

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА И МЕТОДА СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ

Осипов М.Н.,
Сергеев Р.Н.,
Лимов М.Д.

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва
(Самарский университет)

Московское шоссе, д. 34, г. Самара,
443086, Российская Федерация

osipov7@yandex.ru,
romansr@yandex.ru

Экспериментальная отработка ракетно-космической техники является одним из самых сложных, трудоёмких и дорогостоящих этапов разработки и создания этих изделий. Современные методы разработки имеют тенденцию к снижению доли экспериментальных исследований и заменой их численным моделированием. Однако соответствие численной модели реальному объекту определяется исходными данными, поэтому полностью отказаться от проведения натурных испытаний изделий невозможно. Особое внимание при разработке и создании ракетно-космической техники уделяют вибрационному воздействию. Получение достоверных основных динамических характеристик изделия при вибрационных испытаниях чисто теоретическим путём практически невозможно. Так, коэффициенты демпфирования могут быть определены только экспериментально. В работе проведён анализ основных методов определения динамических характеристик и сделан выбор в пользу резонансного метода. Точность определения динамических характеристик резонансным методом зависит от точности построения резонансной кривой. В работе для построения резонансной кривой предлагается применить спекл-интерферометр, позволяющий одновременно фиксировать форму собственных колебаний и амплитуду, используя методы усреднения во времени и спекл-интерферометрию на одиночном спекле. Показано, что спекл-интерферометрия на одиночном спекле позволяет измерять амплитуды собственных колебаний в реальном времени и с высокой точностью - менее чем одна восьмая длины волны используемого лазерного излучения в спекл-интерферометре.

Данные обстоятельства особенно важны при разработке и создании космических аппаратов имеющих прецизионную аппаратуру.

Ключевые слова: экспериментальные методы механики; прецизионные измерения; динамическое поведение конструкции; резонансный метод; метод спекл-интерферометрии; логарифмический декремент колебаний; коэффициент затухания; добротность колебательной системы

1 Введение

При разработке и создании современных аэрокосмических аппаратов всё более важной и сложной становится проблема исследования динамического поведения этих конструкций при различных силовых воздействиях на них. Одной из проблем является выявление и предотвращение различного рода взаимодействий между корпусом, служебными системами и прецизионной аппаратурой, в результате

которых в полёте могут возникать очень опасные виды динамической неустойчивости и автоколебаний, приводящие к ухудшению их работоспособности [1-3].

С другой стороны, отработка прочности в ракетно-космической технике доходит до 40-60% от общей стоимости всех испытаний [4, 5]. Современная же тенденция состоит в сокращении экспериментальной отработки и заменой её численным моделированием, в частности, методом конечных элементов [6,

7]. Данная ситуация характерна и для других областей машиностроения.

Особое место в ракетно-космической технике уделяется созданию динамических моделей как для определения уровней нагружения, так и для моделирования процессов происходящих с конструкцией во время её штатной эксплуатации [2, 6, 7]. Так, например, вибрационные воздействия, исходящие от источников, проходят по корпусу космического аппарата, имеющему свои собственные динамические характеристики, и только после этого попадают в некотором изменённом виде на прецизионную аппаратуру, что может привести к её ненадлежащей работе. Требования стабильности, которые предъявляются к прецизионной аппаратуре, соответствуют значениям сотых долей угловых секунд и/или единицам микрон [2, 3, 9].

Адекватность разрабатываемой численной модели определяется исходными данными, поэтому полностью отказаться от проведения натурных испытаний изделий невозможно [1, 3-7]. Каждая численная модель должна быть верифицирована [6, 7]. Более того, получение достоверных основных динамических характеристик изделия чисто теоретическим путём практически невозможно. Так, коэффициенты демпфирования могут быть определены только экспериментально [1, 3].

При проведении натурных испытаний изделий экспериментальные методы должны обладать высокими метрологическими характеристиками, обеспечивать возможность измерений деформированного состояния по всей поверхности объекта исследования, иметь высокий уровень автоматизации и информационной ёмкости.

