

ванной механохимической повреждаемости : дис. ... канд. техн. наук : 250019. Уфа, 2004.

4. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В. Вероятностная оценка ресурса узлов трения и износа // Вестник СибГАУ. Вып. 6. 2005. С. 148–152.

5. ГОСТ 23942–80. Оценка показателей качества продукции по изменениям контролируемого параметра. М. : Изд-во стандартов, 1980.

6. РД 26-10-87. Методические указания. Оценка надежности химического и нефтяного оборудования при поверхностном разрушении [Электронный ресурс]. URL: www.docload.ru/basesdoc/9/9080/index.htm.

7. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Т. 1. М. : Машиностроение, 2001.

8. Светлицкий В. А. Статистическая механика и теория надежности. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.

9. Надежность технических систем / Е. В. Сугак [и др.] Красноярск : МГП «Раско», 2001.

10. Математика : энцикл. / под. ред. Ю. В. Прохорова. М. : Большая Российская энциклопедия, 2003.

11. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В., Игнатьев Д. А. Оптимальное управление безопасностью промышленных объектов // Вестник СибГАУ. Вып. 4 (17). 2007. С. 43–47.

12. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В. Управление техническим состоянием потенциально опасных объектов // Системы управления и информационные технологии : науч.-техн. журн. Вып. 1.1(35). М. : Научная книга, 2009. С. 192–196.

E. N. Okladnikova, E. V. Sugak

ESTIMATION OF RESIDUAL RESOURCE OF SAFE EXPLOITATION TAKING INTO ACCOUNT CASUAL FACTORS

The authors offer a method for calculation of intension of refuses and residual resource of safe exploitation of technical object with the account of casual factors. Results of calculations allow to define probability of object refuse and to minimize risk of accident occurrence at the decision of problems of optimization of systems of technical service, and to provide optimum control of safety at exploitation of potentially dangerous objects.

Keywords: exploitation, resource, safety, risk, refuse intensity, technical service.

© Окладникова Е. Н., Сугак Е. В., 2011

УДК 629.7.018.4:534.01

Л. А. Семенова, Е. А. Лысенко, К. Е. Лысенко

МЕТОДИКА ВЫБОРА УНИВЕРСАЛЬНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Представлена методика выбора универсальной вибрационной системы для динамических испытаний космических аппаратов на примере схемы «тандем». Определены параметры системы и даны рекомендации по ее применению.

Ключевые слова: методика, вибрационная система, испытания, космический аппарат.

Разработка, изготовление и испытания различных космических аппаратов, в том числе и для коммерческих заказчиков иностранных государств, должны соответствовать современным тенденциям расширения рынка полезных нагрузок, рациональному и эффективному использованию космической техники, материалов и космических технологий.

Космические аппараты (КА) на высокоэллиптические и геостационарные орбиты выводятся на ракетах-носителях (РН) типа «Протон». Одной из задач при проектировании, создании новых КА или их модернизации является обеспечение длительного срока активного существования аппаратов на орбите в интересах заказчика.

Космические аппараты связи размещают под головным обтекателем (ГО) ракеты-носителя. Количество и масса выводимых спутников влияет на их компоновку на разгонном блоке РН. Для одновременного

вывода нескольких КА существует три основных вида компоновки: последовательная по схеме «тандем», параллельная и последовательно-параллельная. Поэтому изменяемыми элементами в составе космического комплекса являются и КА, и их компоновка с разгонным блоком. Известно, что максимальные значения параметров механического нагружения системы «РН + разгонный блок + КА» имеют место при запуске двигателей первой ступени, в зоне полета при максимальных скоростных напорах и в момент разделения ступеней. Создаваемая при этом вибрация от работы двигательных установок и средств отделения ступеней и КА от разгонного блока не должна влиять на работоспособность приборов КА и механизмов раскрытия солнечных батарей и антенн. Для обеспечения поставленных задач осуществляется комплекс испытаний – наземная экспериментальная отработка. Такие цели, как отработка параметров конструкции на

образцах, проверка способности элементов КА противостоять разрушающему воздействию нагрузок, достигаются при динамических испытаниях.

На рынке пусковых услуг и полезных нагрузок в мире существует жесткая конкуренция, поэтому снижение затрат на изготовление и экспериментальную отработку конструкций и изделия в целом – одно из условий успешного функционирования предприятий, предоставляющих такие услуги. Выбор испытательных установок всегда связан с изучением перспектив развития проектируемых конструкций КА, а значит и с обоснованием затрат на их изготовление и приобретение комплектующих. Правильный выбор вибрационной системы для испытаний КА различных масс и конструкций будет способствовать снижению себестоимости изделия.

