frac{k_i}{\mu} \left(\frac{\partial p^*}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} \cdot e^{\varphi \left(\frac{z}{L} \right)}. \quad (10)$$

Система уравнений (8)-(9) в случае подачи смазки через поры внешнего пористого слоя в направлении оси Oy решается при граничных условиях (рис. 2).

$$\begin{aligned} p_1^* &= p \text{ при } y = 0; \quad p_2^* = p_g \text{ при } y = -H; \\ p_2^* &= p_1^* = p = p_a \text{ при } z = \pm \frac{L}{2}; \\ p_1^* &= p_2^*; \quad k_1 \frac{\partial p_1^*}{\partial y} = k_2 \frac{\partial p_2^*}{\partial y} \text{ при } y = -H_1; \end{aligned} \quad (11)$$

где p_g – давление подачи смазки; p_a – атмосферное давление; H_1 – толщина пористого слоя, прилегающего к смазочному слою; H – толщина двухслойного пористого слоя.

В случае подачи смазки в осевом направлении граничные условия запишутся в следующем виде (рис. 2)

$$p_1^* = p \text{ при } y = 0; \quad \frac{\partial p_2^*}{\partial y} = 0 \text{ при } y = -H; \quad p_1^* = p_2^*, \quad k_1 \frac{\partial p_1^*}{\partial y} = k_2 \frac{\partial p_2^*}{\partial y} \text{ при } y = -H_1;$$

$$p_i^* = p = p_H \quad \text{при} \quad z = -L/2; \quad p^* = p = p_K \quad \text{при} \quad z = L/2.$$

(12)

Здесь p_H – давление в начальном сечении; p_K – в конечном сечении.

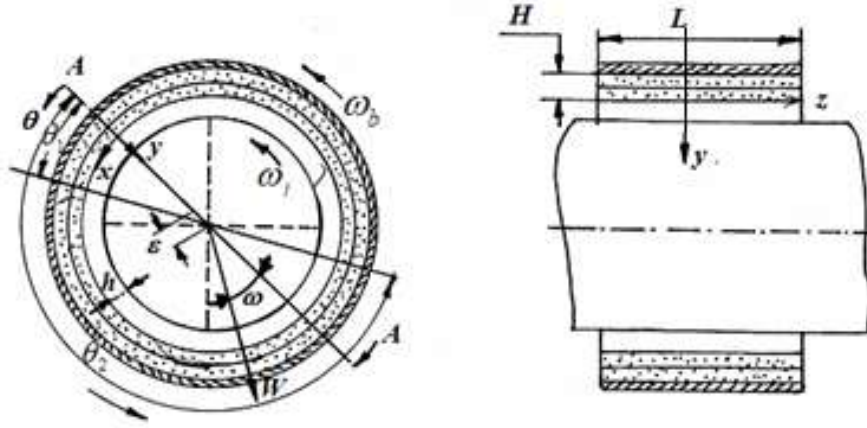


Рисунок 3- Радиальный подшипник конечной длины с двухслойной пористой обоймой при осевой подаче смазки

Давление в пористых слоях и в смазочном слое определяется по методике, предложенной в работе [5]. В результате для определения F_r и F_t получаются аналитические выражения, существенно зависящие от отношения проницаемости пористых слоев и от способа подачи смазки.

С учетом найденных выражений для F_r и F_t вводятся обозначения

$$B = \frac{\mu R^3 L}{2m\omega_r C^3}, \quad U = \frac{u}{mC}, \quad \omega_s = \sqrt{K/m},$$

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{\omega_r}, \quad \Omega = \frac{\omega_j}{\omega_r}, \quad \beta = \varphi - \Omega T, \quad (13)$$

где B – параметр демпфера; U – безразмерный дисбаланс; ω_s – собственная частота ротора; Ω_s – безразмерная собственная частота; Ω – безразмерная рабочая угловая скорость.

Уравнения (5) и (6), с учетом (13), описывающие нестационарное движение шипа, решаются численно методом, предложенным в работе. [5].

