



**САМАРСКИЙ** УНИВЕРСИТЕТ  
SAMARA UNIVERSITY

# **Разработка алгоритма разгрузки двигателя-маховика с использованием магнитных исполнительных органов**

Бормотов А.Н., Орлов Д.И.,  
Хнырева Е.С., Браткова М.Е.

Самара, 2023 г.



# Выполнение задачи ориентации МКА

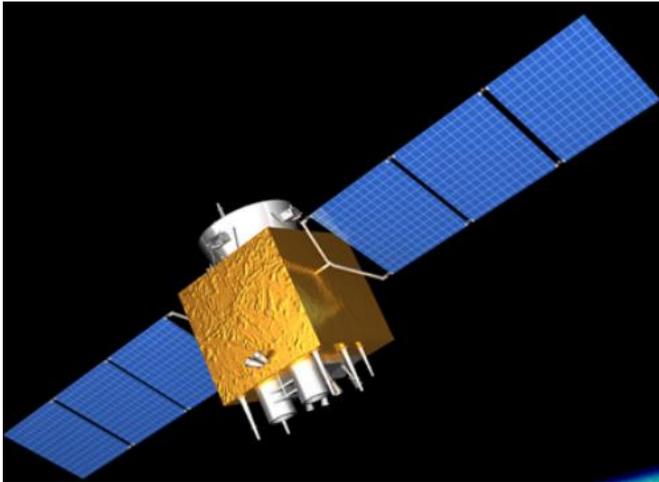


Рисунок 1 - Космический аппарат дистанционного зондирования Земли серии Yaogan

Точность стабилизации:

- по углу составляет около  $0,03^\circ$
- по угловой скорости -  $0,0001 \text{ } ^\circ/\text{с}$

+ не расходуют рабочее тело  
- накапливают кинетический момент и требуют периодической разгрузки



Рисунок 2 - Двигатель-маховик, выполненный на основе управляемого моментного бесконтактного двигателя постоянного тока



# Основные результаты работы

$$\frac{d\vec{L}_0}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{L}_0 = \vec{M}_e$$

где

(1)  $\vec{L}_0 = \vec{L} + \sum_{i=1}^n \vec{L}_i$  - кинетический момент малого космического аппарата, состоящий из кинетического момента корпуса и суммы кинетических моментов маховиков;

$\vec{\omega}$  - вектор угловой скорости вращения главной связанной с малым космическим системы координат;

$\vec{M}_e = \vec{M}_{aer} + \vec{M}_{mag} + \vec{M}_{other}$  - внешний возмущающий момент, действующий на космический аппарат

$\vec{M}_{aer}$  - аэродинамический возмущающий момент;

$\vec{M}_{mag}$  - магнитный возмущающий момент;

$\vec{M}_{other}$  - прочие возмущающие моменты).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dL_1}{dt} + \omega_y L_3 - \omega_z L_2 = M_{ex}; \\ \frac{dL_2}{dt} + \omega_z L_1 - \omega_x L_3 = M_{ey}; \\ \frac{dL_3}{dt} + \omega_x L_2 - \omega_y L_1 = M_{ez}. \end{array} \right. \quad (2)$$

где

$L_1, L_2$  и  $L_3$  - кинетические моменты маховиков, оси которых параллельны соответственно осям  $x, y$  и  $z$  главной связанной системы координат малого космического аппарата;

$\omega_x, \omega_y$  и  $\omega_z$  - проекции вектора угловой скорости в главной связанной системе координат;

$M_{ex}, M_{ey}$  и  $M_{ez}$  - проекции вектора возмущающего момента, действующего на малый космический аппарат, в главной связанной системе координат.



## Основные результаты работы

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\omega}_1 &= \frac{\omega_z I_2 \omega_2 - \omega_y I_3 \omega_3 + p_y B_z - p_z B_y}{I_1}; \\ \dot{\omega}_2 &= \frac{\omega_x I_3 \omega_3 - \omega_z I_1 \omega_1 + p_z B_x - p_x B_z}{I_2}; \\ \dot{\omega}_3 &= \frac{\omega_y I_1 \omega_1 - \omega_x I_2 \omega_2 + p_x B_y - p_y B_x}{I_3}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Где

