

Из уравнения (1), подставив в него граничные условия, можно получить уравнение частот. Например, если концы лопаток свободны, то  $Q_e = 0$ , и

$$|\bar{H}_b^m| = 0.$$

Уравнение формы колебаний будет иметь вид

$$\bar{H}_b^m q_b = 0.$$

Учитывая вышесказанное, можно легко найти уравнения частот и форм колебаний при иных граничных условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В. П. Метод волновых динамических жесткостей и податливостей для расчета колебаний упругих систем, обладающих циклической симметрией. Труды КуАИ, вып. 48, 1971.
2. Шипов Р. А. Исследование влияния динамической неоднородности кольцевой решетки на резонансные колебания ее профилей. «Прочность и динамика авиационных двигателей», вып. 6, «Машиностроение», 1971.

**И. Б. Панич, В. А. Письменов**

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ

Необходимость проведения высокочастотных исследований элементов конструкций ГТД при высоких значениях коэффициента демпфирования в сочетании с низкими значениями модуля упругости материала конструкции приводит к необходимости решения ряда вопросов, связанных с созданием высокоэффективного испытательного оборудования. Наличие больших амплитуд колебаний приводит к появлению нелинейных эффектов, сопровождающихся такими аномалиями, как проявление субгармонических и ультрагармонических колебаний [1].

При возникновении таких колебаний наличие в спектре возбуждающей силы ряда гармонических составляющих приводит к искажению результатов эксперимента [2]. Это вызывает необходимость исследования спектрального состава возбуждающей силы.

Высокочастотные пневматические возбудители типа КуАИ-ВВ [3] хорошо зарекомендовали себя при проведении усталостных испытаний деталей ГТД при значениях декрементов  $\delta = 0,02 \div 0,05$  [4]. Для испытания конструкций, обладающих большими значениями декрементов колебаний, требуется увеличение возбуждающей силы либо за счет увеличения площади проходного сечения сопла, либо за счет увеличения давления воздуха перед соплом, что при испытаниях малогабарит-

ных конструкций на высших формах колебаний не всегда приводит к желаемым результатам.

Целью данной работы являлось исследование спектрального состава возбуждающей силы пневматических возбудителей типа КуАИ-ВВ и оценка возможности повышения их эффективности с точки зрения расширения частотного и амплитудного диапазона возбуждающей силы путем вариации скважности прилагаемого импульса и организации многоточечного возбуждения.

### Гармонический анализ возбуждающей силы

Импульсное воздействие пневматических возбудителей [3] можно представить как сумму гармонических воздействий.

Несложные преобразования приводят к следующему выражению для амплитуды силы  $P_m$  составляющей гармоники  $m$ :

$$P_m = P_{ст} \frac{2h}{a\pi^2} \frac{1}{m^2} \sin(\pi mk) \sin\left(\pi m \frac{a}{h}\right) \cos \frac{2\pi m}{T} t,$$

где  $P_{ст}$  — статическое усилие при полностью открытом сопле;

$h$  — шаг прорези в модулирующем диске;

$a$  — ширина сопла;

$b$  — ширина прорезей в модулирующем диске;

$k = \frac{b}{h}$  — скважность.

Расчетные значения относительных амплитуд трех низших гармоник возбуждающей силы для различных скважностей « $k$ » показаны на рис. 1.

На этом же рисунке приведены экспериментальные данные гармонического анализа, проведенного на вибраторе типа КуАИ-ВВ-3 с модулирующими дисками различной скважности при постоянном значении  $\frac{a}{h} = 0,2$ .

При проведении эксперимента использовалась следующая измерительная и регистрирующая аппаратура:

преобразователь давления;

самописец уровня;

анализатор гармоник;

электронный осциллограф;

Указанные измерительные средства обеспечивают проведение достоверного спектрального анализа в диапазоне частот  $f = 20 \div 10000$  гц.

Из рис. 1 видно, что экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с расчетными. Имеющееся различие может быть объяснено инерционностью воздушной струи и рядом допущений, принятыми при расчете (малые размеры сопла по сравнению с диаметром модулирующего диска, пропорциональ-

ность динамического усилия площади открытия сопла и др.).

Из рис. 1 также следует, что скважности, соответствующие максимальным амплитудам первой, второй и третьей гармоник, равны соответственно 0,5; 0,25; 0,5.

Таким образом, при наличии запаса по статическому давлению воздуха перед соплом и набора модулирующих дисков со скважностями 0,5 и 0,25 можно значительно расширить частотный диапазон существующих пневматических возбудителей.

### Анализ эффективности многоточечного возбуждения

Одним из способов повышения эффективности пневматических возбудителей может являться замена одноточечного приложения возбуждающей силы многоточечным с фазами сил, соответствующими фазам колебаний точек их приложения.

Для оценки реальной эффективности данного мероприятия была проведена экспериментальная работа с использованием пневматического возбудителя типа КуАИ-ВВ-3. В качестве объекта исследования использовалась препарированная тензометрами сопротивления консольно закрепленная балка прямоугольного сечения. Приложение возбуждающей силы в двух точках осуществлялось путем использования сопла, имеющего вид двух расходящихся отверстий в одном корпусе. При этом расстояние между центрами на срезе двух сопел было равно двум протяженностям прорезей в модулирующем диске, а отношение окружных протяженностей зубьев к прорезям в модулирующем диске составляло 3:1.

