

УДК 629.7.01

Особенности экспериментального определения частот и форм собственных колебаний цилиндрической оболочки*

И.С. ПОНОМАРЁВ¹, С.В. МАХНОВИЧ², А.С. ПАНТИЛЕЕВ³

¹ 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Южно-Уральский государственный университет, аспирант. E-mail: ponomarevis.91@mail.ru

² 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Южно-Уральский государственный университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: mahnovichsv@mail.ru

³ 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Южно-Уральский государственный университет, преподаватель. E-mail: andyfly@mail.ru

Приведены результаты экспериментального определения собственных частот и форм колебаний тонкостенной цилиндрической оболочки методом удара. Для проведения исследования оболочка вывешивалась на упругих подвесах. Виброускорения оболочки измерялись с помощью однокомпонентных акселерометров. Проведена серия экспериментов с различной установкой датчиков по образующим оболочки. Сигналы с акселерометров регистрировались в системе сбора данных LMS Scadas. Частоты и формы собственных колебаний оболочки определялись на основе взаимного спектрального анализа переходных процессов входного сигнала возбуждения и выходных сигналов с помощью программного обеспечения LMS Test Lab. Первичная оценка частот собственных колебаний оболочки выполнялась по максимумам АЧХ и точек смены фаз на 90° на ФЧХ. Последующее уточнение этих частот проводилось по усредненным АЧХ и ФЧХ. Для выбранных частот выполнена оценка форм собственных колебаний по критерию модальной достоверности. Проведена вероятностная оценка значений собственных частот, модальной массы и жесткости, коэффициентов затухания цилиндрической оболочки. В исследуемом диапазоне из восьми зарегистрированных максимумов идентифицировано три частоты и соответствующие формы собственных колебаний. Так, максимумам соответствовали частоты 423,3 Гц, 425,4 Гц, 700,9 Гц, 715,6 Гц, 971,8 Гц, 977,5 Гц, 983,7 Гц и 985,4 Гц, из которых 425,4 Гц, 977,5 Гц и 985,4 Гц идентифицированы как собственные. Выполненный экспериментальный модальный анализ показал, что предложенная последовательность процедур обработки результатов виброиспытаний является вполне удовлетворительной при идентификации частот и форм собственных колебаний конструкций отсеков летательных аппаратов.

Ключевые слова: метод удара, частоты собственных колебаний, формы собственных колебаний, экспериментальное исследование, LMS Test Lab, цилиндрическая оболочка, взаимный спектральный анализ, метод наименьших квадратов

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-44-58

* Статья получена 08 июня 2016 г.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и отработке летательных аппаратов возникает широкий спектр задач, связанных с анализом их динамического поведения. Так, на этапе проектирования предварительная оценка этих характеристик требуется для определения нагрузок, действующих на ЛА, для установки и подтверждения требований по динамической точности стабилизации, в качестве исходных данных для разработки систем ориентации и стабилизации.

Для определения динамических характеристик броскового макета ракеты исследуются динамические характеристики его отсеков. Макет представляет собой составную конструкцию, состоящую из нескольких тонкостенных отсеков и грузов. Конструктивно отсеки включают цилиндрическую или коническую оболочку и торцевые шпангоуты. Оболочки свернуты из листа из алюминиевого сплава с продольным сварным швом. К торцам цилиндра приварены кольца-шпангоуты, полученные механической обработкой. Таким образом, в оболочке присутствуют один продольный и два кольцевых сварных шва. В рамках настоящей работы проводится отработка методики экспериментального определения частот и форм собственных колебаний нижнего цилиндрического отсека ракеты. На рис. 1 показаны общий вид оболочки и схема расположения точек.

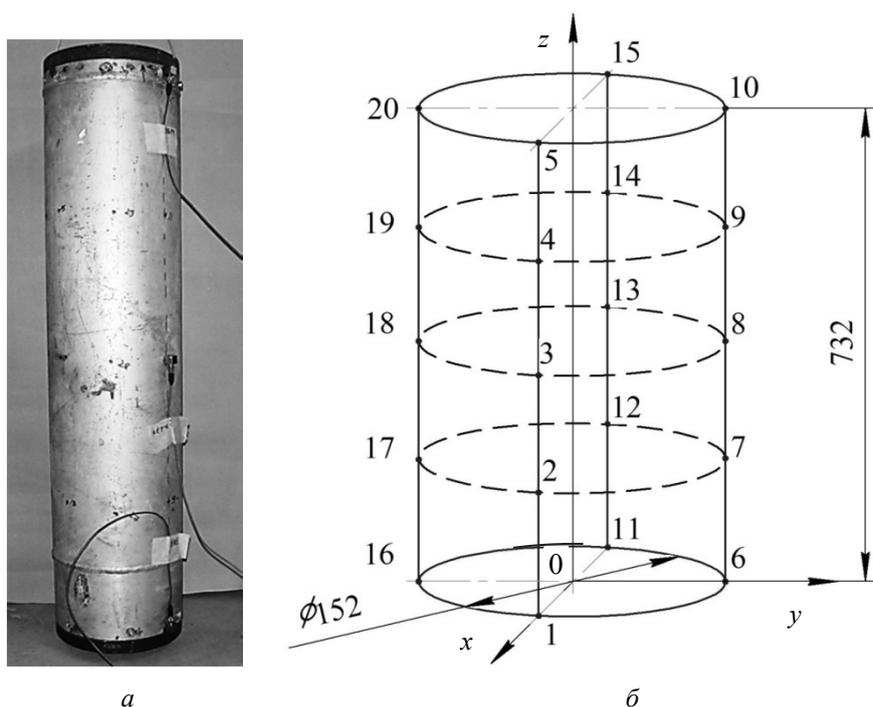


Рис. 1. Общий вид оболочки:

a – оболочка на упругом подвесе; *б* – расположения точек измерения и ударов

Длина оболочки 732 мм, диаметр 152 мм, толщина 3 мм. Оболочка изготовлена из алюминиевого сплава $E = 70\,000$ МПа, $\rho = 2700$ кг/м³. На основе геометрической модели отсека сформирована конечноэлементная модель. На основе модального анализа этой модели в исследуемом диапазоне до

