

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2021-13-18-23>

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОЙ ГАЗОСТАТИЧЕСКОЙ ОПОРЫ С РЕГУЛЯТОРОМ РАСХОДА ТИПА СОПЛО-ЗАСЛОНКА

Коднянко В.А., Григорьева О.А., Строк Л.В.

Ключевые слова: газостатическая опора, резонаторная камера, двойное дросселирование, демпфирующее сопротивление, дросселирующее сопротивление, податливость несущего слоя, качество динамики.

Аннотация. Рассмотрена конструкция, выполнено математическое моделирование и теоретическое исследование качества динамики осевой газостатической опоры с двойным дросселированием воздуха, проточной полостью и мембранным регулятором типа сопло-заслонка. Изучены показатели качества динамики опоры в зависимости от сопротивлений демпфирующих и дросселирующих сопротивлений, а также от объема полости-резонатора и коэффициента упругости мембраны. Установлено, что наличие полости способствует значительному улучшению показателей качества динамики опоры, а применение регулятора позволяет снизить податливость до нулевого и отрицательных значений. На основе анализа полученных данных сделаны выводы, подтвердившие гипотезу о том, что при целенаправленном выборе значений параметров системы двойного дросселирования можно получить конструкцию, которая в сравнении с известными аэроэстатическими опорами будет иметь многократно лучшие статические и динамические характеристики.

STUDY OF THE THRUST GAS-STATIC BEARING WITH FLOW RATE REGULATOR OF THE NOZZLE-DAMPER TYPE

Kodnyanko V.A., Grigorieva O.A., Strok L.V.

Keywords: gas-static bearing, resonator chamber, double throttling, damping resistance, throttling resistance, compliance of the carrier layer, quality of dynamics.

Abstract. The design considered, mathematical modeling and theoretical study of the dynamics of an axial gas-static support with double air throttling, a flow cavity and a nozzle-damper membrane regulator are performed. The indicators of the quality of the dynamics of the support studied depending on the resistances of the damping and throttling resistances, as well as on the volume of the cavity-resonator and the coefficient of elasticity of the membrane. It found that the presence of a cavity contributes to a significant improvement in the quality indicators of the support dynamics, and the use of a regulator allows one to reduce the compliance to zero and negative values. Based on the analysis of the data obtained, conclusions were made that confirmed the hypothesis that with a purposeful choice of the values of the parameters of the double throttling system, it is possible to obtain a structure that, in comparison with the known aerostatic supports, will have many times better static and dynamic characteristics.

В Сибирском федеральном университете проводятся работы по проектированию и исследованию газостатических опор, в магистрали нагнетания которых установлены регуляторы расхода газа. Применение регуляторов, осуществляющих активную компенсацию расхода газа в несущем слое, позволяет создавать опоры с любой, сколько угодно малой податливостью несущего газового слоя, в том числе с нулевой и даже отрицательной (в последнем случае приращению нагрузки и зазора в опоре имеют одинаковые знаки). Техническая реализация принципа активной компенсации расхода в газостатических опорах неразрывно связано с проблемой обеспечения устойчивости из-за наличия в регуляторе

сравнительно больших объемов газа, оказывающих на опору дестабилизирующее влияние. Установлено, что приемлемое динамическое качество опоры с регулятором может быть обеспечено при использовании двойного дросселирования газа в магистрали нагнетания. Суть двойного дросселирования рассмотрена авторами в работах [1-4].

Ниже приведены некоторые результаты исследования осевой газостатической опоры с мембранным регулятором расхода типа сопло-заслонка, схема которой представлена на рисунке 1. Опора состоит из части 1 массой m ; основания 2 с дросселирующими соплами $\varnothing d_p$, $\varnothing d_k$ между которыми заключена резонирующая полость объемом v_p ; упругой мембраны 3 с центральным отверстием, жестко закрепленной по периферии в основании опоры.

