

МИНИСТЕРСТВО ВЫШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Дадаев Сергей Григорьевич

УСТОЙЧИВОСТЬ И ДИНАМИКА РОТОРОВ И ПОДВЕСОВ
В ОПОРАХ НА ГАЗОВОЙ СМАЗКЕ

(Специальность 01.02.06—"Динамика, прочность
и надежность машин, приборов и аппаратуры")

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинский
политехнический институт
БИБЛИОТЕКА

Челябинск
1974

Работа выполнена на кафедре "Гирокопические приборы и устройства" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, доцент
Завьялов Г.А.

Официальные оппоненты:

профессор, доктор технических наук А.С. Кельзон (г.Ленинград),
доцент, доктор технических наук В.А. Цыганков (г.Челябинск).

Ведущая организация указана в решении ученого совета

Автореферат разослан "___" 1974 г.

Защита диссертации состоится "20" ноября 1974 г.,
в 1500 часов, на заседании Совета по присуждению ученых степеней
машиностроительных факультетов Челябинского политехнического
института (454044, г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76,
аудитория 244).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся
темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета
или прислать отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью.

Отзывы на автореферат просим направлять в адрес Ученого Совета
института: 454044, г. Челябинск, 44, проспект им. В.И. Ленина, 76.

Ученый секретарь Совета

кандидат технических наук,

доцент


A.S. DAMMERM/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Все более широкое применение в узлах трения скольжения газовой смазки ставит задачу повышения надежности работы таких узлов. Как показала практика, важными факторами, определяющими надежность и долговечность работы этих узлов, являются устойчивость и динамические свойства роторов и подвесов в опорах на газовой смазке.

Поэтому актуальной задачей теории газовой смазки опор скольжения является дальнейшая разработка методов расчета устойчивости и динамических свойств сложных конструкций роторов и подвесов в таких опорах, которые бы полностью учитывали свойства нестационарного вязкого слоя газа и позволяли бы рассчитывать опоры с нужными динамическими свойствами.

Цель работы. Обобщая опыт предыдущих исследований, разработать и обосновать общий метод и критерий для исследования устойчивости равновесного положения роторов и подвесов по Ляпунову в малом, которые бы полностью учитывали сжимаемость смазки и распределенность параметров газового смазочного слоя. Исследовать устойчивость и динамические свойства шипа в опорах с вибрирующей поверхностью и некоторых конструкций с такими опорами. Разработать методы расчета устойчивости и динамических свойств конструкций, использующих споры с вибрирующей поверхностью.

Общая методика исследований. В теоретическом исследовании была использована известная математическая модель, описывающая динамику изучаемого объекта. Методами функционального анализа, аппарата теории интегральных уравнений и теории функций комплексного переменного исходная модель была подвергнута анализу, в результате чего разработан общий метод исследования устойчивости шипа на смазочном слое и получен критерий устойчивости без каких-либо дополнительных упрощений исходной математической модели, кроме общезвестных в теории устойчивости.

В теоретическом исследовании широко применялись методы теории матриц. При получении численных результатов использовались ЭЦВМ "Минск-22" и "Мир-Г".

Проведенный анализ позволил исследовать устойчивость и динамические свойства некоторых систем с спорами на газовой смазке. Предложен общий подход к исследованию устойчивости таких систем.

В экспериментальном исследовании основное внимание уделено

проверка правильности исходной математической модели, а также проверены некоторые результаты теории.

Научная новизна. Разработан в деталях и обоснован метод исследования устойчивости равновесного положения шипа на слое газовой смазки, полностью учитывавший сжимаемость и распределенность параметров газового смазочного слоя; получен критерий, с помощью которого определяется положение области устойчивости сложных систем на газовой смазке; найдены силы, действующие на шип, при произвольном движении его геометрического центра в окрестности равновесного положения; разработаны в деталях методы расчета динамических свойств роторов на слое газовой смазки с помощью передаточных функций; разработан графический метод определения пороговой скорости жестких роторов на упругодемпферных спорах, не требующий расчетов на больших ЭЦВМ; проведено экспериментальное исследование нагрузочных характеристик в сферической опоре с вибрирующей поверхностью; экспериментально и теоретически доказана возможность стабилизации роторов высокочастотными вибрациями одной из поверхностей споры.

Практическая ценность. Разработаны инженерные методы расчета устойчивости и динамических свойств конструкций, в которых используются споры с вибрирующей поверхностью. Методы исследования, использованные в работе могут быть применены для анализа опор, в которых используются другие принципы смазки.

Реализация работы на практике. Инженерные методы расчета динамических свойств спор с вибрирующей поверхностью внедрены в практику проектирования таких опор и конструкций с их использованием на предприятиях приборостроительной промышленности.

Авторская работа. Основные результаты работы докладывались на Всесоюзном совещании по проблемам развития газовой смазки, на Всесоюзном межвузовском научно-техническом совещании по газовым спорам турбомашин, на научно-технических конференциях вузов Ленинграда, Перми, Томска, Челябинска, на заседании кафедры "Теоретической механики" Ленинградского Высшего Инженерного Морского училища им. адм. Макарова и на расширенном заседании кафедр "Сопротивление материалов", "Теории механизмов и машин", "Гирокослических приборов и устройств" Челябинского политехнического института.

Публикация. По теме диссертации опубликовано 5 статей, две находятся в печати.

Состав работы. Диссертационная работа с 5 таблицами и 68 рисунками изложена на 148 стр. и состоит из введения, 5 глав, выводов с рекомендациями и приложения. Библиография содержит 102 наименований работ. Приложение представлено на 66 стр.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важность задачи анализа устойчивости и динамики роторов и подвесов в опорах с газовой смазкой привела к многочисленным исследованиям в этой области.

Большой вклад в исследование динамики роторов и подвесов в опорах на газовой смазке внесли отечественные учёные Алиев Р.З., Дроздович В.Н., Жель В.П., Завьялов Г.А., Поступов Г.А., Сергеев С.И., Снопов А.И., Шитеев М.Д., а также зарубежные исследователи Пэн, Блрод, Константинаеску, Лихт, Осмэн, Штернхильд и др.

Однако, как показывает анализ существующих работ, до настоящего времени не разработан общий хорошо обоснованный и простой метод анализа устойчивости сложных конструкций роторов в таких опорах.

В некоторых работах (Хирофуми Миура) не учитывается сжимаемость газового смазочного слоя. Критерии устойчивости не учитывают распределенности параметров газового смазочного слоя. Отсутствует анализ характера сил, действующих со стороны смазочного слоя на ротор, движущийся произвольным образом вблизи равновесного положения.

Среди имеющихся методов наибольшее распространение за рубежом получил метод частотного анализа газовых подшипников, разработанный американским учёным *Рал С.Н.Т.* Однако подход к исследованию устойчивости здесь отличается от известного подхода к исследованию устойчивости по Ляпунову, а критерий устойчивости строится на базе физических рассуждений, что делает применение этого метода простым лишь для простейших систем типа "шип-подшипник".

В работах советского учёного Дроздовича В.Н. высказана мысль о новом подходе к исследованию устойчивости.

Однако, в опубликованных работах отсутствует обоснование этого подхода и не раскрывается существо метода исследования.

Применение в приборостроении подшипников с газовой смазкой конических и сферических форм ставит задачу исследования динамических свойств конструкций на таких опорах.

В некоторых областях приборостроения в последнее время находят применение подшипники с газовой смазкой, в которых избыточное давление в слое создается за счет вибрации одной из поверхностей опоры с большой частотой.

Важной задачей при проектировании этих опор является расчет устойчивости и динамических свойств конструкций с такими опорами.

