

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ С КОМПЕНСАЦИЕЙ СОБСТВЕННЫХ ПОМЕХОВЫХ МОМЕНТОВ

Балковой Н.Н.

*Научно-производственный центр «Полюс»,  
пр. Кирова, 56в, Томск, 634050, Россия  
e-mail: info@polus-tomsk.ru  
e-mail: balkovoy.nn@gmail.com*

Предложена классификация двигателей-маховиков, и проанализированы их типы. Исследованы возможности применения двигателей-маховиков, компенсирующих собственные помеховые моменты. Разработана их математическая модель, которая интегрирована в модель управляемого вращательного движения космического аппарата. Проведено сравнение функционирования двигателей-маховиков с компенсацией собственных помеховых моментов и приборов, управляемых по электромагнитному моменту.

*Ключевые слова:* двигатель-маховик, компенсация внутренних помеховых моментов, классификация двигателей-маховиков.

### Введение

Большое распространение в качестве исполнительных органов системы ориентации и стабилизации (СОиС) космического аппарата (КА) получили инерционные электромеханические исполнительные органы — двигатели-маховики (ДМ). Функционально задача управления ДМ заключается в формировании управляющего динамического момента пропорционально сигналу управления, что, в свою очередь, сводится к управлению ускорением маховика.

Вследствие тенденций уменьшения шага дискретизации выходного динамического момента ДМ и повышения требований к точности СОиС КА увеличилось влияние момента сопротивления  $M_c$  и момента трогания  $M_T$  на переходный процесс выходного динамического момента ДМ, что оказывает непосредственное влияние на СОиС. Поэтому в настоящее время для получения оптимальных характеристик функционирования СОиС КА актуально проведение тщательного анализа и моделирования как отдельных ее составляющих, так и всей системы в целом с учетом потенциальных возмущающих и помеховых моментов.

В последние годы, с возрастанием возможностей вычислительных устройств, стали изменяться подходы к управлению двигателями-маховиками. Большое внимание уделяется созданию приборов, обеспечивающих компенсацию собственных помеховых моментов [1]. Такая возможность обеспечи-

вается при использовании в составе прибора точных измерителей положения ротора (к примеру, датчиков Холла, магнитных или оптических энкодеров) и мощного вычислителя, которые зачастую не обладают требуемой радиационной стойкостью.

В статье сравнительный анализ ДМ проводится с акцентом на особенности применения в составе СОиС КА разработанных в России приборов нового поколения, компенсирующих собственные помеховые моменты. Данные приборы используют отечественные радиационно-стойкие компоненты в связке с надежными вращающимися трансформаторами для определения положения ротора. Кроме того, предлагаемый подход к компенсации помеховых моментов позволяет применять менее производительные вычислительные устройства в составе прибора и обеспечивать более быстрый переходный процесс формирования динамического момента.

### Классификация способов формирования управляющего воздействия двигателей-маховиков

В качестве критерия, по которому предлагается классифицировать ДМ, рассмотрим способ формирования управляющего момента. Согласно этому критерию ДМ можно разделить на четыре типа по реализации пропорциональной зависимости между кодом управления и следующими моментами:

- электромагнитным (косвенный способ);
- динамическим с помощью обратной связи по ускорению (прямой способ);

— динамическим на основе электромагнитного момента и обратной связи по углу с компенсацией отклонений от эталонной траектории движения вала (комбинированный способ);

— кинетическим с помощью обратной связи по угловой скорости.

Приборы первых трех типов формируют реактивные управляющие моменты благодаря развиваемому ускорению маховика (в зарубежной литературе используется термин «reaction wheel»).

ДМ первого типа отличаются небольшой, по сравнению с другими типами приборов, постоянной времени. То есть время от подачи сигнала на создание управляющего момента до его реализации сравнительно мало (определяется лишь быстродействием интерфейсной и силовой частей блока электроники). Малая постоянная времени является преимуществом таких приборов. Однако при управлении электромагнитным моментом помеховые моменты (например, от вязкого и сухого трения на валу электродвигателя) не компенсируются. Это обстоятельство вынуждает применять в составе СОиС КА алгоритм [2], который обеспечивал бы их оценку и компенсацию с целью минимизации статической ошибки. Кроме того, у данного типа ДМ в процессе управления имеется особое состояние — прохождение ротором околонулевых угловых скоростей. Под действием момента трогания при малом управляющем моменте маховик может «залипнуть» в одном угловом положении, что на определенный интервал времени будет равносильно размыканию цепи управления и приведет в дальнейшем к существенным возмущениям, перерегулированию и автоколебаниям в контуре угловой стабилизации.

ДМ второго типа имеет лучшие характеристики при прохождении околонулевых угловых скоростей по сравнению с прибором первого типа. При этом постоянная времени у такого ДМ значительно (в сотни раз) больше, чем у прибора первого типа, и в разы больше, чем у ДМ третьего типа. Этот факт влияет на выбор параметров системы управления и качество переходных процессов контура угловой стабилизации. В то же время процесс формирования динамического момента у многих приборов данного типа зачастую не является апериодическим и характеризуется существенным перерегулированием.

