

ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

М.Е. Браткова, А.С. Николаева, А.В. Седельников

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Обоснование. Качество приема информации с малого космического аппарата, как показали исследования, напрямую зависит от угловой скорости вращения. Чем ниже угловая скорость малого космического аппарата, тем выше достоверность информации, полученной с него. Поэтому изучение факторов, влияющих на вращательное движение малого космического аппарата, является актуальной практической задачей даже в неориентированном полете.

Цель — исследование значимости влияния различных возмущающих факторов на вращательное движение малого космического аппарата (МКА) на примере опытного образца малого космического аппарата «Аист».

Методы. Для моделирования вращательного движения опытного образца малого космического аппарата «Аист» были использованы динамические уравнения Эйлера в системе координат CXYZ:

$$\begin{cases} I_{xx}\dot{\omega}_x + I_{xy}\dot{\omega}_y - I_{xz}\dot{\omega}_z + \omega_y(I_{zz}\omega_z - I_{xz}\omega_x - I_{yz}\omega_y) - \omega_z(I_{yy}\omega_y - I_{xy}\omega_x - I_{yz}\omega_z) = M_x \\ I_{yy}\dot{\omega}_y + I_{xy}\dot{\omega}_x - I_{yz}\dot{\omega}_z + \omega_z(I_{xx}\omega_x - I_{xy}\omega_y - I_{xz}\omega_z) - \omega_x(I_{zz}\omega_z - I_{xz}\omega_x - I_{yz}\omega_y) = M_y \\ I_{zz}\dot{\omega}_z + I_{xz}\dot{\omega}_x - I_{yz}\dot{\omega}_y + \omega_x(I_{yy}\omega_y - I_{xy}\omega_x - I_{yz}\omega_z) - \omega_y(I_{xx}\omega_x - I_{xy}\omega_y - I_{xz}\omega_z) = M_z, \end{cases} \quad (1)$$

где $\hat{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}$ — тензор инерции малого космического аппарата в системе координат CXYZ,

$\vec{\varepsilon}(\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z)$ и $\vec{\omega}(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ — соответственно векторы углового ускорения и угловой скорости вращения опытного образца малого космического аппарата «Аист».

Проведем оценку значимости внешних возмущений для рассматриваемого малого космического аппарата. В рамках поставленной задачи представим возмущения следующим образом:

$$\vec{M} = \vec{M}_{aer} + \vec{M}_{grav} + \vec{M}_{mag} + \vec{M}_{cont}.$$

где $\vec{M}_{aer}$ — аэродинамический возмущающий момент; $\vec{M}_{grav}$ — гравитационный возмущающий момент; $\vec{M}_{mag}$ — магнитный возмущающий момент; $\vec{M}_{cont}$ — управляющий момент.

Рассмотрим гравитационный возмущающий момент, оценив его значение по формуле:

$$|\vec{M}_{grav}| = \left| \frac{3\mu}{r^3} \vec{e}_r \times (\hat{I} \cdot \vec{e}_r) \right| \approx 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где μ — гравитационный параметр Земли; r — радиус орбиты опытного образца малого космического аппарата

«Аист»; $\vec{e}_r$ — единичный вектор направления на центр Земли, при $r = 6871$ и $\hat{I} = \begin{bmatrix} 1,7 & -1,0 & -0,8 \\ -1,0 & 1,2 & -1,1 \\ -0,8 & -1,1 & 1,5 \end{bmatrix}$ [1].

Оценим влияние аэродинамического момента для опытного образца малого космического аппарата «Аист». По теореме об изменении кинетической энергии ее изменение будет обусловлено работами сил тяготения и аэродинамического сопротивления:

$$\begin{aligned} \Delta T &= A(\vec{G}) + A(\vec{F}_{aer}) \\ A(\vec{G}) &= m_{spacecraft} g(R_0 - R_1) \approx 1,65 \text{ МДж}. \end{aligned} \quad (2)$$

Изменение кинетической энергии:

$$\Delta T = \frac{m_{spacecraft}}{2} (v_1^2 - v_0^2) \approx 0,83 \text{ МДж.}$$

Работа силы аэродинамического сопротивления по формуле (2):

$$A(\vec{F}_{aer}) \approx -0,82 \text{ МДж.}$$

Оценим расстояние, которое преодолел опытный образец малого космического аппарата «Аист» за три года полета: $s = 2\pi \bar{R}N \approx 7 \cdot 10^{11} \text{ м.}$

Имеем оценку модуля средней аэродинамической силы и модуля аэродинамического момента:

$$\bar{F}_{aer} = \frac{A(\vec{F}_{aer})}{s} \approx \frac{0,82 \cdot 10^6}{7 \cdot 10^{11}} \approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$$

$$|\vec{M}_{aer}| = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Оценим максимальный магнитный момент, действующий на опытный образец малого космического аппарата «Аист»:

$$\vec{M}_{mag} = \sum_{j=1}^n \vec{p}_j \times \vec{B} \Rightarrow |\vec{M}_{mag}|_{max} = \left| \sum_{j=1}^n \vec{p} \right| \cdot |\vec{B}| = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Исполнительные органы системы управления движением представляют собой электромагниты [2].

Основные характеристики магнитных исполнительных органов приведены в работе [3]. Исходя из этого управляющий момент по каждому каналу можно оценить следующим образом:

$$|\vec{M}_{cont i}| = M_{cont i} \cdot \sqrt{3} = p_{max} \cdot |\vec{B}_{max}| \cdot \sqrt{3} = 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Результаты. Проведенные оценки значимости различных возмущений дали результаты, представленные в табл.

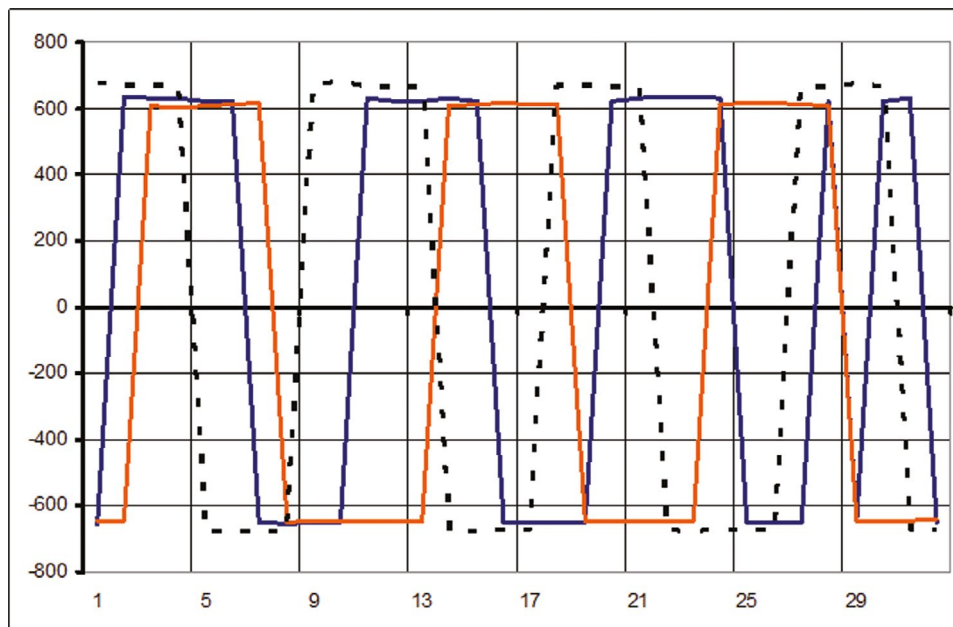


Рис. 1. Сила тока, подаваемая на магнитные исполнительные органы опытного образца малого космического аппарата «Аист», по данным телеметрической информации

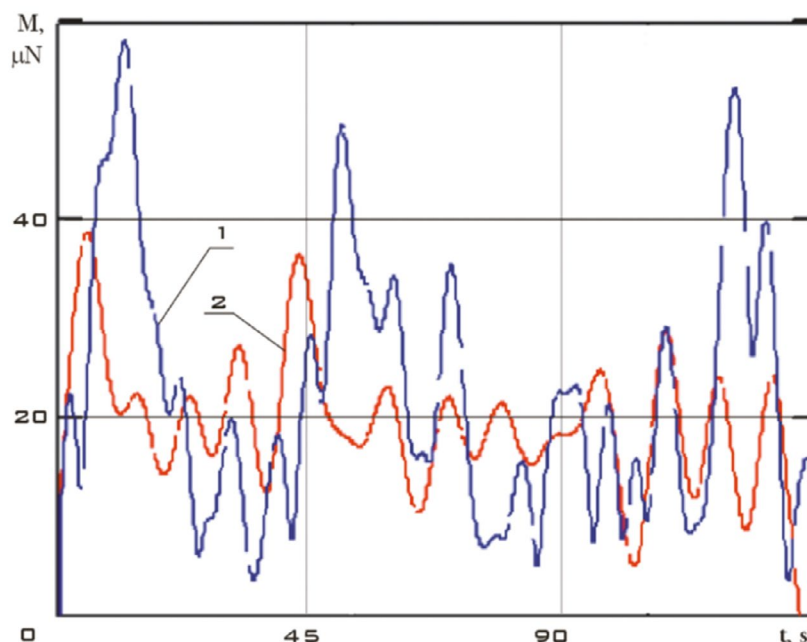


Рис. 2. Модуль возмущающего момента: 1 — на основе динамических уравнений Эйлера системы (1) с учетом всех возмущений, действующих на малый космический аппарат; 2 — с учетом только управляющего момента, в соответствии с законом изменения тока (см. рис. 1)

Таблица. Оценка возмущающих факторов

Момент	$ \vec{M}_{aer} $	$ \vec{M}_{grav} $	$ \vec{M}_{mag} $	$ \vec{M}_{cont} $
Значение, Н · м	$5 \cdot 10^{-8}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$

Далее с помощью данных измерения компонентов вектора магнитной индукции построены зависимости возмущающих моментов (рис. 2).

Выводы. В ходе работы была проведена оценка возмущающих факторов, действующих на вращательное движение малого космического аппарата, выявлено доминирующее влияние возмущений магнитного характера на вращательное движение опытного образца малого космического аппарата.

Установлена необходимость учета влияния всех магнитных возмущений, даже на участке работы магнитных исполнительных органов, для корректной оценки параметров вращательного движения малого космического аппарата.

Ключевые слова: малый космический аппарат; динамические уравнения Эйлера; аппарат «Аист»; оценка возмущающих факторов; возмущающий момент.

Список литературы

1. Sedelnikov A.V., Salmin V.V. Modeling the disturbing effect on the Aist small spacecraft based on the measurements data // Sci Rep. 2022. Vol. 12, No. 1. ID 1300. DOI: 10.1038/s41598-022-05367-9
2. Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Пияков А.В., и др. Система компенсации микроускорений малого космического аппарата АИСТ // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 4. С. 117–124. DOI: 10.7868/S0032816215040114
3. Воронов К.Е., Семкин Н.Д., Сазонов В.В., и др. Измерения параметров магнитного поля и анализ возмущений на борту малых космических аппаратов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18, № 4. С. 67–73.

Сведения об авторах:

Мария Евгеньевна Браткова — студентка, группа 1305-010303D, факультет теоретической механики; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: bratkova02@mail.ru

Александра Сергеевна Николаева — студентка, группа 1305-010303D, факультет теоретической механики; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: ezhevichka333@gmail.com

Андрей Валерьевич Седельников — научный руководитель, доктор технических наук, доцент; профессор кафедры теоретической механики; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: axe_backdraft@inbox.ru