

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К МЕХАНИЧЕСКИМ ИСПЫТАНИЯМ АГРЕГАТОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2010 Н. А. Тестоедов, А. А. Логанов, В. В. Двирный

ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнева

Рассматривается проблема квалификации агрегатов и узлов космических аппаратов на стойкость к механическим воздействиям. Для агрегатов, имеющих элементы с низкой собственной частотой, предлагается подход, дополняющий автономные испытания динамическим анализом с учётом способа их интеграции в конструкцию космического аппарата. Результат динамического анализа подтверждается испытанием агрегатов, в рассмотренном случае – компенсатора объема в активной системе терморегулирования, в составе макета космического аппарата для динамических испытаний, и содержание программы автономных испытаний такого агрегата устанавливается на основании данного подхода.

*Механические нагрузки, резонансные частоты, моделирование нагрузок, виброизоляция.*

Агрегаты исполнительной автоматики системы терморегулирования (СТР) космических аппаратов (КА) различаются по назначению, принципу действия и конструкции. Основное требование к ним – обеспечение бесперебойного функционирования в условиях штатной эксплуатации в течение всего срока активного существования (САС) КА на орбите. Различие в принципе действия агрегатов и в способе его конструктивной реализации определяет выбор методики подтверждения соответствия требованиям по механическим воздействиям для каждого конкретного агрегата. В программу механических испытаний включаются нагрузки, имитирующие этап выведения КА, а именно удары; квазистатические синусоидальные и случайные вибрации. Требования по стойкости к механическим нагрузкам определяются для КА, заносятся в Нормы прочности и ложатся в основу программы экспериментальной отработки, приёмки узлов и агрегатов в технологическом процессе изготовления.

Такие агрегаты исполнительной автоматики, как электронасосный агрегат (ЭНА), вентилятор, терморегулятор, конструктивно построены из элементов, обладающих высокой жёсткостью, и поэтому процедура проверок в процессе механических испытаний используется стандартная. Кроме них, в со-

ставе активной СТР имеется компенсатор объема (КО), предназначенный для поддержания в заданном диапазоне давления рабочей жидкости (РЖ) в магистрали СТР при изменениях объема РЖ вследствие колебаний температуры. Для обеспечения изменения объема содержащейся в КО жидкости в его конструкции имеется тонкостенный сварной сильфон большого диаметра. В силу этой особенности конструкция КО имеет резонансы на низких частотах – до 150 Гц, что приводит к высоким уровням механических воздействий и, как следствие, к потере герметичности при механических испытаниях. Ставится задача определения стойкости конструкции КО к механическим нагрузкам в натуральных условиях. Аппаратура должна сохранять работоспособность во время (если при воздействии механических нагрузок аппаратура включена) и после воздействия механических нагрузок, приведённых в таблицах 1, 2.

В условиях приведённых выше нагрузок критичным элементом КО является сильфон, так как требования по назначению предполагают низкую жёсткость его конструкции. При возникновении резонанса в элементах конструкции с низкой жёсткостью возможно разрушение этого элемента.

При автономных испытаниях КО в соответствии с требованиями таблиц 1, 2 был

Таблица 1

	Перпендикулярно плоскости		Параллельно плоскости	
	Частота, Гц	Уровень	Частота, Гц	Уровень
Синусоидальные воздействия	5-10 10-20 20-100	$\pm 10$ мм от $\pm 4$ g до $\pm 20$ g $\pm 20$ g	5-10 10-20 20-100	$\pm 10$ мм от $\pm 4$ g до $\pm 15$ g $\pm 15$ g
Случайная вибрация	20-50 50-1000 1000-2000	+6 дБ/октаву $0,4 \text{ g}^2/\text{Гц}$ -6 дБ/октаву	20-50 50-1000 1000-2000	+6 дБ/октаву $0,1 \text{ g}^2/\text{Гц}$ -6 дБ/октаву
Среднеквадратичное значение, g	25,5		13	

Таблица 2. Квасистатические нагрузки

Направление действия	Ускорение, м/с (g)
Продольное (по оси ОХ КА)	$\pm 147,2 (\pm 15)$
Боковое (любое в плоскости YOZ КА)	$\pm 196,2 (\pm 20)$

