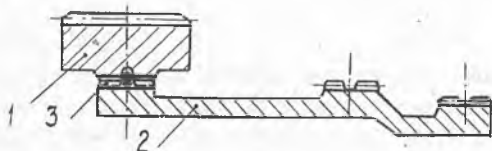


УДК 621.833:534.1

В.С.Вишневский, М.Д.Генкин, Г.В.Тарханов

ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СМАЗОЧНЫМ СЛОЕМ  
ЗУБЧАТЫХ МУФТ

Уровни колебаний планетарных редукторов в диапазоне частот 100-1000 Гц существенно зависят от поглощения энергии зубчатыми муфтами подвесок центральных колес. В статье исследуются колебания зубчатой муфты (рис. 1), которая состоит из кольца 1 и тонкостенной обложки 2, связанных косозубым эвольвентным соединением 3 [1]. Зубья имеют шероховатости 5 мкм, а соединение смазывается турбинным маслом и нагружается в эксперименте с помощью четырех легких и податливых стяжек. Сила натяжения в стяжках контролируется с помощью тензодатчиков.



Р и с. 1. Зубчатая муфта

При колебаниях происходят микроскольжение контактных площадок соединения с амплитудами порядка 0,01-0,5 мкм и относительные перемещения по нормали к этим поверхностям, которые вызывают перетекание смазки в микрозазорах. Основные потери колебательной энергии в муфте обусловлены трением при микроскольжении участков контакта и вязким сопротивлением смазки.

Для оценки демпфирования в муфте исследуется модельная пара трения в диапазоне частот 70-700 Гц [2]. Экспериментальная установка состоит из стержня размером 1500 x 50 x 40 мм, который опирается на массивное основание тремя штифтами, имеющими плоские площадки. Размеры площадок, шероховатостей и величины нормального давления в контакте выбраны аналогичными зубчатым соединениям.

Колебания муфты и модельного соединения возбуждаются с помощью электродинамического вибратора, присоединяемого через пьезо-

датчик силы. Муфта подвешивается на податливом тросе, при этом потери энергии в подвеску не превышают 1-3% от общих потерь. Аналогично производится подвеска основания в модельном эксперименте. Величины логарифмических декрементов колебаний системы определяются по ширине резонансных пиков. Амплитуды относительных микросмещений контактирующих деталей замерялись с помощью пьезодатчиков ускорения. Сигналы с датчиков силы и ускорения подаются на фильтры с шириной полосы 3,16 Гц и на электронные вольтметры. Измеряется также сдвиг фазы между этими сигналами с помощью прецизионного фазометра, и производится спектральный анализ сигналов ускорения. На резонансных частотах определяются потери энергии в соединении деталей по работе силы возбуждения за цикл колебаний, при этом учитываются потери энергии в подвеске системы и на внутреннее трение в материале.

Сдвиговая жесткость контакта модели определяется как отношение сдвиговой силы к средней для трех опор амплитуде относительного горизонтального перемещения. Сдвиговая сила оценивается по колебаниям массивного основания, а действительная площадь контакта - по приработанной поверхности торцев штифтов. В эксперименте суммарная площадь трех опорных площадок имеет величины 0,3 и 0,2 см<sup>2</sup>, которым соответствуют удельные нагрузки 80 и 120 кгс/см<sup>2</sup>.

Потери энергии в контакте оказываются примерно пропорциональными квадрату амплитуды относительного сдвигового перемещения  $u_K$

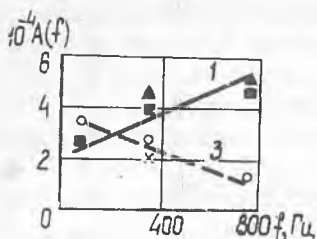
$$\Delta W_K = A(f) u_K^2, \quad (1)$$

где  $A(f)$  - относительные потери;  $f$  - частота колебаний;  $u_K < 0,5$  мкм. Экспериментальные исследования показывают, что в смазываемом контакте средние величины относительных потерь (рис. 2а) и сдвиговая жесткость  $C_K$  (рис. 2б) пропорциональны площади контакта  $S_K$  и увеличиваются линейно с ростом частоты (кривые 1,2). Средний для упруго-вязкой модели системы коэффициент поглощения

