

4. Андропова И.А., Малыкин Г.Б. Физические проблемы волоконной гироскопии на основе эффекта Саньяка // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172. – № 8. – С. 849–873.
5. Lefevre H. The Fiber -Optic Gyroscope, Artech House, 1993.
6. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Обухович Д.В., Прилуцкий С.В., Кострицкий С.М., Федоров И.В., Зуев А.И., Варнаков В.К. Прецизионный волоконно-оптический гироскоп с расширенным диапазоном измерения угловых скоростей // Инерциальные системы и датчики. – 2014. – С.183–190.
7. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Марчук В.Г., Кострицкий С.М. Падерин Е.М. Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы // Фотон-Экспресс. – 2007. – № 6 (62). – С. 47–49.
8. Патент Китай CN20161363356 20160527, 26.10.2016. Active anti-radiation design method of interference type digital closed-loop fiber-optic gyroscope/ Jin Jing.
9. Патент Китай CN20161623262 20160728, 12.10.2016. Method for testing and compensating temperature coefficient of fiber-optic gyroscope/ Yang Zhihuai.
10. Патент Китай CN20151890482 20151207, 16.03.2016. Method for controlling temperature of photoelectric separate fiber optic gyroscope optical path / Huang Xinyan.
11. Патент Китай CN2013106106 20130108 08.05.2013. Error restraining method for fiber-optic gyroscope strapdown inertial navigation system rotating relative to geocentric inertial system / Sun Feng.
12. Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Прилуцкий В. Е., Пономарев В. Г., Морев И. В., Скрипников С.Ф., Хмелевская М.И., Буравлев А.С., Кострицкий С.М., Зуев А.И., Варнаков В.К. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконно-оптических гироскопов // Инерциальные системы и датчики. – 2013. – С. 75–82.
13. Song Y., Zhou S., Lu Z., Fiber optic gyroscope for strap-down inertial navigation systems // Proc. SPIE 4540, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites V, 424 (December 12, 2001) – С. 424–428.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ МОМЕНТОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Хайдукова В.М.¹, Бритова Ю.А.^{1,2}

Научный руководитель: Бритова Ю.А., ассистент, к.т.н.

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

²АО «Научно-производственный центр «Полус»

634050, Россия, г. Томск, пр. Кирова, 56 «в»

E-mail: vmh1@mail.ru

DETERMINATION OF DISTURBING MOMENT OF MAIN PARTS OF SMALL SPACECRAFTS

Khaydukova V.M.¹, Britova Yu.A.^{1,2}

Scientific Supervisor: Assistant lecturer, PhD, Britova Yu.A.

¹Tomsk Polytechnic University

Russia, Tomsk, Lenin ave., 30, 634050

²JSC «Scientific & Industrial Centre «Polyus»

Russia, Tomsk, Kirova ave., 56v, 634050

E-mail: vmh1@mail.ru

Динамическая точность малых космических аппаратов (МКА) с аппаратурой дистанционного зондирования Земли существенно зависит от уровня силовых и моментных возмущений, действующих со стороны работающих бортовых электромеханических устройств – инерционных исполнительных органов

систем ориентации на базе двигателей-маховиков. С целью минимизации виброактивности и измерения возмущающих сил и моментов, обусловленных остаточным дисбалансом вращающегося ротора-маховика двигателей-маховиков, в АО «НПЦ «Полюс» был разработан силоизмерительный стенд для контроля сил и моментов [1].

The dynamic accuracy of remote sensing small spacecraft essentially depends on the level of force and moment perturbations. Perturbations are caused by an on-board electric motor driver rotor used primarily for spacecraft altitude control, particularly, by a rotating flywheel residual unbalance. With a view to measure these perturbations and reduce vibrational activity, JSC «SIC «Polyus» designers have developed a force and moment control test bench.

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

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 первой [2].

Внедрение технологии разработки МКА поддерживается сегодня современными тенденциями развития науки и техники, такими как миниатюризация электроники, переход к цифровым технологиям в управлении, прогресс в создании конструктивных материалов и в целом ряде других технических решений.

При проектировании МКА разработчик сталкивается с задачей обеспечения виброустойчивости размещенной на борту точной чувствительной аппаратуры от динамических нагрузок, действующих, в основном, от системы управления движением МКА.

Система управления движением МКА выполняет следующие задачи:

- обеспечение заданной траектории корпуса МКА в какой-либо из заданных систем координат на заданном интервале времени, т. е. управление движением вокруг центра масс МКА (система ориентации);
- обеспечение заданной траектории движения МКА в инерциальном пространстве для решения поставленных задач, т. е. управление движением самого центра масс (система навигации).

Система ориентации МКА имеет структуру, совпадающую со структурой любой автоматической системы управления (рис. 1).

