

УДК 629.7.05

**Бритова Юлия Александровна**, аспирант ТПУ, инженер по испытаниям отдела климатических, механических и электрических испытаний ОАО «НПЦ «Полюс».  
E-mail: [tps@tpu.ru](mailto:tps@tpu.ru)  
Область научных интересов: электромеханические исполнительные органы систем ориентации и стабилизации.

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИИ УПРАВЛЯЕМЫХ ПО СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ ДЛЯ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ЭТАПАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ

Ю.А. Бритова

Томский политехнический университет  
E-mail: [tps@tpu.ru](mailto:tps@tpu.ru)

Достоверность результатов определения динамических качеств космического аппарата существенным образом зависит от достоверности определения силовых и моментных возмущений, действующих на космический аппарат со стороны его функциональных систем. Интегральная оценка динамического состояния управляемого по скорости двигателя-маховика выполняется

посредством определения его силомоментной и вибрационной характеристик.

### Ключевые слова:

Управляемый двигатель-маховик, датчик силы, виброизмерительный преобразователь, анализатор спектра, вибрационная характеристика, вибростенд.

Для ориентации и стабилизации углового положения космического аппарата (КА) в настоящее время наибольшее распространение получили управляемые по скорости двигатели-маховики (УДМ), выполняющие функции генераторов управляющих моментов.

ОАО «НПЦ «Полюс» разрабатывает и изготавливает УДМ для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, метеорологических спутников, аппаратов космической связи, телевидения и навигации.

Во время работы комплекса оборудования, в том числе и УДМ, на КА и его функциональные системы воздействуют вибрации и акустические шумы, создаваемые УДМ в рабочем режиме [1].

Для обеспечения нормального функционирования КА в течение срока его активного существования (ресурса) необходимо учитывать влияние параметров динамики УДМ.

Для подтверждения качества изготовления конструкции УДМ на предприятии на этапе проектирования проводится экспериментальная отработка конструкции, включающая в себя следующие виды испытаний:

- определение вибрационной характеристики УДМ в режиме разгона-выбега (герметичного/не герметичного);
- определение силомоментных характеристик УДМ;
- определение спектра резонансных частот, создаваемых УДМ.

Для проведения указанных видов испытаний предприятие располагает современным оборудованием: модульной многоканальной системой анализа сигналов PULSE фирмы Brüel & Kjær (Дания), вибрационной системой модели V830-335 LPT750 фирмы LDS (Англия), различными прецизионными виброизмерительными преобразователями и датчиками силы.

Определение вибрационной характеристики УДМ проводится в динамическом режиме при включенном электроприводе и на выбеге маховика в частотном диапазоне от 3 до 100 с<sup>-1</sup> с дискретностью 3 с<sup>-1</sup> [2].

Блок-схема стенда для проведения испытаний на определение вибрационных характеристик УДМ состоит из вакуумной камеры, пульта разгона УДМ, амперметра, частотомера, многоканальной системы для анализа сигналов PULSE (рис. 1). В качестве входных средств измерения используются трехкомпонентные виброизмерительные преобразователи (ВИП), ла-

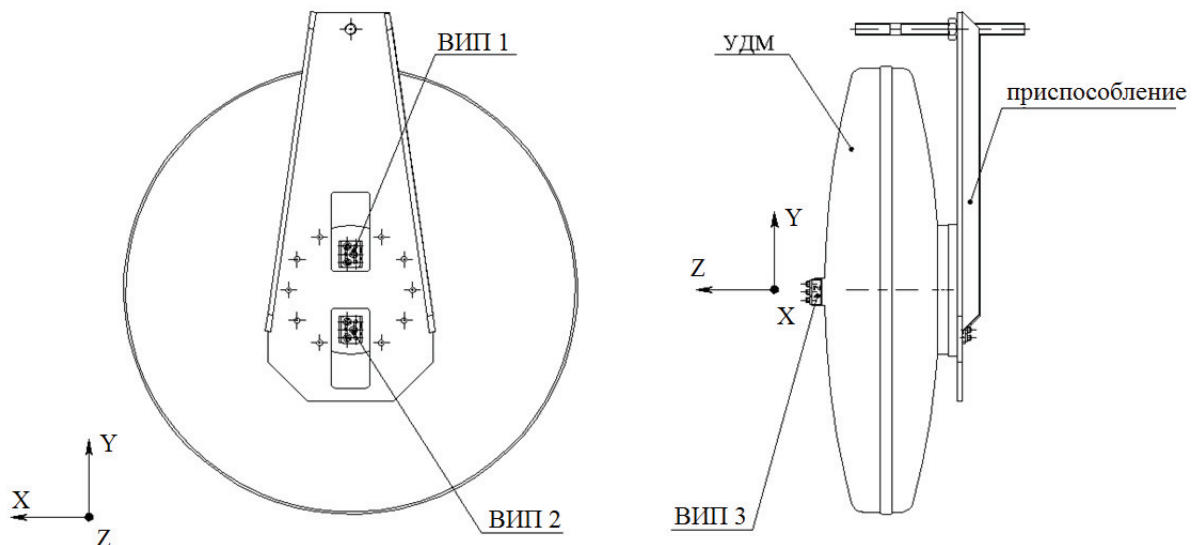
зерный фотоэлектрический тахометр ММ 0024, конденсаторный микрофон типа 4190, индукционный датчик типа ММ 0002 [3].



**Рис. 1.** Блок-схема стенда для проведения испытаний на определение вибрационных характеристик УДМ

Состояние свободного подвеса УДМ обеспечивается подвешиванием его в вакуумной камере на упругий резиновый подвес с собственной частотой колебаний не более 3 Гц.

В соответствии с технологическим процессом вибрационная характеристика определяется дважды: на этапе отработки конструкции еще не герметичного УДМ (после окончательной балансировки) и уже герметичного. Места расположения ВИП при испытаниях герметичного УДМ представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Расположение ВИП при проведении испытаний по определению вибрационной характеристики герметичного УДМ

ВИП устанавливается в зоне шарикоподшипникового узла УДМ на специальную мастику. Посредством герметично выведенных через заднюю стенку вакуумной камеры кабелей его выходные каналы подключаются к входным каналам системы PULSE типа 3560-D, которая осуществляет измерение и обработку данных и имеет следующие технические характеристики: частотный диапазон от 0 до  $25,6 \cdot 10^4$  Гц, динамический – 130 дБ, погрешность измерений  $\pm 0,1$  дБ, входных каналов – 5, выходных – 5 [4].

Основными источниками возмущающих (нежелательных) моментов УДМ являются дисбаланс и упругие деформации ротора, а также погрешности изготовления подшипников ро-

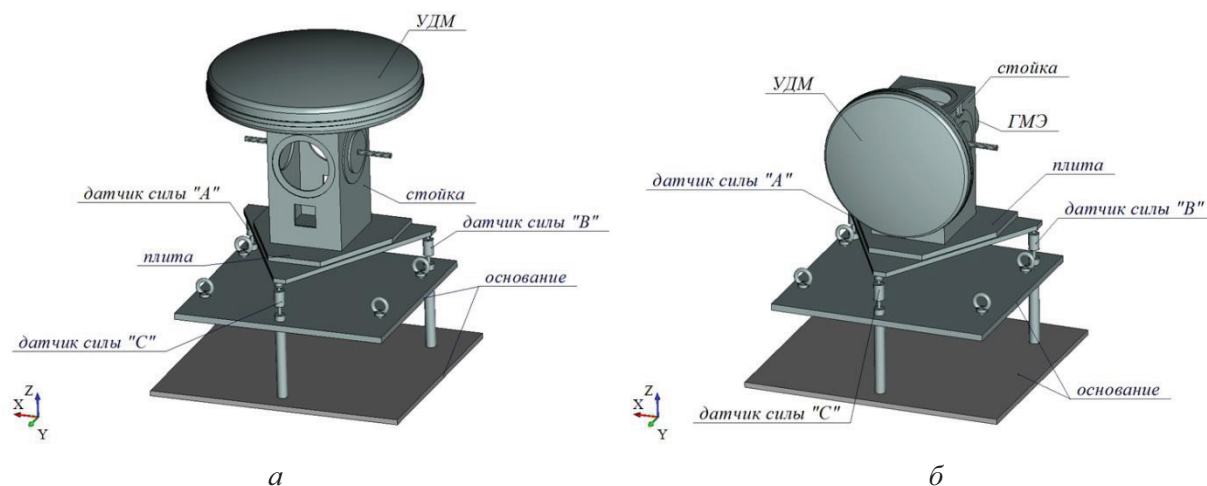
тора. Эти возмущающие факторы, особенно знакопеременные, изменяющиеся с частотой, близкой к собственной частоте элементов КА, могут вызвать резонанс, в результате чего снижается качество выполняемых КА задач из-за вибрационных помех, а в худшем случае могут привести к выходу из строя отдельных элементов.

