

3. Канцельсон М.Ю., Балаев Г.А. Полимерные материалы: Справочник. - Л.: Химия, 1982. - 322с.

4. Кондрашов Ю.И., Квасов В.М., Мулкин О.П. Исследование герметичности запорных пар конусного типа на основе поликарбонатных смол в прямоточной управляемой криогенной арматуре. - В сб.: Бюллетень научно-технической информации. Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, декабрь 1982, с. 36-44.

5. Погорелов В.И., Спрудэ И.К., Симкин Ю.Д. О гидравлическом моделировании при оценке герметичности металлических уплотнений типа "клапан - седло". - В сб.: Арматуростроение. Л.: ЦКБА, 1973, вып. 3, с. 49 - 56.

6. Пискунов И.С. Дифференциальное и интегральное исчисление. - М.: Наука, 1978. Т.1. - 456 с.

УДК 629.7.051:534.29

В.И.Коннычев, Г.В.Костин, В.Н.Ягодкин

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВИБРОЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ГРУППОВОЙ АМОРТИЗАЦИИ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОТ ДЕЙСТВИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ

При эксплуатации оборудования на современных летательных аппаратах начинают широко применять бортовые системы групповой амортизации (СГА). Определение и анализ виброзащитных характеристик таких систем амортизации бортового оборудования (БО) летательных аппаратов зачастую осуществлялись с помощью плоской одномерной колебательной модели классической структуры. Колебательная модель СГА качественно отличается от общепринятой плоской одномерной модели. СГА подвергается многовходным случайным вибрационным воздействиям, когерентным между собой, и является пространственно разнесенной многомассовой упругой системой. Виброзащитные свойства СГА могут описываться с помощью так называемых полных и обобщенных виброзащитных характеристик (ВЗХ), связывающих энергетический спектр случайного вибрационного процесса (СВП) на выходе с условным энергетическим спектром многомерного СВП на входе.

Однако до сих пор еще не разработаны сколь-нибудь приемлемые для практики рекомендации, дающие возможность оценивать ВЗХ много-

мерной СГА. В настоящей статье делается попытка решить эту задачу применительно к линейной СГА с сосредоточенными параметрами жесткости, неупругого сопротивления и массы конструктивных элементов системы. Методологические основы решения указанной проблемы заложены в работах [1 - 4].

Рассмотрим динамику четырехходной СГА. Входные и выходные вибрационные процессы представлены случайными функциями $y(t)$

$x_0(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)]$ и соответствующими им автономными и взаимными энергетическими спектрами в сопровождении функций обычной и множественной когерентности, связывающих между собой компоненты многомерного входного процесса $x_0(t)$ и реакцию $y(t)$. На выходе СГА допускаются остаточные "шумовые" сигналы $z(t)$, обусловленные не учтенными при формировании модели источниками вибрационных воздействий и не коррелированные с активными источниками $x_0(t)$.

Для описания динамики СГА привлекается основополагающее уравнение в Фурье-преобразованиях

$$y(f) = \sum_{j=1}^4 H_j(f) X_j(f) + Z(f), \quad (1)$$

в котором оригиналы $y(t), z(t), x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)$ даны при описании модели СГА.

В энергетической трактовке уравнения примут вид

$$W_{jy}(f) = \sum_{i=1}^4 H_j(f) W_{ji}(f), \quad (j=1, 2, 3, 4), \quad (2)$$

где $W_{ji}(f)$ - автономные и взаимные энергетические спектры СВП, действующего по входным каналам СГА; $W_{jy}(f)$ - взаимный энергетический спектр входного $x_j(t)$ и выходного $y(t)$ процессов; $H_j(f)$ - частотная характеристика упругой системы, расположенной между двумя точками измерений СВП на входе и выходе СГА.

Уравнение (2) справедливо независимо от того, в каких коррелированных связях находятся случайные функции входного многомерного вибрационного процесса.

По условию задачи $W_{jz}(f) \equiv 0$. Модуль $|H_j(f)|$ представляет собой частную ВЭХ системы.

Полная ВЭХ СГА строится как

$$|H_0(f)|^2 = \sum_{j=1}^4 |H_j(f)|^2 \quad (3)$$

и находится по экспериментальным данным путем вычисления

$$|H_0(f)|^2 = \frac{W_{yy}(f)}{W_{x_0x_0}(f)} \quad (4)$$

Здесь $W_{yy}(f)$ - автономный энергетический спектр СВН на выходе СГА;
 $W_{x_0x_0}(f)$ - опорный энергетический спектр многомерного СВН на входе СГА.