Как показало исследование литературных источников, лишь в сдной работе (Пэн, Чанг "Динамические характеристики сферических гибридных подшипников со сдавливанием пленки смазки", Проблемы трения и смазки, "Мир", 1969 № 1, с 167-180) методом частотного анализа проведено исследование устойчивости и динамических свойств сферического шара в опоре с вибрирующей поверхностью. Это исследование не позволяет ответить на многие вопросы, появляющиеся при расчетах динамики таких опор в сложных конструкциях.

Поэтому были поставлены следующие задачи:

- обобщая опыт предыдущих исследований, разработать и обосновать метод исследования устойчивости и динамических свойств систем с опорами на газовой смазке, полностью учитывающий скимаемость смазки, распределенность параметров смазочного слоя, особенности геометрии опоры и принципа смазки;
- исследовать устойчивость и динамические свойства шара в опорах с вибрирующей поверхностью и разработать инженерные методы расчета их динамических свойств;
- исследовать устойчивость и динамические свойства двухопорной конструкции на опорах с газовой смазкой и разработать методы расчета устойчивости и динамических свойств подвеса на сферических опорах с вибрирующей поверхностью;
- экспериментально проверить правильность математической модели для распределения давления в опорах с вибрирующей поверхностью.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КВАЗИРАВНОВЕСНОГО ПОЛОЖЕНИЯ В ОПОРАХ С ВИБРИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ПРОСТРАНСТВЕННОМ ТЕЧЕНИИ СМАЗКИ

Предварительно проводится обобщение понятий жесткость и податливость смазочного слоя спор скольжения при стационарном течении смазки. Показывается, что жесткость и податливость слоя в этом случае необходимо характеризовать матрицей. Приводятся выражения для определения элементов матрицы жесткости и показывается, что матрица податливости равна со знаком минус обратной матрице жесткости.

Вводится новое понятие - жесткость двухспорной системы с произвольными опорами на газовой смазке. Жесткость двухспорной системы выражается через жесткости слоев первой и второй спор при помощи операций умножения и сложения матриц.

Эти понятия используются в работе при исследовании устойчивости положения равновесия двухопорной конструкции с такими опорами.

Сферическая геометрия шипа и подшипника опор на газовой смазке является широко распространенной формой в приборостроении благодаря технологичности изготовления, сборки, способности нести нагрузку произвольного направления. Это послужило причиной выбора основного объекта исследования - сферической опоры с вибрирующей в осевом направлении поверхностью подшипника. Так как сферическая геометрия шипа является наиболее общей по отношению к цилиндрической, торцовой и конической, то многие результаты и выводы прямо переносятся на торцевые, цилиндрические и конические опоры.

Исследование поведения шипа под действием динамических возмущений в опорах с вибрирующей поверхностью имеет свою специфику, поскольку вибрация одной из поверхностей является причиной нестационарности протекающих в слое процессов, независимо от характера возмущений, а взвешиваемая масса под действием постоянной нагрузки совершают вынужденные колебания с высокой частотой вблизи некоторого положения, которое называется квазиравновесным.

Теоретические исследования американских ученых, а также проведенные нами опыты показывают, что высокочастотные колебания подвешиваемой массы устойчивы и пренебрежимо мало влияют на распределение давления в слое. Поэтому для опор с вибрирующей поверхностью, в которых одна из поверхностей вибрирует с высокой частотой 5–20 кгц, необходимо изучить устойчивость и динамику медленно меняющихся во времени движений шипа (по сравнению с частотой вибрации поверхности), которые вызваны медленно меняющимися возмущениями (так продолжительность ударного импульса около 0,002 сек, что на порядок больше периода высокочастотных колебаний поверхности сдавливающей слой). Вследствие этого, медленно меняющиеся процессы могут рассматриваться как квазистационарные в течение одного цикла вибрации поверхности и может быть применена гипотеза *Elrod H.G.* о независимости характерного времени высокочастотных колебаний и характерного времени, определяющего медленные движения, вызванные медленно меняющимися динамическими возмущениями. С помощью этой гипотезы *Elrod H.G.* и *Rap C.H.T.*, воспользовавшись асимптотическими методами, впервые сформулировали нестационарную краевую задачу для распределения давления в случае медленных меняющихся возмущений. Эта задача мало отличается от известной в теории газовой смазки краевой задачи для распределения давления в тонком слое газа для изотермического течения, а когда амплитуда вибрации поверхности равна нулю, полностью с ней совпадает.

Особенностью опор с вибрирующей поверхностью является слабая нагруженность шипа в радиальном направлении (безразмерное радиальное смещение меньше 0,5), которая обусловлена амплитудой вибрации поверхности (в опорах с вибрирующей поверхностью она должна быть по возможности более половины зазора), что позволяет в теоретическом исследовании ограничиться изучением устойчивости центрального квазиравновесного положения традиционным методом Ляпунова в малом, и изучить динамику движений центра шипа в окрестности только центрального квазиравновесного положения.

Выражение толщины смазочного слоя записывается так, что из него могут быть получены два частных случая:

- радиусы шипа и подшипника разные и зазор в опоре задается их разностью;
- радиусы шипа и подшипника одинаковые, зазор в опоре задается начальным осевым смещением подшипника.

Это позволяет путем анализа интегральных характеристик выбрать оптимальную геометрию зазора. Сферическая опора с такой геометрией зазора названа "обобщенной".

В реферируемой работе нестационарная краевая задача для распределения давления линеаризуется, ввиду малости движений центра шипа в окрестности равновесного положения, и интегрируется совместно с уравнением для движения центра масс шипа. Решение ищется с помощью преобразования Лапласа.

В изображениях, при произвольных начальных условиях, система уравнений, определяющих медленное движение центра сферы в окрестности квазиравновесного положения, которое обусловлено действием постоянной осевой нагрузки, имеет вид:

$$-\lambda S \begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_{10} \\ \dot{\varepsilon}_{20} \end{Bmatrix} - \lambda \begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_{10} \\ \dot{\varepsilon}_{20} \end{Bmatrix} + \lambda S^2 \begin{Bmatrix} \ddot{\varepsilon}_1 \\ \ddot{\varepsilon}_2 \end{Bmatrix} = -\frac{1}{\lambda} \int_0^{2\pi} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi \langle \delta^2 \bar{\rho} \rangle \begin{Bmatrix} \sin \varphi e^{i\theta} \\ \cos \varphi \end{Bmatrix} d\varphi \right) d\theta \quad (1)$$

$$\langle \delta^2 \bar{\rho} \rangle = \frac{H_0^4}{\sqrt{H_0'^2 - H_0^2 \cos^2 \varphi}} - \frac{g_0 H_0' \delta H}{\sqrt{H_0'^2 - H_0^2 \cos^2 \varphi}^3}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\sin \varphi \left(\frac{H_0'}{2} \frac{\partial (2\bar{\rho} \sin \bar{\theta})}{\partial \varphi} - 2g_0 \bar{\rho} \bar{\theta} \frac{\partial H_0'}{\partial \varphi} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial (2\bar{\rho} \sin \bar{\theta})}{\partial \theta} \right] -$$

$$- \lambda \omega \sin \varphi \bar{\theta} \bar{\rho} \bar{\theta} = \lambda \omega S \sin \varphi \bar{\theta} \bar{\rho} \bar{\theta} - \lambda \omega \sin \varphi \bar{\theta} \bar{\rho} \bar{\theta} - \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\sin \varphi \left(\frac{4H}{2} \frac{\partial \bar{\rho}^2}{\partial \varphi} - g_0^2 \frac{\partial \bar{H}}{\partial \varphi} \right) \right]; \quad (3)$$

$$\delta \bar{\rho}(4_j, \theta, S) = \frac{H_0'}{g_0} \delta H(4_j, \theta, S), \quad j = 1, 2; \quad (4)$$

$$\bar{\Delta}\bar{\Psi}(\varphi, \theta, S) = \bar{\Delta}\bar{\Psi}(\varphi, \theta + 2\pi, S); \quad (5)$$

$$\bar{\Delta}\bar{H}(\varphi, \theta, S) = -\bar{z}_1 \cos \varphi - \operatorname{Re}\{\bar{\xi}_1^* e^{i\theta}\} \sin \varphi; \quad (6)$$

$$H_0'(\varphi, \theta) = \alpha + (\beta - \bar{z}_1) \cos \varphi. \quad (7)$$

Здесь: $\lambda = m \frac{\delta_0 \omega^2}{\pi R_a R^2}$ — безразмерная масса;

m — масса шара; δ_0 — характерный зазор; R_a — окружающее опору давление среды; R — радиус сферы; ω — масштаб безразмерного времени $T = \omega t$, определяющего медленные процессы в слое;

