

Протаптываем тропы: построение  
программных траекторий в задачах  
управления ориентацией космических  
аппаратов

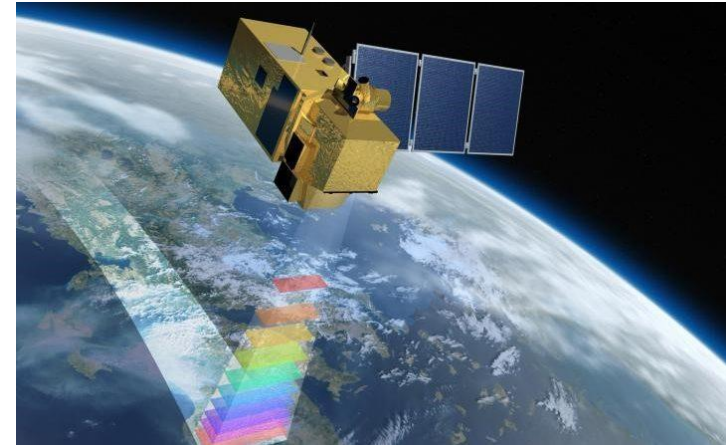
Отдел динамики космических систем (отдел 7)

Степан Ткачев

# Задача управления угловым движением

Цель – реализовать требуемый режим углового движения:

- панели солнечных батарей на Солнце
- камеру на точку интереса
- антенну на точку станции приема на Земле



Главные особенности:

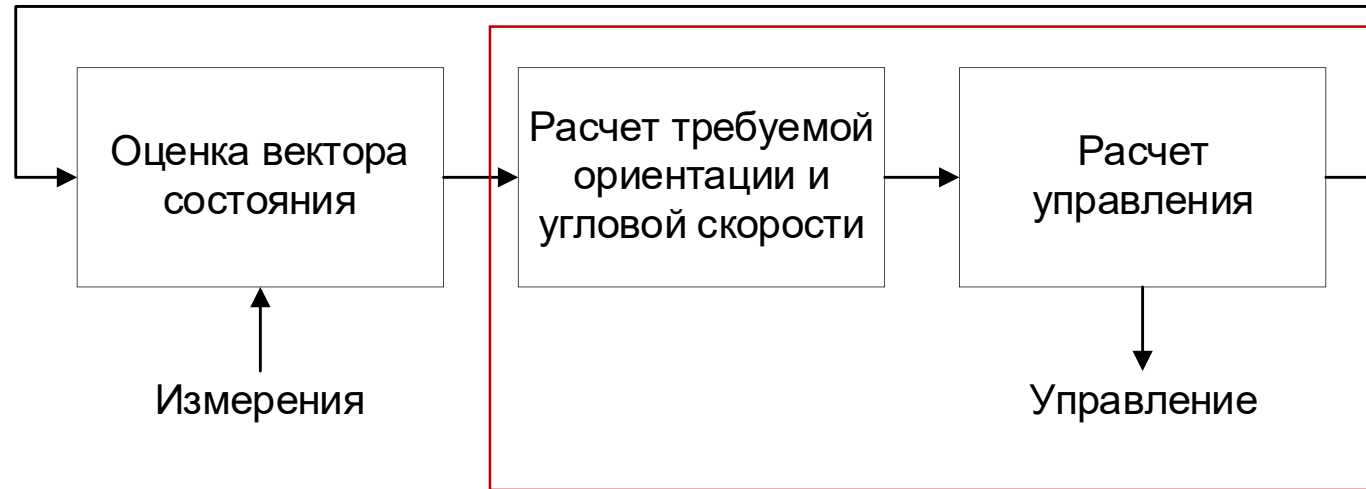
- автономность
- несколько режимов работы
- команды с Земли могут задавать режим работы системы управления, но, как правило, переключение происходит автоматически



# Схема работы системы управления



# Схема работы системы управления



# Управление (немного формул)

Динамические уравнения

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}_{\text{возм}} + \mathbf{M}_{\text{упр}}$$

Кинематические уравнения

$$\dot{\mathbf{Q}} = 0.5 \cdot \mathbf{Q} \circ \boldsymbol{\omega}$$

Управление

$$\mathbf{M}_{\text{упр}} = \mathbf{M}_{\text{комп}} + \mathbf{M}_{\text{стаб}}$$

$$\mathbf{M}_{\text{комп}} = \mathbf{M}_{\text{комп}}(\boldsymbol{\omega}_{\text{прогр}}, \mathbf{Q}_{\text{прогр}})$$

Автономность



1. Функционирование при действующих возмущениях и наличии неопределенностей
2. Ограничения на вычислительные возможности