выявлен отказ (разгерметизация). Результаты измерений собственных частот КО показали наличие широкого спектра собственных частот в диапазоне до 150 Гц (рис. 1). На рисунке приведены зависимости виброускорения в направлении осей X, Y и Z КО (соответственно сверху вниз) от частоты. На графиках как  $A_g$  обозначены значения основной гармоники сигнала виброускорения, как  $S_q$  обозначены среднеквадратические значения суммарного сигнала виброускорения. Несовпадение кривых 1 и 2 на рис. 1 (соответственно до и после испытаний) свидетельствует о разрушении конструкции.

По условиям автономной отработки источник механического воздействия находится максимально близко от испытываемого узла, но при этом отделён от него несколькими элементами конструкции – силовым каркасом, трубопроводами, узлами крепления, которые могут выполнять функцию гашения колебаний [1].

Динамический анализ сильфона в составе КО и с учётом его подключения к гидросистеме КА, выполненный с применением программной среды CATIA и приложения Sim Designer, а также с учётом [2], показал снижение значения виброускорения по сравнению с заданными для автономных испытаний в 4 раза. Значения напряжений в материале сильфона получены ниже допустимых (рис. 2). Результаты динамического анализа КО дали основание считать, что он способен выдержать нагрузки в составе КА (рис. 3).

Завершающей фазой комплекса работ по оценке работоспособности конструкции КО в условиях штатной эксплуатации стали частотные испытания на макете в условиях, близких к натурным. Результаты частотных испытаний КО в составе макета для динамических испытаний подтвердили, что требование по отсутствию резонансов в диапазоне частот до 150 Гц выполняется. В ходе ис-