$\xi_1 = \frac{\langle x_1 \rangle}{\delta_0} + i \frac{\langle y_1 \rangle}{\delta_0}$ — безразмерное радиальное смещение центра шара, осредненное за период высокочастотных колебаний в безразмерном виде; $\bar{z}_1 = \frac{\langle z_1 \rangle}{\delta_0}$ — безразмерная осевая координата центра сферы;

\bar{a} — изображение функции $a(t)$; φ, θ — сферические координаты; $\lambda_u = \frac{6 M \Omega R^2}{R_a \delta_0^2}$; $\lambda_w = \frac{R_a M \Omega R^2}{R_a \delta_0^2}$ — безразмерные параметры; M — динамический коэффициент вязкости газа; Ω — угловая скорость вращения ротора; $g_0(\varphi)$ — функция ($\mathcal{P}H$) при квазистационарном течении смазки для нагруженного в схеме направлении шара $v = \infty$; $\bar{P} = \frac{P}{P_a}$, $H = \frac{H}{\delta_0}$ — безразмерные давление и толщина смазочного слоя соответственно; $\xi_{10}, \bar{z}_{10}, \alpha_0$ — начальные условия; α_1, α_2 — параметры сферического пояса по координате φ ;

α, β — параметры, определяющие вид зазора в споре; $H_0'(\varphi)$ — зазор в опоре при квазистационарном течении смазки под действием осевой нагрузки; \bar{z}_1 — безразмерное осевое смещение, обусловленное осевой нагрузкой; H_1 — безразмерная амплитуда высокочастотных колебаний, создающих избыточное давление в слое; S — оператор преобразования Лапласа; α^* — комплексно-сопряженное с α .

Дифференциальному уравнению в частных производных (3) с краевыми условиями (4) и условиями периодичности (5) удовлетворяет функция

$$\bar{\Delta}\bar{\Psi}(\varphi, \theta, S) = Q_1(\varphi, S) \bar{z}_1 - \operatorname{Re} Q_2(\varphi, S) e^{i\theta} \bar{\xi}_1^* - Q_3(\varphi, S) \bar{z}_{10} - \operatorname{Re} Q_4(\varphi, S) e^{i\theta} \bar{\xi}_{10}^*. \quad (8)$$

Неизвестные функции координаты φ , зависящие от параметра $S, Q_j(\varphi, S)$ ($j=1, 2, 3, 4$) находятся решением краевых задач Штурма-Лиувилля для обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$\zeta_j Q_j = \lambda \omega S \sin \varphi Q_j + f_j(\varphi); \quad (9)$$

$$Q_j(\varphi_i) = \mu_{ij}, \quad i=1, 2; \quad j=1, 2, 3, 4. \quad (10)$$

Изображения для сил, действующих со стороны смазочного слоя на шар с учетом (8), после интегрирования по φ , примут вид

$$\begin{aligned}\bar{F}_x + i\bar{F}_y &= W_2(s)\bar{\epsilon}_1 + W_4(s)\epsilon_{10}; \\ \bar{F}_z &= W_1(s)\bar{\zeta}_1 + W_3(s)\zeta_{10},\end{aligned}\quad (II)$$

где

$$W_j(s) = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} [\phi_{j1}(q)Q_j(q,s) + \phi_{j2}(q)] dq, \quad j=1,2,3,4. \quad (12)$$

С помощью функционального анализа и аппарата теории интегральных уравнений, в результате анализа решений краевых задач (9-10) найдено, что:

1. Решение (8) уравнения (3) с краевыми условиями (4) и условиями периодичности (5) является единственным при любом законе изменения переменных $\zeta_1(t), \epsilon_1(t)$ и любых начальных данных $\zeta_{10}, \epsilon_{10}$;
2. Краевые задачи (9-10) Штурма-Лиувилля имеют единственное решение при любых комбинациях параметров, влияющих на ее решение, для чисто мнимых значений оператора преобразования Лапласа S ;
3. Передаточные функции сил, действующих со стороны смазочного слоя на шип, имеют следующую структуру

$$W_1(p) = -C_2 - d_1 p - p^2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{d_{k1}}{p_{k1} - p}; \quad (13)$$

$$W_2(p) = -J - d_2 p - p^2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{d_{k2}}{p_{k2} + i\lambda_k - p} + i\lambda_k p \sum_{k=1}^{\infty} \frac{d_{k2}}{p_{k2} + i\lambda_k - p}. \quad (14)$$

Здесь: C_2 — осевая жесткость сферической опоры с вибрирующей поверхностью; $J = C_{xx}$, $J = C_{xy}$ — жесткость вдоль линии центров и ей перпендикулярной; $p_{k1}, p_{k2} + i\lambda_k$ собственные числа операторов L_j задач Штурма-Лиувилля (9-10); d_1, d_2, d_{k1}, d_{k2} — числа; $p = \omega S$; замена $p = \omega S$ эквивалентна выбору масштаба ω безразмерного времени $T = \omega t$, равным

$$\omega = \frac{Rab^2}{12\mu R^2}. \quad (15)$$

4. Передаточные функции $W_j(p)$ ($j=1,2$) сил реакций смазочного слоя являются мероморфными с полюсами, равными собственным значениям краевых задач Штурма-Лиувилля (9-10).

Последний результат, в силу независимости проведенного анализа от конкретного вида оператора L_j и краевых условий (10), является справедливым, независимо от принципа смазки и геометрии опоры.

С помощью сценок и расчетов показано, что у сферической сферы

ческой опоры с вибрирующей поверхностью для любых комбинаций параметров, влияющих на характеристики смазочного слоя, эти полюса лежат в левой полуплоскости.

Переходя в выражениях (II) от изображений к оригиналам с учетом (I3, I4), получим соотношения

$$J_1 + J_2 = -2E_1(t) \left[\alpha_2 - f_2(0) \right] \dot{E}_1(t) + \int \dot{E}_1(t) \left[j_2(t-t) - i W_2(t-t) \right] dt; \quad (16)$$

$$J_2 = -C_2 z(t) - \left[\alpha_2 - f_2(0) \right] \dot{z}(t) + \int \dot{z}(t) f_2(t-t) dt. \quad (17)$$

Эти выражения показывают, что помимо позиционных, демпфирующих и гирокопических сил со стороны слоя газовой смазки на шип действуют силы, интегральным образом зависящие от движения центра шипа, которые рядом исследователей не учитываются. Эти силы обусловлены сжимаемостью смазки и их величина в каждый момент времени зависит от того, как шип двигался, начиная с начального момента времени.

Решение для изображений $E_j(\rho), \dot{E}_j(\rho)$, найденное по уравнениям (I) в силу (I3, I4) является мероморфной функцией, поэтому устойчивость равновесного положения будет определяться распределением ее полюсов.

Эти полюса совпадают с нулями функций

$$V_j(\rho) = \Lambda \rho^2 - W_j(\rho), \quad j=1,2, \quad (18)$$

где $\Lambda = m \frac{\rho_0 \delta_0^5}{144 \pi \mu^3 R^6}$ — безразмерная масса.

Так как анализ показывает, что для обобщенной сферической опоры с вибрирующей поверхностью все полюса передаточных функций $W_j(\rho)$ лежат в левой полуплоскости комплексного переменного ρ , принцип аргумента дает критерий, при выполнении которого все нули функций (18) будут лежать в левой полуплоскости ρ .

Критерий. Для того, чтобы все корни характеристических уравнений $V_j(\rho) = 0$ лежали в левой полуплоскости ρ необходимо и достаточно, чтобы при изменении ρ от $+i\infty$ до $-i\infty$ число оборотов векторов, изображающих функции $V_j(\rho)$ ($j=1,2$) по часовой стрелке вокруг начала координат равнялось единице.

С помощью метода \mathcal{D} разбиения в плоскости безразмерного массового параметра Λ и критерия устойчивости, на базе подробного анализа свойств решений краевых задач (9, 10), найдено, что квазив равновесное положение центра масс обобщенной сферической опоры будет асимптотически устойчиво по Ляпунову в малом, если выполняется неравенство

$$\tau < \frac{4\pi\rho_0 R^2}{\delta_0 S_0^2} C_2(H_1, \varphi_1, \varphi_2, \zeta). \quad (19)$$

Здесь: $C_2(H_1, \varphi_1, \varphi_2, \zeta)$ безразмерная радиальная жесткость при квазистационарном течении в слое для нес врашающегося шипа, которая на-

ходится решением стационарной задачи смазки опор с вибрирующей поверхностью методом малых возмущений.

Результат (19) для частного случая $a=1$, $b=0$ (сферические поверхности шара и подшипника разного радиуса) полностью совпадает с выводом исследования, проведенным для этого случая Ран С.Н.Т., методом отличным от метода, использованного в реферируемой работе.

При определении динамических характеристик необходимо знать значения передаточных функций $W_1(p)$ при $p=ig$. Так как решение краевых задач (9,10) не находится в квадратурах, для нахождения приближенного решения краевые задачи Штурма-Лиувилля заменены интегральными уравнениями Фредгольма второго рода. Замена осуществлена с помощью функций Грина. Решение интегрального уравнения Фредгольма применением квадратурной формулы Гаусса заменено решением системы алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами. Такая замена позволяет существенно сократить затраты машинного времени при неизменной точности вычислений.

Все расчеты проведены на ЭЦВМ "Минск-22".

Сферическая опора по параметрам φ_1 и φ_2 оптимизирована из условия максимальной жесткости в радиальном направлении для $a=1$, $b=0$ и из условия максимальной несущей способности в радиальном направлении ($F_2 = C_2 \cdot E = \max$) для $H_1=0,4$ при $a=0$, $b=1$. Оптимизация проводилась путем сравнения характеристик, полученных при различных значениях параметров φ_1 и φ_2 . Полученные значения φ_1 и φ_2 в первом случае составили $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$, $\varphi_1 = 20^\circ$, во втором $\varphi_2 = 60^\circ$, $\varphi_1 = 10^\circ$.

В результате анализа и расчетов установлены следующие свойства передаточных функций $W_1(ig)$ сил, действующих со стороны смазочного слоя:

$$\begin{aligned} Re W_1(ig) &< 0 && \text{при любых } g, \\ Im W_1(ig) &\begin{cases} < 0 \\ > 0 \end{cases} && \begin{cases} \text{при } g > 0, \\ \text{при } g < 0, \end{cases} \\ Re W_1(ig)/g &= -C_2(H_1, \varphi_1, \varphi_2, \xi). \end{aligned} \quad (20)$$

Здесь $C_2(H_1, \varphi_1, \varphi_2, \xi)$ — осевая жесткость сферической опоры.

$$\begin{aligned} Re W_2(ig) &< 0 && \text{при любых } g, \\ Im W_2(ig) &\begin{cases} < 0 \\ > 0 \end{cases} && \begin{cases} \text{при } g \in (+\infty, 1\mu], \\ \text{при } g \in [1\mu, -\infty], \end{cases} \\ Re W_2(i\mu) &= -C_2(H_1, \varphi_1, \varphi_2, \xi), \\ Re W_2(\mu, g) &= -C_{xx}(\mu - g) = -C_{yy}(\mu - g), \\ Im W_2(\mu, g) &= -C_{xy}(\mu - g) = C_{yx}(\mu - g). \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь $C_{xx}, C_{xy}, C_{yx}, C_{yy}$ - элементы матрицы жесткости сферической опоры.

Свойства (20), (21) справедливы для конической, свойства (20) для торцовой, а свойства (21) для цилиндрической опоры в случае равномерного распределения амплитуды сдавливающего движения. Эти свойства играют важную роль при определении областей устойчивости сложных конструкций, в которых используются такие опоры, а также при расчете динамических свойств опор с вибрирующей поверхностью.

В таблице № I приведены значения безразмерной радиальной жесткости сферической опоры в зависимости от параметра ζ (осевой нагрузки) и соответствующая им пороговая скорость вращения ротора весом 0,5 кГ, рассчитанная по формуле (19). Принято $a=0$, $b=1$, $\varphi_1=10^\circ$, $\varphi_2=60^\circ$, $H_1=0,6$, $\delta_0=5 \mu\text{мк}$, $R=2,2 \text{ см}$, $P_a=1,02 \frac{\text{kG}}{\text{см}^2}$.

Таблица № I

ζ	0,00	-0,25	-0,5	-0,75	-1,0
C_x	0,435	0,18	0,0947	0,0568	0,037
$n, \text{мин}$	98000	63000	45600	35400	28500

Разработанный метод исследования устойчивости и анализ краевых задач позволил решить задачу об устойчивости ненагруженного шипа в цилиндрической опоре с вибрирующей поверхностью при произвольном распределении амплитуды сдавливающего движения вдоль осевой координаты.

Найдено, что область устойчивого положения равновесия определяется неравенствами

$$m(A-2C)\left(\frac{\Omega}{2}\right)^2 + [(2C-A)C_{xx}^+ - mC_{xb}^+] \left(\frac{\Omega}{2}\right)^2 + C_{xx}^+ C_{xb}^+ - C_{xb}^+ C_{bx}^+ > 0; \quad (22)$$

$$m\left(\frac{\Omega}{2}\right)^2 < C_{xx}^+, \quad (A-2C)\left(\frac{\Omega}{2}\right)^2 < C_{xb}^+ \quad (23)$$

Здесь A, C - экваториальный, осевой моменты инерции типа соответственно; $C_{xx}^+, C_{xb}^+, C_{bx}^+, C_{yy}^+$ - элементы матрицы жесткости цилиндрической опоры в размерном виде для невращающегося шипа. При симметричном распределении амплитуды сдавливающего движения область устойчивости определяется неравенствами (23), а элементы C_{xx}^+, C_{yy}^+ называются, соответственно, радиальной и угловой жесткостью цилиндрической опоры для невращающегося шипа.

Проведена оценка точности расчета областей устойчивости в спарах с другими принципами смазки, из которых следует, что необходимо обращать особое внимание на точность решения краевых задач типа (9-10).

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПОР С ВИБРИРУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Изучается динамика малых движений центра шипа в окрестности равновесного положения с помощью передаточных функций.

Для движущегося произвольным образом основания передаточные функции имеют вид

$$\frac{\bar{E}_1(P)}{\bar{E}_2(P)} = \frac{-W_2(P)}{A\rho^2 - W_2(P)}, \quad \frac{\bar{Z}_1(P)}{\bar{Z}_2(P)} = \frac{-W_1(P)}{A\rho^2 - W_1(P)}. \quad (24)$$

Здесь $\bar{E}_2(P), \bar{Z}_2(P)$ — изображения для радиального, осевого движения основания, соответственно.