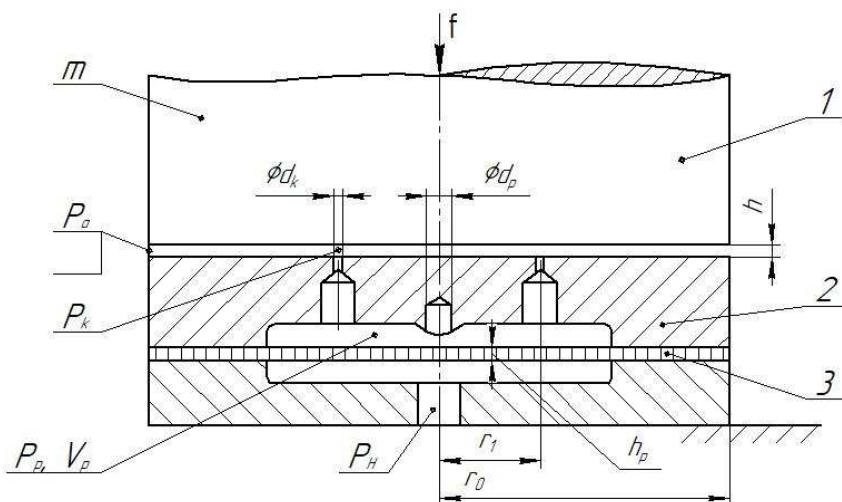


Рис. 1. Расчетная схема газостатической опоры

Сжатый газ, нагнетаемый под давлением $p_H = const$ через центральное отверстие мембраны, дросселируясь через рабочий зазор h_p между соплом $\varnothing d_p$ и мембраной (заслонка), попадает под давлением $p_p < p_H$ в полость объемом v_p , откуда через сопла $\varnothing d_k$ поступает под давлением $p_k < p_p$ в несущий газовый слой толщиной h .

С увеличением (уменьшением) нагрузки f толщина несущего слоя h уменьшается (увеличивается), при этом соответственно возрастает давление p_k , под действием которого мембрана деформируется, увеличивая (уменьшая) рабочий зазор h_p . Вследствие этого возрастает (снижается) расход газа через зазор h_p и тем самым увеличивается (уменьшается) давление p_p в полости регулятора, благодаря чему восстанавливается первоначальный зазор h в опоре. При соответствующем выборе упругости мембраны обеспечивается необходимая податливость несущего слоя.

Динамику опоры с регулятором расхода описывали системой нелинейных дифференциальных уравнений:

а) уравнения баланса весовых расходов газа на входе сопел $\varnothing d_k$;

б) уравнение баланса весовых расходов в резонирующей полости;

в) динамического равновесия подвижного элемента опоры массой m , на который действует возмущающая сила $f(t)$ и реакция несущего газового слоя $w(t)$;

г) динамического равновесия мембраны регулятора под действием давления $p_p(t)$ и p_n .

Функцию давления в несущем слое, необходимую для определения нестационарной реакции $w(t)$, получили решением нелинейной краевой задачи для нестационарного уравнения Рейнольдса при обычных допущениях, принятых в теории газовой скачки. Решение находили методом малого параметра, за который принимали число сдвигания σ . В теории учитывали инерционные свойства подвижной части опоры, а также сжимаемость газа в несущем слое и в полости объемом v_p . Линеаризованную исходную систему уравнений, записанную в безразмерной форме, с помощью преобразования Фурье представляли эквивалентной линейной системой алгебраических уравнений относительно Φ изображений малых отклонений обобщенных координат от положения равновесия.

Газостатические опоры с регуляторами расхода одновременно могут выполнять не только роль подшипников или направляющих, но и также датчиков нагрузки или микроперемещения, так как резонирующая полость объемом v_p может быть использована в качестве измерительной камеры. Поэтому при анализе динамик опоры с регулятором исследовали три типа частотных передаточных функций:

$$\Phi_F^H(j\omega) = \frac{\Phi(\Delta H)}{\Phi(\Delta F)}; \quad \Phi_F^P(j\omega) = \frac{\Phi(\Delta P_p)}{\Phi(\Delta F)}; \quad \Phi_P^H(j\omega) = \frac{\Phi(\Delta H)}{\Phi(\Delta P_p)};$$

где ΔF , ΔH , ΔP_p безразмерные отклонения нагрузки f , зазора h и давления P_p ; ω – частота колебаний.