Поэтому на этапе разработки и в процессе контрольных испытаний проводится всесторонний контроль параметров возмущающих моментов УДМ на стенде измерителя моментов (ИМ).

Принцип действия стенда основан на определении сил, действующих относительно координатных осей УДМ в состоянии свободного подвеса. Для этого используются пьезоэлектрические датчики силы, технические характеристики которых позволяют определить динамические параметры возмущающих моментов от УДМ.

На рис. 3 (а, б) показана установка УДМ на стенде ИМ при определении возмущающих моментов по трем его ортогональным осям. Состояние свободного подвеса УДМ на стенде обеспечивает пружинная подвеска с собственной нижней резонансной частотой не выше 3 Гц с двухкаскадной системой амортизации.

При расположении УДМ с осью вращения в горизонтальной плоскости для уравнивания системы используется габаритно-массовый эквивалент (ГМЭ) (рис. 3, б).



**Рис. 3.** Установка УДМ при расположении оси вращения: а – в вертикальной плоскости; б – в горизонтальной плоскости

Функциональная схема стенда представлена на рис. 4.

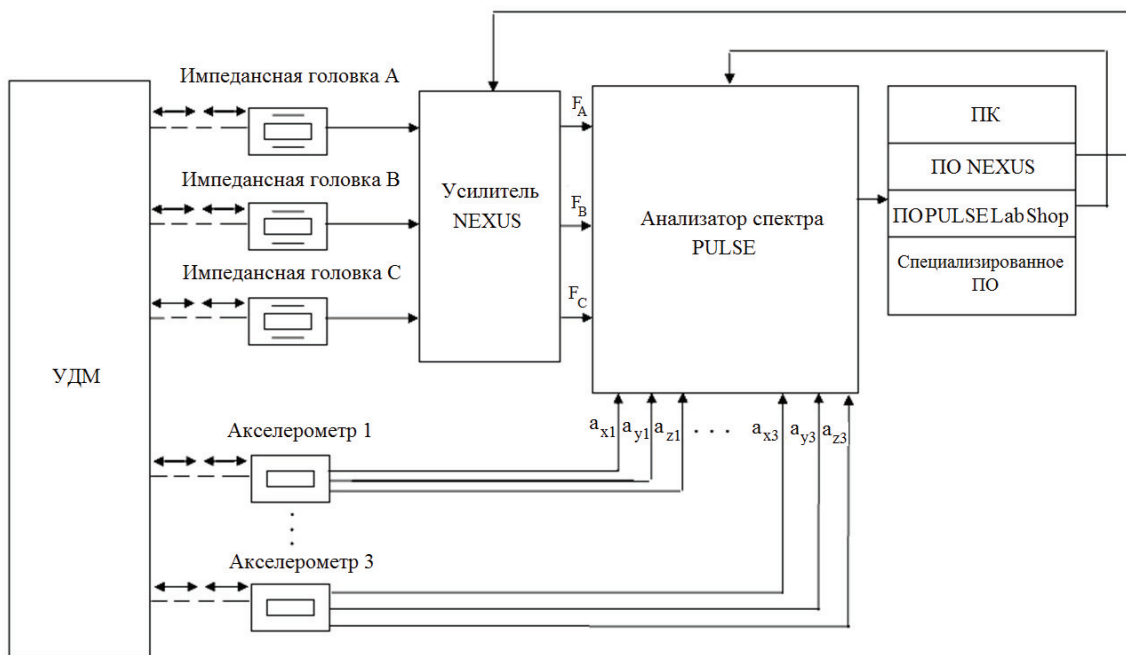


Рис. 4. Функциональная схема стенда

Возмущающие моменты силы вокруг осей УДМ определяются относительно точек расположения датчиков (рис. 5) и численно равны произведению модуля силы на плечо, т. е. на кратчайшее расстояние от указанной точки до линии действия силы, и направлены перпендикулярно плоскости, проходящей через выбранную точку и линию действия силы.

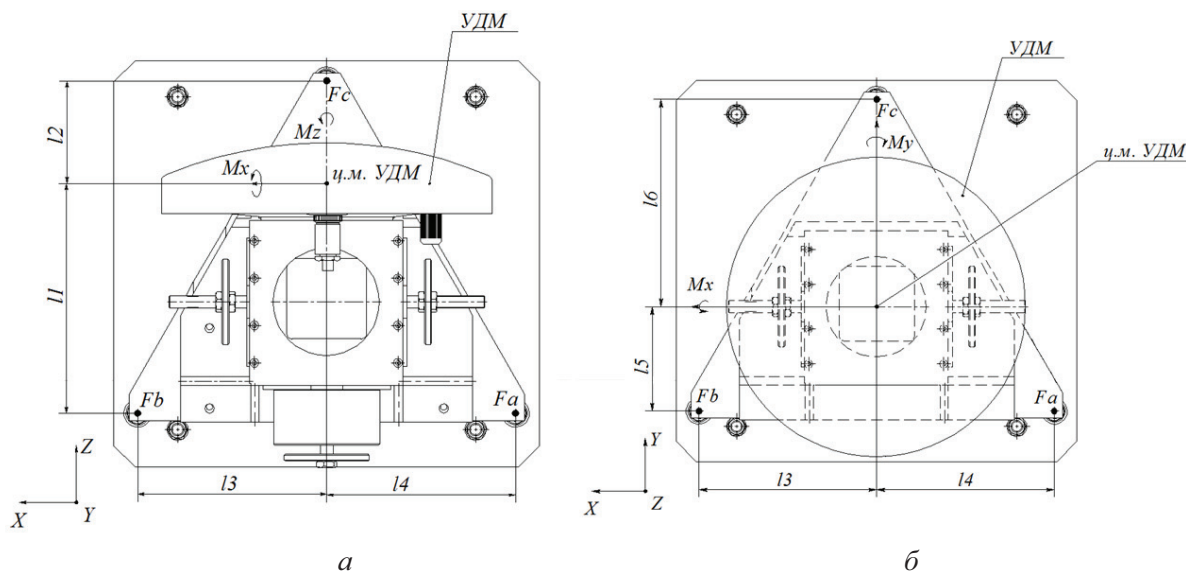


Рис. 5. Определение возмущающих моментов

При расположении оси вращения УДМ в горизонтальной плоскости (рис. 5, а) момент вокруг оси OX равен:

$$M_{x1} = F_c \cdot l_2 = -(F_a + F_b) \cdot l_1,$$

Момент вокруг оси OZ равен:

$$M_z = F_b \cdot l_3 = -F_a \cdot l_4.$$

При расположении оси вращения УДМ в вертикальной плоскости (рис. 5, б) момент вокруг оси OX равен:

$$M_{x2} = -F_c \cdot l_6 = (F_a + F_b) \cdot l_5,$$

Момент вокруг оси ОУ равен:

$$M_y = F_b \cdot l_3 = -F_a \cdot l_4.$$

Значения величин  $l_1 - l_6$  обусловлены конструкцией стенда.

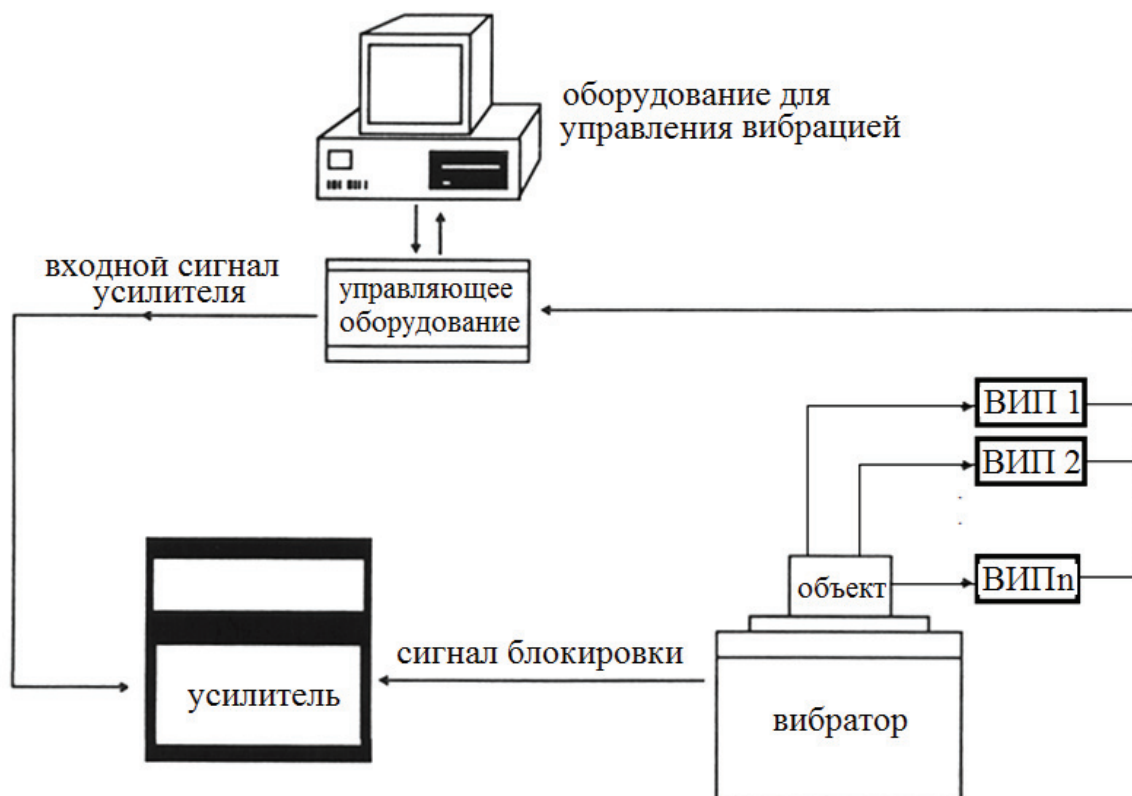
С помощью специализированного программного обеспечения анализатора спектра PULSE в рабочем режиме УДМ измеряются силы, действующие по ортогональным осям УДМ.