По амплитудным и фазовым частственным характеристикам передаточных функций (24) динамический элемент шип-подшипник опор с вибрирующей поверхностью близок к колебательному звену с большой жесткостью и сравнительно большим демпфированием. По этим характеристикам можно определить резонансные частоты системы и величину коэффициента демпфирования смазочного слоя.

Так, резонансную частоту осевых движений шипа на подвижном основании необходимо спределять из нелинейного уравнения

$$q^* = \sqrt{-\frac{Re W_1(q^*)}{A} - \frac{Im^2 W_1(q^*)}{A Re W_1(q^*)}}, \quad (25)$$

которое решается графически.

Размерная резонансная частота определяется по формуле

$$\omega_0 = \frac{P_a \delta_0^2}{12 M R^2} q^*, \quad (26)$$

Показано, что малая, по сравнению с зазором, статическая неуравновешенность вызывает такие движения геометрического центра шипа, устойчивость которых определяется условиями (19). Найдено аналитическое выражение амплитуды и фазы этого движения в функции скрости вращения ротора.

Исследовано влияние упругости и демпфирующих свойств основания на динамику движений в окрестности равновесного положения и устойчивость самого положения равновесия. Без учета внешнего демпфирования устойчивость положения равновесия определяется неравенствами

$$m_0 m_1 \left(\frac{\Omega}{2}\right)^2 + [(m_1 - m_0) C_2^+ - C^+ m_0] \left(\frac{\Omega}{2}\right)^2 + C^+ C_2^+ > 0; \quad (27)$$

$$m_1 \left(\frac{\Omega}{2}\right)^2 < C^+, \quad m_0 \left(\frac{\Omega}{2}\right)^2 < \frac{C^+ C_2^+}{C^+ + C_2^+}.$$

Здесь m_o - масса шипа, m_r - присоединенная масса основания (масса втулки в упруго-демпферной споре), C^* - жесткость основания, C_g^* - радиальная жесткость смазочного слоя для невращающегося шипа в опорах с вибрирующей поверхностью.

Неравенства (27) показывают, что без учета внешних демпфирующих сил область устойчивости шипа, установленного на упругом основании уменьшается.

С учетом демпфирования, область устойчивости в плоскости безразмерных массовых параметров $\Lambda_r = m_r \frac{C^*}{m_o C_g^*}$ и $\Lambda_o = m_o \frac{C^*}{m_r C_g^*}$ приведена на рис. I. для случая $a=1$, $b=0$, $\zeta=0$, $\varphi=30^\circ$, $\varphi_0=90^\circ$.

$$\Lambda_r = 0,6, \quad \Lambda_o = 1, \quad \vartheta \cdot C = 0,4.$$

Здесь $C = C^* \frac{\vartheta}{\vartheta + \vartheta_0}$ - безразмерная жесткость упругого элемента основания, $\vartheta = a \frac{\vartheta_0}{1 + \vartheta_0}$ - безразмерное демпфирование.

Аналитические выражения (27) и проведенные расчеты позволяют выявить качественную картину зависимости областей устойчивости от коэффициента демпфирования, которая сводится к следующему:

1. Внешнее демпфирование существенно расширяет область устойчивости в плоскости параметров Λ_o и Λ_r , по сравнению со случаем его отсутствия;
2. С увеличением коэффициента демпфирования до определенного предела область устойчивости увеличивается и становится больше той, которую имеет шип на абсолютно жестком основании. С дальнейшим увеличением коэффициента демпфирования область начинает уменьшаться и в пределе стремится к области, которую имеет шип на абсолютно жестком основании;
3. При определенных соотношениях параметров Λ_r , C , ϑ , Λ_o и др., возможно падение в неустойчивую область в районе несколько большей пороговой скорости вращения шипа на абсолютно жестком основании (пик одной из ветвей границы области устойчивости, близи критической массы ротора на абсолютно жестком основании, рис. I), выход из которой возможен при дальнейшем увеличении скорости вращения.

В результате проведенного исследования разработан метод графического определения пороговой скорости вращения ротора на упругом основании при наличии внешнего демпфирования, позволяющий учесть все факторы, влияющие на устойчивость и одновременно определить значение безразмерной частоты на границе области устойчивости.

Метод применим к гладкой цилиндрической споре, подшипник которой устанавливается на упруго-демпферные элементы и позволяет полностью учсть сжимаемость и распределенность параметров слоя смазки.

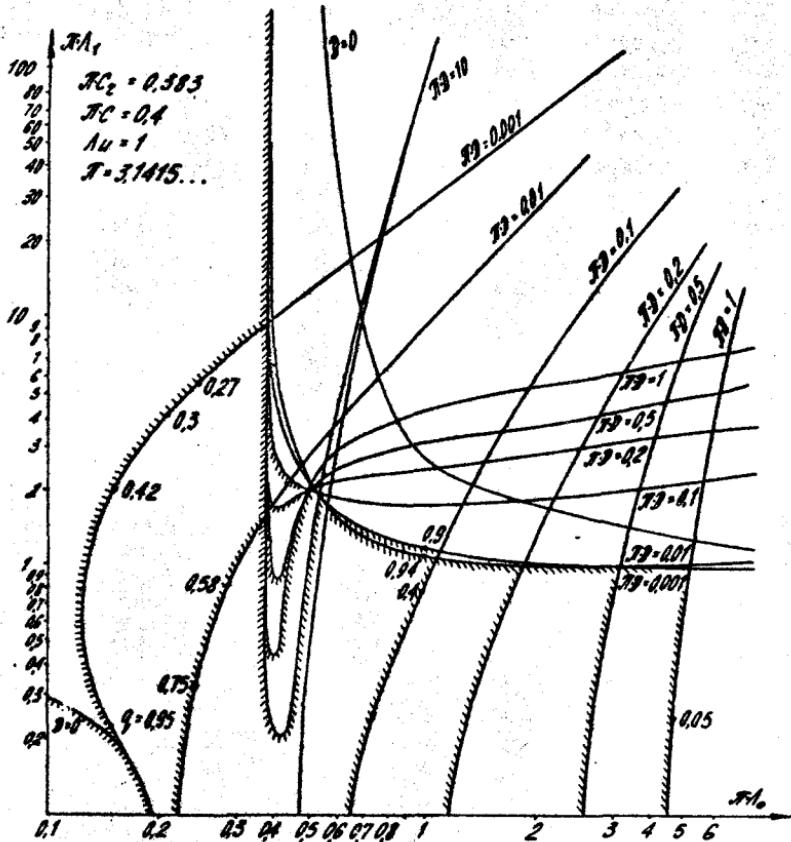


Рис. I

Существо метода состоит в графическом решении системы уравнений относительно двух неизвестных: безразмерной скорости Λ/Λ_0 и безразмерной частоты Ω/Ω_0 , которая имеет вид

$$C_{xx}(\Lambda/\Lambda_0 - q) = \frac{\log^2 [D^2 q^2 + (C - \Lambda/\Lambda_0 q^2)(C - q^2(\Lambda_0 + \Lambda_1))]}{[C - q^2(\Lambda_0 + \Lambda_1)]^2 + D^2 q^2}; \quad (28)$$

$$C_{xy}(\Lambda/\Lambda_0 - q) = \frac{\Lambda_0^2 q^5 D}{[C - q^2(\Lambda_0 + \Lambda_1)]^2 + D^2 q^2}.$$

Метод позволяет, по известным зависимостям элементов матрицы жесткости $C_{xx}(Nu)$, $C_{xy}(Nu)$ от скорости вращения ротора Nu , находить пороговые скорости в зависимости от масс шипа и втулки, жесткости и демпфирования без использования больших ЭЦВМ.

Элементы $C_{xx}(Nu)$, $C_{xy}(Nu)$ матрицы жесткости определяются решением стационарной задачи смазки газом методом малых возмущений.

Найдены передаточные функции системы "шип-подшипник" с учетом жесткости и демпфирующих свойств основания. С их помощью можно отыскать резонансные частоты и построить амплитудные и фазовые частотные характеристики для различных входных и выходных величин.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХОПОРНОЙ СИСТЕМЫ НА ГАЗОВОЙ СМАЗКЕ

В большинстве случаев конструкции подвесов представляют собой двухопорные системы. Под действием внешних сил и сил со стороны смазочного слоя, ротор совершает движение в пространстве ограниченном зазорами в опорах, поэтому необходимо изучить пространственное движение ротора.

Уравнения пространственного движения ротора в работе линеаризованы и с помощью преобразования Лапласа записаны в изображениях. Найдено выражение для сил, приведенных к центру масс ротора, действующих со стороны смазочных слоев произвольных опор на ротор, который движется произвольным образом в окрестности равновесного положения.

Это выражение в изображениях имеет вид:

$$\bar{F}_r = -C(P) \cdot \bar{\delta}_r, \quad (29)$$

где

$$C(P) = \begin{pmatrix} C_{11}(P) & C_{12}(P) \\ C_{21}(P) & C_{22}(P) \end{pmatrix};$$

$$C_{11}(P) = C'_{11}(P) + C''_{11}(P); \quad C_{12}(P) = C'_{12}(P) + C''_{12}(P) - C'_n(P)\rho_1^+ - C''_n(P)\rho_2^+;$$

$$C_{21}(P) = C'_{21}(P) + C''_{21}(P) + \rho_1^+ C'_n(P) + \rho_2^+ C''_n(P);$$

$$C_{22}(P) = C'_{22}(P) + C''_{22}(P) + \rho_1^+ C'_{12}(P) + \rho_2^+ C''_{12}(P) - T^+ -$$

$$- C'_{21}(P)\rho_1^+ - C''_{21}(P)\rho_2^+ + \rho_1^+ C'_n(P)\rho_1^+ - \rho_2^+ C''_n(P)\rho_2^+.$$

Здесь $\bar{F}_r = \{\bar{F}_x, \bar{F}_y, \bar{M}_x, \bar{M}_y\}$ — главный вектор и главный момент, приведенные к центру масс ротора и записанные в матричной форме, в изображениях, $\bar{\delta}_r = \{\bar{x}_r, \bar{y}_r, \bar{\delta}_r, \bar{\delta}_z, \bar{\theta}_r\}$ — матрица столбец координат, которые определяют движение центра масс ротора и движение

вокруг центра масс в изображениях; $\bar{\delta}_1, \bar{\delta}_2$ - изображения для углов Эйлера оси вращения ротора; $C(P)$ - матрица, элементы которой зависят от параметра преобразования Лапласа P ;

$$\rho_k = \begin{pmatrix} 0 & \rho_k^+ & 0 \\ -\rho_k^+ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (k=1,2) \text{ - кососимметрические матрицы,}$$

определяющие положение характерных точек спор, относительные центра масс ротора; ρ_k^+ - расстояние от центра масс ротора до характерной точки каждой из опор; $C_{ij}(P)$ - матрицы, зависящие от свойств смазочных слоев опор двухопорной системы. Последние матрицы определяются, когда решается задача о движении центра шара в окрестности равновесного положения для одной из опор, исследование которой всегда предшествует изучению движения двухопорной системы с такими опорами.

Формула (29) имеет место для любых двухопорных конструкций с произвольными опорами на газовой смазке и может быть использована при исследовании устойчивости и динамических свойств несимметрических двухопорных конструкций с любыми спорами на газовой смазке.

В работе приведена методика определения элементов матрицы $C_{ij}(P)$ для произвольных опор на газовой смазке и найдены эти элементы для сферической споры с вибрирующей поверхностью.

Если одновременно движутся основание и ротор, т.е. на ротор действуют со стороны смазочных слоев силы, которые в изображениях имеют вид

$$\bar{F} = -C(P)(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_2). \quad (30)$$

Здесь: $\bar{\delta}_j = \{x_j, y_j, z_j, \bar{\delta}_j, \bar{\delta}_{jz}\}$ - матрица столбец, определяющая движение основания в окрестности точки, совпадающей с центром масс ротора в положении равновесия.

Это позволило найти передаточные функции двухопорной системы со сферическими опорами для динамического элемента "ротор-основание", рис. 2.

Здесь

$$\begin{aligned} \bar{\delta}_j &= \bar{x}_j + i\bar{y}_j; \\ \bar{\delta}_j &= \bar{\delta}_j + i\bar{\delta}_{jz}; \\ j &= 1, 2. \end{aligned}$$

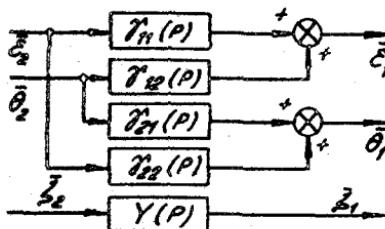


Рис.2

Передаточные функции рис.2 показывают, что в двухопорной системе со сферическими опорами радиальные и угловые движения ротора нельзя рассматривать, как не влияющие одно на другое, вследствие перекрестных связей. Эти связи для симметричного ротора обусловлены осевым нагружением системы и оказывают существенное влияние на устойчивость.

Передаточные функции, полученные для двухопорной конструкции на двух полусферах с вибрирующей поверхностью позволяют рассчитать резонансные частоты такой конструкции на подвижном основании.

Исследована устойчивость равновесного положения такой двухопорной системы и показано, что область устойчивости определяется неравенствами

$$m(A-2C)\left(\frac{\Omega}{2}\right)^2 - \left[\left(m\rho^2 + A - 2C\right)(C_{z1}^+ + C_{z2}^+) + m\rho(F_z^{02} - F_z^{01})\right]\left(\frac{\Omega}{2}\right)^2 + \\ + \rho(F_z^{02} - F_z^{01})(C_{z1}^+ + C_{z2}^+) + 4\rho^2 C_{z1}^+ \cdot C_{z2}^+ > 0; \quad (31)$$

$$m < \frac{4(C_{z1}^+ + C_{z2}^+)}{\Omega^2}; \quad (32)$$

$$A < 2C + \frac{4\rho^2(C_{z1}^+ + C_{z2}^+)}{\Omega^2} + \frac{4\rho(F_z^{02} - F_z^{01})}{\Omega^2}. \quad (33)$$

Здесь: A, C – экваториальный, осевой моменты инерции ротора; ρ – расстояние от центра полуэфелических опор до центра масс ротора; F_z^{02}, F_z^{01} – проекции осевых сил реакций смазочного слоя на ось вращения ротора, найденные при квазистационарном течении смазки; C_{z1}^+, C_{z2}^+ – радиальные жесткости смазочных слоев первой и второй опор для невращающегося шипа, которые вследствие осевого нагружения ротора, различны.

В выражения (31-33) входят разности проекций осевых сил ($F_z^{02} - F_z^{01}$), действующих на ротор, которые могут сказать влияние на устойчивость либо при очень большой их величине, либо когда расстояние центра полусферических опор до центра масс ротора ρ соизмеримо с величиной зазора в опорах. В остальных случаях их влиянием можно пренебрегать.