Опорный спектр $W_{x_0x_0}(f)$ СГА получаем путем решения системы уравнений (2). Так, используя стандартные матричные формы функций множественной когерентности, для каждой $H_j(f)$ находим

$$|H_j(f)|^2 = \frac{W_{yy}(f) [\text{coh}_{y/x_0}^2(f) - \text{coh}_{y/x_{0j}}^2(f)]}{W_{jj}(f) [1 - \text{coh}_{x_j/x_{0j}}^2(f)]} \quad (5)$$

Здесь $\text{coh}_{y/x_0}^2(f)$ - функция множественной когерентности по отношению к многомерному процессу на входе;

$\text{coh}_{y/x_{0j}}^2(f)$ - функция усеченной множественной когерентности $y(t)$ по отношению к многомерному процессу на входе с вычеркнутой из состава $x_0(t)$ функцией $x_j(t)$;

$\text{coh}_{x_j/x_{0j}}^2(f)$ - функция множественной когерентности входного процесса $x_j(t)$ по отношению к остальным учтенным воздействиям.

Используя каноническую форму решения (4), находим с учетом (5) выражение для опорного спектра

$$W_{x_0x_0}(f) = \left[\sum_{j=1}^4 \frac{\text{coh}_{y/x_0}^2(f) - \text{coh}_{y/x_{0j}}^2(f)}{W_{jj}(f) [1 - \text{coh}_{x_j/x_{0j}}^2(f)]} \right]^{-1} \quad (6)$$

Соотношение (6) допускает частные варианты решения прикладного характера. Для СГА с достаточно разнесенными опорами для крепления амортизаторов, когда входные процессы практически некогерентны, т.е. соблюдаются условия

$$\begin{aligned} \text{coh}_{x_j/x_{0j}}^2(f) &\approx 0, \\ \sum_{j=1}^4 \text{coh}_{y_j}^2(f) &= \text{coh}_{y/x_0}^2(f), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^4 \text{coh}_{y_i}^2(f) = \text{coh}_{y/x_{oj}}^2(f), \quad (i \neq j),$$

можно допустить, что

$$W_{x_0x_0}(f) = \left[\sum_{j=1}^4 \frac{\text{coh}_{y_i}^2(f)}{W_{jj}(f)} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Если теперь считать, что каждое из учтенных входных воздействий вносит одинаковый вклад в состав реакции системы, то (8) примет вид

$$W_{x_0x_0}(f) = \frac{W_{cp}(f)}{\text{coh}_{y/x_0}^2(f)}, \quad (9)$$

где $W_{cp}^-(f) = \frac{\sum_{j=1}^4 W_{jj}(f)}{n}$ - усредненный спектр.

Наконец, если при формировании модели учтены все возможные каналы для проникновения к амортизируемому оборудованию воздействующей вибрации, то опорный спектр многомерного СВН на входе СГА принимает упрощенную структуру

$$W_{x_0x_0}(f) = - \frac{\sum_{j=1}^4 W_{jj}(f)}{4}. \quad (10)$$

За обобщенную ВЗХ СГА в целом принимается огибающая из максимальных значений (на каждой частоте) совокупности полных ВЗХ системы, т.е.

$$|H(f)| = \sup |H_0^K(f)|,$$

где индекс K указывает на нумерацию точек конструкции системы, в которых регистрировался выходной СВН.

Точность вычисления ВЗХ по этим оценкам определяется погрешностями, обусловленными: видом априорной колебательной модели, аппроксимирующей реальную конструкцию СГА; статистической неустойчивостью энергетических характеристик СВН, регистрируемого на входах и выходе системы; "шумовыми" сигналами на выходе системы, вызванными не учтенными при формировании колебательной модели системы вибрационными воздействиями.

Выражение для абсолютной случайной ошибки, возникающей вследствие последних двух причин и формирующей доверительный интервал значений истинной величины частной ВЗХ СГА, т.е.

$$|\bar{H}_j(t) - \Delta|H_j(f)| \leq |H_j(t)| \leq |\bar{H}_j(f)| + \Delta|H_j(f)|, \quad (11)$$

можно представить в виде

$$\Delta|H_j(f)| = \sqrt{\frac{2n}{\nu-2n} F_{\nu_1, \nu_2, \alpha} \frac{[1 - \bar{c} \bar{o} s h_{y/x_0}^2(f)] \bar{W}_{yy}(f)}{[1 - \bar{c} \bar{o} h_{x_j/x_{0j}}^2] \bar{W}_{jj}(f)}}, \quad (12)$$

где n - число входных воздействующих вибрационных процессов;

$$\nu = \frac{2T}{\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2(\tau) d\tau} - \text{число степеней свободы для вычисления оценок энергетических спектров СВЛ на входах и выходе системы.}$$

Здесь $\omega^2(\tau)$ - корреляционное окно, примененное в составе статистической оценки для энергетических спектров; если

$$\omega(\tau) = \begin{cases} 1, & |\tau| \leq \tau_k; \\ 0, & |\tau| > \tau_k, \end{cases}$$