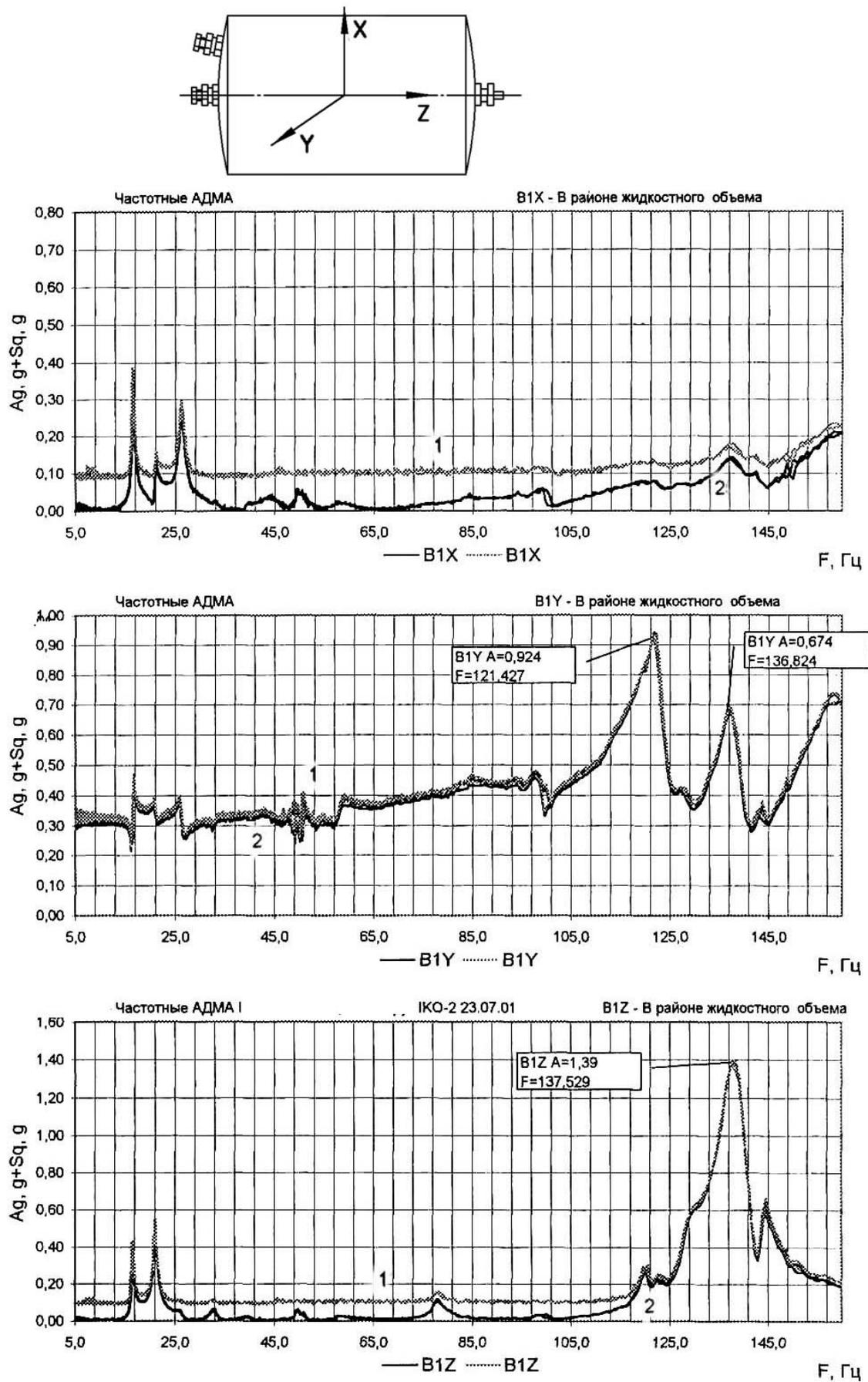


Рис. 1. Профили собственных частот колебаний компенсатора объёма

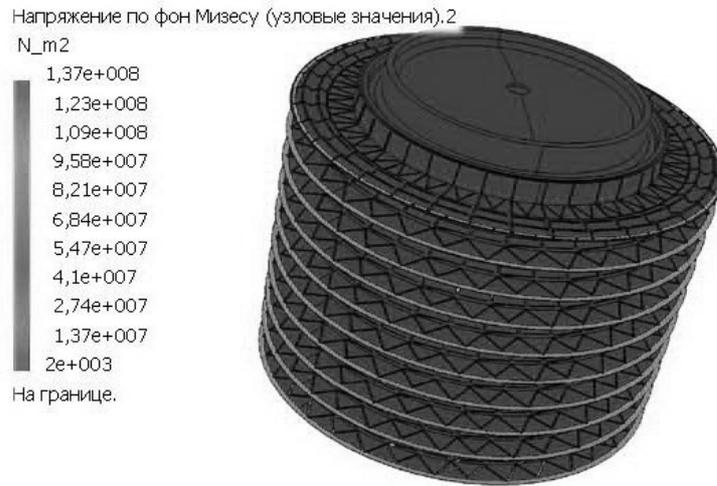


Рис. 2. Результаты динамического анализа сальфона в Sim Designer

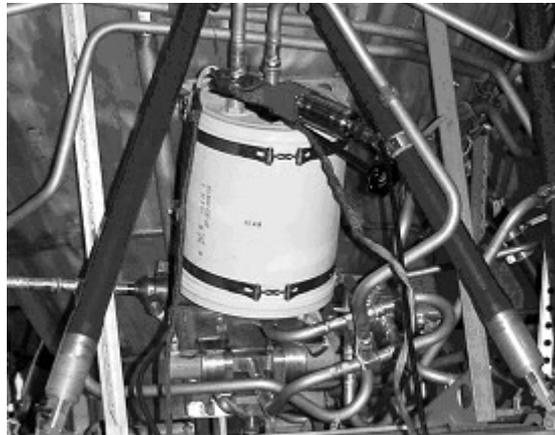


Рис. 3. Компенсатор объема в составе макета для динамических испытаний

пытаний (в рамках программы SESAT) были в целом подтверждены результаты динамического анализа и выработаны требования к механическим нагрузкам для автономных испытаний КО.

В программу проверки КО на механические воздействия включены испытания лишь на вибрацию с уровнями, приведёнными в табл. 3.

