лей осуществлена пока лишь частично. Тем не менее с ее помощью проведен анализ виброхарактеристик ряда различных авиационных ГТД, который показал большие возможности и эффективность автоматизированной системы прогнозирования амплитудно-частотных и других вибрационных характеристик ГТД.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов А. В.* Расчет резонансных режимов работы ГТД с использованием ЭВМ. — Труды МАИ, 1972, вып. 245.

2. *Генкин Г. И., Иванов А. В., Самохин В. М., Чистотин В. П.* Определение вибродиагностических признаков состояния ГТД с помощью математических моделей. — В кн.: Тез. докл. VII науч.-техн. конф. Конструкционная прочность двигателей. — Куйбышев, 1980.

УДК 621.822.5

Д. Е. Чегодаев, В. Н. Самсонов

ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР

Разработка и исследование динамических систем с использованием в качестве рабочего тела газа ведутся в последние годы по пути осуществления наиболее полной целевой реализации жесткостных и демпфирующих свойств опор с внешним наддувом. Это объясняется широкими возможностями, которыми обладают такие опоры и, в частности газостатические опоры (ГСО). Они имеют низкие собственные частоты и регулируемые упруго-демпфирующие характеристики [1], что позволит применять их в виброизолирующих устройствах, в узлах подвески оборудования, для генерации механических колебаний. Простота, технологичность конструкции, малые тепловые деформации, возможность работы на газе любого состава и температуры — все эти качества обеспечивают большие возможности использования газостатических устройств в современной авиационной технике, в двигателях летательных аппаратов. Особенно перспективными оказываются активные газостатические опоры [2], в которых в магистралях подвода и отвода газа устанавливаются дросселирующие элементы,

охваченные обратными связями по перемещению объекта или по давлению газа в рабочей камере.

Возможности использования газостатических опор, пути дальнейшего совершенствования конструкций могут быть проиллюстрированы на примере их использования в системах для виброизоляции роторных машин, подвески тяжелых платформ.

При установке газостатической опоры *1* между корпусом *2* и подшипником *3* (рис. 1) может быть обеспечено уменьшение уровня вибраций от вращающегося ротора *4*. На рис. 2

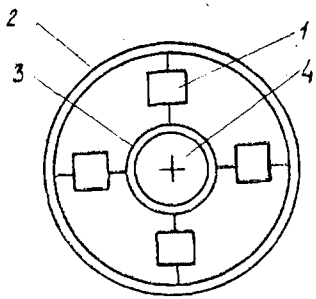

Рис. 1. Упругая подвеска ротора

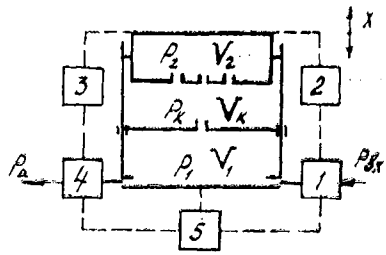

Рис. 2. Схема активной газостатической опоры

показана одна из общих схем газостатических опор, конструктивное исполнение которой позволяет решать различные задачи исследования динамики систем с учетом характеристик подвески. Принцип действия такой опоры заключается в компенсации изменяющейся внешней нагрузки, источником которой является несбалансированный ротор или вибрации корпуса, силами давления газа в проточной рабочей камере. Наличие проточной камеры позволяет вывешивать объект (ротор, платформу и т. д.) в определенном положении, причем независимо от статической нагрузки.

Предельные возможности ГСО могут быть выявлены на основании исследований динамических характеристик схем различного исполнения, например, при введении в конструкцию опоры дополнительных демпферных камер (на рис. 2 объемы V_1, V_2), регуляторов входного и выходного расходов газа и т. д.