Постановка задачи. На этапах разработки и изготовления КА для проведения виброиспытаний необходимо иметь: вибрационную испытательную систему; режимы виброиспытаний; объект испытаний.

Вибрационная испытательная система создает и воспроизводит определенные механические колебания, передает их объекту испытаний, а также имитирует реальные условия вибрации. Любая вибрационная система имеет свои предельные эксплуатационные параметры, например, максимальное перемещение стола вибростенда или максимальное передаваемое усилие. При превышении предельных параметров неизбежно сокращение ресурса работы вибрационной системы. Поэтому для проведения динамических испытаний необходимо знать параметры системы и иметь некоторый гарантированный запас ($\approx 20\%$).

Крепление объекта испытаний к вибростенду осуществляется при помощи оснастки. Оснастка должна передавать вибрацию от стола к объекту испытаний без искажений, неблагоприятно влияющих на результаты испытаний.

Универсальная вибрационная система обеспечивает качество услуг: по режимам испытаний; параметрам полезной нагрузки; снижению себестоимости изделий в результате ее длительной эксплуатации. Общие параметры режимов испытаний следующие: верхняя и нижняя частота диапазона испытаний; уровень нагружения на каждой частоте; скорость и закон изменения частоты (логарифмический или линейный); длительность испытаний.

Объект испытаний на заводе-изготовителе – это инженерно-квалификационные модели (ИКМ) и массоинерциальные макеты. Инженерно-квалификационные модели полностью соответствуют КА по массе, габаритам, расположению и креплению приборов и панелей солнечных батарей и центру масс всего аппарата.

При определении параметров вибрационной испытательной системы, в первую очередь, необходимо знать:

- параметры КА (массу, форму и размеры, положение центра тяжести); массу оснастки; расчетные значения собственных частот и т. д.;
- режимы испытаний: синусоидальная вибрация со скользкой частотой; широкополосная случайная вибрация; ударное нагружение и ударный спектр;

- мощностные возможности системы (способность системы обеспечить требуемые режимы нагружения для наибольшего по массе из объектов испытаний);

- основные характеристики: перемещение, скорость, частотный диапазон;

- статическую грузоподъемность (нужны ли дополнительные средства для обезвешивания объекта испытаний).

Основные требования к вибрационной системе:

- возможность воссоздания характера и уровня расчетных нагрузок;

- соответствие экспериментальной базы габаритам объектов испытаний;

- учет перспектив развития космической техники на 15–20 лет;

- учет объема экспериментальной отработки и сроков испытаний;

- возможность сбора, регистрации и оперативной обработки измерительной информации; автоматизация испытаний;

- энергетическая обеспеченность, экологическая чистота.

Задача заключается в следующем: определить эксплуатационные параметры универсальной вибрационной системы для испытаний космических аппаратов связи по максимальному толкающему усилию вибровозбудителя.

Последовательность решения задачи:

Выбираем расчетную схему.

1. Составляем уравнения движения для выбранной расчетной схемы, решаем их в аналитическом виде для нахождения собственных частот колебаний.

2. Определяем максимальное значение параметров механического нагружения системы «РН + разгонный блок + КА».

3. Определяем толкающее усилие вибровозбудителя.

4. Определяем основные эксплуатационные параметры вибрационной системы.

Решение задачи. Испытаниям КА связи с компоновкой по схеме «тандем» (рис. 1) соответствует расчетная схема, приведенная на рис. 2, где m_1 – масса подвижной части вибровозбудителя с оснасткой; m_2 – масса ИКМ; m_3 – масса макета; c_1 – жесткость упругих элементов оснастки вибровозбудителя; c_2 и c_3 – жесткости упругих элементов, соответственно, ИКМ и макета; F – толкающее усилие вибровозбудителя; x_1 – перемещение стола вибростенда; x_2 и x_3 – перемещения, соответственно, ИКМ и макета; α_1 и α_2 – коэффициенты сопротивления, соответственно, ИКМ и макета.

При составлении дифференциальных уравнений движения механической системы примем следующие допущения:

- упругие элементы считаем безынерционными;
- механическая система имеет устойчивое положение равновесия; центры тяжести ИКМ, макета и оснастки размещаются на продольной оси арматуры (это позволит не учитывать опрокидывающий момент);
- боковым перемещением масс пренебрегаем.

