

перемещения точки $X = l/2$, отнесенной к статическому прогибу упругой оболочки. Результаты представлены для двух случаев вязкости. На этом же рисунке показаны амплитудно-частотные кривые, полученные в работе /1/. Сравнение результатов показывает хорошее совпадение.

Л и т е р а т у р а

1. Колтунов Н.А., Мирсаидов М., Трояновский И.Е. Установившиеся колебания осесимметричных вязкоупругих оболочек // Механика полимеров. - 1978. - № 2. - С. 290-295.

УДК 534.014.2

Ю.Н.Макаров, Р.В.Сидельников

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЛЕТНЫХ ВИБРАЦИЙ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

полетные вибрации тонкостенных конструкций летательных аппаратов (ЛА) чаще всего вызываются нагрузками в виде случайных сил или полей пульсаций давления, спектральная плотность мощности которых охватывает весьма широкий диапазон частот. Уровень этих нагрузок все более возрастает в связи с увеличением мощности двигательных установок, ростом скоростей полета, близостью расположения полезной нагрузки к источникам акустического воздействия.

Как показывает практика /1/, повышенные уровни вибраций оказывают сильное влияние на надежность элементов бортового оборудования, на характеристики усталостной прочности элементов конструкции. В таких условиях прогнозирование уровня и спектрального состава полетных вибраций, особенно на ранних стадиях проектирования, становится актуальной задачей, решение которой требует развития расчетных методов.

В идеале метод должен быть достаточно простым, экономичным в употреблении и должен давать реалистические значения тех рассчитываемых характеристик, которые важны с точки зрения проектирования.

Опыт расчетов вибронегруженности конструкций ЛА в полете показывает, что к настоящему времени вследствие сложности рассчитываемых объектов и внешних нагрузок в практике проектно-конструкторских организаций, в основном, применяются эмпирические методы, основанные на пересчете данных, полученных при летных испытаниях. Эти методы дают большие погрешности при серьезных модификациях конст-

дукций или становятся вовсе неприменимыми при разработке принципиально новых конструкций ЛА.

В настоящей работе анализируется возможность решения проблемы прогнозирования широкополосных вибраций путем использования сильных сторон двух методов: метода конечных элементов (МКЭ) - в области низших частот собственных колебаний, и статистического энергетического метода (СЭМ) /2/ - в области высших частот.

Для МКЭ расчетная модель конструкции строится из кольцевых элементов в виде многослойных усеченных конических оболочек с двумя узловыми окружностями и ребер жесткости с упругомассовыми характеристиками, сосредоточенными в узловой окружности. Для оболочечных элементов аппроксимация перемещений вдоль меридиана выбрана в виде полиномов Эрмита первой (для продольных и окружных компонент перемещения) и третьей (для радиального компонента) степеней, в окружном направлении представлена разложением в ряд Фурье. Интегрирование при вычислении матриц жесткости осуществляется: для однослойной оболочки - аналитически (что экономит время приблизительно в 8 раз по сравнению с численным интегрированием), а для многослойной оболочки - с помощью численного интегрирования по квадратурам Гаусса. Задача расчета случайных колебаний решается с помощью метода разложения по формам собственных колебаний или метода обратной комплексной матрицы для каждой гармонике разложения в ряд Фурье по окружной координате. Результаты расчетов суммируются по гармоникам для получения общей реакции конструкции. Некоторые особенности формирования матрицы взаимных спектральных плотностей обобщенных сил представлены в работе /3/.

Расчетная модель по СЭМу состоит из системы взаимосвязанных элементов, каждый из которых обладает однородностью физических и геометрических характеристик. В качестве элементов расчетной модели в этом методе используются стержни, пластины и оболочки вращения: цилиндрические, сферические, конические, оживальные, тороидальные и эллиптические. Оболочки и пластины могут быть ортотропными или конструктивно-ортотропными. Задача метода состоит в том, чтобы определить, каким образом энергия внешней нагрузки распределяется по элементам, объединенным в сложную конструкцию. Для этого в каждом из частотных диапазонов составляется система алгебраических уравнений баланса энергий. Размерность этой системы равна количеству элементов расчетной модели, а каждое уравнение в системе (в частности, для i -го элемента) имеет вид /2/:

$$E_{g,i} + \sum_{j \neq i}^N E_{ij} = E_{Bx,i} + \sum_{j \neq i}^N E_{ji}, \quad (I)$$