Перечисленным требованиям наиболее полно соответствуют оптические методы исследования, в частности, методы цифровой спекл-интерферометрии [10, 11]. Экспериментальная информация данных методов представляет цифровое изображение с картиной интерференционных или дифракционных

полос, которые связаны с величинами деформационных перемещений объекта, пропорциональных $\lambda/2$, где λ – длина волны излучения лазера (например, для зелёного спектра $\lambda = 532$ нм.).

Голографическая или спекл-интерферометрия позволяют определить как формы колебаний, так и величины перемещений элементов конструкций различными методами: усреднение во времени, метод двух/многих экспозиций или импульсный стробоскопический метод. Однако, наличие собственного шума при использовании когерентного света (зернистость интерференционных картин – спекл-картина) приводит к ограничениям на измеряемый диапазон перемещений, а также к снижению точности и чувствительности измерений. Наличие собственного шума затрудняет или делает невозможным исследование высокочастотных колебаний и колебаний с большими амплитудами, так как при этих условиях видимость интерференционных полос уменьшается, а период интерференционных полос становится соизмерим с размерами спеклов [12, 13].

Применение спекл-интерферометрии при регистрации динамических смещений исследуемых элементов конструкций в промышленных условиях затруднено из-за наличия внешних источников колебаний. Эти шумы искажают результаты измерений, при этом существуют методы снижения чувствительности к ним.

Теоретические и экспериментальные исследования в работе авторов [13] показали, что применение спекл-интерферометрии на одиночном спекле позволяет решить указанные проблемы, связанные с собственными и промышленными шумами.

2 Методы измерения динамических характеристик конструкций

К основным методам определения динамических характеристик можно отнести следующие [1, 3, 4]:

- метод свободных колебаний;
- метод многоточечного возбуждения собственных форм колебаний;
- метод, основанный на измерении амплитудно-фазовых частотных характеристик;
- резонансный метод.

Метод свободных колебаний линейной системы с конечным числом степеней свободы описывается матричным уравнением:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = 0, \quad (1)$$

где A , B , C – матрицы инерции, демпфирования и жёсткости; q – матрица-столбец обобщённых координат; 0 – нулевая матрица столбец.

Собственные частоты в данном методе обычно определяются по осциллограмме процесса затухания свободных колебаний. Если удалось возбудить резонансную частоту колебаний, то искомые динамические характеристики определяются как для системы с одной степенью свободы. На практике возбудить «чистый» тон колебаний во многих случаях невозможно [3].

Методы многоточечного возбуждения позволяют путём специального подбора возбуждающих сил выделить поочерёдно «чистые» собственные формы колебаний и определить соответствующие этим формам динамические характеристики конструкции как для системы с одной степенью свободы. Принципиальная возможность возбуждения «чистых» собственных форм колебаний конструкции с помощью многоточечного возбуждения вытекает из общей теории вынужденных колебаний линейных систем. Задача состоит в том, чтобы найти такое силовое распределение Q , при котором возбуждается «чистая» собственная форма колебаний.

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = Q. \quad (2)$$

Из (2) следует, что для определённой собственной формы в общем случае силы, которые прикладываются в различных точках конструкции, будут иметь различные фазовые сдвиги. Практическое

осуществление таких силовых распределений затруднительно, так как требуется подбирать амплитуды сил и их фазы.

Методы многоточечного возбуждения позволяют определять динамические характеристики с высокой степенью точности для самых сложных конструкций, но при этом данные методы требуют сложных и дорогостоящих вибрационных установок.

Метод, основанный на измерении амплитудно-фазовых, частотных характеристик (метод Кеннеди-Пэнку [1]) позволяет определить собственные частоты и формы колебаний на основании анализа амплитудно-фазовых, частотных характеристик, полученных для различных точек испытываемого объекта. При этом амплитудно-фазовые характеристики строятся на комплексной плоскости.

Математическая модель для данного метода принимается следующей:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = F \cos(\omega t), \quad (3)$$

где F – матрица-столбец амплитуд внешних сил F_1, F_2, \dots, F_n .

В данном методе выделяют резонансные тона колебаний путём построения по резонансным ветвям амплитудно-фазовых характеристик аппроксимирующих окружностей. Данный метод совершеннее резонансного метода, его применение резко снижает возможность пропуска тона колебаний. Однако метод Кеннеди-Пэнку является весьма трудоёмким и требует более сложной аппаратуры.

Наиболее известным и часто применяемым на практике методом измерения динамических характеристик элементов конструкций является **резонансный метод** [1, 4]. В данном методе элементы конструкции возбуждаются гармонической силой, измеряется амплитуда колебаний для конкретной формы колебаний в зависимости от частоты. По полученным данным строятся резонансные кривые (рисунок 1).

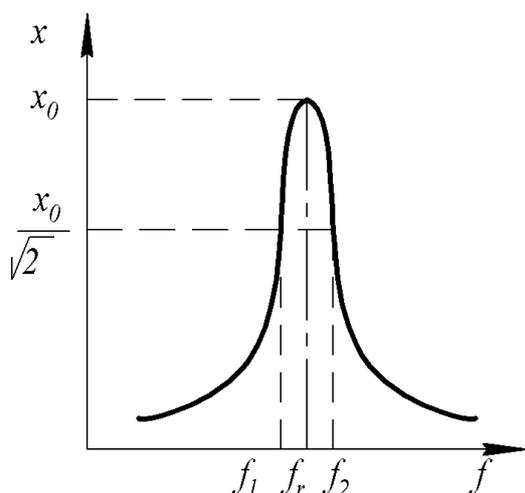


Рисунок 1. Амплитудно-частотная характеристика для определения коэффициентов демпфирования

По резонансной кривой определяют логарифмический декремент колебаний g испытываемой конструкции согласно формуле:

$$g = \frac{\pi(f_2 - f_1)}{f_r}, \quad (4)$$

где f_r – резонансная частота; f_1, f_2 – частоты соответственно на левой и правой «ветвях» резонансной кривой на уровне $x_i^\circ = x_0^\circ / \sqrt{2}$, где x_0° – амплитуда колебаний конструкции на резонансной частоте f_r .

По логарифмическому декременту колебаний определяют другие параметры затухания колебаний конструкции. Коэффициент затухания колебаний конструкции определяется согласно формуле:

$$\delta = g f_r, \quad (5)$$

а добротность колебательной системы в соответствии с формулой:

$$Q = \sqrt{\frac{\pi^2}{g^2} + \frac{1}{4}}, \quad (6)$$

При построении резонансной кривой особое внимание необходимо уделять экспериментальным методам. Так, при применении контактных методов необходимо учитывать влияние измерительной аппаратуры на измеряемые динамические характеристики изделия, особенно малогабаритные. В силу этого

одним из перспективных бесконтактных оптических методов является метод спекл-интерферометрии.

Рассмотрим построение резонансной кривой с использованием спекл-интерферометрии на одиночном спекле.

3 Принцип работы спекл-интерферометра на одиночном спекле

В работе [13] предложен способ исследования виброакустических сигналов на основе спекл-интерферометрии на одиночном спекле, образованной за счёт рассеянного лазерного излучения от исследуемой диффузно отражающей поверхности конструкции. Его преимущество перед существующими методами спекл-интерферометрии заключается в высокой интерферометрической чувствительности и возможности одновременно регистрировать формы колебаний и проводить измерения амплитуд колебаний в реальном времени.

Для выполнения этих функций в оптическую схему стандартного спекл-интерферометра встраивается точечный быстродействующий фотодетектор. В такой оптической схеме спекл-интерферометра сфокусированное изображение поверхности исследуемого элемента конструкции формируется одновременно в плоскости ПЗС-матрицы цифровой видеокамеры спекл-интерферометра и в плоскости точечного быстродействующего фотодетектора. С помощью генератора гармонических сигналов, подключенного к возбудителю колебаний, проходят исследуемый диапазон частот, на которых возникают резонансные колебания исследуемой конструкции. Информация, формируемая ПЗС-матрицей видеокамеры, позволяет фиксировать форму колебаний, а точечный быстродействующий фотодетектор позволяет измерять амплитуду и частоту колебаний исследуемой точки поверхности, в изображении которой располагается фотодетектор. Сканируя быстродействующим точечным фотодетектором по изображению

поверхности исследуемой конструкции можно измерять амплитуду колебаний в любой его точке в реальном времени.

В работе показано, что на резонансных частотах на выходе с быстродействующего точечного фотодетектора, в зависимости от величины амплитуды колебаний исследуемой точки диффузной поверхности, образуются два вида колебаний выходного напряжения. При амплитуде колебаний исследуемой точки диффузной поверхности меньше или равной $\lambda/8$ (λ – длина волны излучения лазера спекл-интерферометра) выходное напряжение полностью соответствует по виду колебаниям исследуемой точки поверхности. При этом амплитуда колебаний выходного напряжения пропорциональна амплитуде колебаний исследуемой точки диффузной поверхности, а максимальное значение выходного напряжения соответствует величине $\lambda/8$. При амплитуде колебаний исследуемой точки диффузной поверхности больше $\lambda/8$ образуются осциллирующие периодические пакеты. Частота следования пакетов равна удвоенной частоте колебаний исследуемой точки диффузно отражающей поверхности, а амплитуда колебаний внутри осциллирующего пакета также соответствует смещению исследуемой точки поверхности на величину, равную $\lambda/8$. В работе также показано, что осциллирующий пакет соответствует полной амплитуде колебаний в исследуемой точке поверхности, в которой расположен точечный фотодетектор. Таким образом, измеряя полную величину отклонений от положения равновесия в осциллирующем пакете, можно определить полную амплитуду колебаний x в исследуемой точке поверхности согласно выражению:

$$x = N \frac{\lambda}{8}, \quad (7)$$

где x – значение полной амплитуды колебаний исследуемой поверхности; N – полное число отклонений от положения равновесия в осциллирующем пакете (не обязательно целое число).

Следовательно, амплитуда колебаний исследуемой поверхности x_0 в данной точке будет равна половине полной амплитуды:

$$x_0 = N \frac{\lambda}{16}, \quad (8)$$

Дробная часть N , то есть минимально измеряемая величина колебаний выходного напряжения фотодетектора, зависит от порога чувствительности спекл-интерферометра – от его регистрирующей оптоэлектронной схемы. В экспериментальных исследованиях эта величина составляла порядка половины максимального значения амплитуды колебаний выходного напряжения фотодетектора, то есть, исходя из сказанного выше, порог чувствительности в этом эксперименте составлял порядка $\lambda/16$.

4 Построение резонансной кривой

Построение резонансной кривой с использованием спекл-интерферометра на одиночном спекле осуществляется в следующей последовательности. На первом этапе производится поиск и регистрация форм и частот резонансных колебаний исследуемой конструкции. Для этого на экране монитора компьютера наблюдают за поведением периодических осциллирующих пакетов выходного напряжения быстродействующего точечного фотодетектора (рисунок 2).

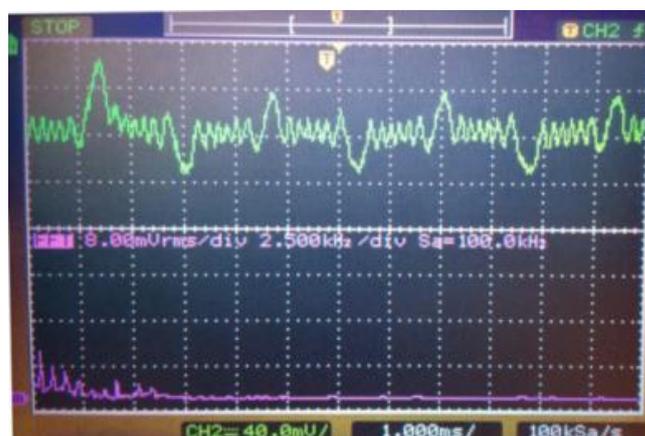


Рисунок 2. Осциллограмма выходного сигнала с фотодетектора

На каждой резонансной частоте добиваются появления установившихся периодических осциллирующих пакетов выходного напряжения точечного фотодетектора с максимальным количеством осцилляций в пакете. По количеству осцилляций в пакете определяют амплитуду колебаний конструкции x_0 на резонансной частоте в исследуемой точке – уравнение (8). При достижении данных условий на экране монитора будет также наблюдаться соответствующая форма колебаний для данной резонансной частоты. Соответствующая форма колебаний фиксируется ПЗС-матрицей цифровой видеокамеры методом спекл-интерферометрии с усреднением во времени. Характерный вид спекл-интерферограммы для одной из форм колебаний вибрирующей металлической мембраны приведён на рисунке 3.

Наличие цифровых спекл-интерферограмм, визуализирующих формы колебаний исследуемой конструкции, позволяет располагать быстродействующий точечный фотодетектор в необходимой точке на изображении конструкции и, следовательно, определять амплитуду колебаний в соответствующей точке конструкции.

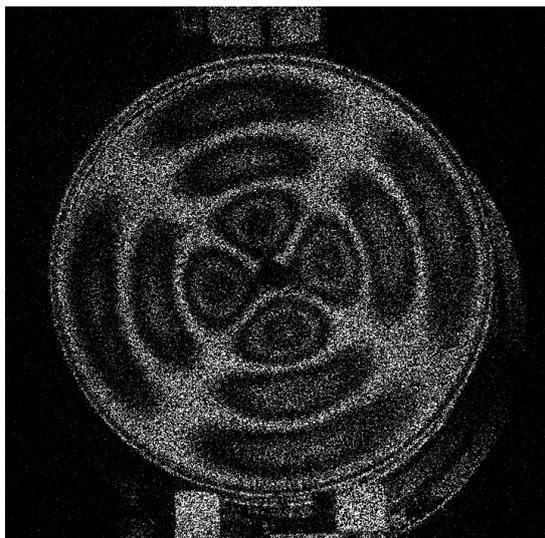


Рисунок 3. Спекл-интерферограмма одной из форм резонансного колебания металлической мембраны, полученная методом усреднения во времени

Сканируя изображение исследуемой поверхности точечным фотодетектором можно определить величины амплитуд колебаний по всей конструкции.

Определив амплитуду колебаний на резонансной частоте, изменяя частоту возбуждающего сигнала, аналогично определяют амплитуды колебаний на околорезонансных частотах согласно методике представленной в предыдущем разделе. По полученным данным строят график зависимости амплитуды x от частоты f для конкретной формы колебаний испытываемой конструкции (рисунок 1).

Следует отметить, что дискретность выбора околорезонансных частот зависит только от системы возбуждения колебаний в исследуемой конструкции. Разрешение метода для определения величины амплитуды, как сказано выше, составляет $\lambda/16$, то есть с интерферометрической точностью. Отметим, что измерение амплитуды происходит в реальном времени.

По построенному с высокой точностью графику зависимости амплитуды x от частоты f определяют логарифмический декремент колебаний исследуемой конструкции по формуле (4). По логарифмическому декременту колебаний определяют другие параметры затухания колебаний конструкции – коэффициент затухания колебаний по формуле (5) и добротность колебательной системы по формуле (6).

Таким образом, предлагаемый метод спекл-интерферометрии на одиночном спекле позволяет построить резонансную кривую с высокой точностью и в реальном времени, что позволяет определить с высокой точностью и динамические характеристики исследуемых конструкций.

5 Заключение

Теоретические и экспериментальные исследования предложенного метода регистрации вибраций на основе спекл-интерферометрии на одиночном спекле подтвердили возможность его практической

реализации и возможность проводить измерения в реальном времени и с высокой точностью при определении динамических характеристик исследуемых конструкций. Так как с помощью спекл-интерферометрии можно регистрировать изменения поверхностей различного характера шероховатости при воздействии внешних сил, то данный метод может быть применён к различным конструкциям.

Бесконтактность и высокая чувствительность методов спекл-интерферометрии позволяет обойтись без энергозатратных вибростендов для получения динамических характеристик конструкций, особенно малогабаритных.