Принятые допущения позволяют свести механическую систему с распределенными параметрами к системе с тремя степенями свободы. По известной методике [1] составляем уравнения движения:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + \alpha_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_1 x_1 - c_2 (x_2 - x_1) &= F_0 \sin(\omega t), \\ m_2 \ddot{x}_2 - \alpha_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \alpha_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + \\ + c_2 (x_2 - x_1) - c_3 (x_3 - x_2) &= 0, \\ m_3 \ddot{x}_3 - \alpha_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + c_3 (x_3 - x_2) &= 0, \end{aligned} \right\} (1)$$

где F_0 – амплитуда силы F ; ω – частота вынуждающей силы; t – время нагружения.

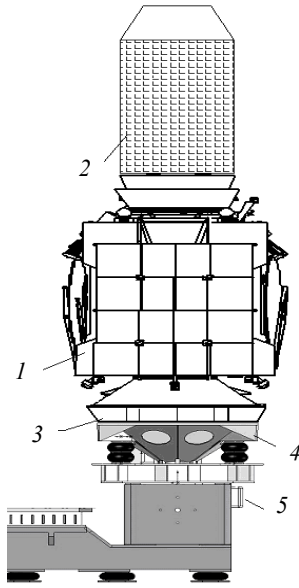


Рис. 1. Схема испытаний КА на воздействие вибрационных нагрузок:

1 – ИКМ; 2 – макет КА; 3 – адаптер; 4 – стол вибростенда; 5 – вибровозбудитель

Решение системы (1):

1. Определение собственных частот колебаний по методу комплексных амплитуд:

– решение ищем в виде $x_j = u_j e^{i\lambda t}$, где $j = 1, \dots, 3$; $i^2 = -1$;

– найдем первую и вторую производные \dot{x}_j, \ddot{x}_j ;

– подставим $x_j, \dot{x}_j, \ddot{x}_j$ в систему:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + \alpha_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_1 x_1 - c_2 (x_2 - x_1) &= 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 - \alpha_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \alpha_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + \\ + c_2 (x_2 - x_1) - c_3 (x_3 - x_2) &= 0, \\ m_3 \ddot{x}_3 - \alpha_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + c_3 (x_3 - x_2) &= 0, \end{aligned} \right\} (2)$$

– получим уравнение частот:

$$\begin{vmatrix} -m_1 \lambda^2 + c_2 + \alpha_1 \lambda i + c_1 & -\alpha_1 \lambda i - c_2 & 0 \\ -\alpha_1 \lambda i - c_2 & -m_2 \lambda^2 + c_2 + c_3 + \alpha_2 \lambda i + \alpha_1 \lambda i & -\alpha_2 \lambda i - c_3 \\ 0 & -\alpha_2 \lambda i - c_3 & -m_3 \lambda^2 + c_3 + \alpha_2 \lambda i \end{vmatrix} = 0,$$

– находим собственные частоты колебаний в аналитическом виде: λ_1, λ_2 и λ_3 .

2. Определение перемещения масс m_1, m_2 и m_3 . Собственно перемещение массо-инерциального макета не требуется, так как для решения задачи необходимо первое уравнение системы (1).

3. Задание численного значения масс, жесткостей и коэффициентов сопротивления:

– в запуске 11 февраля 2009 г. на геостационарную орбиту была выведена рекордная для ракет-носителей России полезная нагрузка массой около 3 700 кг (спутники «Экспресс АМ-44» и «Экспресс МД-1»), поэтому для расчетной схемы (рис. 2) примем общую массу модели и макета 3 700 кг из соотношения $m_2/m_3 \approx 2$:

$$m_2 + m_3 = 2 450 + 1 250 = 3 700 \text{ кг};$$

– массу подвижной части вибровозбудителя с оснastкой m_1 примем примерно 20 % от общей массы ИКМ и макета: $m_1 = 740$ кг;

– жесткости данной системы примем $c_1 = 10^4$ Н/м, $c_2 = 3,5 \cdot 10^7$ Н/м, $c_3 = 4,5 \cdot 10^7$ Н/м (из статистических данных);

– коэффициенты сопротивления определим через добротность Q системы [2, с. 27]:

$$\alpha_1 = 57 000 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}, \alpha_2 = 32 000 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}.$$

4. Нахождение собственных частот системы (2) в численном виде в прикладном вычислительном пакете Maple: $\lambda_1 = 1,50 \text{ с}^{-1}$, $\lambda_2 = 184,16 \text{ с}^{-1}$ и $\lambda_3 = 276,35 \text{ с}^{-1}$. Для дальнейшего расчета частоту λ_1 не учитываем; $\lambda_1 = 0,24$ Гц, а режимы испытаний начинаются с 5 Гц [3, с. 12]. Варьирование численными значениями коэффициентов α_1 и α_2 позволяет сделать вывод о незначительном влиянии силы сопротивления, т. е. это случай «малого сопротивления» [4], и в первом уравнении системы (1) можно пренебречь членом $\alpha_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$.