Таким образом, квалификация узлов с элементами конструкции, имеющими низкую

собственную частоту колебаний, для применения в составе КА требует учёта условий интеграции этих узлов в силовую схему КА. Дополнение автономных испытаний узлов и агрегатов их динамическим анализом с учётом способа включения в конструкцию КА и подтверждение результатов анализа испытанием в составе динамического макета позволяет исключить отбраковку работоспособных узлов и агрегатов, тем самым снижая себестоимости создания и отработки КА.

Таблица 3

Частота, Гц	5-10	10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640	640-1280	1280-2000
Ускорение, g	1	2	3	4,8	6,5	7,5	9	10,5	11,5

**Библиографический список**

1. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т./ Ред. совет: В. Н. Челомей и др. - М.: Машиностроение, 1981. - Т.6, Защита от вибрации и ударов/ Под ред. К. В. Фролова, 1981. – 456 с.
2. Силовой расчет, уравнивание, проектирование механизмов и механика манипуляторов: Учебное пособие/ Под ред. А. К. Мусатова. - М.: Изд. МГТУ, 1990.

**References**

1. Vibrations in technical equipment: Reference book. In 6 vol./: V. N. Chelomej, et al., – Moscow: Mechanical engineering, 1981. – Vol.6, Protection against vibration and impacts / Edited by K. V. Frolov, 1981. – 456 p.
2. Force calculation, equilibration, designing of mechanisms and mechanics of manipulators: Manual. Edited by A. K. Musatov. Moscow: Moscow State Technical University, 1990.

## COMPLEX APPROACH TO MECHANICAL TESTS OF EXECUTIVE AUTOMATIC UNITS OF SPACE VEHICLES

© 2010 N. A. Testoyedov, A. A. Loganov, V. V. Dvirny

Academician M. F. Reshetnev Joint-stock Company «Information satellite systems»

The problem of qualification of space vehicle units according to their resistance to mechanical influences is examined. For units having elements with a low natural frequency, an approach supplementing independent tests by the dynamic analysis in view of the way of their integration into a design of a space vehicle is proposed. The result of the dynamic analysis is confirmed by testing the units in the case under consideration the equaliser of volume in an active thermal control system, in the structure of a space vehicle model for dynamic tests, and the content of the program of independent tests of such a unit is established on the basis of the given approach.

*Mechanical loadings, resonant frequencies, modelling of loadings, vibration isolation.*

### Информация об авторах

**Тестоедов Николай Алексеевич**, кандидат технических наук, генеральный конструктор и генеральный директор ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: математическое моделирование внешних воздействий и их имитация в лабораторных условиях. E-mail: [nropm@nropm.ru](mailto:nropm@nropm.ru).

**Логанов Александр Анатольевич**, начальник группы отдела разработки устройств исполнительной автоматики, ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: разработка и испытания устройств систем терморегулирования космических аппаратов. E-mail: [loganov@iss-reshetnev.ru](mailto:loganov@iss-reshetnev.ru).

**Двирный Валерий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника отдела, ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: разработка и испытания устройств систем терморегулирования космических аппаратов. E-mail: [dvirnyi@iss-reshetnev.ru](mailto:dvirnyi@iss-reshetnev.ru).

**Testoyedov Nikolay Alekseevich**, general designer and general director of the joint-stock company «Information satellite systems» named after acad. M. F. Reshetnev, PhD in mechanical engineering, [office@iss-reshetnev.ru](mailto:office@iss-reshetnev.ru). Area of research: mathematical modelling of external influences and their simulation in laboratory conditions.

**Loganov Alexander Anatolyevich**, chief of a group of the department of executive automatics device development, Academician M. F. Reshetnev Joint-stock Company «Information satellite systems», [loganov@iss-reshetnev.ru](mailto:loganov@iss-reshetnev.ru). Area of research: development and testing of devices of space vehicle thermal control systems.

**Dvirny Valery Vasilyevich**, deputy chief of a department, professor, Academician M. F. Reshetnev Joint-stock Company «Information satellite systems», [dvirnyi@iss-reshetnev.ru](mailto:dvirnyi@iss-reshetnev.ru). Area of research: development and testing of devices of space vehicle thermal control systems.