Расчеты областей устойчивости в плоскости параметров масса ротора m , его экваториальный момент A , показали, что осевое нагружение двухопорной конструкции на двух полусферах с вибрирующей поверхностью в зависимости от сопоставления между массой и экваториальным моментом может либо улучшать, либо ухудшать устойчивость вращающегося ротора. Оптимальной по устойчивости будет конструкция, у которой экваториальный момент инерции будет минимальным.

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ОПОР С ГАЗОВОЙ СМАЗКОЙ В ПРИМЕНЕНИИ К ПРИБОРАМ

В последние годы появились работы по оптимизации опор с газовой смазкой, по различным критериям (максимум жесткости слоя, минимальная величина уводящих моментов и др.). Иногда оптимизация по одному критерию приводит к ухудшению ряда других характеристик, что нежелательно. Слабо изученным является вопрос, связанный с оптимизацией динамических характеристик опор и конструкций с такими опорами.

С целью выяснения условия, при выполнении которого опоры газодинамического типа будут оптимальными по устойчивости, исследована устойчивость положения равновесия ненагруженного шипа с шевронным профилем, нанесенным на поверхности подшипника. Функция зазора смазочного слоя полагалась произвольной, но непрерывной и дважды дифференцируемой, а давление предполагалось удовлетворяющим известному нелинейному изотермическому уравнению Рейнольдса.

Были составлены уравнения возмущенного движения шипа в окрестности равновесного положения и найдено характеристическое уравнение, определяющее устойчивость по Ляпунову.

Анализ характеристического уравнения, кривых ϑ - разбиения и годографа функции $V(\rho)$ показывает, что, если угол положения

$\vartheta = \arctg \left(\frac{C_{xy}}{C_{xx}} \right)$ линии центров шипа и подшипника под действием малой радиальной нагрузки равен нулю, то частота блужданий шипа на границе области устойчивости стремится к нулю, а область устойчивости по массовому параметру A неограниченно расширяется.

Поэтому оптимальной с точки зрения устойчивости будет опора, у которой угол положения линии центров шипа и подшипника под действием малой радиальной нагрузки будет минимальным.

Проведено исследование уходов двухступенчатого гироскопа с произвольными опорами на газовой смазке по главной оси и получено условие инвариантности уходов к действующим ускорениям.

Найдено, что инвариантность будет обеспечена, если матрицы $N\mathcal{K}_H$, $N\mathcal{K}_B$ будут кососимметрическими.

Здесь: \mathcal{K}_H , \mathcal{K}_B - клетки матрицы, определяющей податливость смазочных слоев двухопорной конструкции ротора гироприбора; $N = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ - постоянная матрица.

Как показали вычисления матриц $N\mathcal{K}_H$ и $N\mathcal{K}_B$, необходимым условием выполнения инвариантности уходов, является равенство нулю угла положения линии центров $\vartheta = \arctg \left(\frac{C_{xy}}{C_{xx}} \right)$.

Таким образом, установлена связь между устойчивостью вращающегося ротора на слое газовой смазки и инвариантностью уходов двухстепенного гирокопа с таким ротором, выражаяющаяся в том, что если угол положения φ равен нулю, то равновесное положение ротора устойчиво при любой его массе, а инвариантность уходов может быть обеспечена при выполнении дополнительных условий. Если $\varphi \neq 0$, то инвариантность обеспечена быть не может, а устойчивость ротора при некоторой его массе может быть нарушена.

ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОПОР С ВИБРИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

С целью проверки правильности математической модели для разделения давления в зазоре сферической споры и работоспособности сферической опоры с вибрирующей поверхностью совместно с В.А. Бицкиным была разработана и изготовлена экспериментальная установка, которая позволяет снять нагрузочные характеристики, торцевых сферических, конических опор с вибрирующей в осевом направлении, поверхностью, которые нагружаются в осевом направлении. Для получения механических колебаний большой частоты 5–20 кГц разработана специальная резонансная система (генератор механических колебаний), в которой используются резонансные свойства упругих оболочек.

Генератор механических колебаний представляет собой стальной диск, изгибные колебания которого на резонансной частоте возбуждаются пьезоскраперическим вибратором. Диск крепится по узловой окружности изгибных колебаний, а к его центру крепится полусфера, которая колеблется вместе с центром диска с высокой частотой. Как показали испытания такой генератор обладает высоким К.П.Д. преобразования электрических колебаний в механические.

Экспериментальная установка содержит вертикальный вал, вращающийся в газовых опорах с внешним нагнетанием смазки. На верхней стороне вала крепится эпоксидной смолой полусфера с внутренней сферической поверхностью. На нижней стороне имеется пневмопоршень, с помощью которого создается нагрузка на сферическую опору. Ответная часть сферической споры, полусфера с внешней сферической поверхностью, крепится к генератору механических колебаний и колеблется с высокой частотой.

Измерительная аппаратура включает емкостные датчики для измерения перемещений нагруженой детали, специальный емкостный датчик для измерения амплитуд высокочастотных механических колебаний и

пневматическую систему создания и измерения осевой нагрузки. Приводится описание всех элементов установки и методики эксперимента.

Были испытаны две сферические опоры с закрытым центром, изготовленные из керамики на основе окиси алюминия КС-37 с параметрами: радиус вала $Z = 22,480 \pm 0,0005$, радиус подшипника $R = 22,501 \pm 0,0005$, средний зазор $\delta_0 = 0,0105 \pm 0,0005$, чистота поверхности 12 .

Частота вибрации поверхности при амплитудах $h_1 = 5$ и $7 \mu\text{m}$ составляла 5,6 кГц, а при амплитуде $1,6 \mu\text{m}$ - 15 кГц.

В диапазоне нагрузок (для $h_1 = 7 \mu\text{m}$) до 2,5 кГ, (для $h_1 = 5 \mu\text{m}$) до 2 кГ, (для $h_1 = 1,6 \mu\text{m}$) до 1,3 кГ смазочный слой надежно сохранил свои свойства на протяжении всего времени испытаний. При этом не было отмечено неустойчивых явлений типа "пневмомолот", имеющих место в опорах с внешним нагнетанием газовой смазки.

В диапазоне от нуля до предельных нагрузок наблюдалось хорошее качественное согласование теории и опыта рис.3. На рисунке приведены результаты эксперимента для трех различных значений амплитуды вибрации поверхности. Количественные расхождения можно объяснить погрешностями начальной выставки сосности полусфер и неточностью измерений, поэтому можно сделать вывод о применимости в инженерных расчетах результатов, полученных на базе исходной математической модели, оснований на асимптотическом анализе и допущении о изотермичности течения.

С целью проверки правильности положения теории о том, что взвешиваемая масса колеблется с пренебрежимо малыми амплитудами была измерена амплитуда колебаний подвешиваемой массы при различных амплитудах колебаний сферической поверхности и при различных нагрузках. На частоте колебаний поверхности 5,6 кГц при амплитудах 5-7 μm , максимум амплитуды колебаний подвешиваемой массы приходился на максимальные нагрузки и составил величину $< 0,5 \mu\text{m}$. На частоте колебаний 15 кГц и амплитуде 1,5 μm не удалось достоверно замерить амплитуду колебаний подвешиваемой массы, так как уровень измеряемого сигнала был менее 0,05 μm , что ниже точности измерений.

Из проведенных измерений следует вывод: амплитуда колебаний подвешиваемой массы по крайней мере на порядок меньше амплитуды колебаний поверхности при частотах > 5 кГц.