Проведенные исследования упруго-демпфирующих и амплитудно-частотных характеристик показали, что динамика газостатических опор описывается в рамках модели с релак-

сационным механизмом демпфирования [3]. Из уравнений неразрывности движения рабочего тела через тракт опоры и состояния при допущении изотермичности потока газа получена реакция газового слоя в рабочем объеме трехкамерной ГСО на динамическое возмущение в виде

$$c_{\text{дин}}(s) = c\,\frac{T^3_{13}s^3 + T^2_{12}s^2 + T_{11}s + 1 + W_x(s)}{T^3_{23}s^3 + T^2_{22}s^2 + T_{21}s + 1 + W_{\text{п}}(s)}, \qquad (1)$$

где c — статическая жесткость; T_{13}, T_{12}, T_{11}, T_{23}, T_{22}, T_{21} — постоянные комплексы, которые характеризуют динамические процессы в опоре; $W_x(s)$, $W_{\text{п}}(s)$ — передаточные функции цепи обратной связи (на рис. 2 цепи 3—4, 2—1 связывают перемещение объекта с давлением газа, подводимого в рабочую камеру, а цепи 5—1, 5—4 связывают давление в рабочей камере с давлением питания и слива).

В отличие от однокамерной газостатической опоры, свойства которой достаточно полно изучены [1—4], в многокамерных ГСО имеются дополнительные возможности по регулированию характеристик за счет изменения в определенных пределах параметров $T_{13} \div T_{21}$ и передаточных функций активных связей $W_x(s)$, $W_{\text{п}}(s)$, формирующих необходимый закон управления. Более детально эти возможности могут быть определены при исследовании упруго-демпфирующих и амплитудно-частотных характеристик многокамерных ГСО.

Для газостатического устройства с одной рабочей и двумя демпферными камерами без управления в зависимости (1) отсутствуют члены $W_x(s)$ и $W_{\text{п}}(s)$, и любые изменения в динамике могут быть достигнуты за счет варьирования параметров опоры в пределах, обусловленных возможностями реальных конструкций. Это вызвано тем, что каждый из комплексов опоры в выражении (1) в конечном итоге определяется геометрическими и гидродинамическими параметрами конструкции. Каждый комплекс получен из выражений

$$T^3_{13} = T_1 T_3 T_5; \quad T^2_{12} = T_3 T_5 - T_1 T_3 - T_1 T_5; \quad T_{11} = T_1 - T_3 - T_5;$$

$$T^3_{23} = T_2 T_3 T_5; \quad T^2_{22} = T_3 T_5 - T_2 T_3 - T_2 T_5;$$

$$T_{21} = T_2 - T_3 - T_4 - T_5.$$

Здесь $T_1 \div T_5$ — постоянные времени опоры, каждая из которых характеризует работу отдельных камер и определяется следующими зависимостями:

$$T_1 = \frac{\rho_k F_k}{a_1 - a_2}; \quad T_2 = \frac{\rho_k V_k}{n p_k (b_2 - b_1)}; \quad T_3 = \frac{\rho_1 V_1}{n p_1 b_5};$$

$$T_4 = \frac{\rho_1 V_1}{n p_1} \frac{b_3 b_4}{(b_2 - b_1) b_5 b_6}; \quad T_5 = \frac{\rho_2 V_2}{n p_2 b_6},$$

где ρ — плотность газа; F_k — площадь рабочей камеры; V_1, V_2 — объемы демпферных камер; n — показатель политропы; p_k, p_1, p_2 — давления в камерах; a_1, a_2, $b_1 \div b_6$ — коэффициенты, характеризующие чувствительность изменения расходных характеристик через дросселирующие элементы на входе и выходе камер к изменению положения подвижной массы опоры и давления в камерах.

На основании динамической реакции опоры (1) получены динамическая жесткость и демпфирование в виде

$$c_{\text{упр}}(\bar{\omega}) = c \frac{\bar{T}^3_{13} \bar{T}^3_{23} \bar{\omega}^6 - (\bar{T}^3_{23} \bar{T}_{11} + \bar{T}^3_{13} \bar{T}_{21} - \bar{T}^2_{12} \bar{T}^2_{22}) \bar{\omega}^4 + (\bar{T}_{21} \bar{\omega} - \bar{T}^3_{23} \bar{\omega}^3)^2 +}{} \rightarrow$$

