

Таким образом, принятие для неустановившихся режимов в гидростатических опорах тех же расходных характеристик дросселей, что и при стационарных условиях, не вносит существенных погрешностей только при условии, если  $T_{жс} \ll T_2$  и  $T_{цз} \ll T_2$ , т.е. когда в переходном режиме время установления расходов в каналах дросселей много меньше времени протекания переходных процессов для рабочей камеры опоры в целом. В противном случае инерционное запаздывание оказывает существенное влияние на динамические характеристики опоры, которое проявляется в определенном частотном диапазоне, ограниченном как снизу, так и сверху. При этом изменяется величина динамической жесткости опоры и коэффициенты усиления. При некоторых соотношениях параметров  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{цз}$ ,  $T_{жс}$  возможно существование двух резонансов. Появление отрицательного демпфирования (см.рис. 2,б) несомненно приведет к неустойчивости подвижной массы опоры. Таким образом, инерционность дросселей оказывает влияние и на устойчивость опоры.

#### Л и т е р а т у р а

1. Белоусов А.И., Чегодаев Д.Е. Динамические характеристики газостатических устройств. - В сб.: Вопросы виброизоляции оборудования и приборов. Ульяновск, 1974.
2. Чегодаев Д.Е., Белоусов А.И. Гидростатические опоры как гасители колебаний. - В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей. Труды КуАИ, 1974, вып. 67.
3. Белоусов А.И., Равикович Ю.А., Ржевский В.П., Макушин А.Б. Время срабатывания дросселирующих элементов гидростатических устройств. - В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей. Труды КуАИ, 1974, вып. 67.
4. Залманзон Л.А. Теория элементов пневмоники. М., "Наука", 1969.

А.Н.Брагин, Г.Л.Луцкий

КОЭФФИЦИЕНТ ДИНАМИЧНОСТИ ПОДШИПНИКА  
С ВНЕШНИМ НАДДУВОМ

При повышенных давлениях наддува и малых нагрузках подшипник с внешним наддувом считаем изотропным. В этом случае систему "цапфа -

газовый слой - подшипник" можно рассматривать как систему с одной степенью свободы, для которой в качестве характеристики демпфирующих свойств используют коэффициент динамичности  $\mu_g = A/E$  ( $A$  - амплитуда колебаний,  $E$  - дисбаланс, равный расстоянию между геометрической и физической осями цапфы).

Соотношение между коэффициентом динамичности и безразмерным демпфированием газового слоя на режиме синхронного резонанса

$$\mu_g = \frac{\sqrt{Km}}{B}, \quad (1)$$

где  $m$  - масса цапфы,  $K$  - коэффициент жесткости газового слоя;  $B$  - коэффициент демпфирования газового слоя.

В настоящей работе оценены демпфирующие свойства подшипника на критическом для роторной системы режиме синхронного резонанса. Исследовано влияние радиального зазора, давления наддува, удлинения подшипника и дисбаланса ротора на коэффициент динамичности.

В качестве безразмерного параметра при обработке экспериментальных данных использован определяющий критерий подобия подшипников с ограничителями расхода типа кольцевых диафрагм

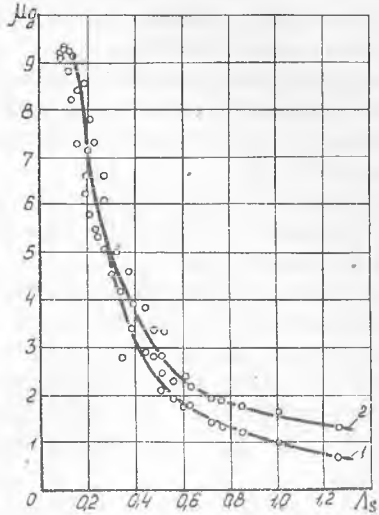
$$\Lambda_s = \frac{6\mu N d \sqrt{R_0 T_H}}{\rho_H c_r^2} \frac{L}{2R}, \quad (2)$$

называемый параметром наддува. В формуле (2)  $N$  - число питателей,  $d$  - диаметр питателя,  $R_0$  - газовая постоянная,  $T_H$  - температура торможения наддуваемого газа,  $c_r$  - радиальный зазор,  $\mu$  - вязкость газа,  $L$  - длина подшипника,  $R$  - радиус подшипника,  $\rho_H$  - давление наддува.