1000 Гц выявлено три парных частотных собственных колебания: 458,1 Гц, 761,6 Гц, 1044,5 Гц. Подтверждение расчетных динамических характеристик отсека проводится с помощью эксперимента [5].

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Оболочка вывешена вертикально на упругом подвесе. Для измерения виброускорений использовались однокомпонентные акселерометры модели Т333В32. Чувствительность акселерометров 100 мВ/г, частотный диапазон от 0,5 до 3000 Гц. При испытаниях удары наносились по оболочке модальным молотком модели 086С02, в котором установлен датчик силы. Чувствительность датчика силы 11,2 мВ/Н, резонансная частота ≥ 22 кГц и нелинейность ≤ 1 %. Сигналы датчиков подавались в систему сбора данных LMS SCADAS Mobile CSM05, а затем обрабатывались с помощью программы LMS TEST Lab. Схема экспериментального стенда показана на рис. 2.

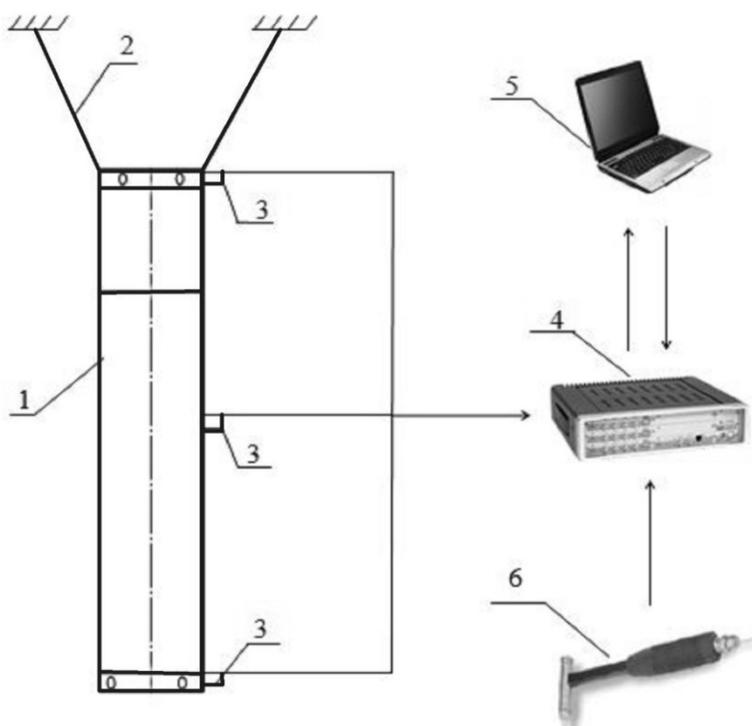


Рис. 2. Схема экспериментального стенда при задании возбуждающего воздействия с помощью модального молотка:

1 – оболочка; 2 – упругие подвесы; 3 – однокомпонентные акселерометры; 4 – система измерения LMS Scadas; 5 – компьютер с программой LMS Test Lab; 6 – модальный молоток

Примеры использования аппаратно-программного комплекса фирмы LMS для модальных испытаний и верификации математических моделей изделий космической и авиационной техники рассмотрены в статьях [1–4].

Экспериментальный анализ мод колебаний основан на определении динамических характеристик конструкции по результатам измерений характе-

ристик вынужденных механических колебаний. При этом одновременно измеряются вынуждающие динамические силы и результирующие ускорения механических колебаний (отклик) в выбранных точках конструкции.

Проведены эксперименты при разном расположении трех акселерометров на внешней поверхности оболочки. На рис. 1, б цифрами обозначены точки возбуждения, в которых в экспериментах закреплялись акселерометры и наносились удары. Номера этих точек и направления ударов приведены в табл. 1. Два направления удара необходимы для возбуждения колебаний в двух координатных плоскостях zOx и zOy . В экспериментах 1Э–4Э акселерометры располагались на одной образующей: два на торцевых шпангоутах оболочки и один – в середине образующей. В эксперименте 5Э акселерометры располагались в точках 11, 14 и 15 между шпангоутами.

Таблица 1

Расположение точек измерения и направление ударов в испытаниях

Обозначение эксперимента	Точки расположения акселерометров	Точки и направления ударов	
		Ox	Oy
1Э	1, 3, 5	1–5, 11–15	6–10, 16–20
2Э	6, 8, 10		
3Э	11, 13, 15		
4Э	16, 18, 20		
5Э	11, 14, 15		

Определение модальных характеристик оболочки проводилось в диапазоне от 400 до 1000 Гц. Колебания, создаваемые при ударе, представляют собой переходный кратковременный процесс передачи энергии. Спектр ударной силы является непрерывным с максимальной амплитудой при 0 Гц и последующим уменьшением с ростом частоты. Продолжительность удара и, следовательно, форма спектра при ударном возбуждении определяются массой и жесткостью ударного молотка и самой конструкции. При применении молотка на жесткой оболочке жесткость головки молотка практически определяет спектр. Головка молотка действует как механический фильтр. Таким образом, выбирая головку молотка, можно выбирать частоты среза. В соответствии с рекомендациями руководства по эксплуатации модального молотка [6] для проведения эксперимента выбран тип наконечника со средней жесткостью, обеспечивающий требуемый спектр частот колебаний.