$$\frac{+ (\bar{T}_{11} \bar{T}_{21} - \bar{T}^2_{22} - \bar{T}^2_{12}) \bar{\omega}^2 + 1}{+ (1 - \bar{T}^2_{22} \bar{\omega}^2)^2}; \tag{2}$$

$$D(\bar{\omega}) = c \bar{\omega} \frac{(\bar{T}^3_{13} \bar{T}^2_{22} - \bar{T}^3_{23} \bar{T}^2_{12}) \bar{\omega}^4 - (\bar{T}^2_{22} \bar{T}_{11} + \bar{T}^3_{13} - \bar{T}^3_{23} - \bar{T}^2_{12} \bar{T}_{21}) \times (\bar{T}_{21} \bar{\omega} - \bar{T}^3_{23} \omega^3)^2 +}{} \rightarrow$$

$$\frac{\times \bar{\omega}^2 + \bar{T}_{11} - \bar{T}_{21}}{+ (1 - \bar{T}^2_{22} \bar{\omega}^2)^2}. \tag{3}$$

В зависимостях (2) и (3) все величины безразмерные, т. е. $\bar{\omega} = \omega/\omega_0$; $\bar{T}_{13} = T_{13}\omega_0$; $\bar{T}_{23} = T_{23}\omega_0$ и т. д. Здесь $\bar{\omega}$ — частота внешнего возмущения; $\omega_0^2 = c/m$ — собственная частота опоры. Поэтому в дальнейшем черта над буквенным обозначением параметров опускается.

Из графиков, построенных по полученным зависимостям (рис. 3, кривая *1*), следует, что при увеличении частоты возмущения ω динамическая жесткость возрастает от 1 на низких частотах до некоторой предельной величины, определяемой жесткостью непроточной многокамерной системы [3], на высокой частоте. Характерным для многокамерных опор является наличие промежуточных горизонтальных участков на графиках зависимости $c_{\text{упр}}(\omega)$, которые могут быть изменены — устранены или расширены путем соответствующего выбора значений параметров $\bar{T}$. Например, расширение горизонтального участка на частотах $\omega = 1$—20 (рис. 3, а, кривая *1*) может быть достигнуто при уменьшении величин T_{12} и T_{22}, т. е. при уменьшении объемов демпферных камер.

При быстрых перемещениях массы поршня опоры подводимое давление газа не успевает компенсировать давление в

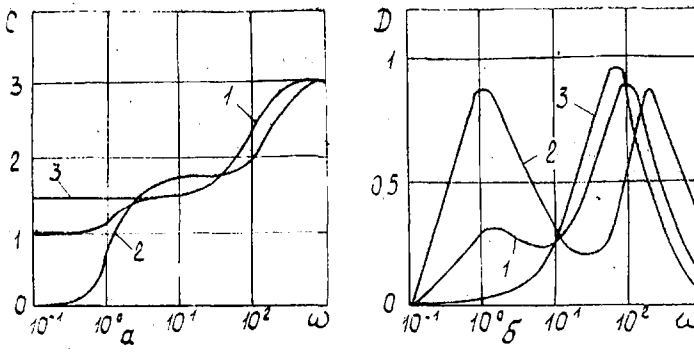

Рис. 3. Зависимость динамической жесткости (а) и демпфирования (б) газостатической опоры от частоты возмущения при $T_{13} = 0{,}06$; $T_{12} = 0{,}2$; $T_{11} = 1{,}3$; $T_{23} = 0{,}04$; $T_{22} = 0{,}12$; $T_{21} = 0{,}8$; $T_{1\,р} = T_{2\,р} = 1$: *1* — $k_р = 0$; *2* — $k_р = -1$; *3* — $k = 0{,}5$