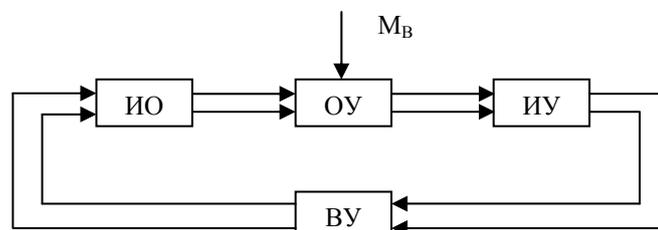


Рис. 1. Структурная схема системы управления МКА

ОУ – объект управления; ИУ – измерительное устройство; ВУ – вычислительное устройство;

ИО – исполнительный орган; M_B – возмущающий момент

ОУ – собственно сам МКА, движение которого описывается в первом приближении (без учета упругих элементов – антенных устройств и панелей солнечных батарей) тремя динамическими и тремя кинематическими уравнениями Эйлера.

Движение МКА описывается уравнениями следующих видов:

Динамические уравнения Эйлера:

$$\begin{cases} \frac{dK_X}{dt} + \Omega_Y K_Z - \Omega_Z K_Y = M_X; \\ \frac{dK_Y}{dt} + \Omega_Z K_X - \Omega_X K_Z = M_Y; \\ \frac{dK_Z}{dt} + \Omega_X K_Y - \Omega_Y K_X = M_Z. \end{cases}$$

где $\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z$ – проекции на оси X, Y, Z угловой скорости вращения $\bar{\Omega}$ системы координат МКА XYZ относительно неподвижной системы координат $X_0 Y_0 Z_0$;

K_X, K_Y, K_Z – проекции на оси X, Y, Z главного момента количества движения МКА \bar{K} ;

M_X, M_Y, M_Z – моменты, действующие по осям МКА.

Кинематические уравнения Эйлера:

$$\begin{cases} \omega_X = \dot{\psi} \sin \vartheta \sin \varphi + \dot{\vartheta} \cos \varphi; \\ \omega_Y = \dot{\psi} \sin \vartheta \cos \varphi - \dot{\vartheta} \sin \varphi; \\ \omega_Z = \dot{\psi} \cos \vartheta + \dot{\varphi}. \end{cases}$$

где $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ – проекции угловой скорости вращения МКА $\bar{\omega}$ на оси системы координат XYZ ;

ψ, ϑ, φ – углы Эйлера,

соответственно прецессии, нутации, вращения;

$\dot{\psi}, \dot{\vartheta}, \dot{\varphi}$ – скорости изменения углов Эйлера.

Задача ИО – обеспечить совмещение системы координат XYZ заданных осей, жестко связанных с МКА, с системой координат $X_0 Y_0 Z_0$ осей ориентации.

ИУ служат для измерения отклонения связанной с корпусом МКА системы координат XYZ от системы координат $X_0 Y_0 Z_0$.

Посредством ВУ определяются необходимые углы коррекции МКА. Положение МКА корректируется посредством ИО.

Одним из наиболее часто используемых ИО системы управления движением МКА являются одностепенные гиросtabilизаторы или, так называемые, двигатели-маховики (ДМ). Одним из основных разработчиков и изготовителей ДМ для МКА является АО «НПЦ «Полус» в г. Томск.

ДМ обладает одной степенью свободы, связанной с осью его вращения вокруг оси симметрии. Сама ось относительно корпуса МКА неподвижна. Такое устройство называют управляющим двигателем-маховиком (рис. 2).

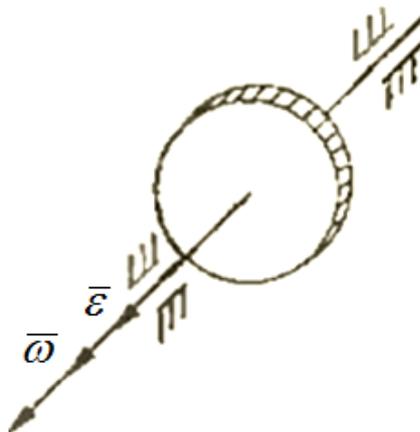


Рис. 2. Кинематическая схема ДМ

Управляющий момент ДМ определяется равенством:

$$\bar{M}_{\text{упр}} = \frac{d\bar{H}}{dt} = J\dot{\bar{\omega}} = J\bar{\varepsilon},$$

где J – момент инерции ДМ;

$\bar{\omega}$ – его угловая скорость;

$\bar{\varepsilon}$ – его угловое ускорение.

Изменение его кинетического момента $H=J\omega$ возможно только путем изменения числа оборотов. ДМ разрабатывают часто реверсивными, чтобы иметь возможность создавать моменты как одного, так и противоположного знака.

