

Щуленов А.И., Глушков С.В., Сарокваша П. Ю.

ЗАПУСК МАЛОМАССОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ВИДЕ ПОПУТНОЙ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ

В настоящее время известны случаи запуска маломассогабаритных космических аппаратов (МКА), как присоединённой массы, совместно со значительно большими по массе основными КА, выводимыми ракетой-носителем (РН). Такие МКА размещаются в свободных объёмах внутри переходных отсеков последних ступеней РН или на поверхности КА.

При отработке российским РН активного участка в условиях старта и при действии пульсаций акустического давления в зоне критических чисел Маха и максимальных скоростных напоров был зафиксирован высокий уровень акустического давления на поверхности бортового оборудования, расположенного в местах приборного и межбакового отсеков третьей ступени.

Для исследования возможности размещения присоединённой массы в виде малого космического аппарата была проведена оценка изменения акустического нагружения в случае отстройки от режима резонанса путём рационального выбора присоединённой массы колеблющейся системы.

Измерение уровня акустического давления производилось в шести точках снаружи по обшивке межбакового отсека на этапе выведения РН «Союз-2-3». Фактический диапазон измерений по частоте для всех акустических параметров – от 30 до 2000 Гц.

С помощью датчиков были получены зависимости акустического давления от времени в диапазоне от минус 10-й до 130-й секунды с частотой 8000 измерений в секунду (отсчёт времени проводится с момента старта).

Исходя из объёма имеющихся экспериментальных данных по нагрузке, при моделировании акустического воздействия для каждого момента времени были приняты следующие допущения:

- в окружном направлении в плоскости поперечного сечения, в которой расположены пять датчиков, использовалась линейная интерполяция давления по значениям, полученным этими датчиками;
- в осевом направлении между двумя плоскостями – плоскостью расположения датчиков и плоскостью стыковочного шпангоута – давление изменяется по линейному закону, определяемому по показаниям датчиков, установленных в осевом направлении;
- на участке обшивки выше плоскости расположения датчиков давление считается по-

стоянным в осевом направлении, а в окружном соответствует показаниям датчиков, установленных в осевом направлении;

– на участке обшивки ниже плоскости стыковочного шпангоута, уровень давления также считается постоянным в осевом направлении, а в окружном соответствует уровню давления, определённому в плоскости стыковочного шпангоута.

Акустическое давление изменяется как по наружной поверхности обшивки, так и во времени. Следует отметить, что в системе MSC Patran для задания изменения нагрузок использовались поля (Fields). Они позволяют определять зависимость нагрузки либо от пространственных координат (пространственные поля – Spatial fields), либо от времени (непространственные поля – Non-spatial fields). Вся наружная поверхность отсека была разделена на 96 отдельных участков (16 делений в окружном и шесть в осевом направлении), в пределах которых акустическое давление в каждый момент времени принимается постоянным.

Для каждого из участков создана отдельная зависимость акустического давления от времени (поле Non-spatial).

Ввиду большой трудоёмкости, расчёт производился не для всего диапазона времени натуральных испытаний, а только для участка от 55 до 65 секунды. В указанный промежуток времени зафиксированы наибольший уровень акустического давления (55–59 секунды) и максимальные величины амплитуд ускорений (60–65 секунды). При этом в интервале от 55 до 60 секунд размер шага по времени принимался равным 0,0003125 секунды, а в интервале 60–65 секунд – 0,00025 секунды.

Следует отметить, что в пакете MSC.Patran/Nastran отсутствует возможность рестарта при выполнении динамического анализа. Поэтому размер шага по времени выбирался, исходя из доступных вычислительных ресурсов.

В пакете метода конечно-элементного проектирования MSC Nastran демпфирующие свойства конструкции описываются при помощи коэффициента конструкционного демпфирования (Structural damping coefficient) G [1, 2].

Коэффициент конструкционного демпфирования G был выражен через процент снижения свободных колебаний за один период α по формуле:

$$G = \frac{2\alpha}{100\%}$$

Коэффициент α связан с логарифмическим декрементом затухания

$$\alpha = (1 - e^{-\beta}) \cdot 100\%.$$

Согласно статистике логарифмический декремент затухания β принимался равным 0,3. Тогда $\alpha = 26\%$, а $G = 0,52$.

В программе MSC Nastarn реализованы два метода решения уравнений динамической системы:

- Direct Transient (Прямой переходный анализ) основан на непосредственном интегрировании уравнений динамики по времени;
- Modal Transient (Модальный переходный анализ) использует разложение вектора узловых перемещений в ряд по формам собственных колебаний (также называемых модами).

В прямом методе демпфирование задавалось путём ввода единственного значения коэффициента G и эффективной частоты колебаний $W3$ (в рад/с), при которой происходит преобразование конструкционного демпфирования в эквивалентное вязкое. В этом случае сила вязкого демпфирования будет прямо пропорциональна частоте. В отличие от первого подхода модальный метод позволяет задавать G в виде зависимости от частоты, т. е. использовать разное демпфирование на разных частотах.

В процессе натурального эксперимента одновременно с фиксированием акустических параметров производилась запись величин виброускорений в отдельных точках кронштейнов аппаратуры, установленной внутри отсека. По каждому параметру фиксация значений производилась с частотой 8000 измерений в секунду. Данные по вибрационным параметрам представлены в виде зависимостей виброускорения от времени, а также в виде спектральных зависимостей.

В силу значительной размерности модели отсека и чрезвычайно большого количества шагов по времени, вывод результатов МКЭ-расчётов был ограничен отдельными узлами, соответствующими местам установки датчиков на модели натурального эксперимента. Тестирование разработанной модели осуществлялось путём сопоставления результатов натурального эксперимента и численных расчётов методом конечных элементов. При этом были построены графики виброускорений.

Анализ результатов проведённых исследований показал, что с помощью МКЭ-расчётов можно не только оценить уровень воздействия акустического давления, но и использовать указанную методику для борьбы с вибрацией путём отстройки от режима резонанса за счёт рационального выбора массы или жёсткости колеблющейся системы, т.е. отстройки собственных частот агрегата и его отдельных узлов и деталей от частоты вынуждающей силы. Резонансные режимы устраняют двумя путями: либо изменением

характеристик системы (массы конструкции отсека в месте установки прибора, что в рассматриваемом случае соответствует установлению присоединённой массы в виде малого спутника, или частоты за счёт установки амортизаторов в опорах крепления самих приборов), либо установлением нового рабочего режима (отстройка от резонансного значения угловой частоты вынуждающей силы).

Библиографический список

1. Рычков, С.П. MSC.visualNASTRAN для Windows [Текст] / С.П. Рычков. – М.: ИТ Пресс, 2004. – 552 с.
2. Шимкович, Д.Г. Расчёт конструкций в MSC/NASTRAN for Windows [Текст] / Д.Г. Шимкович. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.