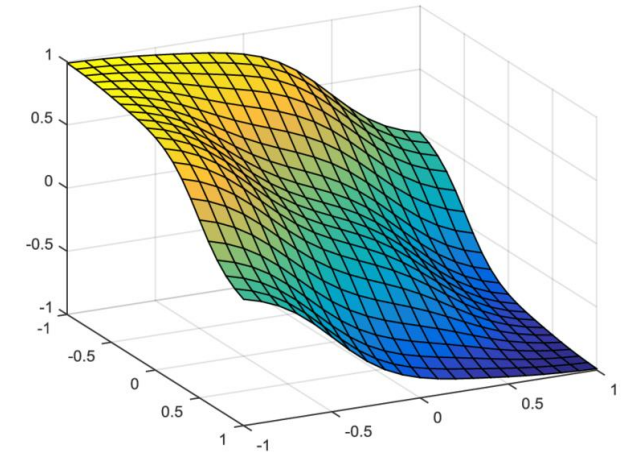
Асимптотическая устойчивость

Случай инерциальной ориентации

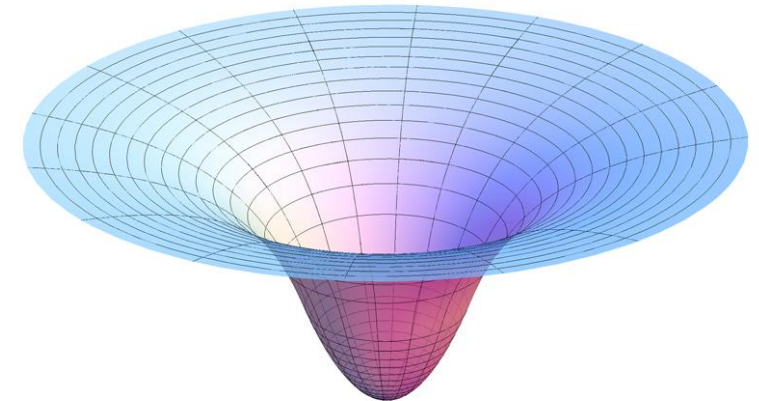
$$\boldsymbol{\omega}_{\text{прогр}} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{Q}_{\text{прогр}} = \mathbf{Q}_0 = \text{const}$$

Требуемая ориентация



Управление



# Отслеживание маршрутов на поверхности Земли

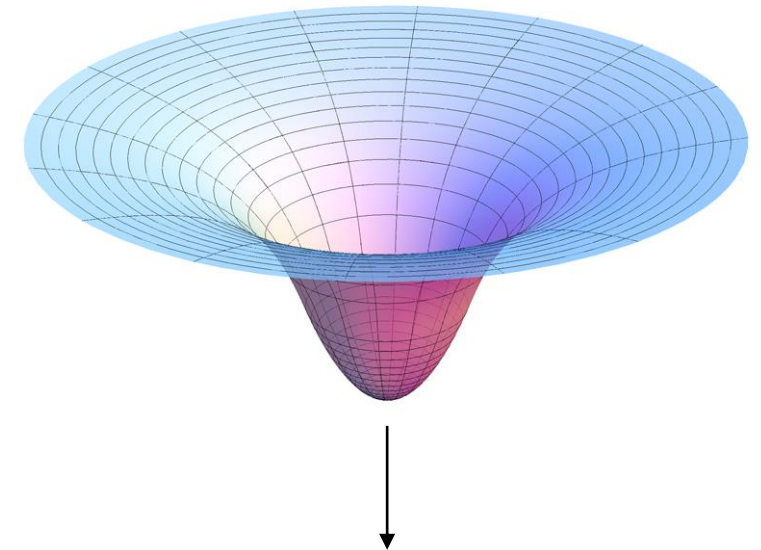
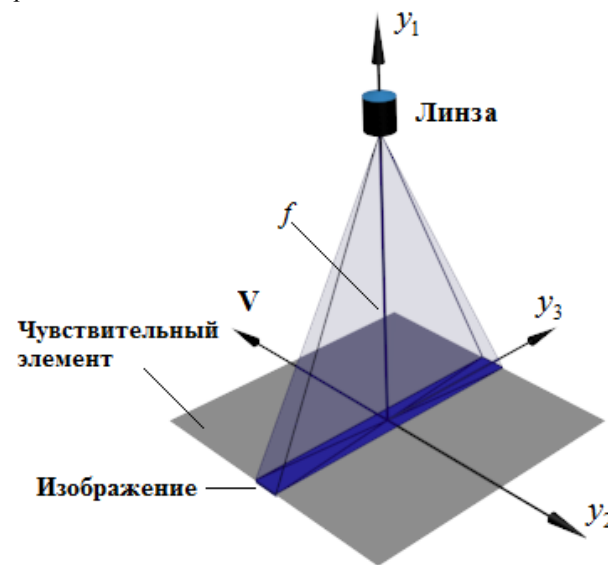
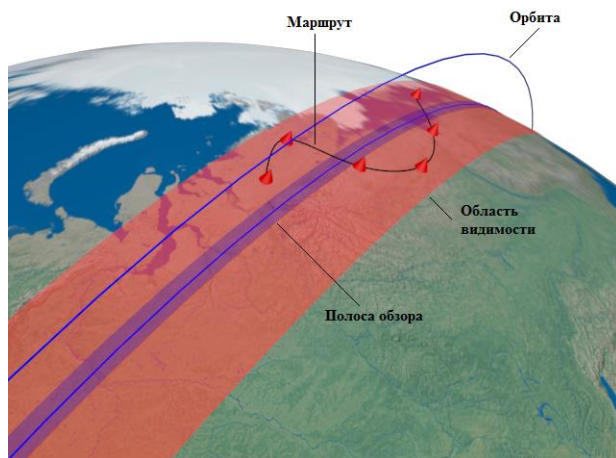
1. Точка на поверхности Земли:

- спутник движется по орбите
- Земля вращается

2. Траектория

- то же, что выше + точка движется по поверхности Земли

Всё это обеспечивает  $\omega_{прогр}(t)$ ,  $Q_{прогр}(t)$



# Нестандартная задача I. Разгрузка маховиков (I)

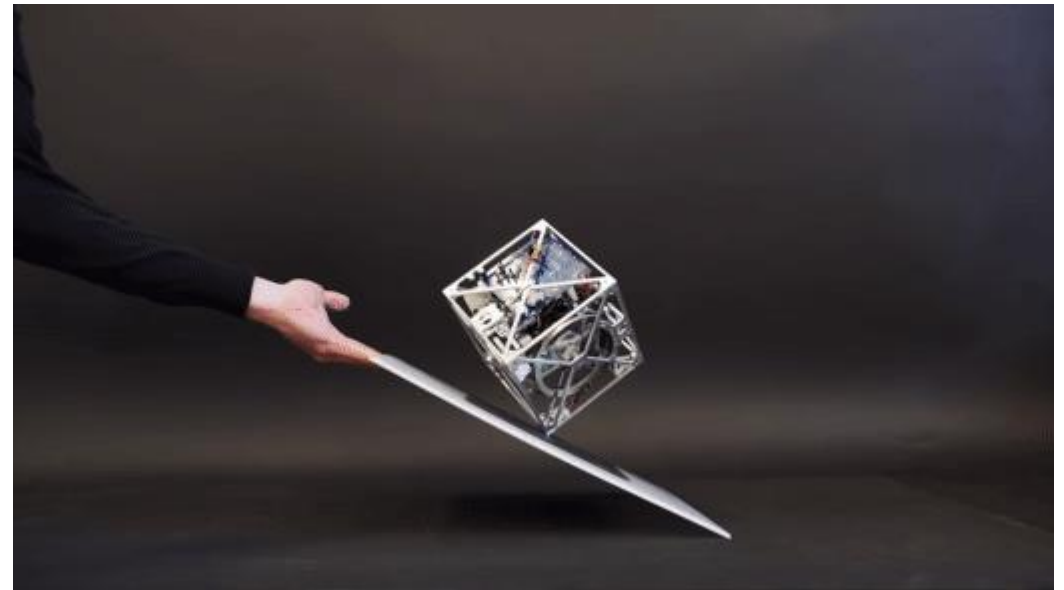
Маховик – электродвигатель + симметричная масса

Принцип работы – сохранение кинетического момента системы спутник-маховик

Основные характеристики – максимальный момент, максимальный кинетический момент

Насыщение – достижение максимальной угловой скорости собственного вращения (максимального кинетического момента)

Разгрузка – уменьшение угловой скорости маховика



# Нестандартная задача I. Разгрузка маховиков (II)

Распространенные подходы:

- использование реактивных двигателей (нужно топливо)
- использование токовых катушек (нужно магнитное поле)

Возможно использовать другие моменты внешних сил. Доступны:

- гравитационный
- аэродинамический
- момент сил светового давления

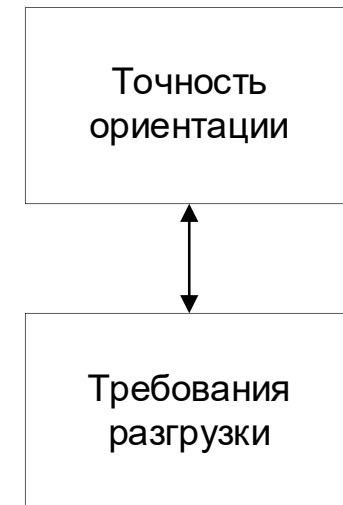
$$\mathbf{K} = \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{H}$$

$$\frac{d}{dt}(K^2) = \frac{d}{dt}(\mathbf{K}, \mathbf{K}) = 2(\mathbf{M}, \mathbf{K}), \quad \text{если } (\mathbf{M}, \mathbf{K}) < 0, \text{ то } \mathbf{K} \rightarrow \mathbf{0}$$

$$\text{при } \boldsymbol{\omega} \approx \mathbf{0} \quad \mathbf{H} \rightarrow \mathbf{0}$$

$$f \sin(\varphi + \psi) + \theta(g \sin(\varphi) - h \sin(\psi)) \rightarrow \min_{\psi, \theta, \varphi}$$

$$-\theta_{max} \leq \theta \leq \theta_{max}$$





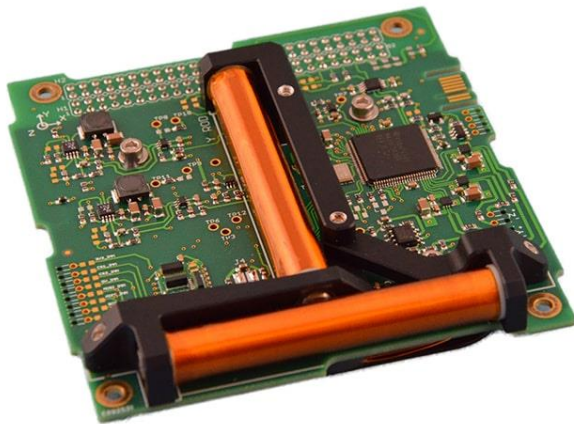
# Нестандартная задача II. Управляемое движение для токовых катушек (I)

Управляющий момент

$$\mathbf{M}_{\text{магн}} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$$

$$\mathbf{M}_{\text{магн}} \perp \mathbf{B}$$

система локально неуправляема

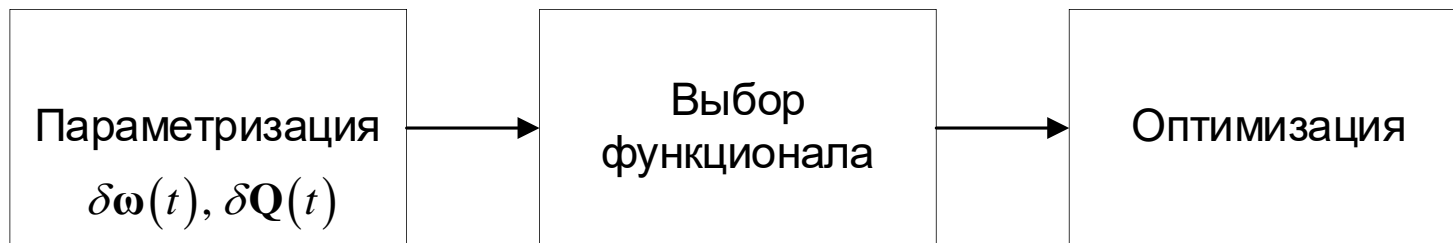


# Нестандартная задача II. Управляемое движение для токовых катушек (II)

Требуемый режим  $\omega_0(t), Q_0(t)$

$$\mathbf{B}^T \mathbf{M}_{\text{ком}}(\omega_0, Q_0) \neq 0$$

Задача найти такие  $\delta\omega(t), \delta Q(t)$ , что  $\mathbf{B}^T \mathbf{M}_{\text{ком}}(\omega_0 + \delta\omega(t), Q_0 + \delta Q(t)) \rightarrow 0$

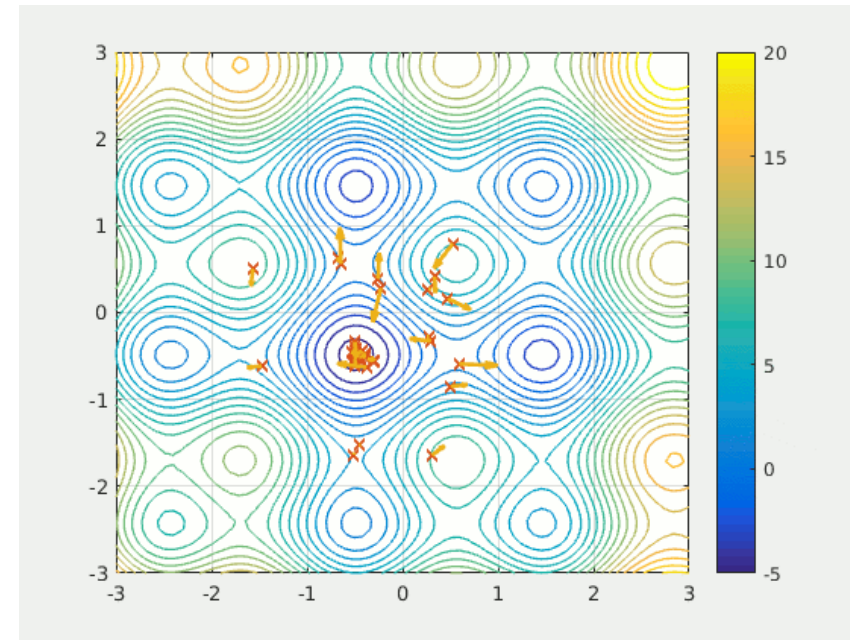
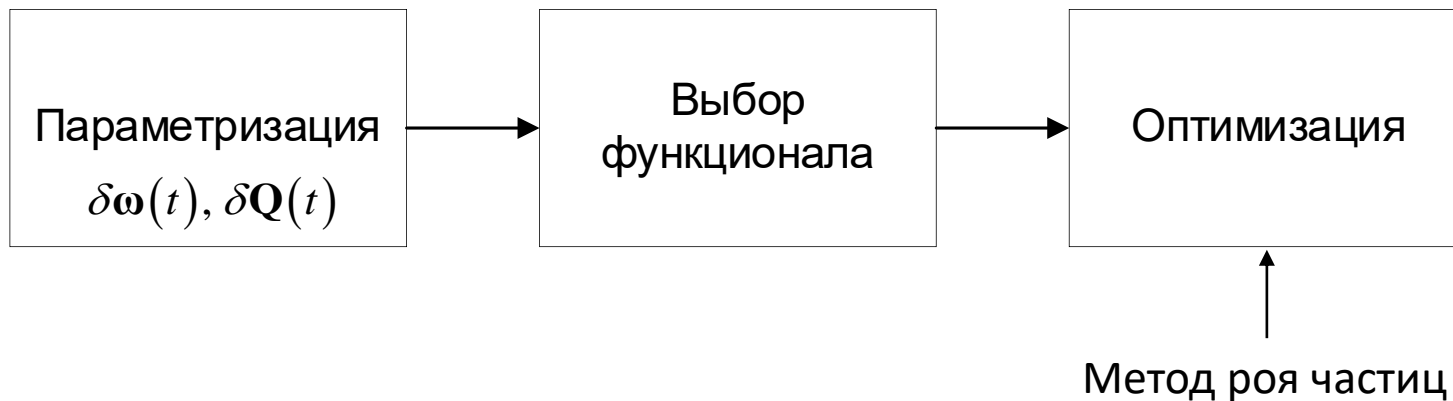


# Нестандартная задача II. Управляемое движение для токовых катушек (II)

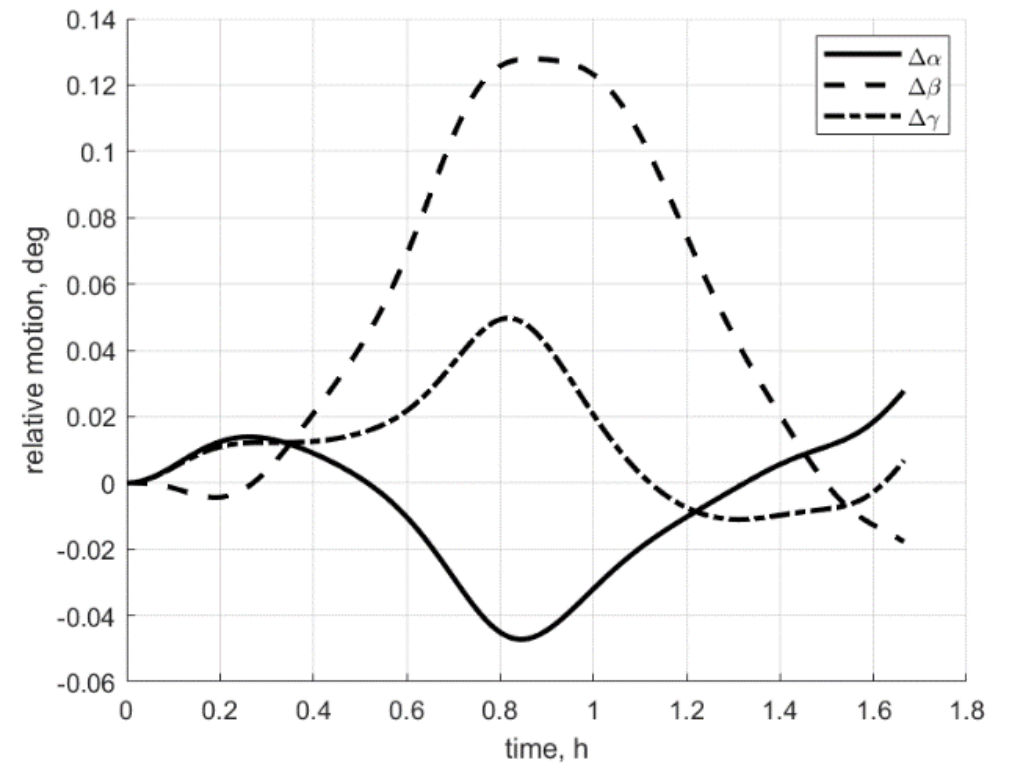
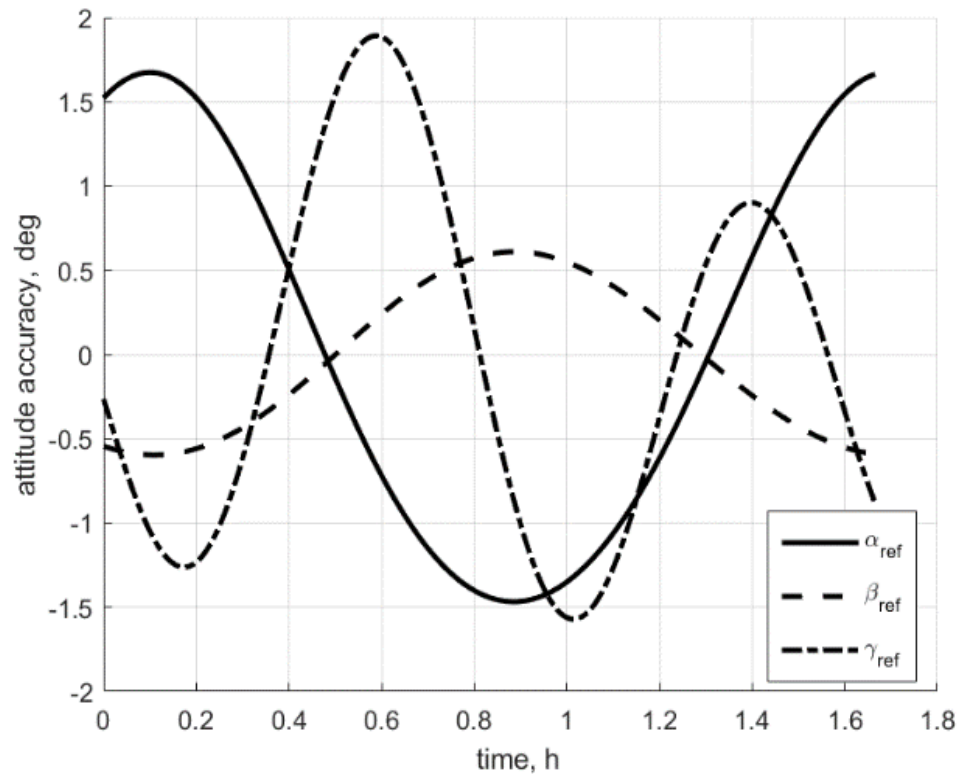
Требуемый режим  $\omega_0(t), \mathbf{Q}_0(t)$

$$\mathbf{B}^T \mathbf{M}_{\text{комп}}(\omega_0, \mathbf{Q}_0) \neq 0$$

Задача найти такие  $\delta\omega(t), \delta\mathbf{Q}(t)$ , что  $\mathbf{B}^T \mathbf{M}_{\text{комп}}(\omega_0 + \delta\omega(t), \mathbf{Q}_0 + \delta\mathbf{Q}(t)) \rightarrow 0$



# Нестандартная задача II. Управляемое движение для токовых катушек (III)



Итоговая ошибка ориентации порядка 2 градусов по сравнению с 10-15 при попытке точного отслеживания

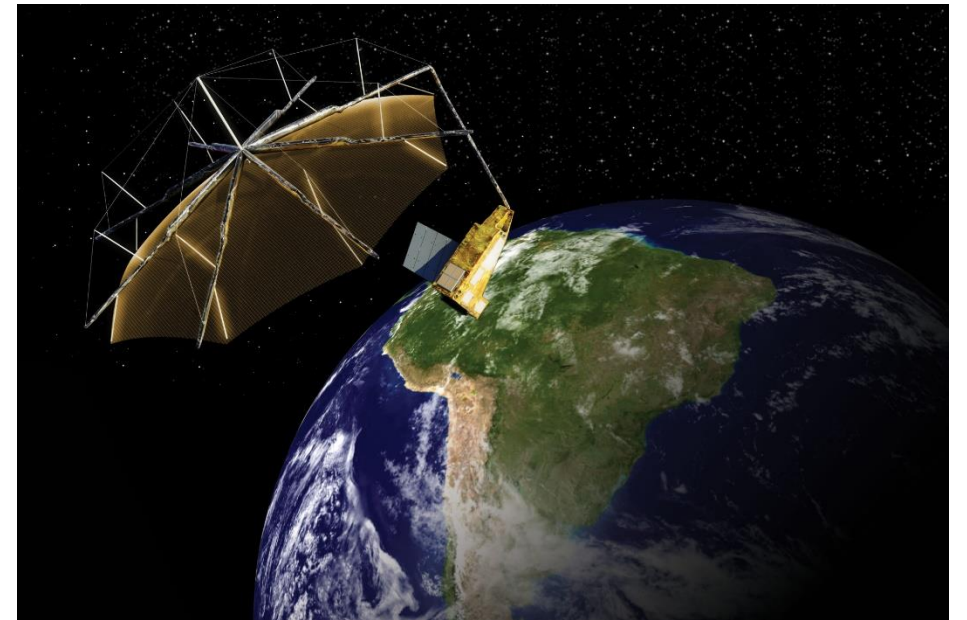
# Нестандартная задача III. Разворот спутника с большими нежесткими элементами (I)

Особенности системы:

- спутник нельзя считать твердым
- число степеней свободы бесконечно
- число каналов управления существенно конечно (часто как у обычных спутников)

Задача:

- переориентация спутника без возбуждений колебаний



# Нестандартная задача III. Разворот спутника с большими нежесткими элементами (II)

Рывок – третья производная координаты

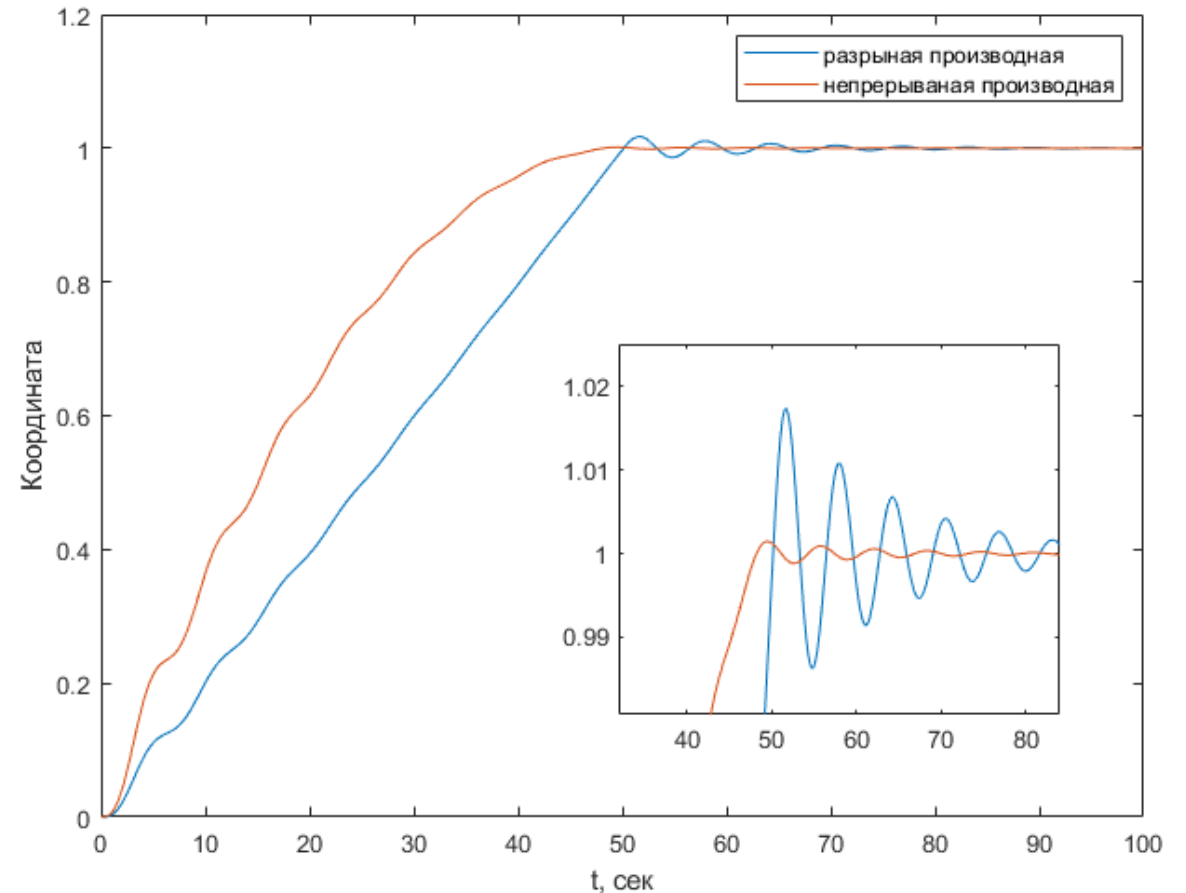
- колебательная часть
- диссипативная часть
- система вышла на установившийся режим

$$\ddot{x} + \alpha_1 \dot{x} + \alpha_2 x = f(t), \quad \alpha_1 > 0, \quad \alpha_2 > 0$$

$$\dot{\mathbf{M}}_{yup}^x = \dot{\mathbf{M}}_{yup}^x(\boldsymbol{\omega}(t), \boldsymbol{\varepsilon}(t), \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}(t))$$