Во всех экспериментах в каждую измерительную точку выполнялось пять ударов. Амплитудно-частотные (АЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики определялись с помощью программного обеспечения LMS Test Lab путем многократного усреднения энергетических спектров входного и выходного процессов. При этом использовались известные связи между ними:

$$\lambda_{AB}^2(\omega) = \frac{|W_{AB}(\omega)|^2}{A(\omega)B(\omega)}, \quad 0 \leq \lambda_{AB}^2 \leq 1,$$

$$W_{AB} = H(\omega) \cdot A(\omega),$$

$$B(\omega) = H(\omega) \cdot A(\omega),$$

где $A(\omega)$ – энергетический автоспектр возбуждения;

$B(\omega)$ – энергетический автоспектр отклика;

$W_{AB}(\omega)$ – взаимный энергетический спектр возбуждения и отклика – функция когерентности;

$H(\omega)$ – частотная характеристика.

При всех измерениях проводился контроль характера функции когерентности. Удовлетворительными считались данные, для которых вид функции когерентности не изменялся в рамках серии из пяти измерений.

Функция когерентности является средством для оценки степени линейности связи входных и выходных сигналов. Если соответствующие собственные спектры содержат некогерентные шумы, то квадрат амплитуды взаимного спектра меньше произведения собственных спектров. Это объясняется тем, что некогерентные шумы удалены из взаимного спектра в процессе усреднения. Граничным значением функции когерентности является «1» в отсутствие шума и «0» при наличии чистых шумов [7–9].

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 изображена усредненная АЧХ, на ней можно выделить три области резонанса при разных частотах (в областях 400, 700 и 1000 Гц). Для выделенных областей частот далее выполняется уточнение АЧХ и ФЧХ колебаний оболочки для каждой измерительной точки [8, 9]. Графики этих функций по измерениям во всех точках показаны на рис. 4. На рис. 4, *a* показана область АЧХ около первого резонанса с единственным максимумом 423,3 Гц (верхний график). Функции ФЧХ точек возбуждения на нижнем графике рис. 4, *a* объединяются в две группы в соответствии с двумя направлениями удара. Каждая группа функций имеет общую точку перегиба. Обе точки перегиба соответствуют одной частоте, которая может быть идентифицирована как частота собственных колебаний оболочки. Таким образом, собственным частотам соответствуют максимум $H(\omega)$ и значения ФЧХ, близкие к 90° .

На рис. 4, *b* и *в* показаны значения функции АЧХ и ФЧХ в области второго и третьего резонанса соответственно. Особенностью этих областей является то, что функция АЧХ для каждой измерительной точки, кроме строгого локального максимума при 700,9 и 971,8 Гц, имеет один или несколько нестрогих максимумов при 715,6 и 983,7 Гц. Строгие максимумы связаны с резонансными явлениями, и соответствующие им частоты идентифицируются как частоты собственных колебаний оболочки. Нестрогие локальные максимумы могут быть связаны с тональными сигналами, которые наводятся на измерительных трактах, и соответствующие частоты должны быть отсеяны. К тому же и на ФЧХ при этих частотах «классическое» изменение фазы на 90° отсутствует. На рис. 4 плохо видны пики локальных максимумов и они размыты по частотам и по фазам. Для того чтобы уточнить их, потребовались усредненные данные, представленные на рис. 5.