5. Определение максимального значения параметров механического нагружения системы «РН + разгонный блок + КА»:

– максимальное значение динамического нагружения системы «РН + разгонный блок + КА» после сброса ГО соответствует осевой перегрузке n_x в момент разделения ступеней:

$$n_x = 4,5 [3, \text{ с. } 24];$$

– находим максимальную осевую силу, действующую на КА схемы «тандем»:

$$N = (m_2 + m_3) n_x g = c_2 (x_1 - x_2), \\ N = 3 700 \cdot 4,5 \cdot 9,8 = 163 170 \text{ Н} = 163,17 \text{ кН}.$$

При расчете осевой силы не учитывались:

– демпфирование конструкций КА;

– дополнительная осевая сила, обусловленная приращением осевой перегрузки для КА за счет колебательного движения РН.

Таким образом, оставляем для расчета $N = 163,17$ кН, так как эти два пункта компенсируют друг друга.

6. Преобразование первого уравнения системы (1) к виду

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \frac{\ddot{x}_1}{\lambda^2} + c_2 (x_1 - x_2) = F, \text{ где } c_1 x_1 = c_1 \ddot{x}_1 / \lambda^2.$$

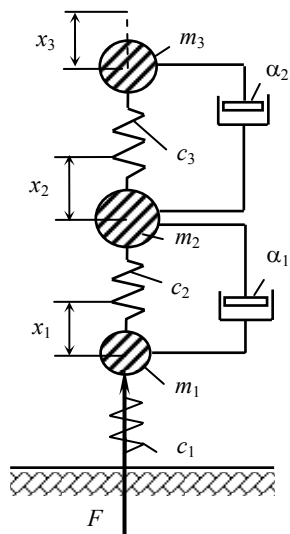


Рис. 2. Расчетная схема

Принимаем, что виброускорение подвижной части m_1 вибрационной системы соответствует осевой перегрузке n_x ракеты-носителя: $\ddot{x}_1 = n_x g = 4,5g$.

Подставим численные значения и найдем тяговую силу F вибровозбудителя:

$$F = 740 \cdot 4,5 \cdot 9,8 + 10^4 \frac{4,5 \cdot 9,8}{184,16^2} + 163\,170 \approx \approx 195\,817 \text{ Н} \approx 195,8 \text{ кН}.$$

7. Определение требуемой скорости вибровозбудителя. Нагружение испытываемых ИКМ и макета должно соответствовать заданным режимам испытаний. Один из самых распространенных методов проведения испытаний – метод испытания синусоидальным сигналом.

Для пиковых значений синусоидального сигнала скорость вибровозбудителя определяется по формуле

$$V = g n_x / (2\pi f),$$

где f – частота (Гц).

Частоту испытаний примем $f = 5$ Гц:

$$V = 9,8 \cdot 4,5 / (2\pi \cdot 5) \approx 1,4 \text{ м/с}.$$

Максимальная скорость вибровозбудителя может быть до 2 м/с в длительном режиме работы, номинальное ускорение (синусоидальное) – до 75g [5, с. 36].

8. Определение перемещения стола вибростенда. При решении задачи рассматривалось движение механической системы только в одном направлении. В действительности испытания ИКМ осуществляются по трем координатам X , Y и Z , следовательно, необходимо предусмотреть перемещение стола вибростенда в горизонтальном и вертикальном направлениях.

9. Определение размеров стола вибростенда. Космические аппараты, выводимые на высокоэллиптические и геостационарные орбиты, являются крупногабаритными изделиями, за характерный размер возьмем диаметр 2 м. Исходя из условий размещения ИКМ на столе вибростенда, его размеры не могут быть меньше площади ИКМ для предотвращения биений на краях объекта. Поэтому ИКМ должна быть установлена на столе вибростенда через специальный адаптер в форме усеченного конуса с диаметрами 460 и 2 000 мм соответственно.

10. Управление вибрационной системой. Конструкция вибровозбудителя должна обеспечить передачу толкающего усилия вдоль оси арматуры, поэтому смещение ИКМ, макета и оснастки от продольной оси может вызвать «опрокидывание» арматуры. ИКМ и макет в этом случае подвергаются воздействию поперечных нагрузок, которые не предусмотрены режимами испытаний. У оснастки возможен резонанс в поперечном направлении: и на ИКМ, и на макет будет действовать значительная неконтролируемая вибрация. Следовательно, необходим контроль поперечного ускорения. Это обеспечивается при многоканальном управлении, когда управляющий сигнал формируется по реакции испытываемого объекта.