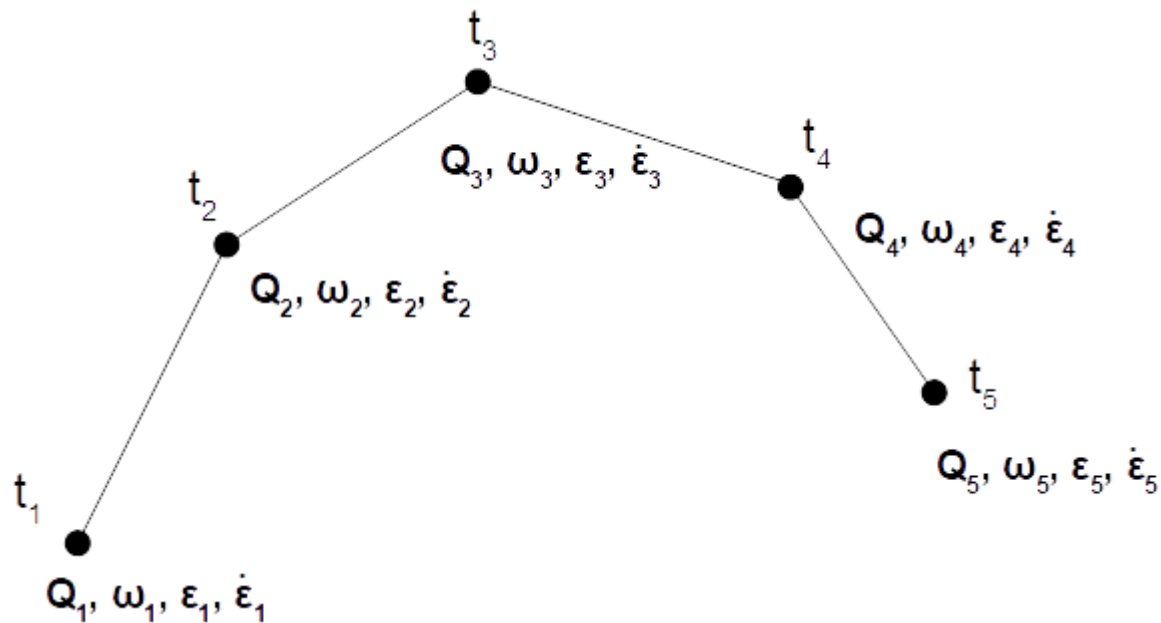
$$\boldsymbol{\omega} = 2\tilde{\mathbf{Q}} \circ \dot{\mathbf{Q}}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = 2\tilde{\mathbf{Q}} \circ \ddot{\mathbf{Q}} - \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega} \circ \boldsymbol{\omega},$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = 2\tilde{\mathbf{Q}} \circ \ddot{\mathbf{Q}} - \frac{1}{2}\boldsymbol{\varepsilon} \circ \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega} \circ \boldsymbol{\varepsilon} - \frac{1}{4}\boldsymbol{\omega} \circ \boldsymbol{\omega} \circ \boldsymbol{\omega}$$



# Нестандартная задача III. Разворот спутника с большими нежесткими элементами (III)

$$\mathbf{Q}_{j,j+1}(t) = \mathbf{Q}_j \circ (\mathbf{Q}_j^{-1} \circ \boldsymbol{\mu}_1)^{\beta_1(\tau)} \circ \dots \circ (\boldsymbol{\mu}_i^{-1} \circ \boldsymbol{\mu}_{i+1})^{\beta_{i+1}(\tau)} \circ \dots \circ (\boldsymbol{\mu}_n^{-1} \circ \mathbf{Q}_{j+1})^{\beta_{n+1}(\tau)}$$



$$\boldsymbol{\mu}_1 = \boldsymbol{\mu}_0 \circ \exp\left(\frac{\boldsymbol{\omega}(t_1)}{\dot{\beta}_1(0)}\right), \quad \boldsymbol{\mu}_2 = \boldsymbol{\mu}_1 \circ \exp\left(\frac{\boldsymbol{\epsilon}(t_1)}{\ddot{\beta}_2(0)}\right)$$

