

**Библиографические ссылки**

**References**

1. Макаров А. Л. Управление процессом съемки поверхности Земли с помощью спутников // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 3 (100). С. 101–109.
2. Данные исследований поверхности Земли космических аппаратов RapidEye [Электронный ресурс]. URL: <http://www.blackbridge.com/rapideye/solutions/index.htm> (дата обращения: 28.10.2013).
3. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Аналитическая геометрия : учебник для вузов. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. 224 с.
4. The one-stop-shop for all your CubeSat and nanosat systems [Electronic resource]. URL: <http://cubesatshop.com/> (date of visit: 28.10.2013).
5. NanoPower Solar P100U-A/B [Electronic resource]. URL: <http://cubesatshop.com/index.79> (дата обращения: 28.10.2013)
6. NanoPower P31U Power Supply [Electronic resource]. URL: <http://cubesatshop.com/index.68> (дата обращения: 28.10.2013).
7. Шепетов Ю. А., Должикова Е. А. Оценка рационального угла раскрытия панелей солнечных батарей с точки зрения максимума энергорихода // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 4 (101). С. 89–94.

1. Makarov A. L. *Aviazhijno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*. 2013, no. 3 (100), p. 101–109.
2. *Dannue issledovanii poverchnosti Zemli kosmicheskichi apparatov RapidEye* (earth remote sensing datas from RapidEye satelittes). Available at: <http://www.blackbridge.com/rapideye/solutions/index.htm> (accessed: 28 October 2013).
3. Ilin V. A., Poznyak E. G. *Analiticheskaya geometriya* (Analytical geometry), Moscow, 2004. 224 p.
4. The one-stop-shop for all your CubeSat and nanosat systems. Available at: <http://cubesatshop.com/> (accessed: 28 October 2013).
5. NanoPower Solar P100U-A/B. Available at: <http://cubesatshop.com/index.79> (accessed : 28 October 2013)
6. NanoPower P31U Power Supply. Available at: <http://cubesatshop.com/index.68> (accessed : 28 October 2013).
7. Shepetov Yu. A., Dolzhukova K. A. *Aviazhijno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*. 2013, no. 4 (101), p. 89–94.

© Губин С. В., Шепетов Ю. А., Должикова Е. А., 2014

УДК 629.7.05

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ МОМЕНТОВ  
УПРАВЛЯЕМЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ  
НА СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ**

А. А. Денисова, О. В. Тверяков, Ю. А. Бритова

Научно-производственный центр «Полус»  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в  
E-mail: [polus@online.tomsk.net](mailto:polus@online.tomsk.net)

*Динамическая точность космических аппаратов с аппаратурой дистанционного зондирования Земли (в том числе малых) существенно зависит от уровня силовых и моментных возмущений, действующих со стороны работающих бортовых электромеханических устройств – инерционных исполнительных органов систем ориентации на базе управляющих двигателей-маховиков. С целью минимизации виброактивности и измерения возмущающих сил и моментов, обусловленных остаточным дисбалансом вращающегося ротора-маховика управляемых двигателей-маховиков, разработан силоизмерительный стенд для инструментального контроля сил и моментов. Предложена методика определения возмущающих моментов, основанная на использовании экспериментально определяемых значений вибрационных сил.*

*Ключевые слова: снижение виброактивности, управляемые двигатели-маховики, датчики силы, силоизмерительный стенд, контроль возмущающих сил и моментов.*

**DEVELOPMENT OF DISTURBANCE MOMENTS DEFINITION METHOD  
FOR WORKING REACTION FLYWHEELS ASSEMBLIES INSTALLED  
ON THE SPECIAL FORCES MEASURING STAND**

A. A. Denisova, O. V. Tveryakov, J. A. Britova

Scientific industrial centre "Polyus"  
56v, Kirov pr., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: polus@online.tomsk.net

*Instrumental inspection of vibration disturbance forces and moments generated by reaction wheels is an actual technical problem. Dynamic accuracy of the space vehicle for the Earth observation and small space vehicle depend on the level of vibration disturbance forces and moments generated by working onboard devices such as reaction wheels. To reducing of vibration disturbances and to check disturbance forces and moments caused by the unbalance of rotating parts of reaction flywheels the special force measuring stand has been developed. The stand consists of the measurement module, converting and recording parts. Stand operation principle is based on real-time measuring the projections of forces created by working reaction wheel on three orthogonal axes  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . The special method of calculating the disturbance moments using values of the forces obtained experimentally has been proposed. The method of determining disturbance moments implemented in specially designed software of the stand is proposed.*

*Keywords: reducing of vibration disturbances, reaction wheels, force sensors, force measuring stand, check disturbance forces and moments.*

Снижение уровня вибрационного воздействия от работающих на борту космических аппаратов электромеханических приводных устройств, в том числе управляемых двигателей-маховиков (УДМ), содержащих вращающиеся части, является актуальной технической задачей, обусловленной ужесточением вводимых предприятиями – разработчиками космических аппаратов ограничений.

