УДК 621.316.71

М.В. Поляков, А.С. Дмитриенко, О.Ю. Завьялова,
В.П. Лянзбург, Г.Н. Гладышев, Н.Н. Балковой

Современное состояние и перспективы развития управляющих двигателей-маховиков

Рассматриваются современный технический уровень и перспективные направления развития управляющих двигателей-маховиков систем ориентации и стабилизации космических аппаратов. Особое внимание уделено научно-техническим задачам, связанным с внедрением непосредственного управления по динамическому моменту, снижением возмущающих моментов и массогабаритных характеристик. Отмечены особенности, возникающие при использовании двигателей-маховиков на малых и тяжелых космических аппаратах. Приведены преимущества интеллектуализации управляющих двигателей-маховиков.
Ключевые слова: управляющий двигатель-маховик, космический аппарат, технический уровень, перспективы.
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-109-114

В настоящее время в качестве электромеханических исполнительных органов систем ориентации и стабилизации различных отечественных и зарубежных космических аппаратов (КА) применяются, главным образом, управляющие двигатели-маховики (УДМ), реже – силовые гироскопы. Основными задачами УДМ являются осуществление высокоточной угловой стабилизации и управление ориентацией КА в пространстве средствами формирования динамических и кинетических моментов по осям стабилизации.

Формирование динамического момента УДМ $M_д$, приложенного к корпусу КА, осуществляется путем изменения кинетического момента УДМ H за счет изменения угловой скорости вращения ротора ω:

$$M_д = M_{эм} - M_c \operatorname{sign}(\omega) = \frac{dH}{dt} = J_o \frac{d\omega}{dt} = J_o \varepsilon, \quad (1)$$

где $M_{эм}$ – электромагнитный момент сил, создаваемый электродвигателем УДМ; M_c – результирующий момент сопротивления вращению ротора УДМ; J_o – осевой момент инерции ротора УДМ; ε – угловое ускорение ротора УДМ.

Конструктивно УДМ состоит из двухфазного синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ), ротора, выполненного в виде маховика, шарикоподшипниковых опор, корпуса, основания и блока электроники, содержащего регулятор тока, вторичный источник питания, сигнальный и силовой интерфейсы.

УДМ оснащен двухфазным датчиком положения ротора, выдающим на выходе гармонические напряжения, которые подаются на входы регуляторов тока и обеспечивают гармоническую форму тока в обмотках двигателя и отсутствие пульсаций электромагнитного момента.

В зависимости от расположения опор относительно диска ротора выделяют консольную [1] и симметричную [2] конструктивные схемы. Консольная конструкция УДМ имеет лучшие массогабаритные характеристики по сравнению с симметричной, однако в тех случаях, когда требуется повышенная прочность конструкции, например для тяжелых КА, предпочтительно симметричное размещение опор относительно ротора.

Большинство конструкций УДМ оснащено гермокамерой, которая служит не только для уменьшения аэродинамической составляющей момента сопротивления вращению ротора, но и обеспечивает комфортные условия работы шарикоподшипниковых опор, что повышает их надежность и увеличивает срок службы.

Анализ характеристик современных УДМ отечественного и зарубежного производства, а также требований, предъявляемых к ним заказчиками, позволяет выделить следующие основные направления развития УДМ:

– снижение массогабаритных характеристик;
– увеличение срока активного существования;
– расширение области применения как вследствие усиленного развития класса малоразмерных КА, так и за счет более широкого использования на аппаратах тяжелого класса;
– повышение точности выходных характеристик;
– снижение возмущающих моментов;
– интеллектуализация функций.

Снижение массогабаритных характеристик и увеличение срока активного существования УДМ

Данные требования являются общими для всей бортовой аппаратуры КА и достигаются применением более легких материалов и современных электрорадиоизделий с длительным сроком хранения. Кроме того, снижение массы достигается переходом на моноблочную конструкцию, в которой платы электроники размещены на основании УДМ [3]. Моноблочная конструкция обеспечивает меньший объем, занимаемый УДМ на КА, и дает возможность размещать его в различных местах контейнера без наличия силовых кабелей. Кроме того, размещение плат электроники в силовом корпусе УДМ обеспечивает дополнительную защиту от излучений.