Коэффициент передачи определяется как отношение модуля силы, передаваемой на корпус (за вычетом пригрузки), к модулю силы дисбаланса. При жестком опирании, коэффициент передачи равен единице. При некоторых условиях работы демпфер со сдвигаемой пленкой может даже усиливать действие силы дисбаланса. Поэтому важно определить рабочий режим и проницаемость обоймы, которые приводили бы к ослаблению передаваемого усилия.

Пусть i и j – единичные векторы, соответственно, в направлениях X и Y . Согласно рис. 1, силу F_{mp} , передаваемую на корпус, можно записать в виде

$$F_{mp} = (-K_x X + F_r \cos \varphi - F_t \sin \varphi)i + (-K_y Y - F_r \sin \varphi - F_t \cos \varphi)j. \quad (14)$$

Учитывая, что $X = e \cos \varphi$, $Y = -e \sin \varphi$, $K_x = K_y = K$, получаем

$$F_{mp} = (-Ke \cos \varphi + F_r \cos \varphi - F_t \sin \varphi)i + (Ke \sin \varphi - F_r \sin \varphi - F_t \cos \varphi)j. \quad (15)$$

Извлекая квадратный корень из суммы квадратов составляющих F_{mp} , получим модуль передаваемого усилия

$$|F_{mp}| = [(F_r - Ke)^2 + F_t^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Поскольку модуль дисбаланса равен $u\omega^2$, то коэффициент передачи T_r

равен
$$T_r = \frac{|F_{mp}|}{u\omega^2} = \frac{[(F_r - Ke)^2 + F_t^2]^{\frac{1}{2}}}{u\omega^2}. \quad (17)$$

Полагая в формулах для F_r и F_t $\varepsilon = 0, \dot{\varphi} = 0$, получим стационарные значения F_r и F_t при установившемся движении в случае подачи смазки, соответственно, в направлении оси Oy и при осевой подаче.

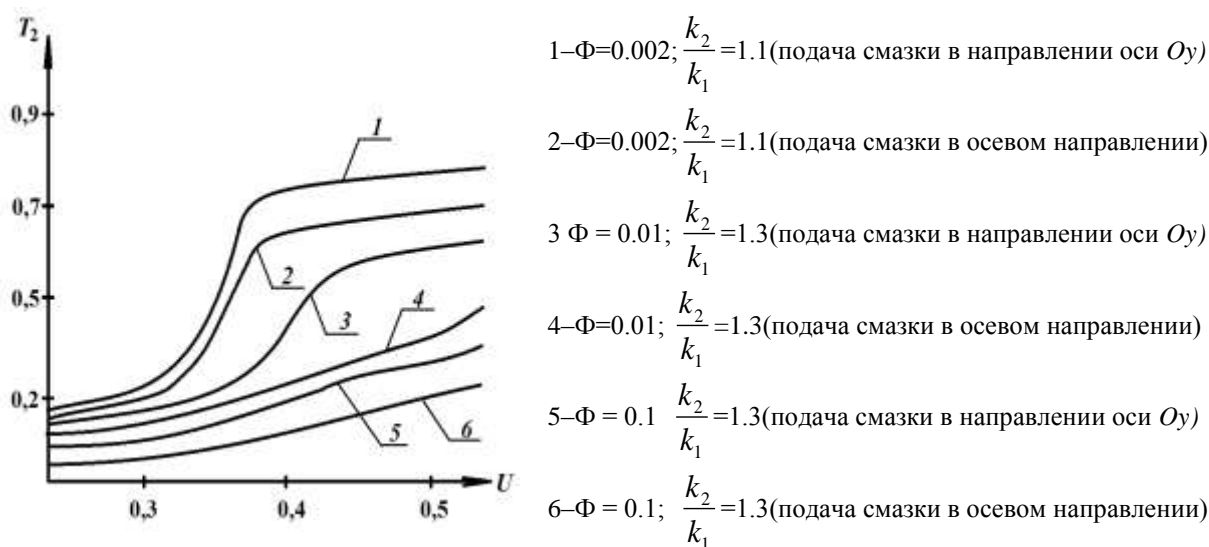


Рисунок 4- Зависимость стационарного коэффициента передачи от эксцентриситета дисбаланса ($B = 0,12, \Omega = 1, H/L = 0,1, \Phi = \frac{k_1 H}{L}$)