Третий тип ДМ объединяет в себе преимущества двух предыдущих и при этом имеет сравнительно небольшую постоянную времени, которая относится только к переходному процессу компенсации возмущающих воздействий. Основная составляющая управляющего момента пропорциональна коду управления, который задает уровень тока в

фазах двигателя. Таким образом, основная часть момента реализуется точно так же, как в приборах первого типа.

Приборы четвертого типа часто применяются в качестве одноступенных гиросtabilизаторов (за рубежом используется термин «momentum wheel»). По способу применения в составе СОиС КА они существенно отличаются от приборов первых трех типов и в данной работе не рассматриваются.

Наиболее перспективны ДМ третьего типа, однако возможности и особенности их применения ни в отечественной, ни в зарубежной литературе еще не освещены, что и должна восполнить данная статья. Ключевые задачи при этом — моделирование работы СОиС КА и сравнение ДМ с компенсацией собственных помеховых моментов с приборами первого типа, являющимися классическими по принципу управления.

### Модель управляемого вращательного движения КА с ДМ

Принцип работы ДМ с комбинированной системой управления детально описан [3, 4]. При моделировании работы СОиС КА с таким прибором требуется моделировать функционирование:

- интерфейсной и силовой частей ДМ [5, 6];
- электрической машины на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами [7–9];
- синусно-косинусного вращающегося трансформатора, определяющего угловое положение ротора ДМ и его угловую скорость как производную;
- аналого-цифровых преобразователей и алгоритма CORDIC [10–12], конвертирующего ортогональные гармонические сигналы синусно-косинусного вращающегося трансформатора в линейно изменяющийся пилообразный код угла;
- эталонной цифровой модели ДМ, работающей на частоте 20 МГц и выполняющей функцию двойного интегрирования кода управления [4];
- контура регулирования тока (частота коммутации ключей 40 кГц);
- устройства синхронизации и частотно-фазового дискриминатора [13–18].

С целью создания актуальной и более простой математической модели прибора был проведен анализ переходного процесса формирования динамического момента ДМ, который показал, что передаточную функцию компенсирующего и основного (управления электромагнитным моментом) контуров можно с высокой точностью представить в виде апериодических звеньев. По результатам экспериментальной отработки были получены значения постоянных времени, которые представлены в таблице.

Характеристики двигателя-маховика

Характеристика	Значение
Момент инерции ротора $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,0031847
Максимальная угловая скорость $\Omega$ , рад/с	628
Цена единицы младшего разряда управляющего сигнала, Н·м	2,5e-5
Номинальный момент сухого трения $M_{с.т.ном}$ , Н·м	12e-4
Коэффициент вязкого трения $K_{в.т}$ , Н·м/(рад/с)	1,433e-5
Максимальный управляющий момент, Н·м	0,05
Постоянная времени контура компенсации $\tau_2$ , с	0,4
Постоянная времени контура формирования электромагнитного момента $\tau_1$ , мкс	500
Коэффициент статического дисбаланса ротора $K_c$ , г·см	1
Коэффициент динамического дисбаланса ротора $K_d$ , г·см <sup>2</sup>	3,5

Учитывая вышесказанное, уравнения динамики управляемого вращательного движения КА с ДМ (для упрощения рассмотрим соосную со связанной системой координат КА схему установки трех ДМ) запишем в виде [19, 20]

$$\begin{cases} \dot{\bar{\omega}} = J^{-1}(\bar{M}_\Sigma + \bar{M}_{в.д} - \dot{\bar{h}} - \bar{\omega} \times (J\bar{\omega} + I(\bar{\Omega} + \bar{\omega}))); \\ \dot{\bar{\Omega}} = I^{-1}(\bar{M}_{с.т}(\bar{\Omega}) - \bar{K}_{в.т}\bar{\Omega}) + \bar{U}_\Sigma - \dot{\bar{\omega}}; \\ \tau_2 \dot{\bar{U}}_к + \bar{U}_к = I^{-1}(\bar{M}_{с.т}(\bar{\Omega}) + \bar{K}_{в.т}\bar{\Omega}) - \dot{\bar{\omega}}; \\ \tau_1 \dot{\bar{U}}_\Sigma + \bar{U}_\Sigma - \bar{U}_к = \bar{N}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{\omega}$  — вектор угловых скоростей КА;  
 $J$  — тензор инерции КА;

$\bar{M}_\Sigma$  — вектор суммарного внешнего возмущающего момента;

$\bar{M}_{в.д}$  — проекция вектора возмущающего воздействия системы ДМ от динамического и статического дисбалансов роторов;

$\dot{\bar{h}}$  — вектор кинетических моментов ДМ;

$I$  — диагональная матрица с элементами — моментами инерции роторов ДМ;

$\bar{\Omega}$  — вектор угловых скоростей роторов ДМ;

$\bar{M}_{с.т}(\bar{\Omega})$  — функция вектора моментов сухого трения на валу ДМ;

$\bar{K}_{в.т}$  — вектор коэффициентов вязкого трения на валу ДМ;

$\tau_2$  — постоянная времени компенсирующего контура ДМ;

$\bar{U}_к$  — вектор управления компенсирующего контура электродвигателя ДМ;

$\tau_1$  — постоянная времени основного контура управления ДМ;

$\bar{U}_\Sigma$  — суммарный вектор управляющих сигналов, подаваемых на электродвигатель ДМ;

$\bar{N}$  — вектор кодов управления, пропорциональный желаемому изменению динамического момента ДМ.