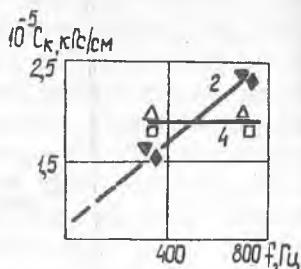
$$\psi_K = \frac{2 \Delta W_K}{C_K u_K^2} \quad (2)$$

не зависит от частоты и площади контакта и равен примерно 0,5. Жесткость контакта можно оценить зависимостью

$$C_K = 180 (500 + f), \quad (3)$$



а



б

Р и с. 2. Удельные потери энергии и сдвиговая жесткость контакта:  $\circ, \blacksquare, \square, \blacklozenge$  - для площади  $0,3 \text{ см}^2$ ;  $\times, \blacktriangle, \triangle, \blacktriangledown$  - для площади  $0,2 \text{ см}^2$

а относительные потери зависят от частоты

$$A(f) = 45(500 + f) \quad (4)$$

В сухом контакте относительные потери (рис. 2, кривая 3) примерно пропорциональны площади контакта и уменьшаются линейно с увеличением частоты колебаний, что, видимо, связано с увеличением отношения нормальных микросмещений в контакте к сдвиговым от 0,05 до 0,3 по мере роста частоты. Уменьшение удельной сдвиговой жесткости (кривая 4) с частотой оказалось незначительным: величина  $C_k/s_k$  примерно равна  $2 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^3$  в рассматриваемом диапазоне частот. Поэтому для коэффициента поглощения, оцениваемого упруговязкой моделью, получено согласно (2) выражение  $\eta_k = 0,5 - 5 \cdot 10^{-4} f$ .

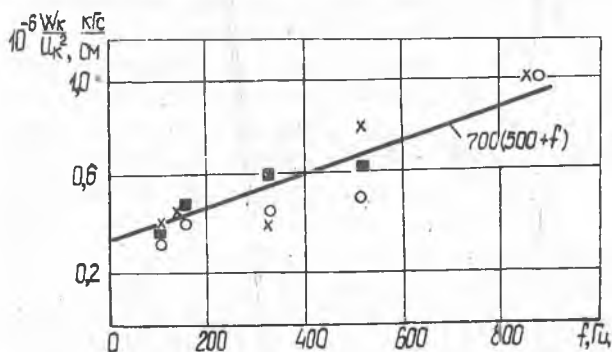
Вязкие потери энергии, связанные с перетеканием смазки в микрозазорах при относительных перемещениях  $u_n$  по нормали к сопрягаемым поверхностям, учитываются также, как в макрослоях, [3] так как отношение смазочного слоя  $\delta$  к величине  $u_n$  в эксперименте равно 20 - 100. Потери энергии за цикл колебаний, согласно С.И.Сергееву [4], составляют

$$\Delta W = \pi \omega \mu \lambda^2 L u_n^2 Z, \quad (5)$$

где  $\mu$  - вязкость масла;  $Z$  - число площадок контакта;  $L, \delta$  - длина и ширина площадки контакта;  $\lambda = \frac{\delta}{\sigma}$ . Полученные расчетом суммарные потери энергии, состоящие из потерь на трение в сухом

контакте и из вязких потерь в смазке, примерно совпадают с потерями в смазочном контакте. В расчете принималось:  $\mu = 10^{-6} \text{ кгс} \cdot \text{см}^{-2}$ ;  $\rho = 12 \text{ мкм}$ ;  $\lambda = 300$ ;  $Z = 3$ . Доля вязких потерь в смазке существенно увеличивается в общих потерях с ростом частоты колебаний: на частоте 70 Гц они пренебрежимо малы, на частоте 350 Гц составляют 70% от потерь на трение, а на 700 Гц больше последних в три раза. Зубчатая муфта является эффективным вибропоглотителем колебаний и имеет коэффициент поглощения  $0,2 \div 0,3$ , который практически не зависит от частоты колебаний и удельной нагрузки  $p$  в зубчатом соединении при  $p > 5 \text{ кгс/см}^2$ , если величина нагрузки отнесена к номинальной площади рабочих поверхностей зубьев [1].

