

Список літератури: 1. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения, Мир, 1990. 2. Харкевич А.А. Спектры и анализ, ГИТТЛ, М.:1957.

Надійшла до редколегії 10.04.2002.

УДК 629.7.02-192: 629:8.015.13

П.Д.ДОЦЕНКО, д-р.техн.наук, НАКУ “ХАИ”;
В.О.ПОВГОРОДНИЙ, АПБУ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРИБОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В цій статті розроблено методи аналізу надійності приладових конструкцій літальних апаратів з метою підвищення їх якості, виходячи з розрахунку параметрів динаміки цих конструкцій. Конструкції літальних апаратів знаходяться під впливом випадкових навантажень. Ці методи розрахунку необхідні для сертифікації приладових конструкцій, що встановлюються на літак АН-140.

Схемы современных конструкций приборов летательных аппаратов (ЛА) состоят из неоднородных тонкостенных элементов (пластин, оболочек, стержней), которые являются очень восприимчивыми к акустическим воздействиям, представляющим случайное поле. Высокие уровни этих воздействий, которые особенно характерны для космических ЛА, приводят к интенсивным вибрациям элементов панелей и во многом определяют усталостную прочность рассматриваемых конструкций. К настоящему времени уровень акустических воздействий может превосходить 170 дБ; в ближнем акустическом поле зарегистрированы давления до 180 дБ.

Предполагается, что блок воздушных параметров (БВП) находится при комплексном внешнем воздействии, которое включает:

- статическую нагрузку, представляющую распределенные усилия в средней поверхности;
- акустическое воздействие, представляющее случайное по пространственным координатам и времени поле пульсаций давления звукового диапазона частот.

Случайное поле считается стационарным по времени и однородным по пространственным координатам. В этом случае его спектральная плотность может быть представлена в виде

$$S_x(\xi, \eta, \omega) = S(\omega) \exp(-\alpha|\xi|) \cdot \exp(-\beta|\eta|), \quad (1)$$

где $S(\omega)$ – спектральная плотность пульсаций давления однородного поля, представленная на рис.;

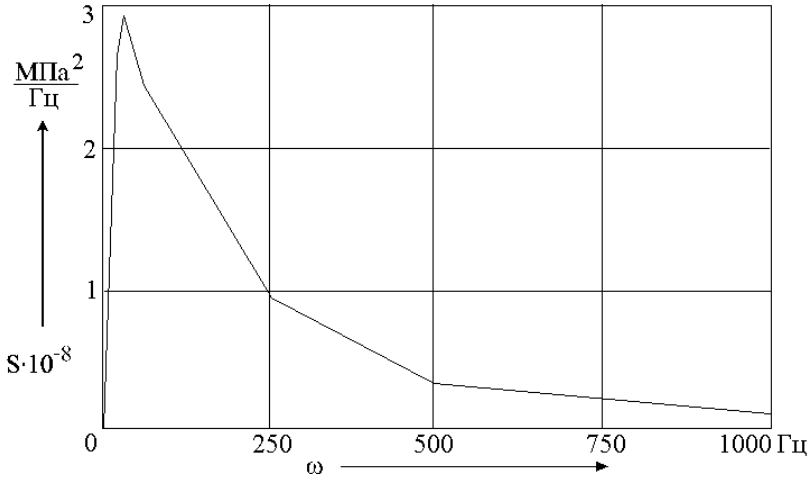
α, β – коэффициенты, характеризующие степень уменьшения корреляционной связи пульсаций вдоль координатных осей x и y ;

$$\xi = x - x'; \quad \eta = y - y'.$$

Коэффициенты α и β связаны с радиусом корреляции r_x и r_y вдоль координатных осей соотношениями

$$\alpha = 1/r_x; \quad \beta = 1/r_y. \quad (2)$$

Задача статической динамики для БВП решается в два этапа.



На первом этапе решается задача случайных колебаний в рамках корреляционной теории для всей конструкции БВП (модель первого уровня), рассматриваемая как коробчатая конструкция в виде набора пластин.