Минимизация виброактивности, под которой понимаются механические воздействия в виде сил и моментов, требует проведения как комплексных теоретических исследований на проектном этапе, включая компьютерное моделирование и инженерный анализ конструкции, так и экспериментальных измерений, направленных на изучение характера и уровня вибраций, создаваемых в процессе работы прибора, на выяснение неизбежных отличий реальной конструкции от «идеальной» модели с целью уточнения и совершенствования последней [1].

Для экспериментального определения создаваемых УДМ возмущающих сил и моментов в ОАО «НПЦ «Полус» разработан и изготовлен силоизмерительный стенд, состоящий из измерительного модуля и аппаратно-регистрающей части.

Принцип работы стенда основан на измерении сил по трем ортогональным осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , создаваемых работающими УДМ в реальном режиме времени.

Измерительный модуль представляет собой платформу с шестью трехкомпонентными датчиками силы, установленную на виброизолированный фундамент, конструктивно обеспечивающий контроль вибрационных воздействий с частотами не ниже 3 Гц.

Аппаратно-регистрающая часть стенда образована измерительными усилителями заряда и 32-канальным анализатором вибрационных, акустических сигналов LMS SCADAS Mobile (Бельгия).

Для калибровки и поверки измерительных усилителей, управления процессом измерений, осуществления сервисных функций, преобразования получаемых с датчиков силы данных, выполнения частотного анализа и преобразования Фурье использован персональный компьютер с предусмотренным служебным программным обеспечением, также разработанным фирмой LMS [2].

Испытываемый УДМ закрепляется на платформе при помощи специальных приспособлений и крепежа с заданным моментом затяжки, исключающего возможные повреждения посадочных мест УДМ. Закрепление УДМ производится таким образом, чтобы оси приборной системы координат  $OX$  и  $OY$  (лежащие в плоскости вращения маховика) совпадали с соответствующими осями платформы.

Определение значений силомоментных характеристик УДМ основано на измерении электрических сигналов с выходов датчиков силы, прямо пропорциональных силам сжатия и растяжения, создаваемым работающим в различных режимах УДМ и действующим в точках его крепления к платформе. Эти сигналы в реальном масштабе времени передаются в измерительный тракт, усиливаются и поступают в анализатор, где происходит их согласование и аналого-цифровая обработка. Далее оцифрованные сигналы поступают в компьютер и сохраняются на его жестком диске в виде массива данных. Таким образом, оператор получает значения вибрационных сил, генерируемых УДМ.

Однако на практике необходимо иметь информацию о возмущающих моментах, действующих относительно осей  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  приборной системы координат, а также значения статического и динамического дисбалансов, которые позволяли бы проводить экспресс-оценку качества выполнения технологической

операции уравнивания роторной системы УДМ на завершающей стадии изготовления и приемки.

Для расчета значений возмущающих моментов предложена методика, основанная на положении о равновесии пространственной системы сил и связывающая геометрические размеры, конфигурацию расположения датчиков и значения регистрируемых сил.

Согласно схеме расположения датчиков силы (рис. 1), применяемых в измерительном модуле (датчики 261A13 фирмы РСВ), уравнения для вычисления суммарных проекций сил, действующих вдоль осей приборной системы координат, имеют вид

$$\begin{aligned} F_x &= F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x} + F_{5x} + F_{6x}; \\ F_y &= F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + F_{4y} + F_{5y} + F_{6y}; \\ F_z &= F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} + F_{4z} + F_{5z} + F_{6z}, \end{aligned} \quad (1)$$

а уравнения для вычисления суммарных моментов, действующих относительно осей приборной системы координат,

$$\begin{aligned} M_x &= a(F_{4z} + F_{3z} - F_{1z} - F_{6z}); \\ M_y &= b(F_{6z} + F_{4z} - F_{3z} - F_{1z}) + c(F_{5z} - F_{2z}); \\ M_z &= a(F_{1x} + F_{6x} - F_{4x} - F_{3x}) + \\ &+ b(F_{3y} + F_{1y} - F_{4y} - F_{6y}) + c(F_{2y} - F_{5y}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}$  – проекции вибрационной силы на оси системы координат стенда, регистрируемые соответствующими датчиками силы;  $M_x, M_y, M_z$  – амплитудные значения возмущающих моментов;  $a, b, c$  – расстояния, определяющие положение проекций геометрических центров датчиков силы относительно осей системы координат стенда в плоскости  $XOY$ .

В результате расчета по формулам (2) получены зависимости возмущающих моментов, генерируемых УДМ, при различных частотах вращения ротора (рис. 2).