Уравнения для определения возмущения ротора в осях ДМ (с учетом того, что ось  $X$  — это ось вращения ротора) выглядят следующим образом: от динамического дисбаланса

$$M_{дY}(t) = K_d \omega^2 \cos(\omega t); M_{дZ}(t) = K_d \omega^2 \sin(\omega t), \quad (2)$$

где  $\omega$  — угловая скорость ротора ДМ;

$K_d$  — коэффициент динамического дисбаланса, Н·м·с<sup>2</sup>;  
от статического дисбаланса

$$F_Y(t) = K_c \omega^2 \cos(\omega t); F_Z(t) = K_c \omega^2 \sin(\omega t),$$

где  $K_c$  — коэффициент статического дисбаланса, Н·с<sup>2</sup>.

В этом случае момент от ДМ будет определяться из соотношения

$$\bar{M}_B = \bar{r} \times \bar{F}_B, \quad (3)$$

где  $\bar{F}_B$  — проекция возмущающей силы на оси КА;

$\vec{r}$  — радиус-вектор из центра масс ДМ в центр масс аппарата.

Тогда в уравнении (1)

$$\vec{M}_{в.д} = \vec{M}_д + \vec{M}_в.$$

Уравнения динамики дополним уравнением кинематики в кватернионной форме:

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2} \Lambda \otimes \bar{\omega}, \tag{4}$$

где  $\Lambda$  — текущий кватернион ориентации КА.

Кроме того, при моделировании учитывается ряд нелинейностей ДМ: насыщение, связанное с достижением предельной угловой скорости ротора и зоны нечувствительности при прохождении его нулевой угловой скорости (для модели ДМ без компенсации помеховых моментов). При прохождении околонулевых угловых скоростей момент сухого трения ротора  $M_{с.т}(\Omega)$  отличен от номинального значения момента сухого трения  $M_{с.т.ном}$  [21]. Эта зависимость представлена условием:

если  $|\Omega| < \varepsilon$ ,

$$\text{то } M_{с.т}(\Omega) = (M_{тр} - M_{с.т.ном})f(\Omega) + M_{с.т.ном}, \tag{5}$$

иначе  $M_{с.т}(\Omega) = M_{с.т.ном} \text{sign}(\Omega)$ ,

где  $\varepsilon$  — малая положительная величина (при моделировании принято  $\varepsilon = 10^{-5}$  рад/с);

$M_{тр}$  — момент сопротивления началу вращения ротора;

$f(\Omega)$  — функция, определяющая переходный процесс начала движения ротора ДМ при прохождении околонулевой угловой скорости.

Для рассматриваемого прибора эта функция определяется соотношением, которое получено из анализа экспериментальных данных:

$$f(\Omega) = \frac{e^{(10^4 \Omega + 1)^{-1}} - 1}{e - 1}. \tag{6}$$

При моделировании использовался ДМ с максимальным кинетическим моментом 2 Н·м·с и максимальным динамическим моментом 50 мН·м [22]. Характеристики рассматриваемого прибора представлены в вышеприведенной таблице.

С целью анализа достижимых точностных и динамических характеристик СОиС КА при использовании данного прибора проведем моделирование СОиС КА в режиме стабилизации в условиях идеальных измерений углового положения и угловой скорости.

Помимо компенсации помеховых моментов, СОиС КА должна компенсировать внешние возмущающие моменты, также влияющие на статическую ошибку.

Существуют различные способы компенсации статической ошибки в контуре угловой стабилизации КА [23-25]. Рассмотрим способ, при котором контур управления КА замыкается пропорционально-интегрально-дифференцирующим регулятором:

$$\vec{N} = \vec{K}_\phi \Delta \bar{\varphi} + \vec{K}_\omega \bar{\omega} + \vec{K}_I \int \Delta \bar{\varphi} dt,$$

где  $\Delta \bar{\varphi} = [2dQ_x \ 2dQ_y \ 2dQ_z]^T$ .

В свою очередь,  $dQ = \Lambda \otimes \tilde{Q}$ , где  $Q$  — требуемый кватернион ориентации КА.

Для качественной оценки применения прибора в составе СОиС КА будем считать в уравнении (1)  $\vec{M}_\Sigma = \text{const}$  относительно инерциального пространства.

**Результаты моделирования**

В качестве объекта управления исследован КА с тензором инерции

$$J = \begin{bmatrix} 31 & 0 & 0 \\ 0 & 24 & 0 \\ 0 & 0 & 20 \end{bmatrix} \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Осевые моменты роторов ДМ идентичны и соответствуют представленному в таблице.