Потери энергии в зубчатой муфте примерно пропорциональны величине  $\mu_k^2$  при амплитудах взаимных микросмещений полушестерен  $\mu_k < 0,2 \text{ мкм}$ . Относительные потери  $A(f)$  (рис. 3), определенные согласно (1), увеличиваются с средним линейно с возрастанием час-



Р и с. 3. Зависимость относительных потерь энергии в муфте от частоты колебаний при удельном давлении (кгс/см<sup>2</sup>): x - 4,9; o - 14,7; ■ - 24,5

тоты

$$A(f) = 700(500 + f).$$

( 6 )

Наряду с осевыми и радиальными микросмещениями сопрягаемых поверхностей зубьев происходят взаимные перемещения их по нормали, связанные с радиальными перемещениями  $\mu_z$  зависимостью:

Частота колебаний, Гц	Потери энергии в муфте (эксперимент) кгс·мкм	Средние амплитуды перемещений (0,1 мкм)		Составные части потерь энергии в муфте (расчет), %		Отношение суммарных потерь: расчет/эксперимент, %	
		сдвиг	по нормали	на трение	в смазке		
115,6	1,15	1,76	0,217	85	13	2	103
150,4	0,43	1,0	0,177	72	26	2	120
340	0,28	0,78	0,085	67	29	4	103
505	0,042	0,3	0,034	42	49	9	84
835	0,017	0,13	0,02	22	66	12	106

$u_n = u_z \sin 20^\circ$ . Нормальные микросмещения вызывают размыкание контакта и перетекание смазки в микрозазорах. Колебания с размыканием контакта сопровождаются соударением деталей, при этом возбуждаются кратные основной частоте гармоники колебаний.

Из сравнения удельных потерь в муфте, согласно выражению (6), и в смазываемом контакте, согласно выражению (4), определена действительная площадь контакта муфты  $S_k$ , которая составляет 16 см<sup>2</sup> или 20% от номинальной рабочей поверхности зубьев. Для известной площади  $S_k$  жесткость и потери энергии в муфте определяется из (3) и (4). Потери колесательной энергии в муфте складываются из потерь на трение, вязких потерь в смазке и потерь на внутреннее трение в металле (см. таблицу). Вязкие потери, связанные с перетеканием смазки, определяются согласно уравнению (5). в расчете принималось:  $l = 0,8$  см,  $b = 0,3$  см,  $\sigma = 10$  мкм,  $z = 70$ , что составляет 20% от общего числа сопрягаемых зубьев. Для определения потерь на трение использовались экспериментальные величины удельной жесткости и  $\psi_k$  для сухого контакта. Потери на внутреннее трение в металле определены с использованием коэффициентов поглощения, измеренных в эксперименте с отдельными полумуфтами, и составляют 2-10% от общих потерь в муфте. Вязкие потери в масляном слое увеличиваются от 13% на частоте 100 Гц до ~ 70% на 700 Гц, а потери на трение уменьшаются в общем балансе потерь с увеличением частоты от 85 до 22%.

Полученные расчетом суммарные потери в муфте отличаются от эксперимента не более, чем на 20%. Предложена расчетная модель муфты, состоящая из двух концентрических колец, допускающих на поверхности контакта относительные перемещения в осевом и радиальном направлениях, а также относительный поворот сечений. Связь между кольцами моделируется комплексной жесткостью  $\tilde{C}_k = C_k (1 + i \frac{\psi_k}{2\sigma_0})$ , где  $\psi_k = 0,5$  для поверхностей, смазываемых турбинным маслом. В качестве ориентировочной величины отношения действительной площади контакта к номинальной можно принять полученную в работе величину 0,2.

Оценки потерь энергии в муфте показывают, что основное поглощение на частотах выше 500 Гц связано с вязким сопротивлением в смазке при взаимных нормальных перемещениях зубьев. На частотах 100-400 Гц основные потери энергии происходят на трение поверхностей контакта при их микроскольжении.

## Л и т е р а т у р а

1. Вишне夫斯基 В.С., Генкин М.Д., Тарханов Г.В. Демпфирование колебаний зубчатыми муфтами. - В кн.: Виброзащита человека-оператора и колебания в машинах. - М.: Наука, 1977.

2. Вишне夫斯基 В.С. Исследование демпфирования колебаний при неполном проскальзывании в соединении стальных деталей. - В кн.: Методы создания машин в маломощном исполнении. - М.: Наука, 1978.

3. C. Andzew, J. A. Cockburn, A. E. Waring, *Metal surfaces under normal forces, some dynamic stiffness and damping characteristics. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, v. 182, pt 3k, 1967-68.*

4. Сергеев С.И. Демпфирование механических колебаний. - М.: Гос.изд-во физ-мат. литературы, 1959.