Расширение области применения

Применение УДМ на тяжелых КА требует увеличения кинетических H и управляющих $M_д$ моментов. Согласно (1) увеличение кинетического момента УДМ H достигается повышением угловой скоро-

сти вращения ротора ω либо осевого момента инерции ротора $J_о$. При повышении угловой скорости снижается ресурс шарикоподшипников, возрастают потребляемая мощность, момент сопротивления вращению, возмущающие моменты УДМ. Увеличение осевого момента инерции $J_о$ ротора увеличивает массу УДМ, момент сопротивления вращению и момент трогания. Поэтому задача в данном случае сводится к поиску компромисса между перечисленными параметрами и решается исходя из требуемых характеристик и назначения КА.

Применение УДМ на тяжелых аппаратах обусловливает необходимость увеличения управляющего динамического момента, что, в свою очередь, ведет к возрастанию рабочего тока УДМ. Возможным вариантом снижения рабочего тока является переход с шины питания прибора «27 В» на шину «100 В». В этом случае тепловые потери уменьшаются пропорционально квадрату тока потребления. Переход на шину «100 В» влечет за собой применение в схемах мостовых инверторов питания фаз УДМ транзисторов MOSFET и IGBT взамен биполярных.

При использовании УДМ на малых КА необходимо обеспечить минимальные массогабаритные характеристики УДМ и управляющей электроники, минимальное энергопотребление, линейность управляющего воздействия во всем диапазоне изменения кинетического момента. Одновременно с этим конструкция УДМ должна обладать высокой стойкостью к внешним механическим нагрузкам. Решение данных технических проблем – в применении электрорадиоизделий с высокой степенью интеграции в совокупности с отказом от полного резервирования электроники в связи с малым сроком активного существования (обычно менее 5 лет), в оптимизации УДМ по критерию «энергопотребление – масса ротора» и использовании высокопрочных конструкционных сплавов [4].

Повышение точности выходных характеристик УДМ

Повышение их точности требует внедрения новых законов управления. Основными обобщенными характеристиками УДМ являются развиваемые моменты – кинетический H и динамический $M_д$, определяемые динамикой КА.

Из (1) видно, что возможны два способа управления моментом $M_д$: косвенный и непосредственный.

В первом случае реализуется частотно-токовый способ управления СДПМ в соответствии с функциональной схемой (рис. 1), состоящей из электродвигателя ЭД, датчиков положения ротора ДПР и тока ДТ, маховика М и регулятора тока РТ.

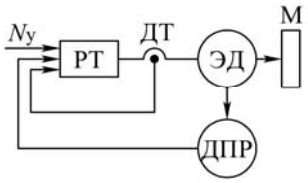


Рис. 1. Функциональная схема частотно-токового регулятора момента УДМ

В схеме реализуется линейная зависимость амплитуды фазного тока ЭД $I_ф$ от значения сигнала управления $N_у$, поступающего на вход РТ:

$$I_ф = K_т N_у, \quad (2)$$

где $K_т$ – коэффициент преобразования кода управления в фазный ток.

Электромагнитный момент электродвигателя УДМ линейно зависит от амплитуды фазного тока и при гармонической форме потока возбуждения и амплитуды огибающих выходных напряжений ДПР не имеет пульсаций:

$$M_{эм} = C_м I_ф, \quad (3)$$

где $C_м$ – коэффициент пропорциональности.

Подставляя (2), (3) в (1), получаем закон формирования динамического момента УДМ при частотно-токовом способе управления:

$$M_д = C_м K_т N_у - M_с \operatorname{sign}(\omega), \quad (4)$$

Произведение $C_м K_т N_у$ представляет собой функцию управления, на нее накладывается помеховая составляющая от момента сопротивления $M_с$, значение которой зависит от угловой скорости вращения ротора ω (рис. 2). В частности, при ω = 0 формируется зона нечувствительности по управлению из-за влияния момента трогания $M_т$:

$$N_{ун} = \frac{M_т}{C_м K_т}. \quad (5)$$

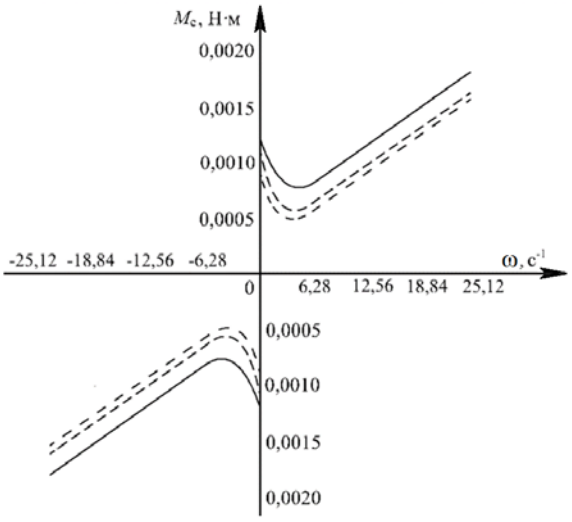


Рис. 2. Графики зависимости момента сопротивления от угловой скорости вращения ротора УДМ

Из рис. 1 видно, что рассмотренный способ управления имеет простую техническую реализацию, поэтому в настоящее время широко используется в различных УДМ.

Для повышения точности выходных характеристик УДМ необходимо исключить влияние моментов сопротивления и трогания на функцию управления, этого можно добиться либо их компенсацией, либо внедрением непосредственного управления по динамическому моменту.

Компенсация моментов сопротивления и трогания заключается в суммировании функции управле-

ния с дополнительным сигналом, равным моменту сопротивления [5]. Однако в связи с нестабильностью и нелинейностью момента сопротивления [6] полностью компенсировать его не удается.

Непосредственное управление [7–9] обеспечивает управление динамическим моментом путем регулирования углового ускорения вращения ротора в соответствии с выражением

$$M_{\text{д}} = J_{\text{о}}\varepsilon. \quad (6)$$

Функциональная схема, реализующая данный способ управления (рис. 3), содержит дополнительный модуль регулятора динамического момента РДМ, выполненный, например, на основе цифрового интегратора сигнала управления. Регулятор динамического момента обеспечивает пропорциональное равенство

$$\varepsilon = K_{\varepsilon} N_y, \quad (7)$$

из которого следует пропорциональный закон управления, не зависимый от момента сопротивления вращению:

$$M_{\text{д}} = KN_{\text{у}}. \quad (8)$$

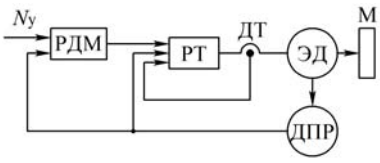


Рис. 3. Функциональная схема непосредственного регулятора момента УДМ

Результаты внедрения модуля регулятора динамического момента, полностью построенного на отечественной элементной базе в УДМ с кинетическим моментом 2 Н·м·с и динамическим моментом 0,05 Н·м, показали, что регулировочная характеристика имеет линейный характер, а разрешающая способность прибора составляет 0,000025 Н·м/ед. Расчетная погрешность крутизны регулировочной характеристики по результатам испытаний составила не более 0,05%. Масса модуля РДМ не превышает 120 г, а потребляемая мощность – 0,4 Вт. При этом существенно расширился функционал прибора – возможны три режима управления: по электромагнитному, кинетическому и динамическому моментам [10].

Снижение возмущающих моментов УДМ

Наряду с динамическим моментом УДМ создает и знакопеременные возмущающие моменты [11–13], которые возбуждаются поступательными и угловыми колебаниями главной центральной оси инерции неуравновешенного ротора и подшипниковых опор, содержащих собственные подвижные части: наружное кольцо, шарики, сепаратор [14, 15].

Подшипники качения являются источником вибраций широкого спектра, вызванных отклонениями их геометрических форм и размеров в пределах допусков. Наиболее существенные из них – зазоры, радиальный и осевой бой колец, овальность, гранность и конусность колец, разноразмерность, овальность и гранность шариков, допуски в гнездах сепараторов, волнистость и шероховатость дорожек качения. Основные причины подшипниковых вибраций и соответствующие им частоты приведены в таблице.

Частоты вибраций шарикоподшипника

Причина	Частота, Гц
Овальность колец подшипника	$\frac{2n}{60}$
Разноразмерность шариков	$\frac{r_1}{r_1+r_2}\frac{z}{2}\frac{n}{60}$
Зазоры в гнездах сепаратора, неуравновешенность сепаратора	$\frac{1}{2}\left(1-\frac{d_{\text{ш}}}{D_0}\right)\frac{n}{60}$
Периодическое изменение жесткости подшипника при перекатывании тел качения	$\frac{z}{2}\left(1-\frac{d_{\text{ш}}}{D_0}\right)\frac{n}{60}$,
Овальность и гранность тел качения	$\frac{D_0}{d_{\text{ш}}}\left(1-\frac{d_{\text{ш}}^2}{D_0^2}\right)\frac{z}{2}\frac{kn}{60}$
Волнистость колец подшипника	$\frac{m}{2}\left(1\pm\frac{d_{\text{ш}}}{D_0}\right)\frac{n}{60}$
n – частота вращения ротора, об/мин; r_1, r_2 – радиусы дорожек качения внутреннего и наружного колец; z – число тел качения; D_0 – диаметр центров тел качения; $d_{\text{ш}}$ – диаметр тел качения; k – число граней; m – число волнистостей по окружности дорожки качения внутреннего или наружного кольца	

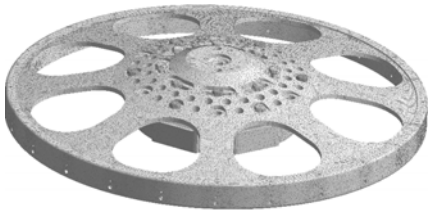
Снижение возмущающих воздействий УДМ, обусловленных вибрациями подшипникового узла, достигается за счет применения прецизионных радиально-упорных подшипников (классов точности 2 и 4) с дополнительными требованиями по уровню вибраций, Кроме того, упругое поджатие колец шарикоподшипника позволяет повысить жесткость подшипникового узла, увеличить собственные частоты роторной системы и тем самым снизить возмущающие моменты.

Помимо обеспечения достаточной жесткости подшипникового узла, необходимо, чтобы собственные конструктивные частоты ротора не лежали в рабочем диапазоне частоты вращения ротора УДМ (0…n). Требование к собственным частотам ротора $f_{\text{р}}$ можно записать следующим образом:

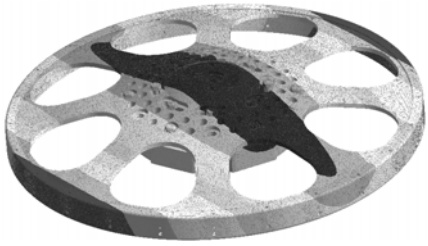
$$f_{\text{р}} = (1{,}3...1{,}5)\frac{\pi n}{30}. \quad (9)$$

Одновременно с этим требованием ротор должен иметь минимально возможные массогабаритные характеристики и достаточные коэффициенты запаса по прочности и текучести, исключающие возможность его разбалансировки и разрыва в процессе вращения.

Для оптимизации конструкции ротора, наиболее полно удовлетворяющей вышеперечисленным требованиям, проводится конечно-элементное моделирование динамики роторной системы, в результате которого определяются ее собственные частоты (рис. 4), в том числе и в виде диаграмм Кэмпбелла, перемещения, деформации и напряжения в конструкции ротора.



а



б

Рис. 4. Конечно-элементное моделирование динамики ротора: *а* – конечно-элементная модель; *б* – результаты моделирования в виде моды колебаний, соответствующей первой собственной частоте

Амплитуда возмущающих моментов в основном определяется остаточным дисбалансом ротора. Поэтому снижение возмущающих моментов напрямую зависит от качества проведения балансировки ротора УДМ.

Для повышения точности, помимо применения прецизионного балансировочного оборудования, балансировку ротора осуществляют в собственных шарикоподшипниках в составе УДМ, что позволяет в определенной степени компенсировать подшипниковые вибрации. Кроме того, ряд конструктивных мер, в том числе и изготовление деталей, входящих в роторную систему, из материалов с одинаковыми коэффициентами теплового расширения, обеспечивает стабильность балансировки в течение всего срока службы УДМ.

Интеллектуализация функций УДМ

В настоящее время благодаря появлению радиационно стойких отечественных электрорадиоизделий, в частности ПЛИС и микропроцессоров, возможно создание интеллектуальных УДМ.

Интеллектуализация предполагает качественно новые функциональные возможности УДМ, основные из которых следующие:

– автомониторинг работы узлов, оптимизация структуры и программного обеспечения в различных условиях применения УДМ и полномасштабный объем телеметрической информации;

– защита от пониженного напряжения, включая защиту от плавного снижения напряжения питания;

– защита чувствительных микросхем от тиристорного эффекта;

– ограничение пускового тока;

– целевое управление динамическим, электромагнитным, кинетическим моментами с погрешностью 0,1% и длительностью переходного процесса не более 0,5 мс;

– парирование ошибок в кодах управления и обмена информации;

– контроль и ограничение кинетического момента в предельных режимах работы УДМ;

– контроль и адаптация температурных режимов работы составных частей УДМ;

– защита источника электропитания от воздействия энергии рекуперации в тормозных режимах УДМ, которая включается при увеличении напряжения на входе прибора и ограничивает создание динамического момента до тех пор, пока двигатель не выйдет из генераторного режима или в сети не появится достаточная нагрузка.

Благодаря данным особенностям интеллектуальные УДМ обладают рядом существенных технических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с традиционными: они адаптивны, имеют широкие возможности гибкой настройки, управления и контроля параметров функционирования.

Заключение

Таким образом, на сегодняшний день основными перспективными направлениями развития УДМ являются внедрение прямого управления по динамическому моменту, интеллектуализация, снижение возмущающих моментов. Данные направления успешно реализуются в АО «НПЦ «Полюс» при создании современных УДМ.

Литература

1. Пат. 124079 РФ, МПК H 02 K 7/02. Электродвигатель-маховик / Ю.Г. Гладышев, Г.Н. Гладышев, В.П. Лянзбург (все РФ). – № 2012114338 / 07; заявл. 11.04.12; опубл. 10.01.13. – Бюл. № 1.

2. Пат. 142222 РФ, МПК H 02 K 7/02. Электродвигатель-маховик / Ю.Г. Гладышев, Г.Н. Гладышев, В.П. Лянзбург (все РФ). – № 2014103076 / 07; заявл. 29.01.14; опубл. 20.06.14. – Бюл. № 17.

3. Пат. 137710 РФ, МПК H 02 K 5/02, H 02 K 7/02. Электродвигатель-маховик / Ю.Г. Гладышев, Г.Н. Гладышев, В.П. Лянзбург (все РФ). – № 2013135406 / 07; заявл. 26.07.13; опубл. 27.02.14. – Бюл. № 6.

4. Иванющенко А.А. Проблемы миниатюризации двигателей-маховиков для космических аппаратов класса микро / А.А. Иванющенко, Ю.Г. Гладышев, П.А. Алексанов // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (Томск, 12–13 апр. 2018 г.) / АО «НПЦ «Полюс». – Томск, 2018. – С. 176–179.

5. Дмитриенко А.С. Способ компенсации момента сопротивления двигателей маховиков / А.С. Дмитриенко, О.Ю. Завьялова, А.А. Сосин // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: матер. III науч.-техн. конф. молодых специалистов ОАО «ИСС». – Железногорск, 2014. – С. 72–73.

6. Михайлов Е.М. Момент трения в шарикоподшипниках изделий для космических аппаратов // Вопросы электромеханики. – 2014. – Т. 140. – С. 3–6.

7. Пат. 1840286 РФ, МПК H 02 P 7/28. Устройство управления двигателем-маховиком / В.П. Лянзбург, А.К. Зенков (РФ). – № 2215375 / 09; заявл. 07.01.77; опубл. 27.08.06. – Бюл. № 24.

8. Пат. 2609673 РФ, H 02 P 6/08, H 02 P 6/12, H 02 P 6/18. Способ регулирования частоты вращения электродвигателя / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин, В.П. Лянз-

бург (все РФ). – № 2015112503; заявл. 06.04.15; опубл. 02.02.17. – Бюл. № 4.

9. Пат. 2521617 РФ, МПК H 02 P 7/28. Способ управления динамическим моментом двигателя-маховика / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин. – № 2012133007/07; заявл. 01.08.2012; опубл. 10.07.2014. – Бюл. № 4.

10. Балковой Н.Н. Модуль прецизионного цифрового регулятора динамического момента двигателя-маховика // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (Томск, 12–13 апр. 2018 г.) / АО «НПЦ «Полюс». – Томск, 2018. – С. 161–164.

11. Vitelli M. A process to verify the microvibration and pointing stability requirements for the BepiColombo mission / M. Vitelli, B. Specht, F. Boquet // International Workshop on Instrumentation for planetary missions. – 2012. – P. 1–5.

12. Smet G. Managing reaction wheel microvibration on a high resolution EO small spacecraft / G. Smet, G. Richardson, S. McLaren, A. Haslehurst // 15th European Space Mechanisms & Tribology Symposium. – 2013. – P. 1–8.

13. Le M.P. Microdisturbances in reaction wheels // PhD dissertation. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2017. – 166 p.

14. Никифоров А.Н. Проблемы колебаний и динамической устойчивости быстровращающихся роторов // Вестник науч.-техн. развития. – 2010. – № 3 (31). – С. 31–53.

15. Леонтьев М.К. Динамика ротора в подшипниках качения / М.К. Леонтьев, В.А. Карасев, О.Ю. Потапова, С.А. Дегтярев // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2006. – № 4 (7). – С. 40–45.

Поляков Мирослав Вадимович
Инженер-конструктор акционерного общества
«Научно-производственный центр «Полюс»,
аспирант Инженерной школы неразрушающего контроля
и безопасности (ИШ НКиБ)
Национального исследовательского
Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-66-52
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Дмитриенко Антон Сергеевич
Вед. инж. акционерного общества
«Научно-производственный центр «Полюс»
Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-66-52
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Завьялова Ольга Юрьевна
Канд. техн. наук, нач. лаб. акционерного общества
«Научно-производственный центр «Полюс»
Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-66-52
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Лянзбург Владимир Петрович
Канд. техн. наук, зам. гл. конструктора,
нач. отд. акционерного общества
«Научно-производственный центр «Полюс»
Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-66-52
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Гладышев Герман Николаевич
Канд. техн. наук, нач. лаб. (до 2017 г.)
акционерного общества
«Научно-производственный центр «Полюс»
Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-66-52
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Балковой Николай Николаевич
Вед. инж. акционерного общества
«Научно-производственный центр «Полюс»
Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-66-52
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Polyakov M.V., Dmitrienko A.S., Zav'yalova O.Yu.,
Lyanzburg V.P., Gladyshev G.N., Balkovoy N.N.

Reaction wheels: the state-of-the-art and prospectives

The paper presents the state-of-the-art and the prospective lines of development of reaction wheels used in the attitude and orbit control system of spacecraft. Authors give a detailed description of scientific and engineering problems, arising from adoption of dynamic torque control, weight and disturbances reduction. The peculiarities, coupled with application of reaction wheel in small and heavy satellites, are noted. The advantages of smart reaction wheels are described.

Keywords: reaction wheel, spacecraft, state-of-the-art, prospective.
doi: 110.21293/1818-0442-2018-21-3-109-114

References

1. Gladyshev Yu.G., Gladyshev G.N., Lyanzburg V.P. *Elektrodvigatel'-makhovik* [Reaction wheel]. Patent RF, no. 124 079, 2013.

2. Gladyshev Yu.G., Gladyshev G.N., Lyanzburg V.P. *Elektrodvigatel'-makhovik* [Reaction wheel]. Patent RF, no. 142 222, 2014.

3. Gladyshev Yu.G., Gladyshev G.N., Lyanzburg V.P. *Elektrodvigatel'-makhovik* [Reaction wheel]. Patent RF, no. 137 710, 2014.