Мы определили параметры, позволяющие выбрать универсальную вибрационную систему для динамических испытаний КА.

Каждый производитель вибрационных систем имеет свою «линейку» систем с определенными параметрами, учитывающими требования практики. Из этого ряда выбирается вибрационная система по толкающему усилию вибровозбудителя с большим значением усилия.

Приведем рекомендуемые параметры при выборе вибрационной системы для динамических испытаний КА:

1. Максимальная статическая нагрузка на вибровозбудитель не менее 3 700 кг.
2. Рабочий частотный диапазон – от 0 до 3 000 Гц (задается условиями заказчика).
3. Режимы испытаний: синусоидальная вибрация со скользящей частотой; широкополосная случайная вибрация.
4. Режим нагружения – толкающее усилие вибровозбудителя не менее 235 кН.
5. Основные характеристики:
 - вибростенд – электродинамический с замкнутой системой водяного охлаждения, что исключает потери воды и снижает необходимость в дорогом кондиционировании воздуха (охлаждение необходимо для предотвращения перегрева катушек электромагнитной системы);
 - перемещение стола вибростенда – в горизонтальном и вертикальном направлениях;
 - максимальная скорость вибровозбудителя – до 2 м/с (для режимов испытаний синусоидальной вибрацией);
 - диаметр стола вибростенда не менее 460 мм.

6. Перечень измеряемых компонентов вибрации: амплитуда, частота, перегрузка (ускорение), перемещение, фазовый сдвиг.

7. Управление вибрационной системы – многоканальное с усреднением управляющего сигнала и управлением вибронегрузкой по максимальному значению отклика системы.

8. Аппаратно-программные средства управления и измерения вибрации: с одновременным измерением и регистрацией в табличном и графическом видах параметров колебаний.

9. Результаты измерений: вывод квантованных результатов измерений в виде таблиц, графиков амплитудно-частотных характеристик, фазово-частотных характеристик, диаграмм спектральной плотности.

10. Система обезвешивания – внешняя (пневмоподвеска адаптера с регулировкой давления в зависимости от веса КА).

11. Автоматическая балансировка для гарантированного поддержания арматуры вибростенда в центральном положении при снятии/добавлении нагрузки на стол вибростенда.

Данная универсальная вибросистема может использоваться в следующих случаях:

1. Для виброиспытаний крупногабаритных инженерно-квалификационные моделей с габаритами, превышающими размеры стандартного стола вибростенда:

– при оснащении системы специальными платформами (например, на пневмоподшипниках);

– с расширительными элементами для предотвращения биений на концах образца, которые могут привести к выходу вибровозбудителя из строя.

2. При других схемах компоновки спутников под ГО ракеты-носителя.

При современном развитии ракетно-космической техники наблюдается тенденция к уменьшению массы приборов за счет использования новых материалов с применением нанотехнологий. Поэтому, несмотря на уменьшение массы приборов, масса полезной нагрузки космических аппаратов может оставаться в тех же пределах за счет добавления дополнительных модулей, так как увеличение ее ограничено объемом ГО ракеты-носителя.

Увеличение же массы полезной нагрузки и космического аппарата для высокоэллиптических и геостационарных орбит требует разработки и создания более мощных РН.

Предложенная методика может использоваться специалистами при выборе вибрационных систем в процессе разработки плана наземной экспериментальной отработки космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний : учебник для вузов. М. : Высш. шк., 1980.

2. Хейлен В., Ламменс С., Сас П. Модальный анализ: теория и испытания / ООО «Новатест». 2010.

3. Виброиспытания космических аппаратов / Б. П. Соустин [и др.]. Новосибирск : Наука, 2000.

4. Ильин М. М. Теория колебаний : учебник для вузов / под общ. ред. К. С. Колесникова. 2-е изд., стереотип. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003.

5. Бейкер Р. Введение в вибрацию. LDS, 1994.

L. A. Semenova, E. A. Lysenko, K. E. Lysenko

APPROACH TO SELECT OF UNIVERSAL VIBRATORY SYSTEM

The authors propose an approach of selection of an universal vibratory system for test operation of dual-launch communication satellites. The system parameters are detected and recommendations for the system adaptation are formulated.

Keywords: approach, vibratory system, testing, space apparatus.

© Семенова Л. А., Лысенко Е. А., Лысенко К. Е., 2011