$I_1, I_2$  и  $I_3$ ;  $\omega_1, \omega_2$  и  $\omega_3$  - моменты инерции и угловые скорости маховиков, оси которых параллельны соответственно осям  $x, y$  и  $z$  главной связанной системы координат малого космического аппарата;  $p_x, p_y$  и  $p_z$  - дипольные магнитные моменты малого космического аппарата в проекции на соответствующие оси главной связанной системы координат;  $B_x, B_y$  и  $B_z$  - проекции вектора индукции магнитного поля Земли в главной связанной системе координат

Критерий допустимости разгрузки:

$$\text{sign}(\dot{\omega}_i) = -\text{sign}(\omega_i) \quad (4)$$

Тензор инерции малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д»

$$\hat{I} = \begin{pmatrix} 37338 & 0 & 0 \\ 0 & 10111 & 0 \\ 0 & 0 & 41284 \end{pmatrix} \quad (5)$$



# Внешний вид и основные параметры МКА

Параметр	Размерность	Аист-2D
Масса	кг	530
Количество больших упругих элементов	-	2
Высота орбиты	км	490
Погрешность при ориентации вдоль одной оси по углу и угловой скорости	град	0,5
	град/с	0,01
Погрешность при ориентации вдоль трёх осей по углу и угловой скорости	град	2
	град/с	0,0005
Максимальная угловая скорость	град/с	1
Максимальное угловое ускорение	град/с <sup>2</sup>	0,15
Максимальный магнитный дипольный момент исполнительных органов	А м <sup>2</sup>	600
Осевой момент инерции двигателя-маховика	кг м <sup>2</sup>	0,32
Максимально допустимая угловая скорость вращения маховика	рад/с	600
Начальная угловая скорость при разгрузке	рад/с	100

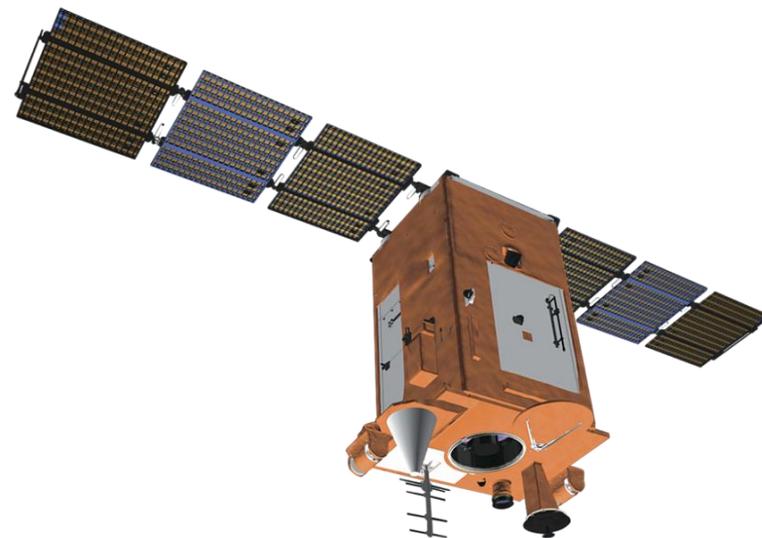


Рисунок 3 - Внешний вид малого космического аппарата «Аист-2D»

