Список используемой литературы:

1. Анисимов Е.Ф., Королев В.В., Иванов Е.Б. Точность мерного реза на летучих ножницах с электрическим выравниванием скоростей Accuracy of measuring cut at flying shears with electric equalization of speeds Металлург. 2011. № 10. С. 87-88.

2. Anisimov E.F., Korolev V.V., Ivanov E.B. Accuracy of cutting metal to measured lengths on flying shears with electrical equalization of speeds Metallurgist. 2012. Т. 55. № 9-10. С. 758-760.

УДК 51 : 621 : 891

К.С.Ахвердиев, Н.С.Задорожная, Е.В.Поляков
ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный
университет путей сообщения»

МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ УПРУГОЙ ОПОРЫ КАЧЕНИЯ В ДЕМПФЕРЕ СО СДАВЛИВАЕМОЙ ПЛЕНКОЙ И НЕОДНОРОДНОЙ ОБОЙМОЙ С УЧЕТОМ КОМБИНИРОВАННОЙ ПОДАЧИ СМАЗКИ

Исследованию передаточных характеристик центрально нагруженного демпфера со сдавливаемой пленкой и пористой обоймой, в котором установлен подшипник качения, посвящена работа [1]. Основной недостаток этой работы заключается в том, что в приведенной расчетной модели проницаемость пористого слоя считается постоянной и, кроме того, не учитывается влияние источника подачи смазки. Обобщение рассмотренной в [1] задачи дается в работе [2], где отдельно рассматриваются случаи подачи смазки в осевом и перпендикулярном оси направлениях, а анизотропия проницаемости пористого слоя учитывается в осевом направлении. В настоящей работе решение задача, рассмотренной в [2], приводится для случая комбинированной подачи смазки, т.е. одновременно как в осевом, так и в перпендикулярном оси, направлениях. Кроме того, здесь учитывается влияние анизотропии проницаемости пористого слоя в осевом и радиальном направлениях.

Уравнения движения ротора в направлениях *r* и *t* (рис.1 и рис. 2) могут быть записаны, соответственно, в виде [2]

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

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

Здесь m – масса ротора, приходящаяся на подшипник, кг; e – эксцентриситет, м; $\varphi-$ 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, $Н \cdot c^2$.

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

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

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

Примем, что нагрузка W не вращается и направлена, как показано на

рис. 2. Тогда условие центральной пригрузки демпфера со сдавливаемой 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

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

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

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 уравнения для давлений в пористой обойме и в пленке и согласовать решение вдоль общей поверхности раздела. Силы F_r и F_t определяются по методике, предложенной в работе [2], при следующей постановке задачи.

Постановка задачи. Рассматривается неустановившееся течение вязкой несжимаемой жидкости в зазоре пористого радиального подшипника конечной длины. Подшипник с неоднородным пористым слоем считается неподвижным, а движение вала считается заданным. Проницаемость пористого слоя задается следующей зависимостью

$$k' = A_0 e^{k_1\left(\frac{z}{L}\right)\cdot\frac{y}{H}} \tag{7}$$

Здесь A_0 - заданная постоянная величина, $k_1\left(\frac{z}{L}\right)$- известная безразмерная функция, L – длина подшипника, H - толщина пористого слоя.

В дальнейшем будем считать, что на поверхности $y=-H$ проницаемость пористого слоя в направлении оси z меняется по нормальному закону, а комбинированная подача смазки осуществляется как в осевом, так и перпендикулярном оси направлениях (рис. 1).

Уравнение, определяющее течение смазки в пористой матрице, представляется в виде

$$\frac{\partial^2 p^*}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p^*}{\partial z^2} + k_1\left(\frac{z}{L}\right)\frac{1}{H}\frac{\partial p^*}{\partial y} + \frac{y}{H}\frac{\partial p^*}{\partial z}\frac{\partial k_1}{\partial z} = 0, \quad (8)$$

где *y, z* - прямоугольные координаты, p^* - гидродинамическое давление в пористом слое.

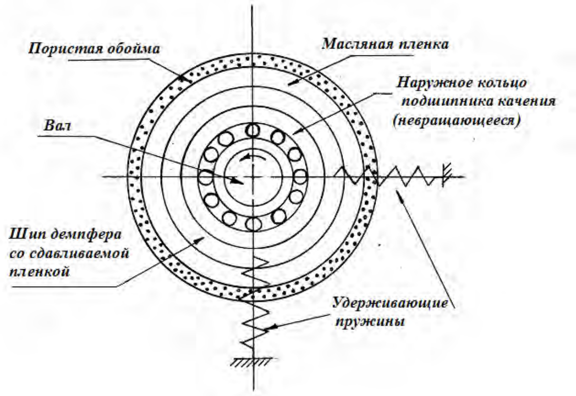


Рис. 1. Схема демпфера со сдавливаемой пленкой и пористой обоймой.

Для определения распределения давления в пленке смазки между шипом и подшипником будем исходить из модифицированного уравнения Рейнольдса в рамках модели короткого подшипника [1].

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

где $h = C(1+\varepsilon\cos\theta)$ - толщина пленки смазки, C – радиальный зазор, $\varepsilon = \frac{e}{C}$ - относительный эксцентриситет, e – 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 Oy на внутренней границе пористого слоя, прилегающая к зазору:

$$v_0 = -\frac{k'}{\mu}\left(\frac{\partial p^*}{\partial y}\right)\Bigg|_{y=0}, \quad (10)$$

где k' – проницаемость материала пористого слоя.

Система уравнений (8)-(10) в случае подачи смазки через поры пористого слоя в направлении оси Oy решается при граничных условиях (рис. 2)

$$p^* = p \text{ при } y=0; \quad p^* = p_g \text{ при } y=-H;$$

$$p^* = p = p_H \text{ при } z = -\frac{L}{2}; \quad p^* = p = p_K \text{ при } z = \frac{L}{2} \quad (11)$$

где p_g - давление подачи смазки, p_H - давление в начальном сечении, p_K - давление в конечном сечении.

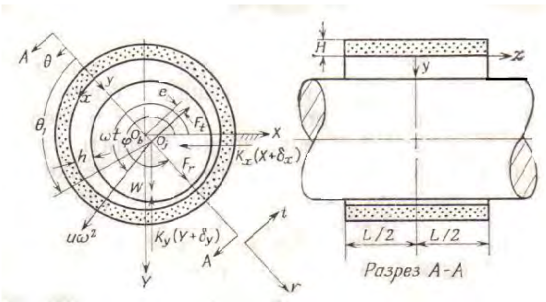


Рис. 2. Радиальный подшипник конечной длины с пористой обоймой.

В результате найдено поле скоростей и давлений в смазочном слое и в пористой обойме и получены аналитические выражения для составляющих усилий масляной пленки вдоль линии центров (F_r и F_t). С учетом найденных выражений для F_r и F_t вводятся следующие обозначения

$$B = \frac{\mu R^3 L}{2m\omega_r C^3}, \quad U = \frac{u}{mC}, \quad \omega_s = \sqrt{K/m}, \quad \Omega_s = \frac{\omega_s}{\omega_r}, \quad \Omega = \frac{\omega_j}{\omega_r}, \quad \beta = \varphi - \Omega T, \qquad (12)$$

где B – параметр демпфера; U – безразмерный дисбаланс; ω_s - собственная частота ротора на удерживающей пружине; Ω_s - безразмерная собственная частота; Ω - безразмерная рабочая угловая частота. С учетом аналитических выражений для F_r и F_t уравнения (5) и (6) решались численным методом, предложенным в работе [3].

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 сдавливаемой 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

$$F_{mp} = \left(-K_x X + F_r \cos\varphi - F_t \sin\varphi\right)i + \left(-K_y Y - F_r \sin\varphi - F_t \cos\varphi\right)j. \qquad (13)$$

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

$$F_{mp} = \left(-Ke\cos\varphi + F_r \cos\varphi - F_t \sin\varphi\right)i + \left(Ke\sin\varphi - F_r \sin\varphi - F_t \cos\varphi\right)j. \qquad (14)$$

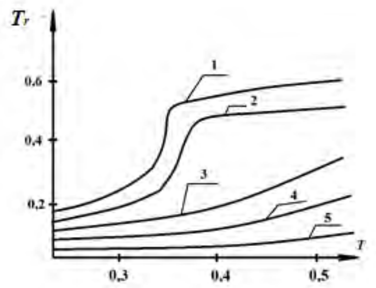
Извлекая квадратный корень из суммы квадратов составляющих F_{mp}, получим модуль передаваемого усилия

$$\left|F_{mp}\right| = \left[\left(F_r - Ke\right)^2 + F_t^2\right]^{\frac{1}{2}}. \qquad (15)$$

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

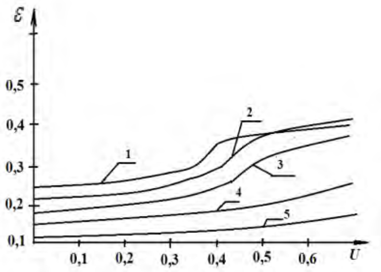
$$T_r = \frac{\left|F_{mp}\right|}{u\omega^2} = \frac{\left[\left(F_r - Ke\right)^2 + F_t^2\right]^{\frac{1}{2}}}{u\omega^2}. \qquad (16)$$

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



1–Ф=0.001 (осевая подача смазки)
2–Ф=0.001 (комбинированная подача смазки)
3 Ф = 0.01 (комбинированная подача смазки)
4–Ф=0.02 (комбинированная подача смазки)
5–Ф = 0.03 (комбинированная подача смазки)

Рис. 3. Зависимость нестационарного коэффициента передачи от параметра T (B = 0,11; Ω = 1; H/L = 0,1; $\Phi = \dfrac{k_1 H}{L^3}$)



1–Ф=0.001 (осевая подача смазки)
2–Ф=0.001 (комбинированная подача смазки)
3–Ф=0.01 (осевая подача смазки)
4–Ф=0.01 (комбинированная подача смазки)
5–Ф = 0.02 (комбинированная подача смазки)

Рис. 4. Зависимость стационарного эксцентриситета демпфера от эксцентриситета дисбаланса (B = 0,12, Ω = 1, H/L = 0,1).

Результаты численного анализа, приведенного на рис. 3 и 4 показывают:

1. Из зависимости нестационарного коэффициента передачи от параметра T следует, что при малых значениях безразмерного параметра Ф ($\Phi \approx 0{,}001$) в этих условиях наблюдается «скачок» при комбинированной подаче смазки. При больших значениях параметра Ф ($\Phi \geq 0{,}01$) в этой зависимости отсутствует «скачок» как при осевом и перпендикулярном оси направлениях подачи смазки, так и при комбинированной подаче.

2. Из зависимости стационарного эксцентриситета демпфера от эксцентриситета дисбаланса следует, что увеличение проницаемости обоймы, прилегающей к смазочному слою, двигает вправо «скачок» в этой зависимости, особенно ощутимо проявляясь при комбинированной подаче смазки. При этом максимальное значение скачка меньше при комбинированной подаче, нежели при подаче смазки в осевом и перпендикулярном оси направлениях.

Список использованной литературы:

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

2. 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.

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