Кроме того, высокая точность предлагаемого метода определения динамических характеристик является основой для верификации динамических численных моделей прецизионных конструкций, в особенности космических аппаратов.

Список использованных источников

[1] Микишев Г. Н. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1978. 248 с.

[2] Бабаев А. А. Амортизация, демпфирование и стабилизация бортовых оптических приборов. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1984. 232 с.

[3] Телепнев П. П., Кузнецов Д. А. Методы виброзащиты прецизионных космических аппаратов. Химки: Издатель АО «НПО Лавочкина», 2019. 263 с.

[4] Белоусов А. И., Ткаченко С. И., Самсонов В. Н., Ткаченко О. А.. Прочностная и вибрационная обработка космических аппаратов. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2002. 502 с.

[5] Кармишин А. В., Лиходед А. И., Паничкин Н. Г., Сухинин С. Н. Основы обработки

прочности ракетно-космических конструкций М.: Машиностроение, 2007. 480 с.

[6] Введенский Н. Ю., Пустобаев М. В. Анализ отработки космической техники на механические воздействия в США, ЕС и РФ // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. Т.130. С. 19-26.

[7] Безмозгий И. М., Иванов С. В. Методика автоматизированной верификации конечноэлементных моделей крупногабаритных космических модулей // Космическая техника и технологии. 2022. №3(38). С. 100-112.

[8] Безмозгий И. М., Казакова О. И., Софинский А. Н., Чернягин А. Г. Обработка вибропрочности автоматического космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Космическая техника и технологии. 2014. №4(7). С. 31-41.

[9] Макриденко Л. А., Волков С. Н., Геча В. Я., Жилёнов М. Ю., Казанцев С. Г. Основные источники снижения качества изображений Земли, получаемых при орбитальной оптической съёмке с борта МКА // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2017. Т. 160. С. 3-19.

[10] Сергеев Р. Н., Осипов М. Н. Прецизионная контрольно-измерительная система на основе цифровой спекл-интерферометрии // "Орбита молодёжи" и перспективы развития российской космонавтики: сборник докладов Всеросс. молод. научно-практ. конференции. Томск: Изд-во ТПУ. 2017. С. 163-164.

[11] Shakhmatov E. V., Zhuravlev O. A., Sergeev R. N., Safin A. I. Development and application of mobile digital speckle interferometer for vibrometer model sample honeycomb // Procedia Engineering. 2015. №106. P. 247-252.

[12] M. N. Osipov, R. N. Sergeev. The influence of the aperture diaphragm on the size of the subjective speckles and the application of this in speckle photography // J. Phys.: Conf. Ser. 1368, 022068. 2019.

[13] Осипов М. Н., Хохлов В. А., Чекменев А. Н. Развитие цифровой спекл-интерферометрии для исследования динамических процессов в реальном времени // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2013. №9/2(110). С. 109-117.

APPLICATION OF THE RESONANCE METHOD AND THE SPECKLE INTERFEROMETRY METHOD FOR MEASURING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CONSTRUCTIONS

**M.N. Osipov,
R.N. Sergeev,
M.D. Limov**

Samara National Research University
(Samara University)

34, Moskovskoye shosse, Samara,
443086, Russian Federation

osipov7@yandex.ru,
romansr@yandex.ru

Experimental testing of rocket and space techniques is one of the most difficult, time-consuming and expensive stages of the development and creation of these products. Modern development methods tend to reduce the proportion of experimental studies and replace them with numerical modeling. However, the correspondence of the numerical model to the real object is determined by the initial data, so it is not possible to completely abandon the full-scale testing of products. Particular attention in the development and creation of rocket and space techniques is paid to vibration effects. Obtaining reliable basic dynamic characteristics of the product during vibration tests in a purely theoretical way is practically impossible. So the damping coefficients can only be determined experimentally. The paper analyzes the main methods for determining dynamic characteristics, and a choice is made in favor of the resonance method. The accuracy of determining the dynamic characteristics by the resonance method depends on the accuracy of the construction of the resonance curve. In this paper, to construct a resonance curve, it is proposed to use a speckle interferometer, which allows simultaneously recording the shape of natural vibrations and amplitude, using time averaging methods and speckle interferometry on a single speckle. It is shown that speckle interferometry on a single speckle makes it possible to measure the amplitudes of natural vibrations in real time and with high accuracy - less than one-eighth of the wavelength of the laser radiation used in the speckle interferometer. These circumstances are especially important in the development and creation of spacecraft with precision equipment.