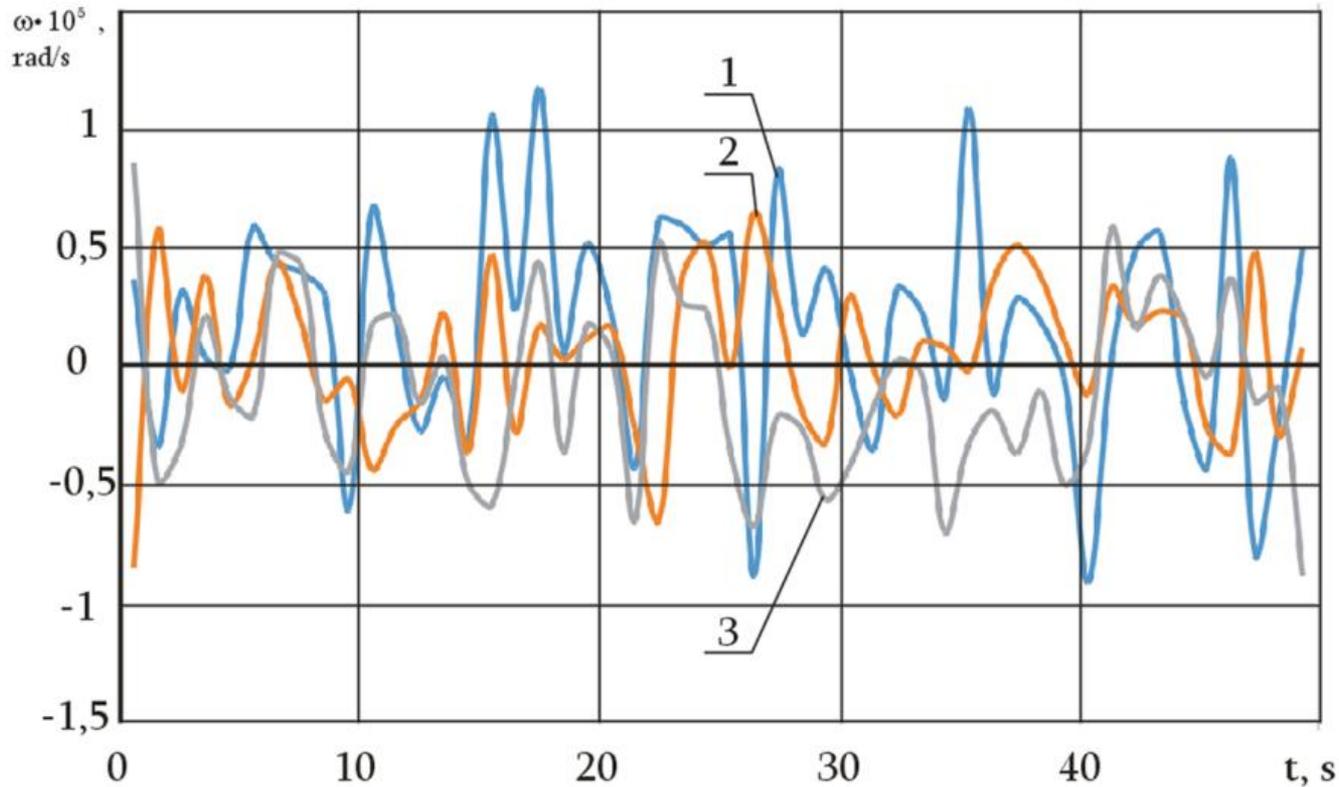


Рисунок 4 - Данные измерений вектора угловой скорости малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д»: 1 -  $\omega_x$ ; 2 -  $\omega_y$ ; 3 -  $\omega_z$



# Измерения вектора индукции магнитного поля Земли

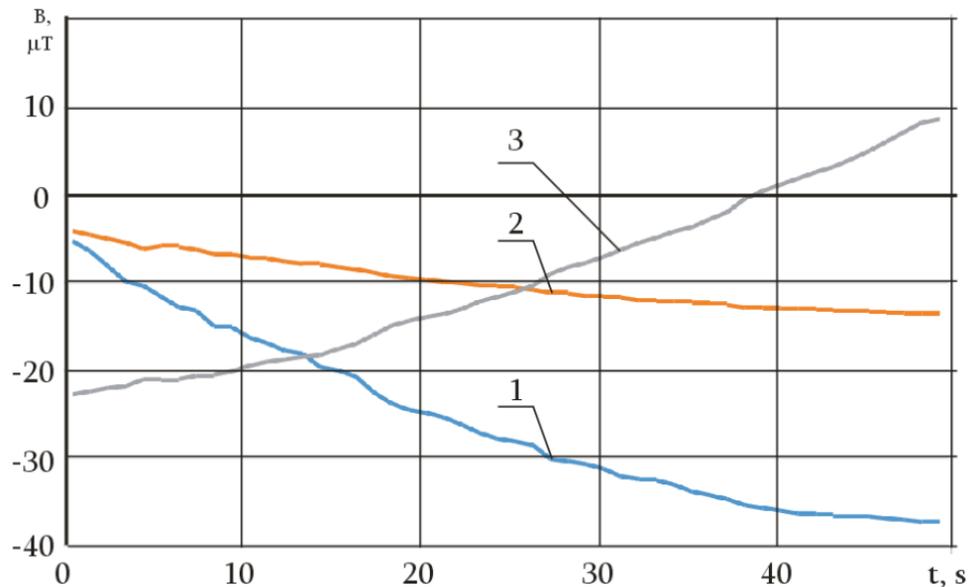


Рисунок 5 - Данные измерений вектора индукции магнитного поля Земли: 1 -  $V_x$ ; 2 -  $V_y$ ; 3 -  $V_z$