4. Ivanyushchenko A.A., Gladyshev Yu.G., Aleksanov P.A. Problemy miniatyurizatsii dvigateley-makhovkov dlya kosmicheskichekh apparatov klassa mikro [Issues of reaction wheel miniaturization for microsatellites]. Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva: tez. dokl. nauch. tekhn. konf. molodykh spetsialistov [*Electronic and electromechanical systems and apparatuses*. Proc. of the sci.-techn. conf.]. Tomsk, 2018, pp. 176–179.

5. Dmitrienko A.S., Zav'yalova O.Yu, Sosin A.A. Sposob kompensatsii momenta soprotivleniya dvigateley-makhovikov [Method of friction torque compensation in reaction wheels]. Razrabotka, proizvodstvo, ispytaniya i ekspluatatsiya kosmicheskikh apparatov i system [*Development, production, testing and operation of spacecraft and systems*. Proc. of the III sci.-techn. conf.]. Zheleznogorsk, 2014, pp. 72–73.

6. Mikhailov E.M. [Friction torque of aerospace ball bearing]. *Voprosy elektromekhaniki*, 2014, vol. 140, pp. 3–6 (in Russ.).

7. Lyanzburg V.P., Zenkov A.K. *Ustroystvo upravleniya dvigatelem-makhovikom.* [Control unit of reaction wheel]. Patent RF, no. 1 840 286, 2006.

8. Balkovoy N.N., Muravyatkin Yu.E., Lyanzburg V.P. *Sposob regulirovaniya chastoty vrashcheniya elektrodvigatelya* [Method of motor speed adjustment]. Patent RF, no. 2 609 673, 2017.

9. Balkovoy N.N., Muravyatkin Yu.E. *Sposob upravleniya dinamicheskim momentom dvigatelya-makhovika* [Method of reaction wheel dynamic torque control]. Patent RF, no. 2 012 133 007, 2014.

10. Balkovoy N.N. Modul' pretsizionnogo tsifrovogo regulyatora dinamicheskogo momenta dvigatelya-makhovika [Precision digital controller of reaction wheel dynamic torque]. Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva: tez. dokl. nauch. tekhn. konf. molodykh spetsialistov [*Electronic and electromechanical systems and apparatuses*. Proc. of the sci.-techn. conf.]. Tomsk, 2018, pp. 161–164.

11. Vitelli M., Specht B., Boquet F. A process to verify the microvibration and pointing stability requirements for the BepiColombo mission, *International Workshop on Instrumentation for planetary missions*, 2012, pp. 1–5.

12. Smet G., Richardson G., McLaren S., Haslehurst A. Managing reaction wheel microvibration on a high resolution EO small spacecraft. *15th European Space Mechanisms & Tribology Symposium*, 2013, pp. 1–8.

13. Le. M.P. Micro-disturbances in reaction wheels // *PhD dissertation. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven*, 2017, 166 p.

14. Nikiforov A.N. [Oscillations, dynamic stability and vibration damping problems of high-speed rotors]. *Vestinik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2010, no. 3 (31), pp. 31–53 (In Russ.).

15. Leont'ev M.K., Karasev V.A., Potapova O. Yu., Degtyarev S.A. [Dynamics of rotor with rolling bearing]. Vibraciya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita, 2006, no. 4 (7), pp. 40–45.

Miroslav V. Polyakov
PhD student, School of Non-destructive testing & Security,
National Research Tomsk Polytechnic University.
Design Engineer,
Stock Company «Scientific & Industrial Centre «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: polyakovmir91@gmail.com

Anton S. Dmitrienko
Principal engineer,
Stock Company «Scientific & Industrial Centre «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: info@polus-tomsk.ru

Olga Yu. Zav'yalova
PhD, Head of laboratory,
Stock Company «Scientific & Industrial Centre «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: info@polus-tomsk.ru

Vladimir P. Lyanzburg
PhD, deputy chief designer, head of department,
Stock Company «Scientific & Industrial Centre «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: info@polus-tomsk.ru

German N. Gladyshev
PhD, till 2017 – Head of laboratory,
Stock Company «Scientific & Industrial Centre «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: info@polus-tomsk.ru

Nikolay N. Balkovoy
Principal engineer,
Stock Company «Scientific & Industrial Centre «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: info@polus-tomsk.ru