Оценка ресурса проводится на основе гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений с использованием теории случайных функций. Задача решается на основе метода конечных элементов (МКЭ) в форме перемещений. Уравнение движения конечно-элементной модели конструкции имеет вид:

$$M\ddot{Y} + R\dot{Y} + KY = P(t), \quad (3)$$

где M , R , K – матрицы инерции, демпфирования и жесткости конструкции соответственно; Y – вектор узловых перемещения. Если все опоры БВП испытывают одинаковое ускорение, то вектор внешней нагрузки $P(t)$ определяется по формуле

$$P(t) = -MN\ddot{Y}_0(t), \quad (4)$$

где N – вектор, содержащий направляющие косинусы перемещений опор в общей системе координат; $\ddot{Y}_0(t)$ – ускорение опор с известными вероятностными характеристиками.

Для стационарной случайной функции $\ddot{Y}_0(t)$ используем неканоническое разложение в виде нелинейной функции трех случайных величин c , λ , φ :

$$\ddot{Y}_0(t) = c \cos(\lambda t + \varphi). \quad (5)$$

Установившееся перемещение системы представим в виде ряда по формам собственных колебаний:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^s \frac{b_i}{m_i} D_i \cos(\omega t + \varphi - \theta_i) Q_i, \quad (6)$$

где Q_i – вектор i -ой собственной формы, а коэффициенты D_i , m_i , θ_i , b_i , $Q_i^T M$ определяются по формулам (7) и (8) соответственно.

$$\left\{ \begin{array}{l} D_i = \frac{c}{\sqrt{(p_i^2 - \omega^2)^2 + 4r_i^2 \omega^2}}; \quad \theta_i = \arctg\left(\frac{2r_i \omega}{p_i^2 - \omega^2}\right); \\ m_i = Q_i^T M Q_i; \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b_i = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^s F_{ix}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^s F_{iy}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^s F_{iz}\right)^2}; \\ Q_i^T M = \{F_{1x}, F_{1y}, F_{1z}, \Phi_{1x}, \dots, F_{sz}, \Phi_{sx}, \Phi_{sy}, \Phi_{sz}\}. \end{array} \right. \quad (8)$$

Здесь s – число форм собственных колебаний; p_i – собственная частота; r_i – коэффициент вязкого трения.

На втором этапе по исходным данным, полученным в результате решения соответствующей задачи первого этапа, проводился уточненный расчет напряженно-деформированного состояния отдельных, наиболее напряженных элементов конструкции (модель второго уровня). Для расчета применялся МКЭ в форме перемещений. В качестве конечного элемента использовался тонкий, произвольно ориентированный в пространстве плоский четырехугольник, учитывающий растяжение – сжатие, изгиб. В каждом из трех узлов конечного элемента шесть степеней свободы – три перемещения и три угла поворота. Динамическая задача решалась в квазистатической постановке. Внешнее воздействие на опоры БВП может быть как силовым (распределенные и сосредоточенные усилия), так и кинематическим (перемещения и углы поворота).

По полученным узловым перемещениям определяются вероятностные характеристики деформаций и компонент напряжений в центре конечных элементов σ_x , σ_y , τ_{xy} на обеих его поверхностях, то есть при $z = \pm h/2$. Далее определялись вероятностные характеристики интенсивностей напряжений

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 4\tau_{xy}^2}. \quad (9)$$

В общем случае элемент системы испытывает деформации растяжения-сжатия, изгиба в двух плоскостях и кручения. Принимая гипотезу плоских сечений, полагаем, что при деформациях растяжения-сжатия $\sigma_y = \sigma_z = 0$; при изгибах $\tau_{yx} = \tau_{zx} = 0$.

Решим задачу определения показателей надежности БВП ЛА при статическом и акустическом нагружении и отказах, происходящих в результате многоциклового усталости. В качестве параметра $\lambda(t)$, характеризующего на-

пряженно-деформированное состояние в заданной точке конструкции, берется максимальная амплитуда интенсивности напряжений $\sigma_i(t)$ с учетом ее статической составляющей σ_m

$$\lambda(t) = \sigma_i(t) + \varphi \sigma_m, \quad (10)$$

где $\sigma_i(t)$ – амплитуда динамической составляющей интенсивности напряжений; σ_m – статическая составляющая интенсивности напряжений; φ – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла.

Вероятностные характеристики $\sigma_i(t)$ и значение σ_m определялись в результате решения задачи статической динамики. В качестве расчетных брались интенсивности напряжений в наиболее нагруженных областях БВП.