Эксперимент был проведен при возбуждении балки по второй изгибной ( $f=855$  гц), третьей изгибной ( $f=2360$  гц) и

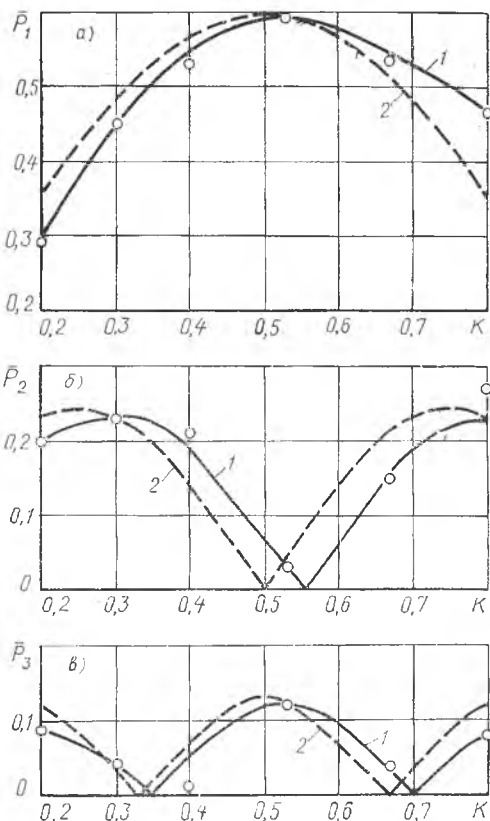


Рис. 1

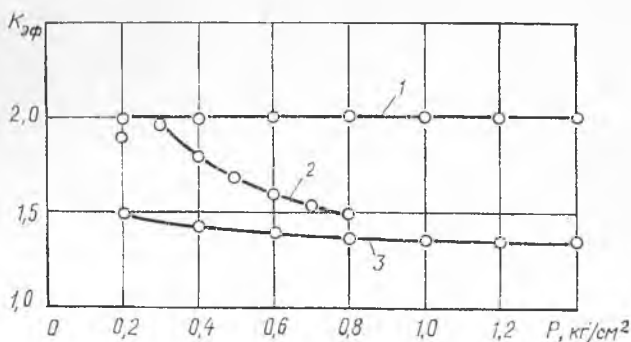


Рис. 2

первой крутильной ( $f=1300$  гц) собственным формам колебаний.

Для каждой из названных форм колебаний сопла были сориентированы симметрично относительно соответствующих узловых линий. Затем при постоянном давлении перед соплом определялся уровень деформаций балки при ее возбуждении в двух точках одновременно и в каждой точке в отдельности.

На рис. 2. приведена полученная по экспериментальным данным зависимость коэффициента  $K_{эф}$  эффективности двухточечного возбуждения от давления воздуха перед соплом. Коэффициент  $K_{эф}$  представляет собой отношение деформаций, возникающих в балке при возбуждении ее в двух точках к деформациям, возникающим при одноточечном возбуждении.

Анализ результатов эксперимента указывает на возможность существенного повышения интенсивности возбуждения объектов исследования при использовании существующих пневматических возбуждателей, доработанных с целью осуществления многоточечного возбуждения.

## ВЫВОДЫ

1. Использование в пневматических возбуждателях модулирующих дисков с отношением ширины прорезей к шагу, равным 0,5 и 0,25, существенно повышает уровень второй и третьей гармоник возбуждающей силы, что значительно расширяет частотный диапазон возбуждателей.

2. Разработан пневматический возбуждатель колебаний с двухточечным возбуждением, обеспечивающий по сравнению с возбуждателями типа КуАИ-ВВ повышение в 1,5÷2 раза возбуждающей силы при испытаниях деталей на высших формах колебаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Хаяси. Нелинейные колебания в физических системах. М., изд. «Мир», 1968.
2. Митропольский Ю. А. Нестационарные процессы в нелинейных колебательных системах. Киев, изд. АН УССР, 1955.
3. Иванов В. П., Огородов В. Т. Высокочастотный воздушный вибростенд. В сб. «Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей», Куйбышев, труды КуАИ, выпуск XIX, 1966.
4. Жуков К. А., Иванов В. П., Письменов В. А., Раткин И. Я. Опыт эксплуатации высокочастотного вибрационного стенда КуАИ-ВВ-2А. В сб. «Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов», Куйбышев, труды КуАИ, выпуск XXXVI, 1969.

Е. А. Панин, М. А. Мальтеев

### ОПОРЫ ТРУБОПРОВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕРИАЛА МР, РАБОТАЮЩЕГО НА ИЗГИБ

Специфика оптимального демпфирования систем трубопроводов, связанная с выбором определенной жесткости  $C$  и коэффициента поглощения  $\Psi$  опор, потребовала создания новых конструкций опор с упругим элементом из МР, работающим на изгиб.

В применяемой в настоящее время модификации МР может выдерживать значительные нагрузки при циклической деформации сжатия. Гораздо меньшие нагрузки материал выдерживает при растяжении вследствие специфического структурного строения. Растяжение приводит к разрыхлению структуры, увеличению объема, сокращению числа связей и уменьшению контактного давления в них, а, следовательно, и снижению упругого и неупругого сопротивлений между отдельными группами витков. При изгибе действуют как растягивающие, так и сжимающие нормальные напряжения, распределение которых по объему детали отражает ее сопротивляемость циклическим нагрузкам. С ростом числа циклов знакопеременного нагружения происходит расслаивание, нарушение сплошности МР и, как следствие этого, ослабление сечения. Постепенно накапливаясь и суммируясь, локальные повреждения дают начало общему разрушению детали. Поэтому для повышения сопротивляемости МР изгибу необходимо принимать ряд мер, обеспечивающих равномерное распределение плотности по объему детали и наиболее выгодную ориентацию спиралей по отношению к действующей нагрузке. Достигается это применением ориентированной укладки спиралей в заготовке, подбором величины и направления усилия прессования.

Экспериментальные исследования показали, что при созда-