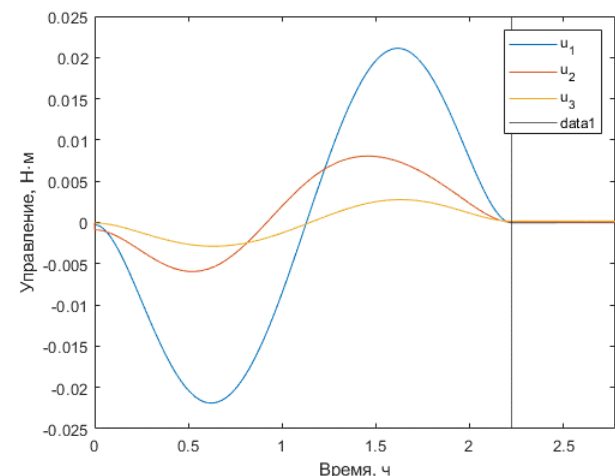
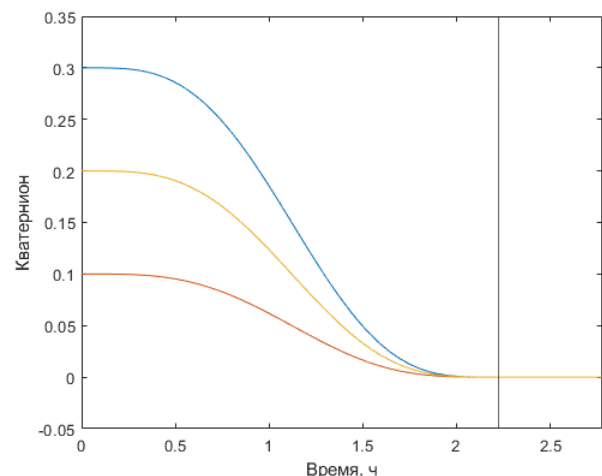
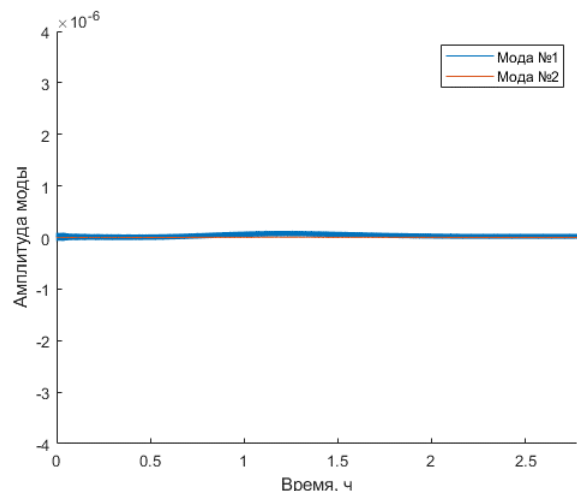
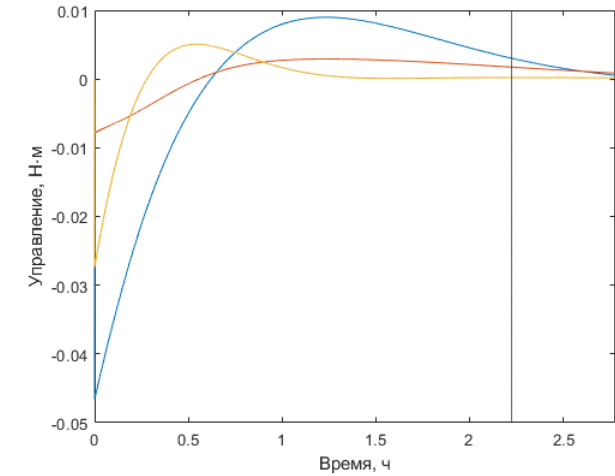
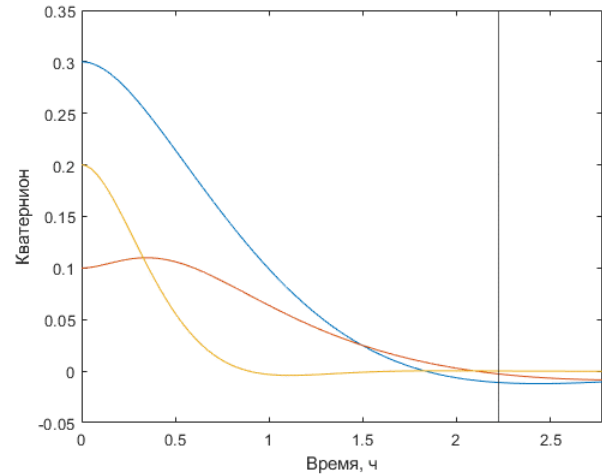
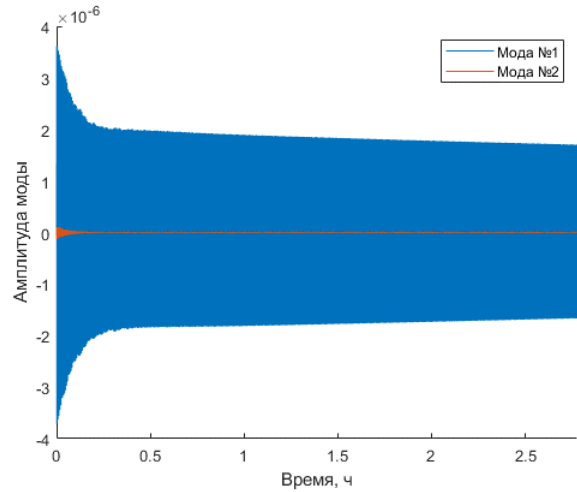
$$\boldsymbol{\mu}_3 = \boldsymbol{\mu}_2 \circ \exp\left(\frac{\dot{\boldsymbol{\epsilon}}(t_1) - 2\boldsymbol{\omega}(t_1) \times \boldsymbol{\epsilon}(t_1)}{\ddot{\beta}_3(0)}\right)$$

$$\boldsymbol{\mu}_6 = \mathbf{Q}_{j+1} \circ \exp\left(-\frac{\boldsymbol{\omega}(t_2)}{\dot{\beta}_7(1)}\right)$$

$$\boldsymbol{\mu}_5 = \boldsymbol{\mu}_6 \circ \exp\left(-\boldsymbol{\mu}_6^{-1} \circ \boldsymbol{\mu}_7 \circ \frac{\boldsymbol{\epsilon}(t_2)}{\ddot{\beta}_6(1)} \circ \boldsymbol{\mu}_7^{-1} \circ \boldsymbol{\mu}_6\right)$$

$$\boldsymbol{\mu}_4 = \boldsymbol{\mu}_5 \circ \exp\left(-\boldsymbol{\mu}_5^{-1} \circ \mathbf{Q}_{j+1} \circ \frac{\dot{\boldsymbol{\epsilon}}(t_2) + 2\boldsymbol{\omega}(t_2) \times \boldsymbol{\epsilon}(t_2)}{\ddot{\beta}_5(1)} \circ \mathbf{Q}_{j+1}^{-1} \circ \boldsymbol{\mu}_5\right)$$

# Нестандартная задача III. Разворот спутника с большими нежесткими элементами (IV)





# Благодарности



Ярослав Маштаков  
7 отдел, н.с., к.ф.-м.н.



Алексей Шестопёров  
Новая лаборатория БД и ИС,  
м.н.с., асп



Анна Охитина  
7 отдел, м.н.с., асп.