Варьировали следующие параметры системы:

– коэффициент настройки опоры

$$\chi = \frac{P_{k0}^2 - P_a^2}{P_H^2 - P_a^2} \in [0;1]; \quad \xi = \frac{P_{p0}^2 - P_{k0}^2}{P_H^2 - P_{k0}^2} \in [0;0,8];$$

– коэффициент компенсации регулятора, характеризующий относительную упругость мембраны

$$k_p = \frac{\Delta H_p}{\Delta P_p} \in [0;3];$$

здесь ΔH_p , ΔP_p – соответственно безразмерные отклонения зазора h и давления P_p .

– частота колебаний $\omega \in [0;800]$ Гц;

– объем резонирующей полости $V_p \in [0,5;4]$ см³;

– расчетную толщину несущего слоя опоры $h_0 \in [10;20]$ мкм.

Рассчитали следующие показатели динамического качества опоры с регулятором расхода:

$$A_F^H(\omega) = \text{mod } \Phi_F^H(j\omega); A_F^P(\omega) = \text{mod } \Phi_F^P(j\omega); A_P^H(\omega) = \text{mod } \Phi_P^H(j\omega);$$

– амплитудно-частотные характеристики:

$$\varphi_F^H(\omega) = \arg \Phi_F^H(j\omega); \varphi_F^P(\omega) = \arg \Phi_F^P(j\omega); \varphi_P^H(\omega) = \arg \Phi_P^H(j\omega);$$

– фазовый сдвиг между ΔH и ΔF , ΔP_p и ΔF и ΔH , ΔP_p соответственно;

$k_F^H = A_F^H(\omega)|_{\omega=0}$ – коэффициент усиления, характеризующий безразмерную статическую податливость несущего газового слоя;

$k_F^P = A_F^P(\omega)|_{\omega=0}$ – коэффициент усиления, характеризующий опору как датчик нагрузки $f(t)$;

$k_P^H = A_P^H(\omega)|_{\omega=0}$ – коэффициент усиления, характеризующий опору как датчик микроперемещений нагрузки $h(t)$;

M_F^H , M_F^P , M_P^H – показатели колебательности, характеризующие относительные пики резонансов амплитудно-частотных характеристик $A_F^H(\omega)$, $A_F^P(\omega)$ и $A_P^H(\omega)$, соответственно.

При расчетах $r_0 = 2,5$ см; $r_1 = 1,25$ см; $m = 2,37 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{см}}$; $f_0 = 30$ кГц;

$$T = 293^\circ; R = 0,287 \cdot 10^7 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}^2 \cdot \text{град}}; \mu = 1,85 \cdot 10^{-10} \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{см}^2}; \gamma = 1,4.$$

Исследованы зависимости $k_F^H(k_p)$. Установлено, что с увеличением k_p (с уменьшением упругости мембраны) значения k_F^H (податливости несущего газового слоя опоры) уменьшаются до нуля и при $k_p = 0,8 + 1,8$ становятся отрицательными. Расчеты показали, что может быть получена практически любая величина отрицательной податливости несущего газового слоя опоры без существенного ухудшения ее динамического качества. Зависимости $A_F^H(\omega)$ для различных k_p свидетельствуют о том, что с уменьшением упругости мембраны резонансные пики в опоре не увеличиваются. Как показали расчеты, увеличение k_p приводит к тому, что амплитудно-частотные характеристики становятся безрезонансными, чего не было отмечено в опоре с двойным дросселированием [1].

Режим положительной податливости отличается от режима отрицательной податливости лишь тем, что фазовые характеристики $\varphi_F^H(\omega)$ последней сдвинуты на 180° . При этом режим отрицательной податливости опоры сохраняется в широком диапазоне частот $\omega \leq 500$ Гц.