рабочей камере. В этом случае нагрузка воспринимается силами, обусловленными сжатием и расширением газа в объемах рабочей и демпферных камер. Поэтому на характеристике $c_{упр}(\omega)$ появляются горизонтальные участки. Демпфирование опоры на частотах, соответствующих горизонтальным участкам жесткостной характеристики близко к нулю, поскольку в этих случаях дросселирующие элементы системы не рассеивают энергию, работая или в режиме малых относительных частот или режиме запирания. Амплитудно-частотная характеристика многокамерной ГСО

$$R(\omega) = \sqrt{\frac{(1 - T^2_{12}\omega^2)^2 + (T_{11}\omega - T^3_{13}\omega^3)^2}{[(1-\omega^2) - \omega^2 (T^2_{12} - T^2_{22}\omega^2)]^2 + [\omega (T_{11} - T_{21}\omega^2) - \omega^3 (T^3_{13} - T^3_{23}\omega^2)]^2}},$$

представленная на рис. 4, имеет четыре резонансные частоты, которые зависят от величин соотношений параметров T_{13}/T_{23}; T_{12}/T_{22}; T_{11}/T_{21}. В зависимости от выбора параметров и условий работы систем, созданных на основе многокамерной ГСО, могут быть получены любая из четырех резонансных частот. Например, в случае использования ГСО в качестве разгрузочного устройства при испытаниях тяжелых объектов необходимо передать сигнал от источника возбуждения на объект без искажения, т. е. обеспечивая значение $R(\omega) = 1$ в возможно большем диапазоне частот. Это достигается выбором

основных параметров ГСО, соответствующих резонансной кривой *4* на рис. 4.

Из всех вариантов включения в ГСО активных связей наибольший интерес с точки зрения возможности практической реализации представляет схема с дополнительной цепью активной связи, формирующей управление общего вида на входе в рабочую камеру по перемещению подвижной массы

$$W_x(s) = k_р \frac{T_{1р} s + 1}{T_{2р} s + 1},$$

где $k_р$ — коэффициент усиления активной цепи; $T_{1р}$, $T_{2р}$ — постоянные, характеризующие ее свойства.

Для этого случая динамическая реакция ГСО имеет вид

$$c_{дин}(s) = c \frac{T^3_{13} T_{2р} s^4 + (T^3_{13} + T^2_{12} T_{2р} + T_3 T_5 k_р T_{1р}) s^3 + (T^2_{12} + T_3 T_5 k_р + T_{11} T_{1р} - k_р T_{1р} T_3 - k_р T_{1р} T_5) s^2 + (T_{21} + T_{2р}) s + 1}{T^3_{23} T_{2р} s^4 + (T^3_{23} + T^2_{22} T_{2р}) s^3 + (T^2_{22} + T_{21} T_{2р}) s^2 + (T_{11} - k_р T_3 - k_р T_5 + T_{2р} + k_р T_{1р}) s + 1 + k_р}.$$

Анализ упругой и демпфирующей составляющих динамической реакции (4), представленных на рис. 3, а, б (кривые *2*, *3*) показывает, что на низких частотах использование управления общего вида позволяет в широких пределах изменять динамические свойства колебательных систем. Так, в зависимости от величины и знака коэффициента усиления $k_р$ упругая составляющая может быть равна нулю или иметь значение $c_{упр}$, много превышающее статическую жесткость. Демпфирование изменяется в широких пределах. Амплитудно-частотные характеристики активной системы могут регулироваться как изменением параметров конструкции опоры, так и изменением параметров регулятора расхода. Уменьшение $k_р$ приводит к росту значений АЧХ на первой резонансной частоте

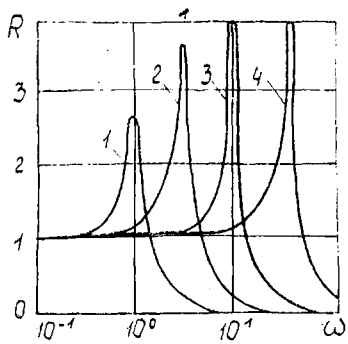

Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики газостатической опоры: *1* — $T_{13} = 0{,}6$; $T_{12} = 2$; $T_{11} = 13$; $T_{23} = 0{,}4$; $T_{22} = 2{,}4$; $T_{21} = 8$; *2* — $T_{11} = 100$; $T_{21} = 10$; *3* — $T_{21} = 100$; $T_{22} = 10$; *4* — $T_{13} = 10$; $T_{23} = 1$

(рис. 4, кривая 1). На высоких частотах жесткость, демпфирование и коэффициент усиления незначительно отличаются от характеристик пассивной системы, то есть управление эффективно лишь в ограниченной области относительно низких частот и не проявляется в высокочастотном диапазоне.