Интервал формирования управляющих сигналов бортовой цифровой вычислительной машиной принимался равным 100 мс. Вектор внешнего возмущающего момента относительно инерциальной системы координат

$$\vec{M}_\Sigma = [10^{-5} \ -2 \cdot 10^{-5} \ -8 \cdot 10^{-5}]^T \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Для решения системы уравнений (1) выбран метод Рунге—Кутты 4-го порядка с постоянным шагом интегрирования  $h = 10^{-6}$  с.

Координаты положения центра масс роторов ДМ относительно центра масс КА:

$$\vec{r}_{ДМx} = [-0,545 \ -0,0445 \ -0,4545]^T \text{ м};$$

$$\vec{r}_{ДMy} = [0,0775 \ 0,221 \ 0,0175]^T \text{ м};$$

$$\vec{r}_{ДМz} = [-0,651 \ -0,651 \ -1,145]^T \text{ м}.$$

Требуемый кватернион ориентации  $Q$  — единичный. Рассмотрим случай нулевых начальных условий и малых угловых скоростей ротора:

$$\bar{\omega}(0) = [0 \ 0 \ 0]^T \text{ } ^\circ/\text{с};$$

$$\Lambda(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T;$$

$$\bar{\Omega}(0) = [1 \ 1 \ 0,5]^T \text{ рад/с.}$$

В данном случае наиболее отчетливо проявляется ситуация прохождения околонулевых угловых скоростей роторов. При этом в движение систему приводит внешнее возмущающее воздействие.

Результаты расчетов для СОиС при использовании ДМ с контуром компенсации собственных возмущающих моментов представлены на рис. 1 и 2. На рис. 3 и 4 показаны аналогичные результаты для системы с ДМ первого типа, управляемым только

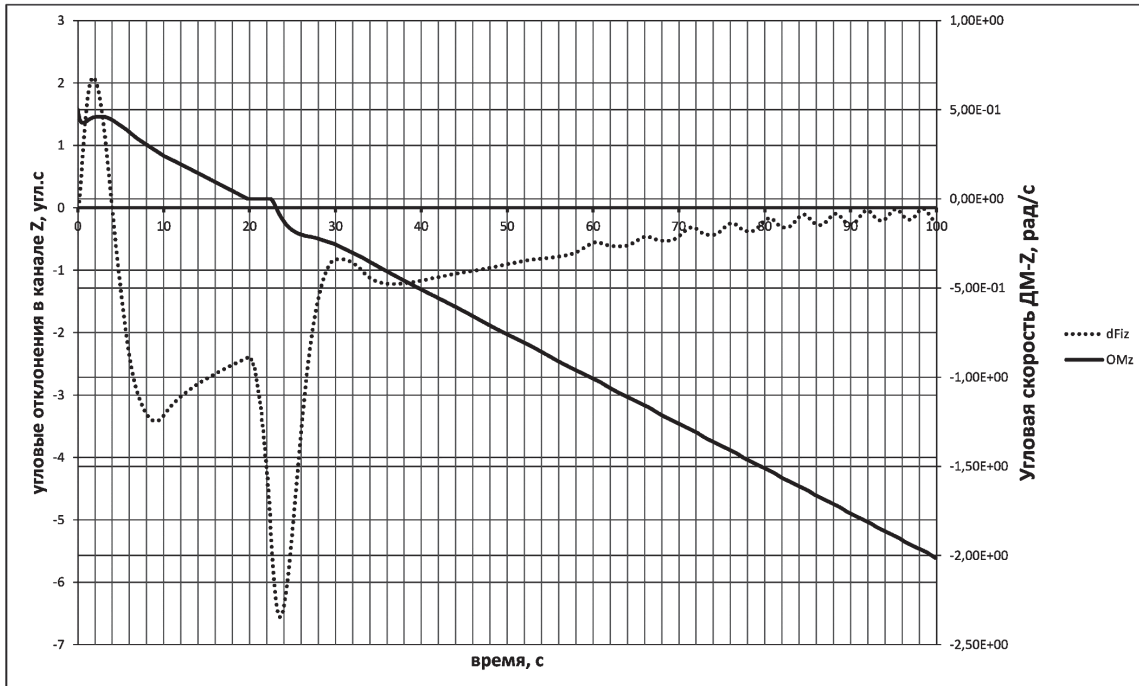


Рис. 1. Угловые отклонения КА в канале Z в зависимости от времени и угловая скорость стабилизирующего ДМ с компенсацией собственных возмущений

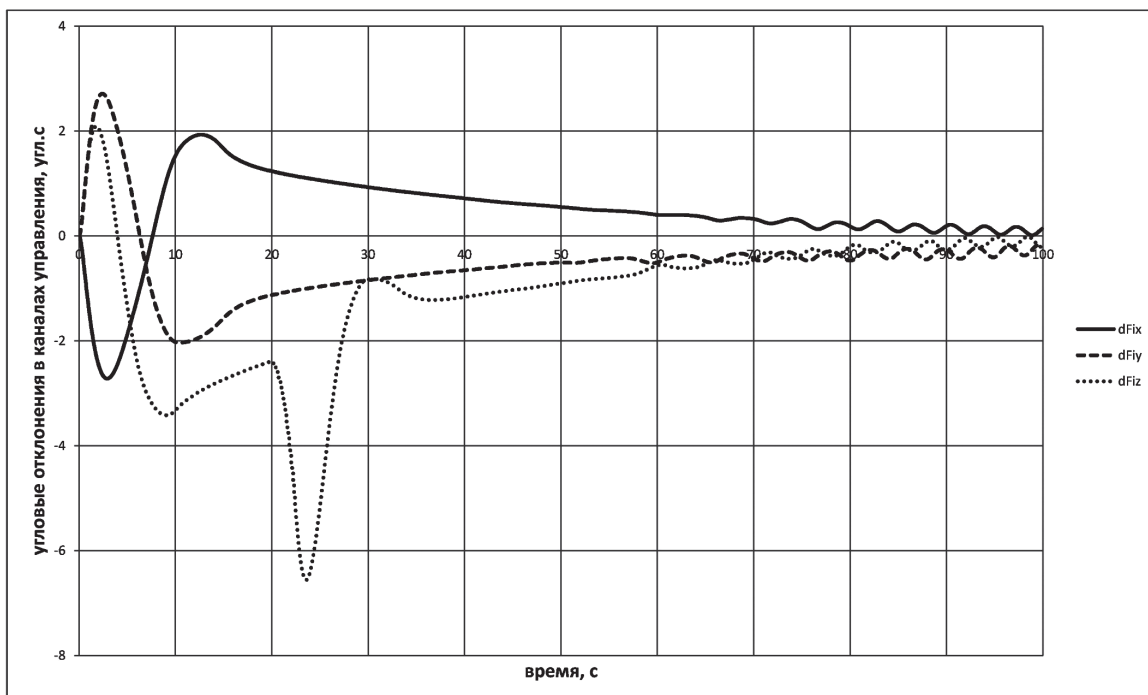


Рис. 2. Угловые отклонения КА в трех каналах управления при использовании ДМ с компенсацией собственных возмущений



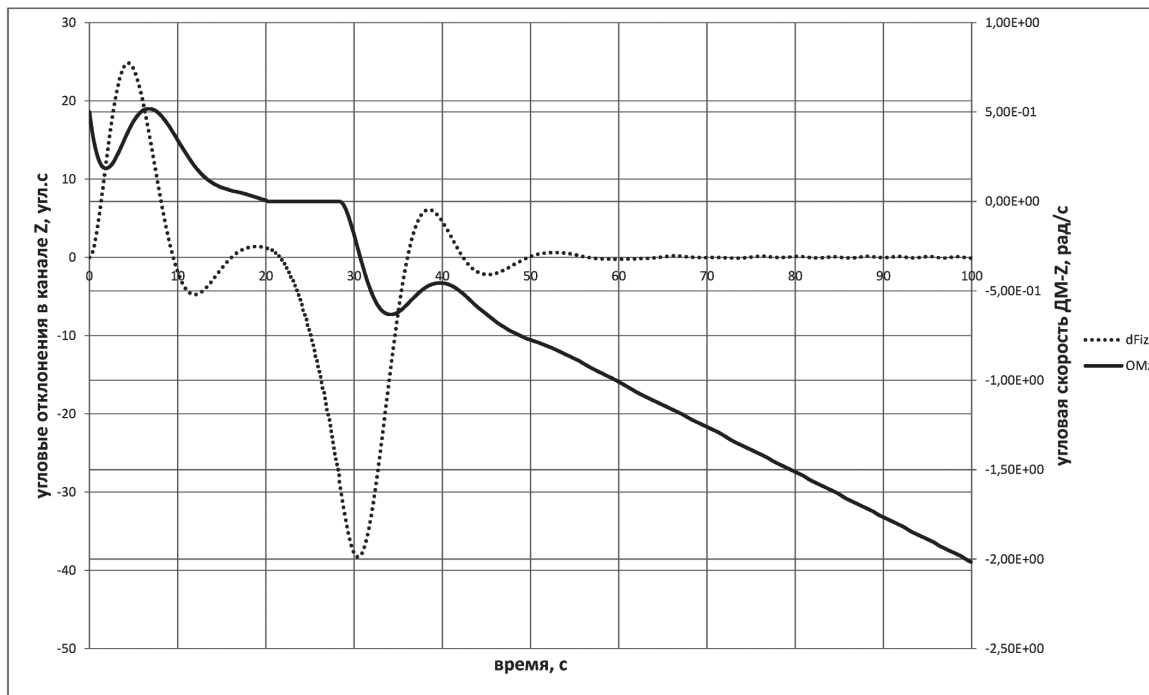


Рис. 3. Угловые отклонения КА в канале Z в зависимости от времени и угловая скорость стабилизирующего ДМ, управляемого только по электромагнитному моменту

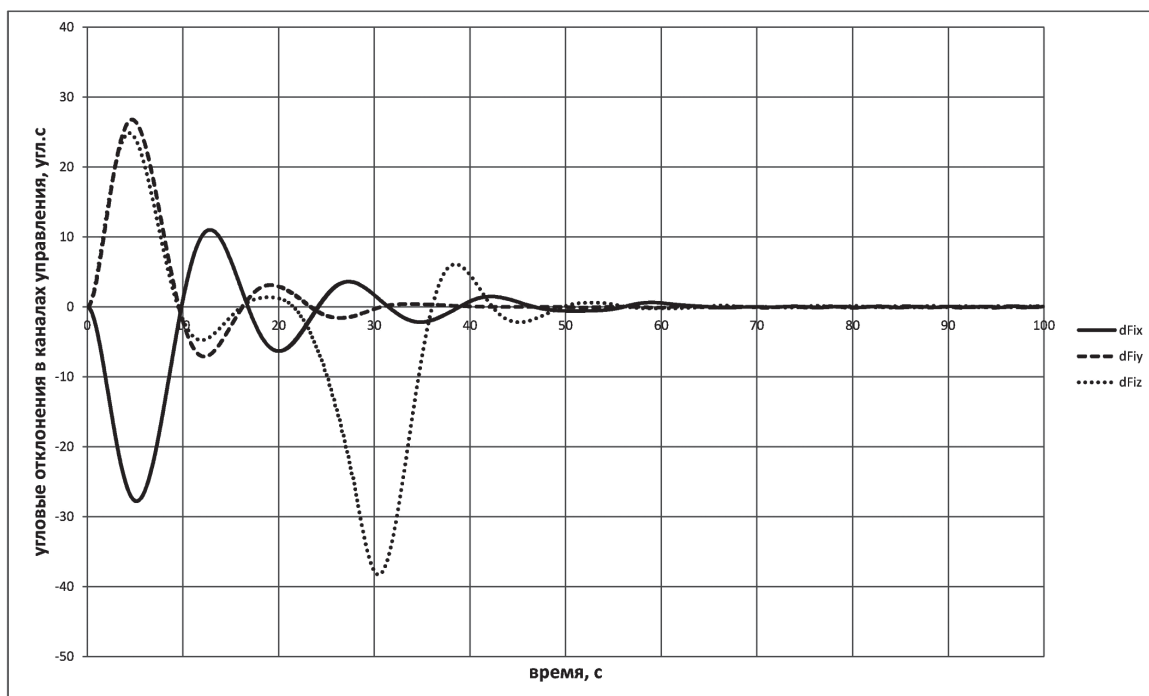


Рис. 4. Угловые отклонения КА в трех каналах управления при использовании ДМ, управляемого только по электромагнитному моменту

по электромагнитному моменту. При этом в обоих вариантах рассмотрен случай прохождения нулевой угловой скорости ротора по каналу Z.

Анализ результатов показывает, что для СОиС КА, в которой используется только ДМ с управлением электромагнитным моментом, приходится примерно десятикратно увеличивать коэффициент усиления при интегральной составляющей сигнала

ла в законе управления относительно системы, в которой используется ДМ с компенсацией внутренних помеховых моментов. Такое увеличение требуется для компенсации статической ошибки за время не более 100 с. При этом, как видно из графиков, время «залипания» ротора значительно больше, чем при использовании ДМ с комбинированной системой управления. Вследствие этого всплеск

по стабилизационным отклонениям оказывается примерно в пять раз больше. Кроме того, поскольку интегральная составляющая сигнала выше, увеличивается колебательность системы.

### Выводы

Система управления КА, имеющая в своем составе ДМ с внутренней компенсацией собственных помеховых моментов, обладает более высокими точностными и динамическими характеристиками по сравнению с СОиС, в которой используются классические ДМ. Следовательно, применение новых ДМ предпочтительнее для построения прецизионных СОиС КА, так как позволяет уменьшить «мертвую зону» по управлению, колебательность системы, а также стабилизационные отклонения углового положения, особенно в области околонулевых угловых скоростей ДМ.

Применение в составе ДМ надежных радиационно-стойких вычислительных устройств и измерителей углового положения ротора российского производства в совокупности с предложенным новым подходом формирования динамического момента обеспечивают конкурентоспособность отечественного приборостроения.

### Библиографический список

1. *Sinclair D., Grant C.C., Zee R.E.* Enabling reaction wheel technology for high performance nanosatellite attitude control, 2007. URL: <http://www.digitalcommons.usu.edu/smallsat/2007/all2007/63>
2. *Hamilton B.* Methods and systems for adjusting attitude using reaction wheels. Patent US 8,918,236 B2, 23.12.2014.
3. *Балковой Н.Н., Муравяткин Ю.Е., Лянзбург В.П., Михальченко Г.Я.* Цифровой астатический электропривод систем ориентации и стабилизации космических аппаратов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. № 3(33). С. 168-175.
4. *Балковой Н.Н.* Цифровая модель управляющего двигателя-маховика // Материалы V Юбилейной Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», посвященной памяти Г.А. Сипайлова. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. С. 275-280.
5. *Бутаков А.Н., Булдаков В.Н., Филонова С.Ю., Чеснокова Т.Ю., Плеснивый А.Н., Лянзбург В.П.* Математическая модель маховичного электромеханического исполнительного органа // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. трудов НПЦ «Полюс». Томск: МГП «РАСКО» при изд-ве «Радио и связь», 2001. С. 340-347.
6. *Завьялова О.Ю., Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф.* Разработка имитационной модели электромеханического исполнительного органа системы ориентации и стабилизации космического аппарата // XV Международная научная конференция «Решетневские чтения»: Сборник трудов. Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева, 2011. Ч. 1. № 4. С. 173-174.
7. *Соколовский Г.Г.* Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. — М.: Академия, 2006. — 272 с.
8. *Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е.* К вопросу определения потерь на вихревые токи в постоянных магнитах высокооборотных электромеханических преобразователей энергии // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 143-150.
9. *Журавлев С.В., Зечихин Б.С., Кузьмичев Р.В.* Аналитический расчет магнитного поля в активной зоне синхронных машин с постоянными магнитами // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 197-209.
10. *Захаров А.В., Хачумов В.М.* Алгоритмы CORDIC. Современное состояние и перспективы // Программные системы: теория и приложения. 2004. Т. 26. № 6. С. 353-372.
11. *Байков В.Д., Смолов В.Б.* Аппаратурная реализация элементарных функций в ЦВМ. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1975. — 96 с.
12. *Andraka R.* A survey of CORDIC algorithms for FPGA based computers // FPGA'98 Proceedings of the 1998 ACM/SIGDA sixth international symposium on Field programmable gate arrays, pp. 191-200. DOI: 10.1145/275107.275139
13. *Фалеев М.В.* Особенности построения электроприводов с импульсной и цифровой фазовой синхронизацией // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2009. № 3. С. 1-4.
14. *Бубнов А.В.* Анализ влияния алгоритма работы импульсного частотно-фазового дискриминатора на динамику электропривода с фазовой синхронизацией // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 6. С. 139-143.
15. *Фалеев М.В., Ширяев А.Н.* Развитие фазовых дискриминаторов для гибридных электроприводов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2008. № 3. С. 36-39.
16. *Бубнов А.В.* Многофункциональное логическое устройство сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 4. С. 153-157.
17. *Бубнов А.В., Катрич П.А.* Моделирование электропривода с фазовой синхронизацией в Matlab-Simulink // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 3. С. 166-169.
18. *Бубнов А.В., Чудинов А.Н., Емашов В.А.* Эффективный способ регулирования электропривода с фазовой синхронизацией // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. № 5. С. 46-49.
19. *Телепнев П.П., Ефанов В.В., Кузнецов Д.А., Ермаков В.Ю.* Анализ режимов работы космического аппарата «Спектр-Р» для различных алгоритмов управ-

- ления приводом остронаправленной антенны // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3(24). С. 100-103.
20. *Бортаковский А.С., Пегачкова Е.А.* Синтез управления активной стабилизацией спутника на основе необходимых условий оптимальности логико-динамических систем // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. № 2. С. 28-35.
  21. *Шрейнер Р.Т.* Системы подчиненного регулирования электроприводов: Учебное пособие. — Екатеринбург: Рос. гос. проф.-пед. ун-т, 2008. — 279 с.
  22. *Балковой Н.Н., Бутаков А.Н., Филонова С.Ю., Лянзбург В.П.* Интеллектуальный двигатель-маховик с управлением по динамическому моменту // Научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства»: Сборник тезисов докладов (Томск, 12-13 апр. 2018). Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2018. С. 137-140.
  23. *Обухов В.А., Покрышкин А.И., Попов Г.А., Яшина Н.В.* Управление движением и ориентацией космического аппарата на высокоэллиптической орбите // Вестник Московского авиационного института. 2007. Т. 14. № 4. С. 22-29.
  24. *Беляев Б.Б., Ульяшин А.И., Ковалев Ф.А.* Система точного гидирования // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5(26). С. 108-113.
  25. *Левский М.В.* Задача оптимального управления пространственным разворотом космического аппарата за фиксированное время // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 5. С. 186-194.

## ANALYSIS OF APPLICATION SPECIFICS OF A REACTION WHEEL WITH INTRINSIC DISTURBING MOMENTS' COMPENSATION

**Balkovoy N.N.**

*Scientific & Industrial Center "Polyus",  
56v, Kirova av., Tomsk, 634050, Russia  
e-mail: info@polus-tomsk.ru  
e-mail: balkovoy.nn@gmail.com*

### Abstract

Inertial electromechanical actuators in the form of reaction wheels (RW) found widespread occurrence as actuators of spacecraft attitude control system. The RW's task consists in forming a dynamic controlling moment proportionally to a control signal. This task is reduced to the RW acceleration control.

The article suggests the RW classification, describes advantages and disadvantages peculiar to each of the types. Amid all varieties of the units, reactions wheels with intrinsic disturbing moments' compensation (RWMC) are outlined as one of the most prospective types. The presented work is devoted to the study of these units' application possibilities and comparing them with classical ones, where control is performed only by the electromagnetic moment.

To study dynamic and accuracy characteristics of a spacecraft equipped with the RWMC under study, its mathematical model was developed. Analysis of the RWMC dynamic moment development transient was performed. It revealed that transfer functions of compensating and basic (electromagnetic moment control) loops may be represented with high accuracy by the aperiodic link. The time constants of these links were also obtained while the RWMC experimental testing.

The model of the controlled rotational motion accounts for the RWMC static and dynamic imbalances values, as well as the number of RWMC nonlinearities, such as saturation, associated with attaining the limiting angular speed by the rotor and the dead zone while the rotor passes the zero angular speed (for a model without disturbances compensation) etc. Modeling of the spacecraft control system operation in stabilization mode in conditions of ideal measuring of angular position and angular speed was performed to study the effect of the unit specifics on the control system operation.

The spacecraft attitude control system with RWCM was compared to classical RW. In both cases, the control system loop was closed by the PID-regulator, since external disturbances, affecting the stabilization static error value, impact the spacecraft together with disturbing moments.

The simulation results showed that RWCMs has higher accuracy and dynamic characteristics compared to the classical RW. This type of units appears more preferable for developing precise spacecraft attitude control systems, since it allows reduce the "dead zone" of control, as well as oscillation in stabilization transient, especially in the area of near-zero angular rotation speeds of the RW rotor.



**Keywords:** reaction wheel, intrinsic disturbing torques compensation, reaction wheels classification.

## References

1. Sinclair D., Grant C.C., Zee R.E. *Enabling reaction wheel technology for high performance nanosatellite attitude control*, 2007, available at: <http://www.digitalcommons.usu.edu/smallsat/2007/all2007/63>
2. Hamilton B. Methods and systems for adjusting attitude using reaction wheels. *Patent US 8,918,236 B2*, 23.12.2014.
3. Balkovoy N.N., Muravyatkin Yu.E., Lyanzburg V.P., Mikhal'chenko G.Ya. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2014, no. 3(33), pp. 168–175.
4. Balkovoy N.N. *Materialy V Yubileinoi Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii", posvyashchennoi pamyati G.A. Sipailova*. Tomsk, Tomskii politekhnicheskii universitet, 2011, pp. 275–280.
5. Butakov A.N., Buldakov V.N., Filonova S.Yu., Chesnokova T.Yu., Plesnivi A.N., Lyanzburg V.P. *Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva. Sbornik nauchnykh trudov*. Tomsk, RASKO, 2001, pp. 340–347.
6. Zav'yalova O.Yu., Kazantsev Yu.M., Lekarev A.F. XV *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Reshetnevskie chteniya"*. *Sbornik trudov*. Krasnoyarsk, Sibirskii gosudarstvennyi aerokosmicheskii universitet im. akad. M.F. Reshetneva, 2011. Part 1, no. 4, pp. 173–174.
7. Sokolovskii G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* (AC Drives with frequency control), Moscow, Akademiya, 2006, 272 p.
8. Ismagilov F.R., Vavilov V.E. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 143–150.
9. Zhuravlev S.V., Zechikhin B.S., Kuz'michev R.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 197–209.
10. Zakharov A.V., Khachumov V.M. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya*, 2004, vol. 26, no. 6, pp. 353–372.
11. Baikov V.D., Smolov V.B. *Apparaturnaya realizatsiya elementarnykh funktsii v TsVM* (Hardware implementation of elementary functions with computers), Leningrad, Leningradskii universitet, 1975, 96 p.
12. Andraka R. A survey of CORDIC algorithms for FPGA based computers. *FPGA '98 Proceedings of the 1998 ACM/SIGDA sixth international symposium on Field programmable gate arrays*, pp. 191–200. DOI: 10.1145/275107.275139
13. Faleev M.V. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2009, no. 3, pp. 1–4.
14. Bubnov A.V. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2004, vol. 307, no. 6, pp. 139–143.
15. Faleev M.V., Shiryaev A.N. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2008, no. 3, pp. 36–39.
16. Bubnov A.V. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2005, vol. 308, no. 4, pp. 153–157.
17. Bubnov A.V., Katrich P.A. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 309, no. 3, pp. 166–169.
18. Bubnov A.V., Chudinov A.N., Emashov V.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2011, no. 5, pp. 46–49.
19. Telepnev P.P., Efanov V.V., Kuznetsov D.A., Ermakov V.Yu. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2014, no. 3(24), pp. 100–103.
20. Bortakovskii A.S., Pegachkova E.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2008, vol. 15, no. 2, pp. 28–35.
21. Shreiner R.T. *Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov* (Systems of subordinate regulation of electric drives), Ekaterinburg, Rossiiskii gosudarstvennyi professional'no-pedagogicheskii universitet, 2008, 279 p.
22. Balkovoy N.N., Butakov A.N., Filonova S.Yu., Lyanzburg V.P. *Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya molodykh spetsialistov "Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva"*. *Sbornik tezisev dokladov (Tomsk, 12–13 April 2018)*. Tomsk, Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet, 2018, pp. 137–140.
23. Obukhov V.A., Pokryshkin A.I., Popov G.A., Yashina N.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2007, vol. 14, no. 4, pp. 22–29.
24. Belyaev B.B., Ul'yashin A.I., Kovalev F.A. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2014, no. 5(26), pp. 108–113.
25. Levskii M.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2009, vol. 16, no. 5, pp. 186–194.