то

$$\nu = \frac{2T}{2\tau_k} = \frac{2n_0 T_0}{2\tau_k} = 2n_0$$

(T_0 - выборочная реализация СВЛ в объеме стандартной памяти ЭВМ);

$F_{\nu_1, \nu_2, \alpha}$ - 100%-ная точка F распределения, соответствующая степеням свободы ν_1 , ν_2 и вероятности риска $\alpha = 1-p$;

$\bar{W}_{yy}(f), \bar{W}_{jj}(f)$ - статистические оценки для вычисления автономных энергетических спектров СВЛ;

$\bar{c} \bar{o} h_{y/x_0}^2(f), \bar{c} \bar{o} h_{x_j/x_{0j}}^2(f)$ - статистические оценки для вычисления функций множественной когерентности СВЛ.

В соответствии с (12) погрешность частной ВЗХ может возрастать в заданных объемах статистики по мере усиления неравенства $\bar{W}_{yy}/\bar{W}_{jj} > 0$ (особенно в диапазоне резонансных частот), а также по мере уменьше-

ния значения оценки $\text{coh}_{y/x_0}^2(f)$ и увеличения значения оценки $\text{coh}_{x_j/x_0}^2(f) \rightarrow 1$.

Относительную погрешность полной ВЭХ СГА определим в принятых обозначениях по формуле

$$\varepsilon_0(f) = \frac{\sum_{j=1}^4 |\bar{H}_j(f)| \Delta |H_j(f)|}{\sum_{j=1}^4 |H_j(f)|^2} \quad (16)$$

По мере приближения к единице функции множественной когерентности $\text{coh}_{y/x_0}^2(f)$, связывающей выходной СВН $y(t)$ с измеренными входными процессами $x_0(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)]$, случайная ошибка, обусловленная "шумовыми" сигналами на выходе вследствие неучтенных воздействий, будет уменьшаться.

Таким образом, реальные конструкции СГА бортового оборудования могут имитироваться многовходными пространственно ориентированными колебательными моделями с сосредоточенными параметрами, для определения виброзащитных свойств которых может быть использована каноническая структура виброзащитной характеристики, свойственная для одномерной колебательной модели.

Виброзащитная характеристика реальной конструкции СГА может быть найдена путем вычисления отношения автономного энергетического спектра СВН, зарегистрированного на выходе в заданной точке системы, к опорному спектру многомерного входного процесса, сформированному с помощью автономных спектров учтенных воздействий с применением функций множественной когерентности, связывающих выходной процесс с входными воздействиями.

Точность определения виброзащитной характеристики системы групповой амортизации ограничена погрешностью, возникающей от наличия шумовых сигналов на выходе и от воздействий, не учтенных при измерениях СВН на входе системы.

Л и т е р а т у р а

1. Михайлов Ф.А. Анализ и синтез нестационарных линейных систем. М.: Машиностроение, 1977. - 296с.
2. Бендат Д., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов.- М.: Мир, 1974. - 464с.

3. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Вып. 2. - М.: Мир, 1972. - 288с.
4. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. - М.: Мир, 1982. - 428с.

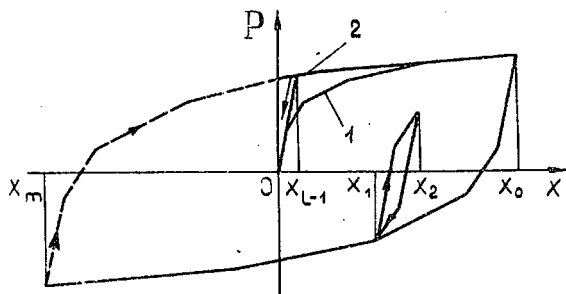
УДК 620.318.6

Г.В.Лазуткин

КОЛЕБАНИЯ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ
С КОНСТРУКЦИОННЫМ ДЕМПИРОВАНИЕМ

В целях виброзащиты широкое применение находят цельнометаллические виброизоляторы и демпферы с конструкционным демпфированием. Упругодемпфирующие элементы таких устройств могут быть выполнены из материала МР, сеток, отрезков тросов, пластин и т.п.

Сложность теоретического исследования колебаний изучаемых виброзащитных систем (ВС) обусловлена как нелинейностью, так и зависимостью упругофрикционных характеристик (УФХ) виброизоляторов и демпферов от предыстории их нагружения - определенной совокупности абсцисс точек смены знака скорости деформирования. На рис. 1 в координатах нагрузка P , деформация x показан характерный вид двух процессов деформирования 1 и 2, соответствующих различным предысториям нагружения



Р и с. 1. Влияние предыстории нагружения балки на характер процессов деформирования

многослойной консольной балки [1]. Процессу 1 предшествовала предыстория нагружения балки, заключающаяся в постепенном уменьшении абсцисс точек смены знака скорости деформирования от x_m до нуля.