Результаты, полученные при исследованиях многокамерных активных газостатических опор и упорных подпятников, могут быть использованы при проектировании и расчете более сложных динамических систем. Например, особенности работы и динамического поведения схемы гидростатического подпятника, описываемого зависимостью (1), при определенных допущениях распространяются на схему узла подвески двигателя при его вибрационных испытаниях (рис. 5, а). По подобной схеме выполняется также торцовое гидростатическое уплотнение в двигателях летательных аппаратов. Условия его работы совпадают с рассматриваемыми в этой статье, и динамические характеристики могут быть исследованы на основании рассмотренных зависимостей (2), (3). Это возможно благодаря тому, что уравнения, описывающие состояние торцового гидростатического уплотнения, имеют тот же порядок, как и уравнения для многокамерных ГСО. Динамика многокамерного радиального газостатического подшипника (рис. 5, б) может быть описана передаточной функцией вида (1). Для такой системы справедливы рассмотренные выше положения.

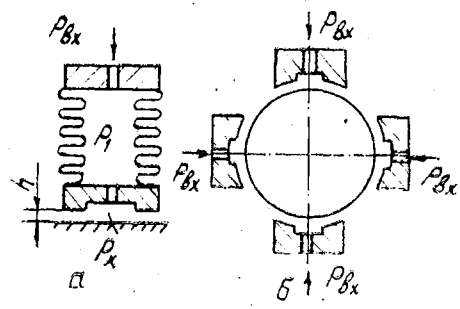

Рис. 5. Газостатические системы с использованием опор с внешним наддувом: *а* — узел подвески двигателя; *б* — четырехкамерный радиальный подшипник

Таким образом, исследование динамических свойств различных устройств газо- и гидростатического типа, выбор и реализация заданных характеристик узлов подвески, разгрузочных устройств и уплотнений могут проводиться на основании анализа передаточных функций и ограничений по учету влияния отдельных факторов (например, динамических эффектов

в торцовой щели подпятника, запаздывания в дросселирующих элементах) на изменение этих характеристик.

Полученные в работе зависимости для динамической реакции газового слоя вида (4) и ее составляющих в линейной постановке показывают предельные возможности ГСО с точки зрения практической реализации ее параметров. Дальнейшее усложнение конструкции опоры (порядок характеристического уравнения выше пятого) приведет лишь к увеличению объема вычислительной работы, не давая принципиально новых научных результатов и практического эффекта. В этой связи оказывается необходимым учет нелинейных эффектов в ГСО и системе управления, а также оптимизация их характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чегодаев Д. Е., Белоусов А. И.* Гидростатические опоры как гасители колебаний. — В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей. — КуАИ, 1974, вып. 67.

2. *Белоусов А. И., Сидоренко А. А., Чегодаев Д. Е.* Методика расчета динамических характеристик активной пневмоопоры.—В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. — КуАИ, 1978, вып. 5.

3. *Белоусов А. И., Токарев И. П., Чегодаев Д. Е.* Газостатические опоры как амортизаторы и генераторы механических колебаний. — Научные труды вузов Лит. ССР. Вибротехника, 1979, № 3 (27).

4. *Чегодаев Д. Е.* Исследование статики и динамики газостатических опор.—Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Куйбышев, 1975.

УДК 621.438.539.4

В. И. Цейтлин

ПРОБЛЕМЫ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА АВИАЦИОННЫХ ГТД

При создании современных двигателей, наряду с проблемами улучшения газодинамических параметров, весьма актуальными являются проблемы обеспечения их надежности и ресурса при приемлемой массе.

Эти проблемы усложняются с увеличением размерности, повышением температуры газа перед турбиной и повышением степени сжатия в компрессоре.