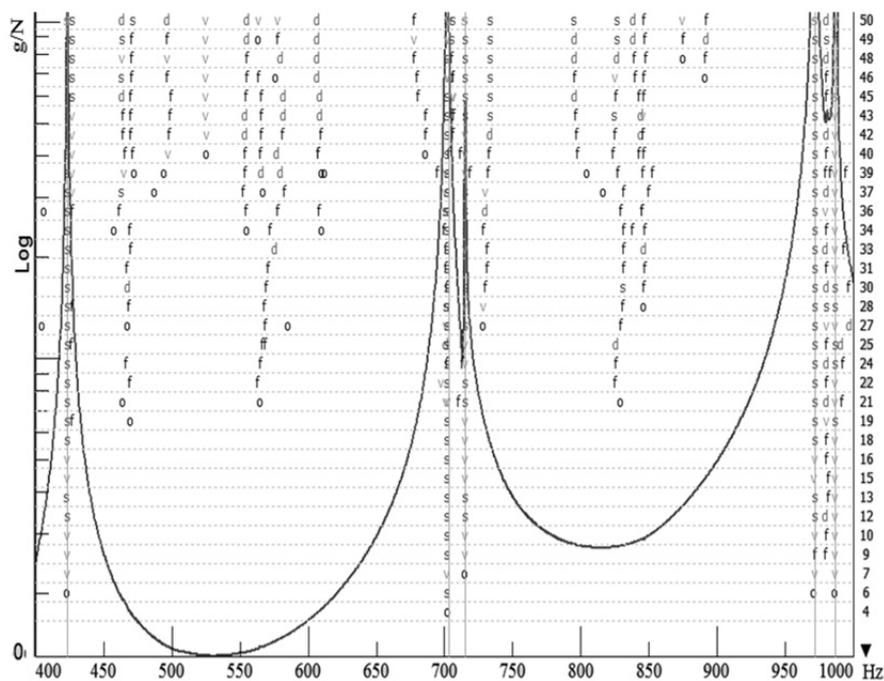


Рис. 3. Усредненная АЧХ и характеристики полюсов

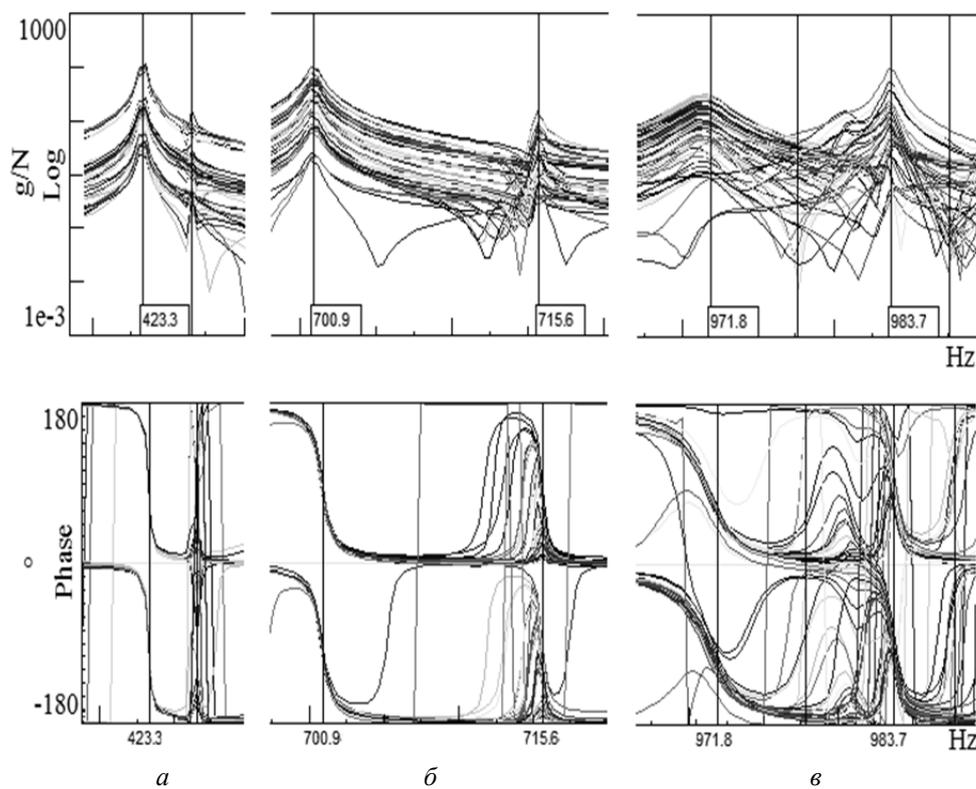


Рис. 4. АЧХ и ФЧХ для всех измерительных точек:

a – диапазон от 410 до 440 Гц; *б* – диапазон от 695 до 720 Гц; *в* – диапазон от 965 до 990 Гц

Дополнительная проверка нестрогих максимумов выполняется по функциям усредненных АЧХ и ФЧХ. На рис. 5, *a*, *б* и *в* показаны усредненные для всех измерительных точек функции АЧХ и ФЧХ. В диапазоне до 1000 Гц экстремумы обозначены цифрами (1–8) рядом с соответствующими значениями частот. Для идентификации частот собственных колебаний в качестве критерия принят максимум усредненной фазы при первой низшей резонансной частоте. С этим максимумом сравнивались все остальные максимумы ФЧХ. Максимумы функции ФЧХ, оказавшиеся ниже этого значения, следует отсеять – они не соответствуют собственным колебаниям оболочки. С учетом этого признака из восьми частот, соответствующих экстремумам функции ФЧХ и обозначенных на рис. 5, *a–в*, отсеяно три частоты 425,4 Гц (2), 977,5 Гц (6) и 985,4 Гц (8).

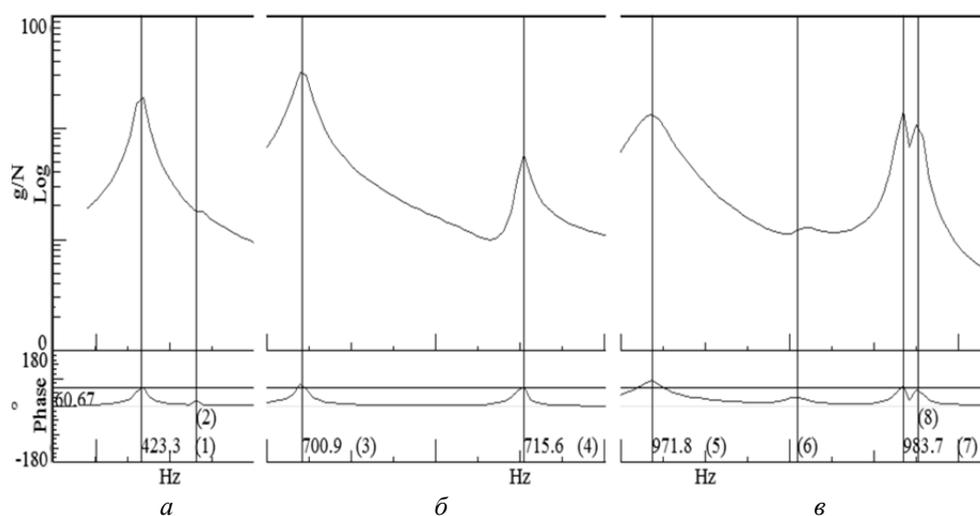


Рис. 5. Усредненные АЧХ и ФЧХ:

a – диапазон от 400 до 440 Гц; *б* – диапазон от 690 до 720 Гц; *в* – диапазон от 960 до 990 Гц

Такое предварительное отсеивание «подозрительных» максимумов АЧХ существенно облегчает дальнейшее уточнение частот и соответствующих им форм собственных колебаний.

Для оставшихся пяти максимумов АЧХ идентификация частот и форм собственных колебаний проводится с помощью утилиты PolyMAX программы LMS TEST Lab. Алгоритм PolyMAX основан на технологии оценки полюсов по методу наименьших квадратов в комплексной частотной области (LSCF – Least-Squares Complex Frequency-domain). Метод LSCF рассматривался в работах [10–12] для обнаружения «начальных» значений полюсов. Важное преимущество оценки полюсов по методу LSCF заключается в том, что этот метод обеспечивает получение наглядной стабилизационной диаграммы [13, 14]. Такая диаграмма, полученная по результатам испытаний оболочки, представлена на рис. 3. Здесь в рассматриваемом частотном диапазоне на графике АЧХ нанесены столбчатые диаграммы символьных обозначений качественной характеристики полюсов. Расшифровка этих символьных обозначений приведена в табл. 2. Для тех частот, которые были выбраны выше, для дальнейшего анализа выделяются «устойчивые» полюса (*s*).

Таблица 2

Качественные характеристики полюсов и их символическое обозначение

Символ	Качественные характеристика полюсов
θ	Неустойчивый полюс
f	Частота идентифицируется нестабильно
d	Форма идентифицируется надежно, частота и демпфирование – нет
ν	Частота и демпфирование идентифицируются надежно, форма – нет
s	Устойчивый полюс: частота, демпфирование и форма идентифицируются надежно

На основе выбранных устойчивых полюсов и определяются динамические характеристики оболочки, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Динамические характеристики оболочки

Динамическая характеристика оболочки	Эксп.	Номер частоты				
		1	2	3	4	5
Частота, Гц	1Э	423,3	702,1	715,1	971,9	986,9
	2Э	423,3	700,7	715,5	971,3	983,8
	3Э	423,5	700,7	715,4	970,6	986,9
	4Э	423,3	701,2	715,7	971,1	983,8
	5Э	423,9	699,8	714,8	971,4	987,9
Модальная жесткость, Вт/м	1Э	0,2	0,2	0,1	0,4	0,2
	2Э	0,3	0,3	0,02	0,4	0,2
	3Э	0,3	0,5	0,03	0,4	0,3
	4Э	0,2	0,3	0,02	0,4	0,2
	5Э	0,1	0,3	0,03	0,4	0,2
Модальная масса, кг · 10 ⁻⁹	1Э	3,65	0,98	0,75	0,11	0,64
	2Э	38,23	17,31	1,22	9,92	5,89
	3Э	38,41	28,00	1,42	11,03	7,38
	4Э	34,78	15,07	0,79	10,27	5,82
	5Э	19,33	15,76	1,57	9,73	4,34
Коэффициент затухания, %	1Э	0,07	0,06	0,04	0,17	0,03
	2Э	0,04	0,10	0,04	0,16	0,05
	3Э	0,10	0,29	0,07	0,15	0,04
	4Э	0,04	0,06	0,04	0,15	0,04
	5Э	0,09	0,06	0,09	0,14	0,04

В табл. 4 представлены статистические оценки этих динамических характеристик оболочки. Для каждой характеристики подсчитаны математическое ожидание, дисперсия и доверительный интервал.

Таблица 4

Результаты статистической оценки модальных параметров

Номер частоты	1	2	3	4	5
Частота, Гц					
Математическое ожидание a	423.45	700.92	715.31	971.28	985.85
Дисперсия D	0.06	0.55	0.09	0.20	2.97
Доверительный интервал	(423,1...423,7)	(700...701,8)	(715...715,7)	(970,7...971,8)	(984...988)
Модальная жесткость, Вт/м					
Математическое ожидание a	0,24	0,33	0,05	0,388	0,226
Дисперсия D	0,0024	0,0131	0,0025	0,0005	0,0012
Доверительный интервал	(0,2...0,3)	(0,2...0,5)	(0...0,1)	(0,4...0,4)	(0,2...0,3)
Модальная масса, кг · 10 ⁻⁹					
Математическое ожидание a	26,9	15,4	1,15	8,2	4,8
Дисперсия D	184,2	74,1	0,1	16,6	5,3
Доверительный интервал	(10,...43,7)	(4,7...26,1)	(0,7...1,6)	(3,1...13, 2)	(2...7,7)
Коэффициент затухания, %					
Математическое ожидание a	0,07	0,11	0,06	0,15	0,04
Дисперсия D	0,0006	0,008	0,0004	0,0001	0,00004
Доверительный интервал	(0...0,2)	(0...0,2)	(0,03...0,08)	(0,1...0,1)	(0,03...0,1)

Для сравнения форм собственных колебаний оболочки, измеренных в разных экспериментах (1Э–5Э), используется критерий модальной достоверности Modal Assurance Criterion (MAC) [15]. По этому критерию определяется соответствие между двумя векторами форм, полученных по измерениям виброперемещений в разных экспериментах $\{\psi\}_i^n$ и $\{\psi\}_i^{n+1}$:

$$MAC_{ij} = \frac{\left| \{\psi\}_i^{nT} \{\psi\}_j^{n+1} \right|^2}{\left(\{\psi\}_i^{nT} \{\psi\}_j^n \right) \left(\{\psi\}_i^{n+1T} \{\psi\}_j^{n+1} \right)} 100 \%,$$

где i, j – номер мод;

n – номер эксперимента.

Если векторы $\{\psi\}_i^n$ и $\{\psi\}_i^{n+1}$ являются оценками одной и той же формы колебаний в разных экспериментах, то критерий модальной достоверности

МАС стремится к 100 %, если же векторы являются оценками различных форм колебаний, то значение критерия стремится к нулю. На рис. 6 представлены диаграммы МАС при сравнении форм собственных колебаний, полученных в разных экспериментах и отобранных после анализа АЧХ и ФЧХ.

	423,3	700,7	715,5	971,3	983,8	423,5	700,7	715,4	970,6	986,9
423,3	99,4				1,0	99,5				
702,1		97,9	45,9				97,2	77,2		
715,1		64,3	73,4	1,8			49,3	51,4	9,7	1,9
971,9			8,8	98,2	2,1			6,2	96,3	11,5
986,9			2,1	11,4	12					44,5
1Э и 2Э					1Э и 3Э					

	423,3	701,2	715,7	971,1	983,8	423,9	699,9	714,8	971,4	987,9
423,3	99,5					99,2				1,1
702,1		97,3	47,6				96,9	49,6		
715,1		83,6	61,4				84,2	55,8		
971,9			10,2	96,5	3,1			10,1	98,1	1,9
986,9	1,1		2,6	19,3	18,5					56,6
1Э и 4Э					1Э и 5Э					

	423,5	700,7	715,4	971,6	986,9	423,3	701,2	715,7	971,1	983,8
423,3	99,5				1,0	99,4				
700,7		98,9	73,4				98,4	72,6		
715,5		79,8	69,9				87,1	70,8		
971,5			2,5	96,5	14,5			2,0	95,1	18,1
983,8	1,0		1,1	8,8	1,6	1,1		2,4	23,4	41,3
2Э и 3Э					2Э и 4Э					

Рис. 6. Значения МАС при сравнении форм колебаний, полученных в разных экспериментах

	423,9	699,8	714,8	971,4	987,9		423,9	699,8	714,8	971,4	987,9
423,3	99,3					423,3	99,2				1,5
700,7		98,6	73,3			701,2		98,9	89,8		
715,5		87,9	69,5			715,7		90,7	77,5		
971,3			2,4	97,3	12,7	971,1				96,8	19,3
983,8	1,2				14,2	983,8				1,8	9,1
	2Э и 5Э						4Э и 5Э				

	423,3	700,2	715,7	971,1	986,8	423,9	701,9	715,8	971,4	983,9	
423,5	99,3		1,0			99,7					
700,7		99,1	80,9				99,6	80,0			
715,4		88,9	71,4				87,7	75,2			
970,6			5,9	98,1	5,4			5,5	97,8	9,3	
986,8	1,4		2,1	17,1	9,7				2,8	81,4	
	3Э и 4Э						3Э и 5Э				

Рис. 6. Продолжение (см. также с. 53)

Например, на рис. 6 сравниваются формы колебаний, полученные в первом эксперименте (1Э), с формами, измеренными во втором (2Э) и третьем (3Э) экспериментах. По известным рекомендациям [12], признаком удовлетворительного совпадения измеренных форм колебаний являются значения МАС больше 75 %. В пустых ячейках значения МАС меньше 1 % и поэтому не указываются. На рис. 6 видно, что формы колебаний, соответствующие частотам 423,5 Гц, 700,9 Гц и 971,3 Гц, во всех экспериментах по этому критерию совпадают.

При сравнении форм колебаний при частотах 715,3 Гц и 985,8 Гц значение МАС изменяется в диапазоне (0,5...0,7). И это является поводом для дополнительной проверки этих частот, например, в испытаниях при гармоническом воздействии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлен экспериментальный анализ собственных форм и частот колебаний цилиндрического отсека при ударном возбуждении с использованием взаимного спектрального анализа переходных процессов сигнала возбуждения и выходного сигнала с пьезоакселерометров. Входной сигнал регистрировался пьезоакселерометром модального молотка. Выходной сигнал (сигнал откликов) определялся по показаниям вибродатчиков, закрепленных на стенке оболочки. Регистрация и обработка сигналов выполнялась с помощью программно-аппаратного комплекса LMS Scadas и LMS Test Lab.

Программные средства контроля функции когерентности при всех измерениях позволяют непосредственно при проверке испытаний оперативно отсеять неудовлетворительные эксперименты, содержащие некогерентные шумы.

По полученным функциям частотной характеристики (АЧХ и ФЧХ) выделяются экстремумы, связанные с резонансными или с тональными сигналами, наведенными на измерительный тракт. Дополнительную проверку нестрогих экстремумов в исследуемом диапазоне частот удобно провести по функциям усредненных АЧХ и ФЧХ, а также по функции модуля взаимного спектра процессов ударного воздействия и измерений виброускорений. При этом из восьми частот, соответствующих максимумам АЧХ, отсеяно три частоты. Для дальнейшей оценки остальных пяти частот с помощью алгоритма PolyMAX выбраны «устойчивые» полюса и определены модальные параметры оболочки: частота, модальная жесткость, модальная масса, коэффициент затухания. Идентификация форм собственных колебаний выполнена на основе критерия модальной достоверности MAC.

Выполненный экспериментальный модальный анализ показал, что предложенная последовательность процедур обработки результатов виброиспытаний является вполне удовлетворительной при идентификации частот и форм собственных колебаний конструкций отсеков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Межин В.С., Обухов В.В.* Практика применения модальных испытаний для целей верификации конечно-элементных моделей конструкции изделий ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 1 (4). – С. 86–91.
2. *Ткач В.В.* Применение модального анализа в междисциплинарном исследовании ЖРД // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2010. – № 38. – С. 1–10.
3. *Бутяга С.* Гибридное моделирование и виброанализ в компании Airbus // ANSYS Solutions. Русская редакция. – 2005. – № 1. – С. 18–23.
4. *Безмозгий И.М., Софинский А.Н., Чернягин А.Г.* Моделирование в задачах вибропрочности конструкций ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 3 (6). – С. 71–80.
5. ГОСТ 30630.1.1–99. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Определение динамических характеристик конструкции. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2001. – 25 с.
6. Model 086C02 ICP Impact Hammer. Installation and operating manual: VIB086: manual numbers 19198. – Depew, NY: PCB Piezotronics, 2007. – 13 p.

7. Хайретдинов В.У., Саратов А.Ю. Вибродинамические испытания привода СУЗ с ДППШ в натурных и стендовых условиях // Материалы 16-й научно-технической конференции молодых специалистов ОКБ «Гидропресс» по ядерным энергетическим установкам. – Подольск, 2014. – С. 138–152.
8. Добрынин С.А., Фельдман М.С., Фирсов Г.И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин: справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
9. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа: пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
10. Application of a fast-stabilizing frequency domain parameter estimation method / H. Auweraer van der, P. Guillaume, P. Verboven, S. Vanlandui // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 2001. – Vol. 123, N 4. – P. 651–658.
11. Parameter estimation techniques for modal analysis / D. Brown, R. Allemang, R. Zimmerman, M. Mergeay. – Warrendale, PA: SAE International, 1979. – 19 p. – (SAE technical papers; N 790221).
12. Randall R.B. Frequency analysis. – Naerum: Brüel & Kjaer, 1987. – 344 p.
13. Hautsch N., Okhrin O., Ristig A. Efficient iterative maximum likelihood estimation of high-parameterized time series models. – Berlin: Humboldt University, 2014. – 34 p. – (SFB 649 Discussion Paper; 2014-010).
14. A poly-reference implementation of the least-squares complex frequency-domain estimator / P. Guillaume, P. Verboven, S. Vanlanduit, H. Van der Auweraer, B. Peeters // Proceedings of IMAC 21, the International Modal Analysis Conference, Kissimmee (FL), USA, February 2003. – Kissimmee, FL, 2003. – P. 9.
15. Хейлен В., Ламменс С., Сас П. Модальный анализ: теория и испытания. – М.: Новатекст, 2010. – 319 с.

Пономарёв Игорь Сергеевич, аспирант кафедры летательных аппаратов и автоматических установок Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета). Основные направления научных исследований: экспериментальные исследования, определения динамических характеристик конструкций, динамика деформирования и разрушения. Имеет 2 публикации. E-mail: ponomarevis.91@mail.ru

Пантилеев Андрей Сергеевич, преподаватель кафедры летательных аппаратов и автоматических установок Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета). Основные направления научных исследований: математическое моделирование, динамика систем твердых тел, методики проектирования, конструирования и испытания узлов беспилотных летательных аппаратов, экспериментальное и расчетное определение динамических характеристик конструкций. Всего опубликовано 17 научных работ, в том числе 2 патента на изобретение. E-mail: andyfly@mail.ru

Махнович Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедры летательных аппаратов и автоматических установок Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета). Основные направления научных исследований: динамика и прочность конструкции, нелинейное деформирование тонкостенных конструкций. Имеет более 50 публикаций, в том числе 4 учебных пособия. E-mail: mahnovichsv@mail.ru

Features of experimental determination of eigenfrequencies and modes of cylindrical shell oscillations*

I.S. PONOMAREV¹, S.V. MAKHNOVICH², A.S. PANTILEEV³

¹ South Ural State University, 76, Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation, Postgraduate student. E-mail: ponomarevis.91@mail.ru

² South Ural State University, 76, Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation, Ph.D. associate professor. E-mail: mahnovichsv@mail.ru

³ South Ural State University, 76, Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation, senior lecturer. E-mail: andyfly@mail.ru

The results of the experimental determination of eigenfrequencies and modes of cylindrical shell oscillations by the impact method are given. The shell was hung on elastic suspensions. Vibration accelerations of the shell were measured by single-component accelerometers. A series of experiments with different settings of sensors on the generatrix of the shell was carried out. Accelerometer signals were detected by the LMS Scadas data collection system. Eigenfrequencies and modes of oscillation of the shell were determined on the basis of mutual spectral analysis of transient input drive signals and output signals by using the LMS Test Lab software. Eigenfrequencies of the shell were visually determined by the maximum of frequency response and phase change points at 90° PFC. The subsequent elaboration of these frequencies was carried out by average frequencies and phase responses. The estimation of oscillations modes by the modal assurance criterion was made for selected frequencies. Probabilistic estimation of the values of eigenfrequencies, modal mass and stiffness, damping coefficient of the cylindrical shell was made. In the investigated range among the eight registered maximums there were three eigenfrequencies and modes of shell oscillations were identified. Thus, the frequency maximums are 423.3 Hz; 425.4 Hz; 700.9 Hz; 715.6 Hz; 971.8 Hz; 977.5 Hz; 983.7 Hz; 985.4 Hz, of which 425.4 Hz, 977.5 Hz and 985.4 Hz were identified as eigenfrequencies. The experimental modal analysis showed that the proposed sequence of procedures of processing the vibration testing results was entirely satisfactory in the identification of frequencies and modes of structural section vibrations.