где $E_{g,i}$ - энергия, рассеиваемая внутри элемента за счет диссипации; $\sum_{j \neq i}^N E_{ij}$ - энергия, переходящая от i -го элемента к элементам с номерами $j \neq i$; $E_{Bx,i}$ - энергия внешней нагрузки, приложенной к i -му элементу; $\sum_{j \neq i}^N E_{ji}$ - энергия, вносимая в i -ый элемент через соединение с j -ыми элементами. Отдельные составляющие формулы (I) в соответствии с допущениями СЭМ записываются в виде:

$$E_{g,i} = \eta_i E_i; \quad \sum_{j \neq i}^N E_{ij} = \left(\sum_{j \neq i}^N \eta_{ij} \right) E_i$$

$$E_{Bx,i} = P_{Bx,i} / \omega; \quad \sum_{j \neq i}^N E_{ji} = \sum_{j \neq i}^N (\eta_{ji} E_j).$$

Здесь $E_i = m_i \langle V_i^2 \rangle$ - вибрационная энергия, m_i - масса, $\langle V_i^2 \rangle$ - дисперсия скорости перемещения (усредненная по площади поверхности), η_i - коэффициент внутреннего демпфирования, $P_{Bx,i}$ - входная мощность внешней нагрузки для i -го элемента, ω - средняя частота расчетного частотного диапазона, η_{ij} , η_{ji} - коэффициенты потерь на переходах, связанные соотношением $\eta_{ij} \eta_i = \eta_{ji} \eta_j$, где η_i и η_j - плотность частот собственных колебаний i -го и j -го элементов. Систему уравнений удобно представить в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \eta_{11} & -\eta_{21} & \dots & \eta_{N1} \\ -\eta_{12} & \eta_{22} & \dots & -\eta_{N2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{1N} & -\eta_{2N} & \dots & \eta_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{Bx,1}/\omega \\ P_{Bx,2}/\omega \\ \vdots \\ P_{Bx,N}/\omega \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\eta_{ii} = \eta_i + \sum_{j \neq i}^N \eta_{ij}$ - коэффициенты, учитывающие суммарные потери энергии в i -ом элементе конструкции, N - количество элементов.

Решая систему уравнений (2) методом исключения Гаусса относительно вектора вибрационных энергий, можно получить искомые параметры виброн нагруженности в виде статистических оценок вибрационных перемещений, скоростей и ускорений.

Граница между областями применения вышеупомянутых методов (по частоте) выбирается из условия достоверности решения. Статистические оценки характеристик виброн нагруженности, получаемые с помощью

СЭМа, являются достоверными в том случае, когда в рассматриваемом частотном диапазоне находятся не менее четырех частот собственных колебаний элемента конструкции /2/. С увеличением частоты такое значение плотности собственных частот достигается не всеми элементами расчетной модели одновременно. Для одного из элементов эта плотность регистрируется позже других, при некоторой частоте $f_{гр}$ (рис.1). Это значение частоты и является границей применимости СЭМа.

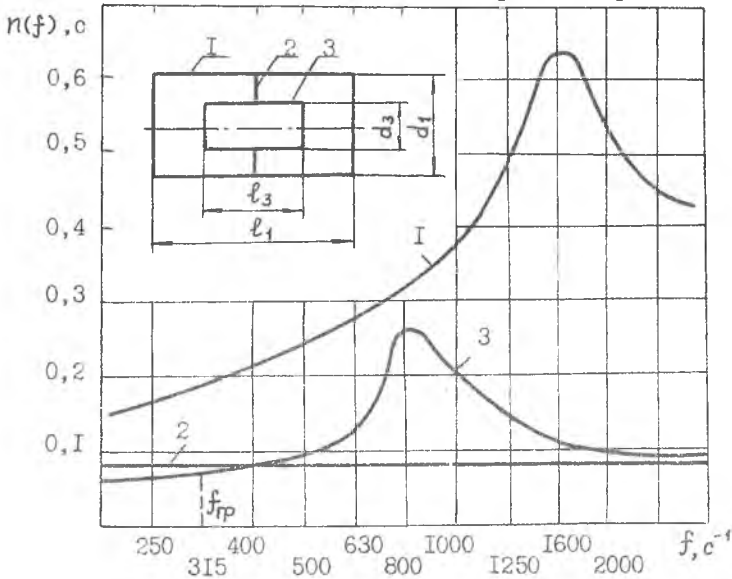


Рис. 1

Таким образом, первым шагом предлагаемой методики и прогнозирования является расчет плотности частот собственных колебаний отдельных элементов конструкции с целью определения нижней границы применимости СЭМа.

До недавнего времени имелись аналитические выражения для плотности собственных частот стержней, пластин, изотропных цилиндрических и сферических оболочек. Лишь в 1982 году была получена /4/ асимптотическая формула для плотности собственных частот анизотропных оболочек вращения с произвольной формой меридиана. На основе этой формулы, с помощью численного интегрирования были получены результаты для большого числа изотропных, ортотропных и конструктивно-ортотропных оболочек вращения.