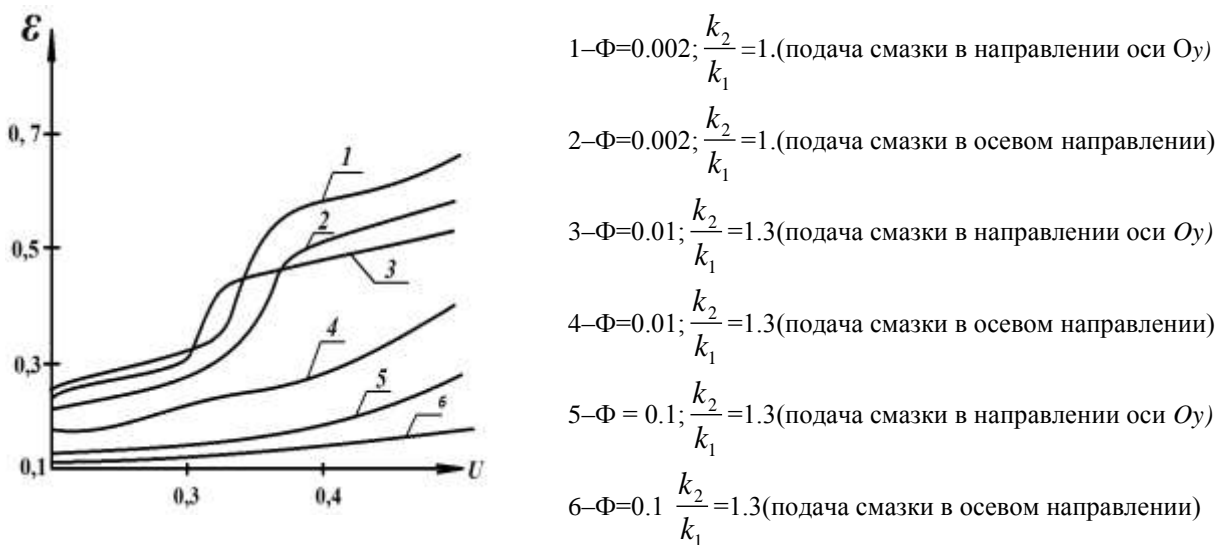


Рисунок 5- Зависимость стационарного эксцентриситета демпфера от эксцентриситета дисбаланса

Результаты численного анализа, приведенные на рис. 4-5, показывают, что:

1. Увеличение проницаемости пористой обоймы, прилегающей к смазочному слою, двигает вправо скачок в этой зависимости. В случае, когда $\frac{k_1}{k_2} > 1$, то, как при осевой подаче смазки, так и при подаче перпендикулярно

оси, значение скачка меньше, чем при $\frac{k_2}{k_1} = 1$.

2. Из зависимости стационарного относительного эксцентриситета от эксцентриситета дисбаланса следует, что относительный эксцентриситет двухслойных пористых демпферов меньше, чем у сплошных и однослойных пористых демпферов, особенно при учете влияния характера подачи смазки и анизотропии проницаемости в осевом направлении.

Список используемых источников

1. Конри, Кузано. Об устойчивости пористых радиальных подшипников // Конструирование и технология машиностроения.-1974. -№ 2.- С. 206-216.

2. Ахвердиев К.С., Муленко О.В. Об устойчивости двухслойных пористых радиальных подшипников // Вестник РГУПС 2002.- № 3. – С. 5-7

3. Кузано К., Фанк. Исследование коэффициента передачи упругой опоры качения в демпфере со сдавливаемой пленкой и пористой обоймой // Проблемы трения и смазки. -№ 1, 1974. -С.54.

4. Ахвердиев К.С., Задорожная Н.С., Мукутадзе М.А., Флек Б.М.. Аналитическое прогнозирование передаточных характеристик центрально нагруженного демпфера со сдавливаемой пленкой и пористой обоймой с учетом влияния анизотропии проницаемости пористого слоя и источника смазки // Вестник РГУПС, № 4 (52), Ростов-на-Дону, 2013. - С.131-142.

5. Gear C.W., Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs N.J., 1972