Эксперименты проведены с двумя сериями однорядных подшипников при радиальных зазорах от 23,5 до 55,5 мкм и удлинениями  $L/2R$  от 1,0 до 0,5. Номинальный радиус подшипника  $17,5 \cdot 10^{-3}$  м. Число питателей 12, диаметр питателя  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м. Масса ротора 0,994 кг. Безразмерное давление наддува  $P_H = P_H/P_a$  в ходе эксперимента изменяли от 2,0 до 5,0 ( $P_a$  - давление окружающей среды).

Описание экспериментальной установки, методика проведения испытаний и оценка точности измерений даны в работах [1], [2].

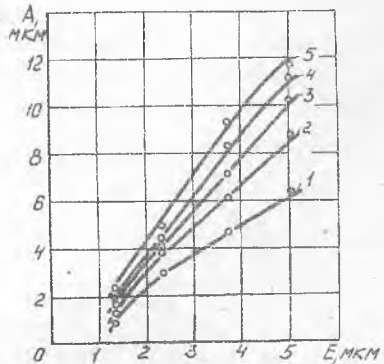
Результаты испытаний подшипников с удлинением I,0 при различных зазорах и давлениях наддува отражены на рис. I.



Р и с.1. Зависимость коэффициента динамичности  $\mu_d$  от параметра наддува  $\lambda_s$  при постоянных значениях относительной остаточной неуравновешенности  $E/2R$ :

1- $E/2R=3,7 \cdot 10^{-5}$ ; 2- $E/2R=6,6 \cdot 10^{-5}$

При оптимальных по устойчивости значениях  $\lambda_s = 0,3 - 0,45$  коэффициент динамичности меняется от 2,5 до 5,0. В подшипниках с малыми  $\lambda_s$  (увеличенные зазоры) коэффициент динамичности возрастает до 7,5 - 9,5. Рост дисбаланса приводит к незначительному увеличению ко-



Р и с.2. Зависимость амплитуды колебаний A на режиме синхронного резонанса от неуравновешенности ротора E при постоянных безразмерных давлениях наддува:

1- $P_H=2,0$ ; 2- $P_H=2,5$ ; 3- $P_H=3,0$ ;  
4- $P_H=3,5$ ; 5- $P_H=4,0$

эфициента динамичности в области больших  $\Lambda_s$  (малые зазоры, пониженные давления наддува). Наиболее низкий коэффициент динамичности присущ подшипникам с высокими значениями параметра наддува (малыми зазорами при малых давлениях наддува), обладающим пониженными пороговыми скоростями вихревой неустойчивости.

В ходе испытаний получены зависимости амплитуды колебаний ротора на режиме синхронного резонанса от дисбаланса  $E$  при постоянных  $\bar{P}_H$ . Одна из таких зависимостей для подшипника с радиальным зазором 24,5 мкм приведена на рис. 2.

Из графика следует, что зависимость резонансной амплитуды от  $E$  близка к линейной. С увеличением давления наддува резонансная амплитуда колебаний возрастает.

Линейность зависимостей резонансной амплитуды от дисбаланса позволяет использовать приведенную на рис. 1 кривую  $M_d = f(\Lambda_s)$  для оценки допустимой остаточной неуравновешенности ротора.