Второй шаг методики предполагает решение задачи вынужденных колебаний с помощью МКЭ в диапазоне частот до границы применимости СЭМа. Третий шаг - применение СЭМа для расчета в области высоких частот.

Методика реализована в виде комплекса вычислительных программ, написанных на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV. В качестве примера прогнозирования вибронагруженности составной оболочки при воздействии шума турбулентного пограничного слоя была выбрана расчетная модель, изображенная на рис.1. Здесь же представлены плотности собственных частот отдельных элементов конструкции и отмечена граница применимости СЭМа. Спектральная плотность мощности внешней нагрузки, прикладываемой к цилиндрической оболочке, задавалась в виде таблицы уровней в третьоктавных полосах частот. Коэффициенты пространственной корреляции выбирались в соответствии с гипотезой Коркоса /5/ и были равны: в продольном направлении $\alpha = 0,1$, в окружном направлении $\beta = 0,7$. С целью определения возможных погрешностей и эффективности методов были проведены расчеты по МКЭ в области применения СЭМа, и наоборот.

Таблица

f, Гц	$D_{\ddot{w}}, \text{ м}^2\text{с}^{-4}$					
	№ № элементов конструкций					
	1		2		3	
	МКЭ	СЭМ	МКЭ	СЭМ	МКЭ	СЭМ
250	$3,212 \cdot 10^4$	$0,794 \cdot 10^4$	$3,766 \cdot 10^4$	$0,982 \cdot 10^4$	$0,503 \cdot 10^4$	$0,126 \cdot 10^4$
1600	$0,137 \cdot 10^6$	$0,129 \cdot 10^6$	$0,608 \cdot 10^5$	$0,536 \cdot 10^5$	$0,385 \cdot 10^5$	$0,340 \cdot 10^5$

Результаты прогноза иллюстрируются таблицей, где f - средне-геометрическая частота третьоктавной полосы, $D_{\ddot{w}}$ - усредненная по поверхности элемента дисперсия виброускорений в полосе частот. Анализ результатов показывает, что в области применения МКЭ дисперсия виброускорений, рассчитанная по МКЭ и усредненная по длине меридиана элемента конструкции, приблизительно в 4 раза превышает дисперсию, рассчитанную по СЭМу. В области применения СЭМа оценки дисперсий различаются на 20 %, однако расчет по МКЭ потребовал 156 минут машинного времени на ЕС-1045, в то время как по СЭМу

результат был получен за 12 минут. Таким образом, показано, что в низкочастотной области расчет виброн нагруженности по СЭМу может давать значительную погрешность, в то время как в высокочастотной области СЭМ оказывается гораздо более предпочтительным методом. Раздельное использование МКЭ и СЭМа в соответствующих частотных диапазонах, как показывает практика, позволяет получать результаты, удовлетворительно совпадающие с данными летных испытаний.

Л и т е р а т у р а

1. Гладкий В.Ф. Прочность, вибрация и надежность конструкции летательного аппарата. - М.: Наука, 1975. - 456 с.
2. Lyon R.N. *Statistical energy analysis of dynamical systems*. - Cambridge, MIT. Press, 1975. - 388 p.
3. Макаров К.Н. Исследование случайных колебаний конечно-элементной модели цилиндрической оболочки // Колебания упругих конструкций с жидкостью: Сб. научн. докладов У симпозиума / Под ред. В.Г.Сувернева и Р.Е.Лампера. - М.: ЦНТИ "Волна" - 1984.-С.175-178.
4. Гулгазарян Г.Р., Лидский В.Б. Плотность частот свободных колебаний тонкой анизотропной оболочки, составленной из анизотропных слоев // Известия АН СССР. Механика твердого тела. - 1982, № 3. с. 131-144.
5. Авиационная акустика / Под ред. А.Г.Мунина и В.Е.Квитки. - М.: Машиностроение, 1973.

УДК 629.7.017.1

С.Н.Перов, Ю.Л.Тарасов

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ

Как показывает опыт, при современном уровне технологии изготовления изделий авиационной техники практически невозможно избежать образования в некоторых конструктивных элементах трещиноподобных дефектов. Усталостные макротрещины могут образовываться в материале элементов конструкции и в процессе эксплуатации. Поэтому в настоящее время в основу проектирования летательных аппаратов положен принцип повышенной живучести, согласно которому некоторые элементы конструкции остаются работоспособными с распространяющейся усталостной трещиной.