С ростом коэффициента ζ переходный процесс для функции $h(t)$ по времени затухания имеет экстремальный характер. Это следует из анализа зависимости $\omega_{\Pi F}^H$ (частота пропускания амплитудно-частотной характеристики $A_F^H(\omega)$) от k_p , которая обратно пропорциональна времени

переходного процесса $h(t)$ с точностью до постоянного множителя. Максимум быстрогодействия по этой функции находится в области нулевой податливости опоры. Зависимость податливости показывает, что увеличивая k_p и ζ и уменьшая χ , можно получить коэффициент усиления k_F^P , в сотни раз превышающий аналогичный показатель для опоры с двойным дросселированием ($k_p = 0$). Это позволяет использовать опору с регулятором расхода как весьма чувствительный датчик нагрузки. Выходным сигналом такого датчика будет давление p_p в измерительной камере. Анализ изменения коэффициента усиления k_p^H от изменения упругости мембраны показывает, что опора с регулятором может также выполнять роль датчика микроперемещений. В зависимости от допустимых фазовых искажений полоса рабочих частот такого датчика может лежать в пределах от нуля до $7 \div 100$ Гц.

Следует отметить, что выбор объема v_p резонирующей полости оказывает существенное, а порой решающее влияние на фазовые и другие характеристики опоры с регулятором. Например, при малых значениях v_p увеличиваются резонансные пики амплитудно-частотной характеристики $A_F^P(\omega)$, тогда как при больших значениях v_p эта характеристика становится безразмерной, но увеличивается продолжительность переходного процесса $p_p(t)$.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод, что использование регуляторов в газостатических опорах существенно улучшает характеристики и расширяет область их рационального использования.

Список литературы

1. Коднянко В.А. Устойчивость энергосберегающей адаптивной радиальной гидростатической опоры с ограничением выходного потока смазки // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. Красноярск. – 2009. – Т. 3, № 3. – С. 674-684.
2. Коднянко В.А., Шатохин С.Н. Исследование динамики газостатической опоры с двойным дросселированием газа в магистрали нагнетания // Машиноведение. – 1978. – № 6. – С. 21-23.
3. Шатохин С.Н., Коднянко В.А. Радиальный газостатический подшипник с активным регулированием расхода газа эластичными компенсаторами // Машиноведение. – 1981. – № 5. – С. 107-112.
4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – М.: Профессия. – 2003. – 200 с.

References

1. Kodnyanko V.A. Stability of energy-saving adaptive radial hydrostatic support with limited lubrication output flow // Journal of the Siberian Federal University. Technics and technology. Krasnoyarsk – 2009, – Vol. 3, №3. – P.674-684.

2. Kodnyanko V.A., Shatokhin S.N. Study of the dynamics of a gas-static bearing with double throttling of gas in the discharge line // *Mechanical Engineering*. – 1978. – №6. – P. 21-23.
3. Shatokhin S.N., Kodnyanko V.A. Radial gas-static bearing with active regulation of gas consumption with elastic compensators // *Mechanical Engineering*. – 1981. – №5. – P. 107-112.
4. Besekersky V.A., Popov E.P. Theory of automatic control systems. – M.: Profession. – 2003. – 200 p.

Коднянко Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Стандартизация, метрология и управление качеством»	Kodnyanko Vladimir Aleksandrovich – doctor of technical sciences, professor of the department «Standardization, Metrology and Quality Management»
Григорьева Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, профессор кафедры «Стандартизация, метрология и управление качеством»	Grigorieva Olga Anatolievna – candidate of technical sciences, professor of the department «Standardization, Metrology and Quality Management»
Строк Лилия Владимировна – старший преподаватель кафедры «Стандартизация, метрология и управление качеством»	Strok Lilia Vladimirovna – senior lecturer of the department «Standardization, metrology and quality management»
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия	Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Received 18.04.2021