Программа испытаний УДМ на синусоидальные и случайные вибрации предусматривает последовательное нагружение конструкции УДМ и определение резонансов до и после каждого вида нагружения [5], при этом отклонение резонансных частот элементов конструкции до и после нагружения от измеренных до нагружения не должно превышать 10 %, а конструкция УДМ не должна иметь резонансных частот до 150 Гц.

Испытания при определении резонансных частот конструкции УДМ проводятся на электродинамическом вибростенде модели V830-335 LPT750 английской фирмы Ling Dynamic Systems (LDS) с применением системы управления виброиспытаниями LASER.

Для возбуждения вибрации в этих видах испытаний используются специальные источники колебательных сил с известными характеристиками, а объектом испытаний и источником диагностической информации являются колебательные свойства изделия.

Вибрационная система состоит из четырех основных частей: вибратора модели V830-335 LPT750, усилителя мощности УМК-12к, системы управления виброиспытаниями LASER и комплекта ВИП. Блок-схема стенда представлена на рис. 6.



**Рис. 6.** Блок-схема стенда для проведения испытаний на определение резонансных частот элементов конструкции

Для закрепления УДМ на платформе вибросистемы используются специально разработанные приспособления, не имеющие собственных резонансных частот до 1000 Гц.

Система управления LASER (с пакетом программного обеспечения Shaker Control Software) имеет динамический диапазон от 0 до 120 дБ и генерирует различные типы вибрационных и ударных нагрузок: синусоидальную вибрацию с разверткой частоты, широкополосную

случайную вибрацию, синусоидальную вибрацию, удар классических форм, удар по заданному спектру реакции конструкции.

Программное обеспечение Shaker Control Software позволяет проводить анализ смещения резонансных частот элементов конструкции до и после нагружения, вычисление коэффициентов динамичности ее элементов, а также запись ее амплитудно-частотной характеристики.

### Вывод

Интегральный анализ результатов испытаний, как показали тестовые испытания, позволяет оценить качество изготовления УДМ и сформировать общую вибрационную картину.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стома С.А., Кузьмин В.Н., Михайлов Е.М. и др. Изделия точной электромеханики для космических аппаратов // юбилейной конференции МЭИ: Сб. докладов. – М., 1999. – С. 6–10.
2. Бритова Ю.А., Андросов В.Я., Дмитриев В.С. Вибрационный анализ динамических характеристик двигателей-маховиков // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 167–172.
3. Бритова Ю.А., Плотников А.В. Определение собственных частот конструкции управляемых двигателей-маховиков // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: Материалы научно-техн. конф. молодых специалистов ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева, посвященной 50-летию полёта в космос Ю.А. Гагарина. – Железногорск, 1–4 марта 2011. – Красноярск: Издательский дом «Класс Плюс», 2011. – С. 213–215.
4. Универсальная многофункциональная система анализа PULSE 3560: Руководство пользователя / Bruel&Kjaer. 2006.
5. ГОСТ 25275-82 (СТ СЭВ 3173-81) Приборы для измерения вибрации вращающихся машин. – М.: Издательство стандартов, 1994. – 11 с.

Поступила 07.06.2012 г.