Установлено, что прохождение режима синхронного резонанса не сопровождается повышенной вибрацией и безопасно, если амплитуда колебаний не превышает 0,4 - 0,5 минимального зазора. Используя соотношение

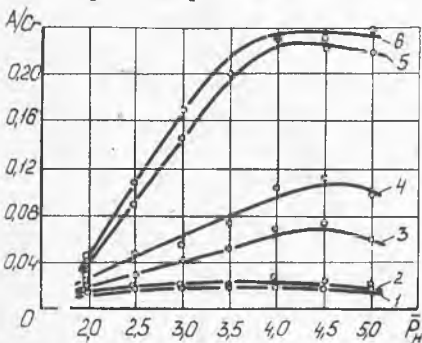
$$\frac{A_{max}}{c_r - e - \Delta} < 0,4 - 0,5 ,$$

получаем величину допустимой неуравновешенности

$$[E/c_r] = 0,02 - 0,12 . \quad (3)$$

Большие значения  $[E/c_r]$  соответствуют большим значениям параметра наддува  $\Lambda_s$ . Здесь  $A_{max}$  - максимальная амплитуда на режиме синхронного резонанса,  $e$  - квазистатический эксцентриситет,  $\Delta$  - суммарная погрешность формы цапфы и подшипника ( $\Delta \sim 0,1c_r$ ).

На рис. 3 представлена зависимость относительной амплитуды  $A(c_r)$



Р и с.3. Зависимость относительной амплитуды колебаний  $A/c_r$  на режиме синхронного резонанса от безразмерного давления наддува  $\bar{P}_H$  при постоянных удлинениях подшипника  $L/2R$ :  
 1-  $L/2R=1,0$ ; 2-  $L/2R=0,9$ ;  
 3-  $L/2R=0,8$ ; 4-  $L/2R=0,7$ ;  
 5-  $L/2R=0,6$ ; 6-  $L/2R=0,5$

синхронного резонанса от давления наддува. Кривые построены при постоянных относительных удлинениях. С уменьшением удлинения безразмерная амплитуда колебаний возрастает, что указывает на рост коэффициента динамичности. Начальные участки кривых имеют линейный характер. В области  $\bar{P}_H = 4,0 - 4,5$  кривые имеют максимумы, связанные с нелинейностью характеристик газового слоя. Резкое возрастание динамичности с уменьшением относительного удлинения требует повышения точности балансировки ротора. При уменьшении удлинения подшипника от 1,0 до 0,5 величина допустимой неуравновешенности понижается в 2 - 10 раз по сравнению с вычисленной по формуле (3). Уменьшение длины подшипника с малым зазором требует большего увеличения точности балансировки.

В коротком подшипнике увеличение резонансной амплитуды сопровождается снижением жесткости газового слоя. Это подтверждается обнаруженным при испытаниях снижением резонансной частоты и уменьшением длины подшипника (при постоянном давлении наддува). Исключение составил подшипник с зазором 23,5 мкм, в котором частота синхронного резонанса, а следовательно, и жесткость газового слоя, имеют максимум при удлинении  $L/2R = 0,75$ . Этому удлинению соответствует оптимальное по жесткости значение параметра наддува (при данных  $\bar{P}_H$  и  $C_r$ ). Уменьшение жесткости при укорачивании подшипника указывает на то, что рост коэффициента динамичности в коротком подшипнике происходит за счет снижения демпфирования газового слоя.

#### Л и т е р а т у р а

1. Брагин А.Н., Воронин В.Г., Луцкий Г.Л. Синхронный резонанс неуравновешенного ротора в опорных газовых подшипниках с внешним наддувом. - "Вестник машиностроения", 1975, № 8.
2. Брагин А.Н., Воронин В.Г., Луцкий Г.Л. Вихревая неустойчивость неуравновешенного ротора в опорных газовых подшипниках с внешним наддувом. - "Вестник машиностроения", 1975, № 9.

Л.И.Брудков, В.П.Шорин

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДЕМПФЕРА,  
ОТДЕЛЕННОГО ОТ ИСТОЧНИКА КОЛЕБАНИЙ ДЛИННОЙ ТРУБОЙ,  
НА ВЕЛИЧИНУ МАКСИМАЛЬНОЙ АМПЛИТУДЫ ДАВЛЕНИЯ В ТРУБЕ

Поскольку постановка акустического демпфера непосредственно за