С целью исследования возможности создания подвеса на сферических опорах с вибрирующей поверхностью, проверки методики расчета его статических и динамических свойств и исследования его работоспособности был рассчитан и изготовлен макет подвеса га двух

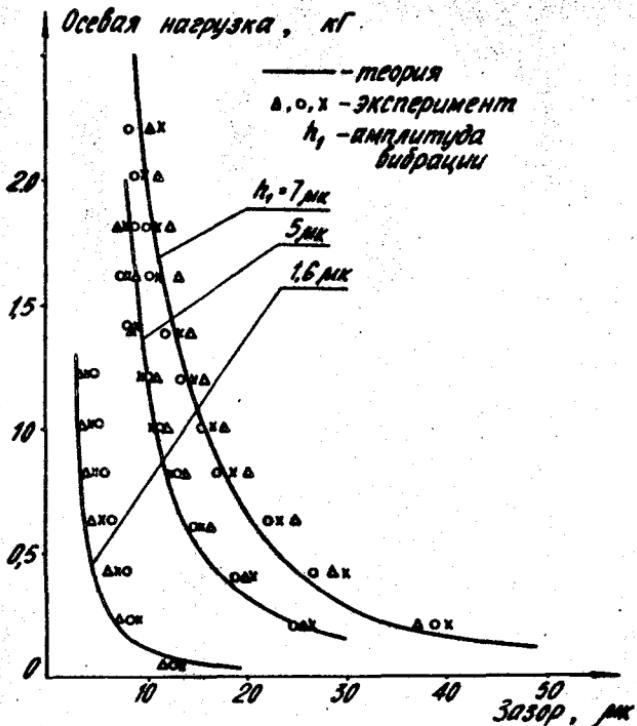


Рис. 3

сферических опорах с вибрирующей поверхностью.

Макет состоит из двух стальных плит, соединенных с помощью трех стоек, к которым крепятся два генератора механических колебаний. Подвешиваемая масса изготовлена из бронзы в виде ротора, к которому эпоксидной смолой приклеены полусфера с внутренней сферической поверхностью. Вес ротора вместе с полусферами составил 565 г. Для разгона ротора был использован пневматический привод серийного гиromотора.

Измерения колебаний подвешиваемого ротора показали, что их амплитуда на порядок меньше колебаний поверхности, сдавливающей слой, что также подтверждает возможность в теоретическом исследовании не учитывать влияния этих колебаний на характеристики смазочного слоя.

Во время испытаний положение равновесия ротора было устойчивым, что подтверждает выводы теории.

Были проведены испытания вращающегося ротора. Статически отба-

лансируемый в собственных опорах ротор раскручивался воздушной турбиной в горизонтальном и вертикальном положении. В горизонтальном положении при амплитудах вибрации поверхности 2,2 μm на частоте 15 кГц удалось раскрутить ротор до 19,5 тыс.об/мин. На этой скорости амплитуда колебаний оси ротора резко возросла и было отмечено касание поверхностей шипа и подшипника.

В вертикальном положении удавалось раскрутить ротор только до 21 тыс. об/мин, так как характеристики пневмопривода не позволили достичь больших значений угловых скоростей вращения ротора. В процессе разгона до 21 тыс.об/мин положение равновесия ротора было устойчивым. Наблюдались незначительные колебания, вызванные остаточной статической и динамической несбалансированностью.

Предсказанное теорией увеличение пороговой скорости вращения вертикального ротора, вследствие вибрации поверхности в осевом направлении, наблюдалось на опыте.

Были проведены испытания макета в условиях качки основания и испытана способность выдерживать ударные нагрузки. Испытания показали способность смазочного слоя выдерживать умеренные вибрационные и ударные нагрузки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На примере сферической споры с вибрирующей поверхностью разработан и обоснован математический критерий и метод для исследования устойчивости по Ляпунову равновесных положений роторов и подвесов в опорах с газовой смазкой, который учитывает без каких-либо упрощений свойства сжимаемости и распределенность параметров газового смазочного слоя. Исследование показывает, что передаточные функции сил реакций смазочного слоя являются мероморфными с полюсами, равными собственным значениям краевых задач, которые решаются при нахождении этих функций. Распределение полюсов этих функций играет важную роль при анализе устойчивости равновесного положения шипа на слое газовой смазки. Разработанный критерий и метод исследования устойчивости применим к спорам с любой геометрией и с любым принципом смазки.

2. Разработана методика расчета устойчивости и динамических свойств с использованием передаточных функций, опор сферической, конической, цилиндрической формы с вибрирующей поверхностью. Найден подход к исследованию устойчивости и динамики несимметричной двухопорной конструкции с произвольными опорами на газовой смазке, который позволяет, используя результаты исследований, проведенных для

одной из опор, отыскать области устойчивости и рассчитать динамику произвольной двухопорной системы.

Установлено, что для улучшения устойчивости ротора на сферических и конических спарах, нагруженного в осевом направлении, необходимо уменьшать экваториальный момент инерции ротора при неизменной массе.

3. Предложен графический метод определения пороговой скорости ротора, вращающегося в упруго-демпферных опорах, который учитывает без каких-либо упрощений свойства сжимаемости слоя газовой смазки. Он позволяет без использования больших ЭЦВМ рассчитать пороговую скорость абсолютно жесткого ротора на упруго-демпферном основании с учетом жесткости и демпфирования, масс шипа и втулки, по известным зависимостям жесткости смазочного слоя при стационарном течении смазки от скорости вращения ротора. Метод применим не только к опорам с вибрирующей поверхностью, но и к гладкой цилиндрической спаре.

4. При наличии осевых колебаний поверхности сферы рекомендуется использовать для подвесов сферические опоры с одинаковыми радиусами шипа и подшипника, так как несущая способность и жесткость сферической опоры с такой геометрией зазора в 2 + 2,5 раза больше, чем у сферической опоры с разными радиусами шипа и подшипника.

Параметры сферического пояса рекомендуется принимать равными $\gamma_1 = 10^\circ$, $\gamma_2 = 60^\circ$.

5. В результате исследований двухступенчатого гирокомпаса с опорами на газовой смазке выявлены условия оптимизации такого прибора по устойчивости ротора и точности прибора. Установлена связь между оптимальной устойчивостью ротора и инвариантностью уходов гироприбора к действующим ускорениям.

6. Экспериментальное исследование нагрузочных характеристик сферической спары с вибрирующей поверхностью показывает вполне удовлетворительное согласование с теорией, что доказывает возможность применения результатов, полученных на базе исходной математической модели, в практике инженерных расчетов. Испытания вращающегося ротора показали, что вибрация одной из поверхностей опоры стабилизирует равновесное положение вертикально вращающегося ротора, что согласуется с выводами теории и может быть использовано для стабилизации быстроротающихся роторов на жидкостной и газовой смазке. Теоретические исследования и испытания подвеса на сферических опорах доказывают возможность применения такого подвеса в различных областях техники.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Неустановившееся течение вязкого газа между двумя твердыми стенками, одна из которых свободна и колеблется с большой частотой. Изв. АН СССР, "Механика жидкости и газа", № 2, 1971, с. III-II6 (совместно с Биушкиным В.А., Завьяловым Г.А.).
2. Исследование подвеса в опорах с колеблющимися стенками на подвижном основании. В сб. Проблемы развития газовой смазки, ч.2, М., "Наука", 1972, с. I8-25 (совместно с Биушкиным В.А., Завьяловым Г.А.).
3. Исследование произвольной опоры с вибрирующей поверхностью. В сб. Приборостроение, Пермь, 1970, № 92, с. III-II7 (совместно с Биушкиным В.А., Завьяловым Г.А., Нечитайло И.И.).
4. Условие инвариантности уходов двухстепенного гироскопа с произвольными опорами на газовой смазке по главной оси к действующим ускорениям. Изв.вузов "Приборостроение", 1972, № II, с.80-83 (совместно с Завьяловым Г.А.).
5. О жесткости и податливости слоя газовой смазки в произвольных опорах и некоторых системах опор. В сб. Приборострение, Пермь, 1974, № I29, с. 96-I03, (совместно с Завьяловым Г.А.).