Рисунок 6 - Внешний вид магнитных исполнительных органов



# Зависимость угловой скорости маховика

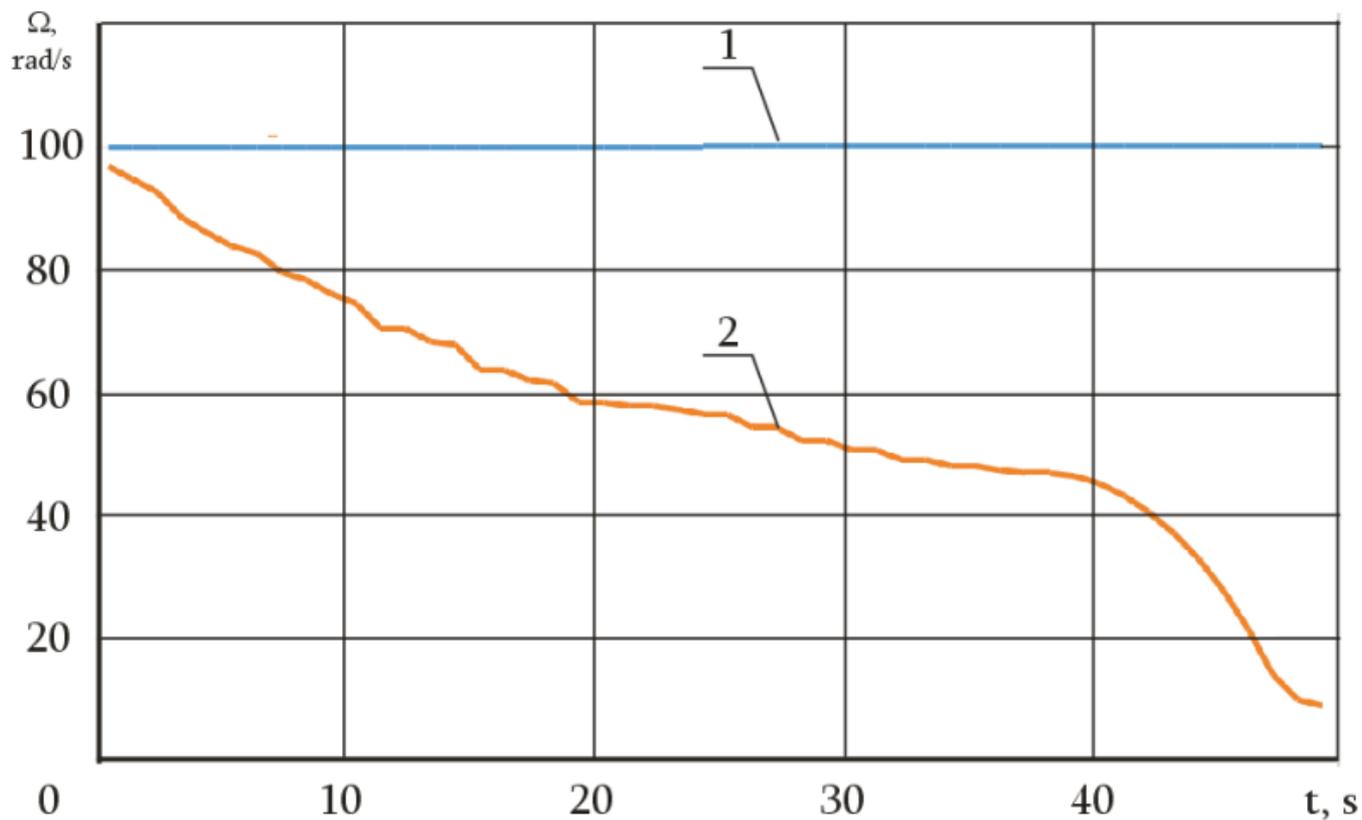


Рисунок 7 - Зависимость угловой скорости маховика от времени:  
1 - без разгрузки; 2 - с разгрузкой по предложенному алгоритму