Для управления МКА по трем ортогональным осям необходимо на борту МКА установить три ДМ, оси которых направлены по осям связанной с корпусом МКА системы координат (рис. 3).

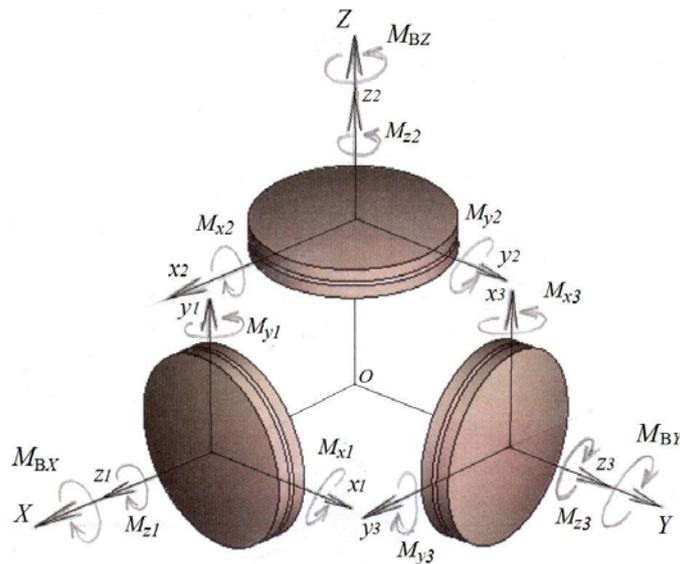


Рис. 3. Расположение ДМ для трехосного управления МКА

В реальных условиях эксплуатации ДМ создают вибровозмущающие силы и моменты сил, воздействующие по трем ортогональным осям как на платформу МКА, так и на другие технические устройства и механизмы, находящиеся на борту МКА, что является потенциально проблемным или критичным фактором.

При этом возмущающие моменты, возникающие в рабочем режиме по осям каждого ДМ, суммарно создают возмущающие моменты по осям МКА (рис. 3):

$$M_{\text{вz}} = M_{x3} + M_{y1} + M_{z2};$$

$$M_{\text{вx}} = M_{x2} + M_{z1} + M_{y3};$$

$$M_{\text{вy}} = M_{x1} + M_{y2} + M_{z3}.$$

Действующие по трём ортогональным осям ДМ возмущающие моменты сил обусловлены следующими механическими причинами: остаточной неуравновешенностью ротора, наличием сил трения в опорах, упругими и температурными деформациями элементов ДМ.

При разработке ДМ технологическим процессом производства предусмотрены испытания по определения возмущающих сил и моментов, создающихся конструкцией.

В АО «НПЦ «Полюс» разработан, изготовлен и введен в эксплуатацию стенд для экспериментального определения, отработки и контроля силомоментных характеристик (СМХ ДМ), имеющий высокие технические, а также программные характеристики [3].

В состав стенда входит: анализатор спектра, специализированное программное обеспечение, датчики силы, комплект прецизионных технологических приспособлений.

Стенд позволяет на этапе опытно-конструкторских работ осуществлять экспериментальную отработку СМХ ДМ различных типоразмеров, применяемых в микро-, мини-спутниках и на больших платформах МКА [3].

В процессе технологических испытаний ДМ осуществляется контроль основных динамических характеристик с целью проверки их соответствия нормированным характеристикам и техническому заданию. Посредством стенда возможно определение следующих характеристик:

– амплитудно-частотную характеристику возмущающих сил и моментов сил, действующих по осям ДМ в рабочем диапазоне скоростей вращения;

– значений статического и динамического дисбалансов.

В зависимости от собственных частот ($f_{\text{ниж}}$ и $f_{\text{верх}}$) и уровня шумов фундамента, а также свободно конфигурируемых типов входных устройств, характеристики стенда СМХ могут быть значительно расширены в области низких частот и нижнего предела измерения [3].

Методика, реализованная в программном обеспечении стенда, позволяет получать объективные данные о значениях возмущающих моментов, генерируемых ДМ, а также с их помощью определять значения статического и динамического дисбалансов вращающихся частей ДМ. 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 [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисова А.А., Тверяков О.В., Бритова Ю.А. Разработка методики определения возмущающих моментов управляемых двигателей-маховиков на силоизмерительном стенде // Вестник СибГАУ. – 2014. – № 1(53). – С. 124.
2. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. В 2 т. – СПб.: Лань, 2004. – 736 с.
3. Андросов В.Я., Бритова Ю.А., Лянзбург В.П., Плотников А.В., Тверяков О.В. Стенд для экспериментальной отработки силомоментных характеристик электромеханических исполнительных органов // Космонавтика и ракетостроение. – 2015. – № 4 (83). – С. 148.