Keywords: Impact method, eigenfrequencies of oscillation, mode of oscillation, experimental investigation, LMS Test Lab, cylindrical shell, mutual spectral analysis, least square method

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-44-58

REFERENCES

1. Mezhin V.S., Obukhov V.V. Praktika primeneniya modal'nykh ispytaniy dlya tselei verifikatsii konechno-elementnykh modelei konstruksii izdelii raketno-kosmicheskoi tekhniki [The practice of modal testing for the purposes of verification of finite element structural model rocket and space technology]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii – Space Engineering and Technology*, 2014, no. 1 (4), pp. 86–91.
2. Tkach V.V. Primenenie modal'nogo analiza v mnogodistsiplinarnom issledovanii ZhRD [Using modal analysis in multidisciplinary investigation of Liquid Propellant Rocket Engines]. *Elektronnyi zhurnal "Trudy MAI" – Electronic journal "Trudy MAI"*, 2010, no. 38, pp. 1–10.
3. Butyaga S. Gibrinnoe modelirovanie i vibroanaliz v kompanii Airbus [Hybrid modeling and vibroanaliz company]. *ANSYS Solutions. Russkaya redaktsiya – ANSYS Solutions*, 2005, no. 1, pp. 18–23. (In Russian)
4. Bezmozgii I.M., Sofinskii A.N., Chernyagin A.G. Modelirovanie v zadachakh vibroprochnosti konstruksii raketno-kosmicheskoi tekhniki [Modeling problems in vibration strength de-

* Received 08 June 2016.

signs of rocket and space technology]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii – Space Engineering and Technology*, 2014, no. 3 (6), pp. 71–80.

5. GOST 30630.1.1–99. *Metody ispytaniy na stoikost' k mekhanicheskim vneshnim vozdeistviyushchim faktoram mashin, priborov i drugikh tekhnicheskikh izdelii. Opredelenie dinamicheskikh kharakteristik konstruksii* [State Standard 30630.1.1–99. Mechanical environment stability test methods for machines, instruments and other industrial products. Determination of dynamic characteristics of structure]. Moscow, Gosstandart Russia Publ., Izdatel'stvo standartov Publ., 2001. 25 p.

6. *Model 086C02 ICP Impact Hammer. Installation and Operating Manual: VIB086*. Manual numbers 19198. Depew, NY, PCB Piezotronics, 2007. 13 p.

7. Khayretdinov V.U., Saratov A.Yu. [Vibrodynamic test drive with CPS dpkv natural and stand conditions]. *Materialy 16-i nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh spetsialistov OKB "Gidropress" po yadernym energeticheskim ustanovkam* [Materials of the 16th scientific and technical conference of young specialists EDO "Gidropress" in nuclear power plants]. Podol'sk, 2014, pp. 138–152.

8. Dobrynin S.A., Fel'dman M.S., Firsov G.I. *Metody avtomatizirovannogo issledovaniya vibratsii mashin* [Automated methods of study of machine vibration]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 224 p.

9. Bendat J.S., Piersol A.G. *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. New York, Wiley, 1980. 302 p. (Russ. ed.: Bendat Dzh., Pirsol A. *Primeneniya korrelyatsionnogo i spektral'nogo analiza*. Translation from English. Moscow, Mir Publ., 1983. 312 p.)

10. Auweraer H. van der, Guillaume P., Verboven P., Vanlanduit S. Application of a fast-stabilizing frequency domain parameter estimation method. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2001, vol. 123, no. 4, pp. 651–658.

11. Brown D., Allemang R., Zimmerman R., Mergeay M. *Parameter estimation techniques for modal analysis*. SAE technical papers, no. 790221. Warrendale, PA, SAE International, 1979. 19 p.

12. Randall R.B. *Frequency analysis*. Naerum, Brüel & Kjaer, 1987. 344 p.

13. Hautsch N., Okhrin O., Ristig A. *Efficient iterative maximum likelihood estimation of high-parameterized time series models*. SFB 649 Discussion Paper. 2014-010. Berlin, Humboldt University, 2014. 34 p.

14. Guillaume P., Verboven P., Vanlanduit S., Auweraer H. van der, Peeters B. A poly-reference implementation of the least-squares complex frequency-domain estimator. *Proceedings of IMAC 21, the International Modal Analysis Conference*, Kissimmee (FL), USA, February 2003, p. 9.

15. Heylen W., Lammens S., Sas P. *Modal analysis: theory and testing*. Leuven, Belgium, KUL Press, 1997 (Russ. ed.: Kheilen V., Lammens S., Sas P. *Modal'nyi analiz: teoriya i ispytaniya*. Moscow, Novatest Publ., 2010. 319 p.)