Keywords: *experimental methods of mechanics; precision measurements; dynamic behavior of the structure; resonance method; speckle interferometry method; logarithmic decrement of vibrations; attenuation coefficient; Q-factor of the vibration system*

References

- [1] Mikishev G. N. Eksperimental'nyye metody v dinamike kosmicheskikh apparatov. M.: Mashinostroyeniye, 1978. 248 s.
- [2] Babayev A. A. Amortizatsiya, dempfirovaniye i stabilizatsiya bortovykh opticheskikh priborov. L.: Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye, 1984. 232 s.
- [3] Telepnev P. P., Kuznetsov D. A. Metody vibrozashchity pretsizionnykh kosmicheskikh apparatov. Khimki: Izdatel' AO «NPO Lavochkina», 2019. 263 s.
- [4] Belousov A. I., Tkachenko S. I., Samsonov V. N., Tkachenko O. A.. Prochnostnaya i vibratsionnaya otrabotka kosmicheskikh apparatov. Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2002. 502 s.
- [5] Karmishin A. V., Likhoded A. I., Panichkin N. G., Sukhinin S. N. Osnovy otrabotki prochnosti raketnokosmicheskikh konstruktsiy M.: Mashinostroyeniye, 2007. 480 c.
- [6] Vvedenskiy N. YU., Pustobayev M. V. Analiz otrabotki kosmicheskoy tekhniki na mekhanicheskoye vozdeystviye v SSHA, YES i RF // Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEМ. 2012. T.130. S.19-26.
- [7] Bezmozgiy I. M., Ivanov S. V. Metodika avtomaticheskoy proverki konechnoelementov krupnogabaritnykh kosmicheskikh moduley // Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. 2022. №3(38). S. 100-112.
- [8] Bezmozgiy I. M., Kazakova O. I., Sofinskiy A. N., Chernyagin A. G. Otrabotka vibroprochnosti avtomaticheskogo kosmicheskogo apparata distantsionnogo zondirovaniya Zemli // Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. 2014. №4(7). S. 31-41.
- [9] Makridenko L. A., Volkov S. N., Gecha V. YA., Zhilenov M. YU., Kazantsev S. G. Osnovnyye istochniki krasivyykh izobrazheniy Zemli, imeyushchikhsya na orbital'noy opticheskoy s"yomke s borta MKA // Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEМ. 2017. T.160. S. 3-19.

[10] Sergeev R. N., Osipov M. N. Pretsizionnaya kontrol'no-izmeritel'naya sistema na osnove tsifrovoy spekl-interferometrii // "Orbita molodozhi" i perspektivy razvitiya rossiyskoy kosmonavtiki: sbornik dokladov Vserossiyskoy molodozhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tomsk: Izd-vo TPU. 2017. S. 163-164.

[11] Shakhmatov E. V., Zhuravlev O. A., Sergeev R. N., Safin A. I. Development and application of mobile digital speckle interferometer for vibrometer model sample honeycomb // Procedia Engineering. 2015. №106. P. 247-252.

[12] M. N. Osipov, R. N. Sergeev. The influence of the aperture diaphragm on the size of the subjective speckles and the application of this in speckle photography // J. Phys.: Conf. Ser. 1368, 022068. 2019. doi:10.1088/1742-6596/1368/2/022068.

[13] Osipov M. N., Khokhlov V. A., Chekmenov A. N. Razvitiye tsifrovoy spektr-interferometrii dlya issledovaniya glubokikh protsessov v prirode vremeni // Vestnik SamGU. Yestestvennonauchnaya seriya. 2013. №9/2(110). S. 109-117.