Рассматривалось вероятностное значение кривой усталости в виде нормального закона распределения десятичного логарифма предела выносливости σ_{-1}

$$f(\sigma_{-1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ell_g \sigma_{-1}} \cdot \exp \left[-\frac{\ell_g \sigma_{-1} - m_{\ell_g \sigma_{-1}}}{2 \sigma_{\ell_g \sigma_{-1}}^2} \right], \quad (11)$$

где $m_{\ell_g \sigma_{-1}}$, $\sigma_{\ell_g \sigma_{-1}}^2$ – соответственно математическое ожидание и дисперсия логарифма предела выносливости.

В соответствии с вышеизложенными методиками и разработанным на их основе программным обеспечением для ПЭВМ были проведены численные исследования по определению вероятностных характеристик параметров НДС и показателей надежности клепаной панели ЛА с учетом статической и акустической нагрузок и усталостных отказов.

Результаты расчетов собственных частот БВП изложены в табл.1, а показателей надежности – в табл.2, 3.

Результаты расчета собственных колебаний представлены в табл.1. Как видно из табл. 1, для получения достоверных результатов при расчете первой и второй собственных частот БВП достаточно использовать 14-ти элементную модель.

В табл. 2 приведены значения ресурса для 14-ти элементной модели БВП, полученные с использованием одной и двух форм собственных колебаний.

Из табл. 2 видно, что наиболее повреждающей является первая форма колебаний. Расчет с использованием трех форм показал, что третья форма не вносит существенный вклад в общее решение, что согласуется с графиком спектральной плотности внешнего воздействия.

Таблица 1

Собственные частоты блока воздушных параметров

Номер частоты	Значение частоты, с ⁻¹		
	7 КЭ	14 КЭ	28 КЭ
–			
1	120,45	119,04	118,93
2	159,82	157,52	157,35
3	169,45	211,46	163,38

Таблица 2

Среднее время до разрушения для блока воздушных параметров

№ элемента	№ узла	Значение ресурса, ч	
		$s = 1$	$s = 2$
–	–	$s = 1$	$s = 2$
1	1	361	361
	2	4852	4852
2	2	1817	1817
	3	767	767
3	3	96	96
	4	$3,2 \cdot 10^{16}$	$3,2 \cdot 10^{16}$
4	4	$7,3 \cdot 10^9$	$7,3 \cdot 10^9$
	5	$1,62 \cdot 10^{16}$	$1,62 \cdot 10^{16}$
5	5	127,5	127,5
	6	$2,2 \cdot 10^{46}$	$2,2 \cdot 10^{46}$
6	6	349,5	349,5
	7	1330,8	1330,8

Таблица 3

Дисперсии напряжений и среднее время до разрушения

Величина	$s = 1$			$s = 2$		
	14 КЭ	28 КЭ	$\delta, \%$	14 КЭ	28 КЭ	$\delta, \%$
$D_1, \text{Па}^2$	$1,531 \cdot 10^5$	$1,138 \cdot 10^5$	26	$2,097 \cdot 10^4$	$1,876 \cdot 10^4$	11
$D_2, \text{Па}^2$	1,287	1,43	10	$8,325 \cdot 10^{-2}$	$9,634 \cdot 10^{-2}$	14
$D_3, \text{Па}^2$	$1,596 \cdot 10^9$	$1,184 \cdot 10^9$	24	$2,3 \cdot 10^8$	$2,053 \cdot 10^8$	8
$D_4, \text{Па}^2$	$1,342 \cdot 10^4$	$1,487 \cdot 10^4$	12	$9,132 \cdot 10^2$	$1,054 \cdot 10^3$	19
СВР, ч	3981	1236	31	3981	1236	31

Проведен расчет ресурса БВП с использованием трех конечно-элементных моделей (7, 14 и 28 КЭ) при учете одной и двух собственных форм колебаний ($s = 1, 2$). Результаты расчета представлены в табл. 3.

Данные, приведенные в табл.3, подтверждают, что вклад второй формы колебаний в общее решение мал, так как дисперсии напряжений, соответствующие второй форме принимают существенно меньшие значения, чем на первой форме. Конечно-элементная дискретизация существенно влияет на определение ресурса конструкции.

Список литературы: 1. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. –Судостроение, Ленинград, 1974. 2. Жовдак В.А., Трубаев А.И. Прогнозирование ресурса трубопроводов при случайном воздействии. Изв. Вузов. Машиностроение, 1987, С.24-28.

Поступила в редакцию 04.04.02