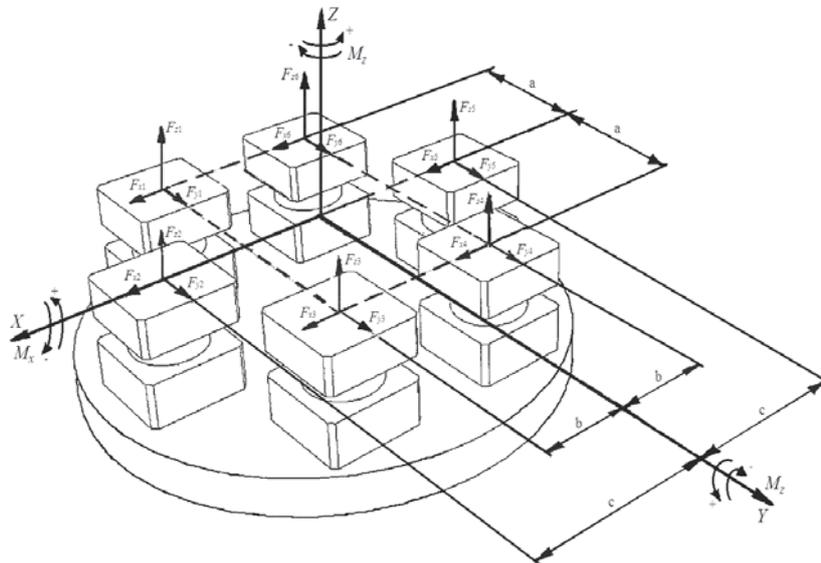


Рис. 1. Схема расположения датчиков на установочной платформе силоизмерительного стенда



Рис. 2. Зависимость моментов сил, действующих по осям X (—), Y (---), Z (.....)

При определении моментов были использованы значения сил, действующих вдоль осей  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  работающего УДМ, полученные экспериментально на силоизмерительном стенде.

Из графика (рис. 2) следует, что суммарные значения амплитуд моментов сил по осям  $OX$  и  $OY$  практически совпадают между собой, что соответствует увеличению центробежных сил ротора-маховика с остаточным дисбалансом по мере роста частоты вращения. Момент по оси  $OZ$  отсутствует. В диапазоне частот 3100–3600 об/мин имеются отклонения амплитуд моментов сил. Выявление источника этих отклонений требует дополнительных исследований. Предварительное предположение – отклонения вызваны вибрацией наружных колец шарикоподшипников.

Предложенная методика, реализованная в программном обеспечении разработанного стенда, позволяет получать объективные данные о значениях возмущающих моментов, генерируемых УДМ, а также с их помощью определять значения статического и динамического дисбалансов вращающихся частей УДМ.

Таким образом, внедрение экспериментального контроля возмущающих моментов создает предпосылки для повышения точности балансировки на этапе изготовления и совершенствования разрабатываемых

приборов. Это делает силоизмерительный стенд эффективным инструментом, необходимым при создании электродвигателей-маховиков с минимальной виброактивностью.

#### Библиографические ссылки

1. Бутенин Н. В., Лунц Я. Л., Меркин Д. Р. Курс теоретической механики. В 2 т. СПб.: Лань, 2004. 736 с.
2. Рекламный каталог инженерных решений от компании LMS International (Бельгия). 163 с.

#### References

1. Butenin N. V., Lunts Ya. L., Merkin D. R. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* (Theoretical mechanics course). Two volumes. Saint-Petersburg, Lan Publ., 2004. 736 p.
2. The LMS International (Belgium) engineering products advertising catalogue, 163 p.

© Денисова А. А., Тверяков О. В., Бритова Ю. А., 2014

УДК 620.17

### К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А. А. Кишкин<sup>1</sup>, И. П. Колчанов<sup>2</sup>, А. В. Делков<sup>1</sup>, А. А. Ходенков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: spsp99@mail.ru

<sup>2</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

*Анализируется возможность повышения чувствительности метода контроля герметичности изделий ракетно-космической техники с применением гелиевых масс-спектрометрических течеискателей. Рассматривается теоретическая постановка задачи по пространственному позиционированию источника негерметичности по значениям проекций градиента концентраций пробной среды в специально подготовленной атмосфере в зоне объекта исследования.*

*Ключевые слова: контроль герметичности, течеискание, локализация утечки, диффузия.*

### THE PROBLEM OF INCREASING THE SENSITIVITY OF LOCAL CONTROL METHODS FOR TIGHTNESS PRODUCTS OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

A. A. Kishkin<sup>1</sup>, I. P. Kolchanov<sup>2</sup>, A. V. Delkov<sup>1</sup>, A. A. Hodenkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation  
E-mail: spsp99@mail.ru

<sup>2</sup> JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation