



XLVII Академические чтения по космонавтике

# Разгрузка маховиков при межпланетном перелете с двигателем малой тяги

Ярослав Маштаков, Степан Ткачев

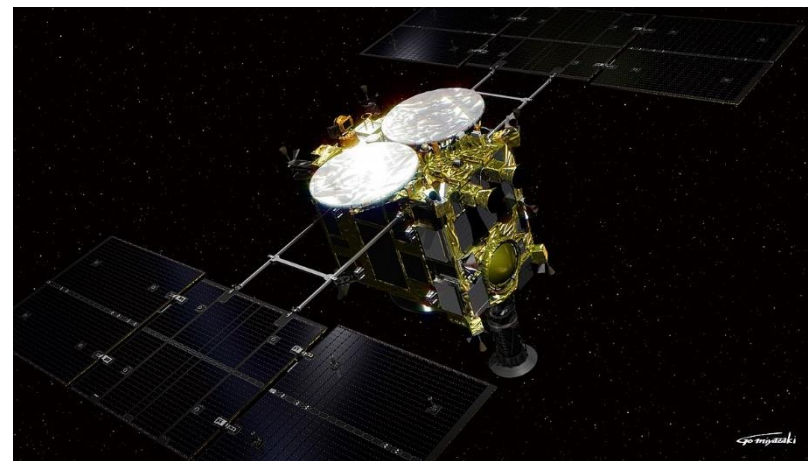
Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

# Введение

- Возрастает интерес к межпланетным перелетам, в том числе миссии к Луне и Марсу
- Помимо традиционных химических используются двигатели малой тяги
- Они позволяют существенно снизить затраты топлива на перелет



SMART-1



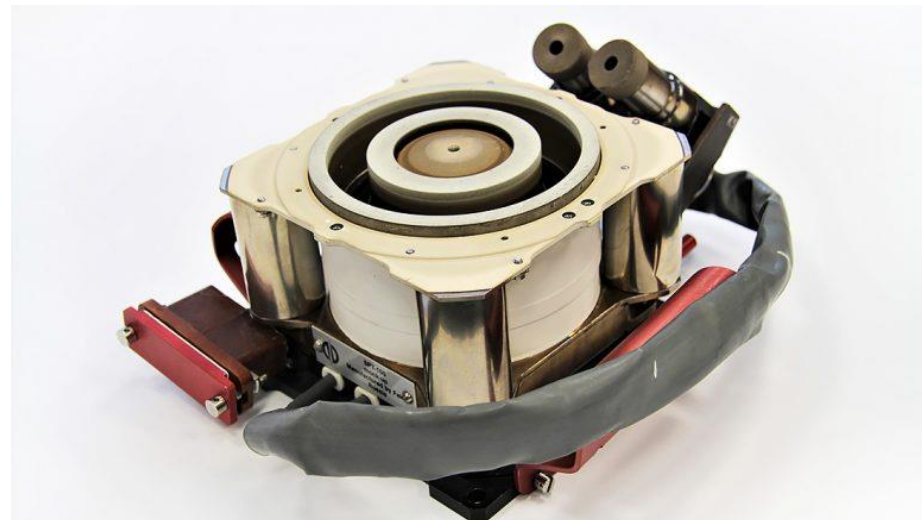
Хаябуса

# Введение

Особенности таких двигателей:

- Высокий удельный импульс (1000-3000 с)
- Высокое энергопотребление
  - Требуются большие солнечные панели
- Малая тяга
  - Разработка новых алгоритмов построения межпланетных перелетов
- Долгое время работы
 

- Необходимость обеспечения заданной ориентации в течение нескольких дней-недель-месяцев



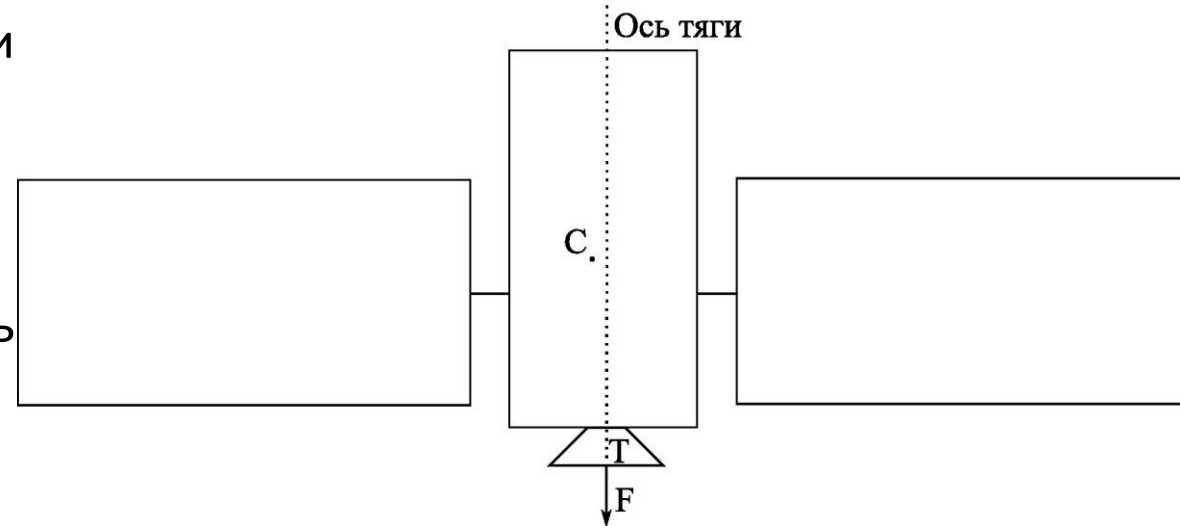
Двигатель СПД-100

Основные характеристики:

Удельный импульс	1600 с
Энергопотребление	1.35 кВт
Тяга	83 мН

# Постановка задачи

- Спутник на гелиоцентрическом участке перелета
- Оснащен двумя поворотными солнечными панелями
- Требуется обеспечить заданное положение оси тяги двигателя
- Из-за наличия эксцентриситета тяги возникает паразитный момент, который нужно компенсировать
- Внешними моментами пренебрегаем



Цель:

- Подобрать режим движения, который уменьшает накопление маховиками избыточного кинетического момента

Паразитный момент из-за работы двигателя:

$$\mathbf{M} = \mathbf{CT} \times \mathbf{F}$$



# Уравнения движения

- Центр масс панелей находится на оси вращения
- Общий центр масс системы остается неподвижным относительно корпуса аппарата
- Управление при помощи системы маховиков
- Используем закон изменения кинетического момента системы, дополняем кинематикой
- Упрощенная модель для управления углом поворота солнечных панелей
- Итоговые уравнения движения:

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2} \Lambda \circ \omega, \quad \dot{\Omega}_k = \mathbf{u}_k^{sp}, \quad \dot{\mathbf{H}} = \mathbf{U}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_\Sigma \dot{\omega} = & -\omega \times (\mathbf{J}_\Sigma \omega + \mathbf{J}_1 \Omega_1 + \mathbf{J}_2 \Omega_2 + \mathbf{H}) - \mathbf{J}_1 \dot{\Omega}_1 - \mathbf{J}_2 \dot{\Omega}_2 - \\ & - \Omega_1 \times \mathbf{J}_1 (\omega + \Omega_1) - \Omega_2 \times \mathbf{J}_2 (\omega + \Omega_2) - \\ & - \mathbf{J}_1 (\omega \times \Omega_1) - \mathbf{J}_2 (\omega \times \Omega_2) - \dot{\mathbf{H}} + \mathbf{M}_{thr} \end{aligned}$$

$\mathbf{H}$  – кинетический момент маховиков

$\Omega_k$  – относительные угловые скорости СП

$\mathbf{J}_k$  – тензор инерции СП

$\mathbf{J}_\Sigma$  – полный тензор инерции КА

$\mathbf{M}_{thr}$  – момент тяги двигателя

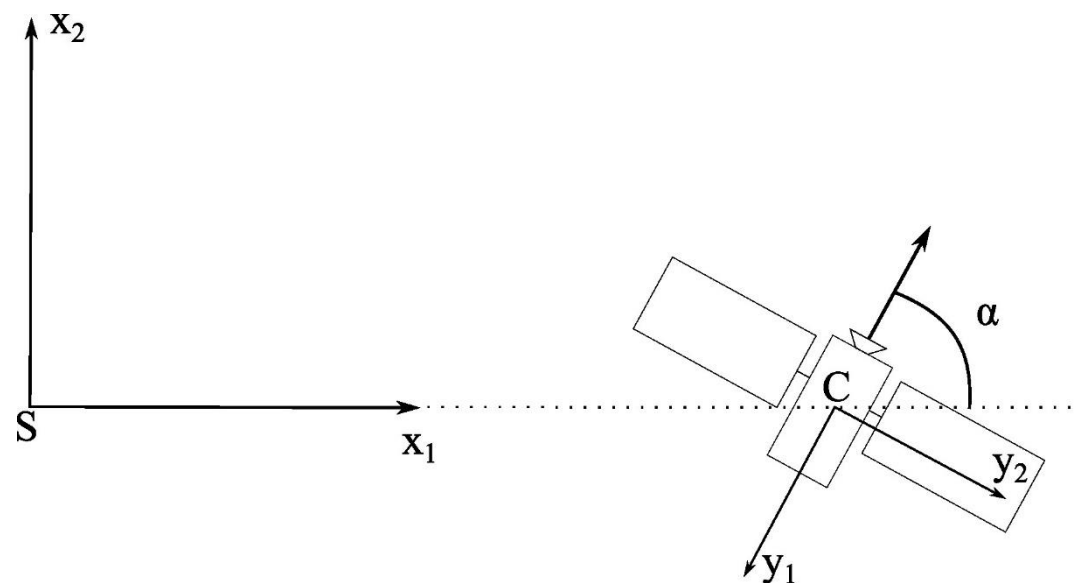
# Опорное угловое движение

- Требуемое положение корпуса КА описывается двумя поворотами (параметры Родрига-Гамильтона):

$$\Lambda = \Lambda_1 \circ \Lambda_2, \quad \Lambda_1 = \begin{pmatrix} \cos([\alpha + \pi]/2) \\ \mathbf{x}_3 \sin([\alpha + \pi]/2) \end{pmatrix}, \quad \Lambda_2 = \begin{pmatrix} \cos(\gamma/2) \\ \mathbf{y}_1 \sin(\gamma/2) \end{pmatrix}$$

- Угол  $\alpha$  определяется программой полета
- Угол  $\gamma$  может быть выбран произвольно
- Угол поворота солнечных панелей определяется соотношением (при  $-\pi/2 < \alpha < \pi/2$ )

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \text{tg}^{-1}(\text{tg} \alpha \sin \gamma)$$



Положение аппарата в Инерциальной СК



# Опорное угловое движение

- Уравнения движения – следствие закона изменения кинетического момента

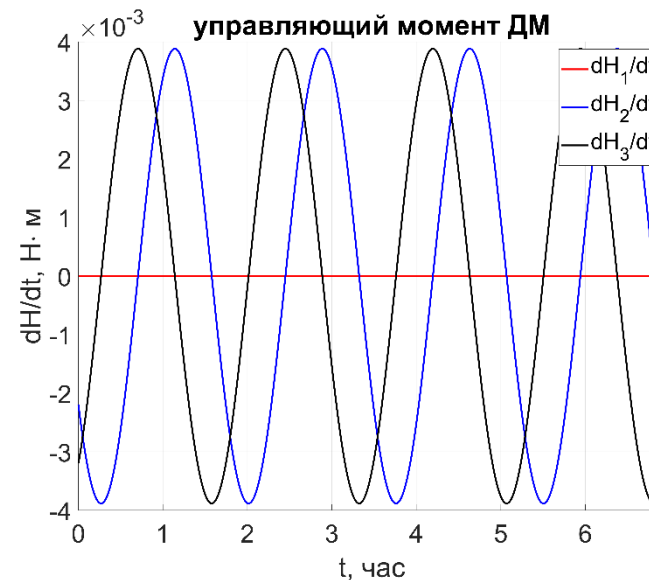
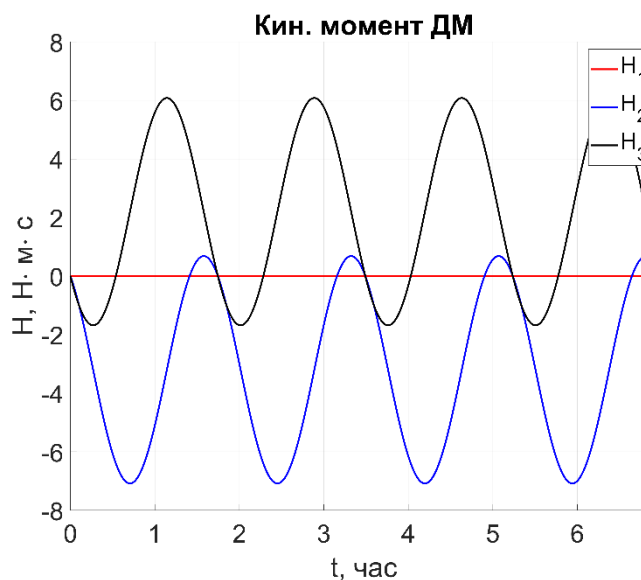
$$\frac{d\mathbf{K}_c}{dt} = \mathbf{M}_c$$

- Единственный момент – со стороны двигателя
- Если аппарат стабилизирован в одном положении, то кинетический момент маховиков будет расти
- Есть одна степень свободы – вращение вокруг вектора тяги
- Если аппарат закручен, или периодически меняет свою ориентацию на 180 градусов, то момент двигателей усредняется
- Рассмотрим два этих режима, то есть

$$\gamma_1 = \Omega t, \quad \gamma_2 = \pm \pi / 2$$

# Постоянная закрутка

- При закрутке с постоянной угловой скоростью момент «усредняется»
- Суммарный кинетический момент маховиков становится периодической функцией
- Для отслеживания требуемого движения используется ляпуновское управление



Начальный запасенный кинетический момент равен нулю,  
 ориентация и угловая скорость аппарата соответствуют  
 опорному движению  
 Тяга 0.1 Н, плечо момента около 3.5 см



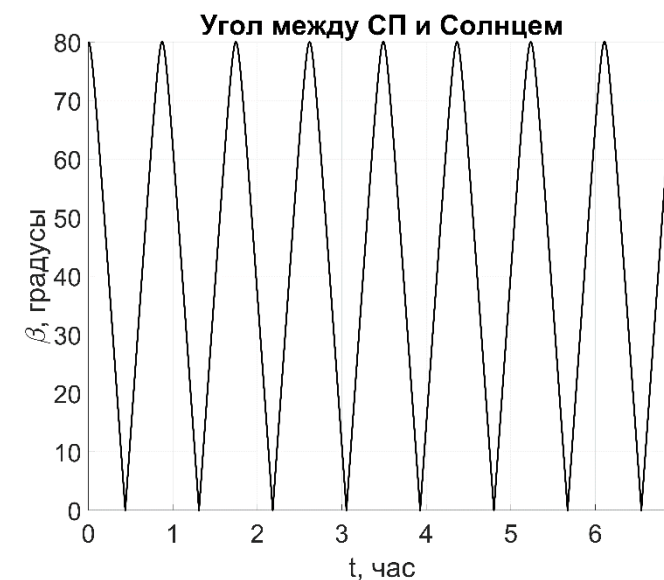
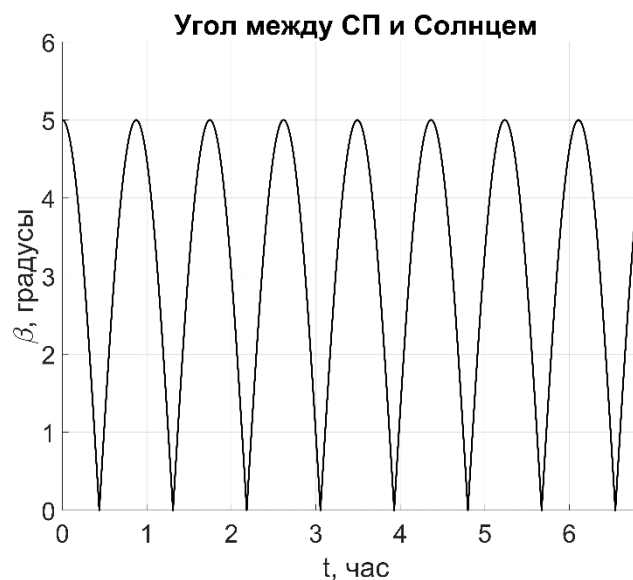
# Постоянная закрутка

Плюсы:

- Малый управляющий момент
- Амплитуда кинетического момента обратно пропорциональна скорости закрутки

Минусы:

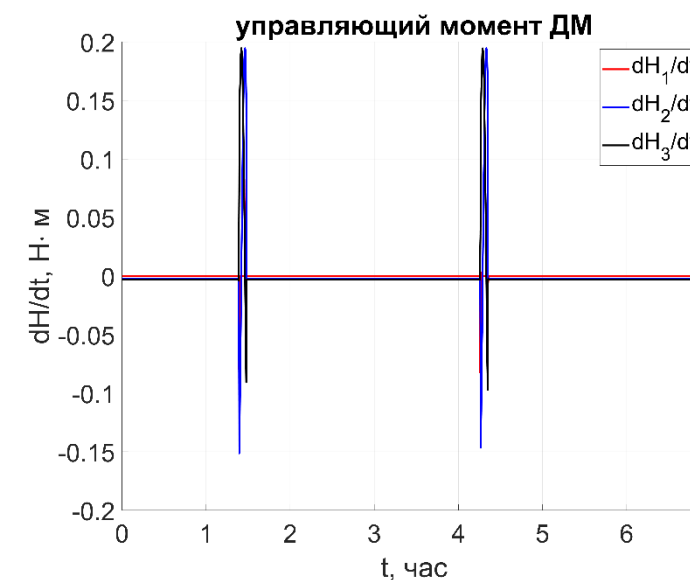
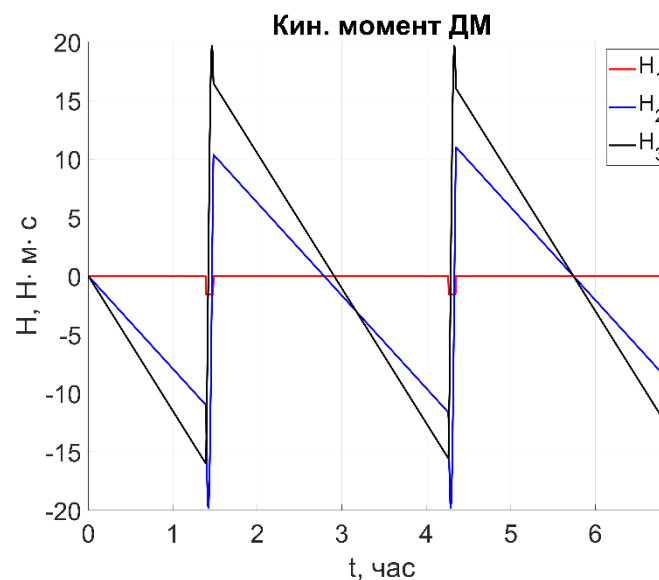
- Неоптимальное положение солнечных панелей
- Токосъем может оказаться существенно ниже требуемого
- Критичны как раз случаи разгона на гелиоцентрическом участке



Угол между вектором тяги и направлением на Солнце составляет 5 (слева) и 80 (справа) градусов

# Периодический разворот

- Аппарат переключается между двумя режимами
- Отличие – в развороте на 180 градусов
- Переходный режим – разгон, постоянная угловая скорость, торможение
- Могут потребоваться достаточно большие управляющие моменты для осуществления быстрого разворота



$$\dot{\omega}_{max} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ рад/с}^2, \quad \omega_{max} = 10^{-2} \text{ рад/с}$$

Время разворота чуть больше 5 минут

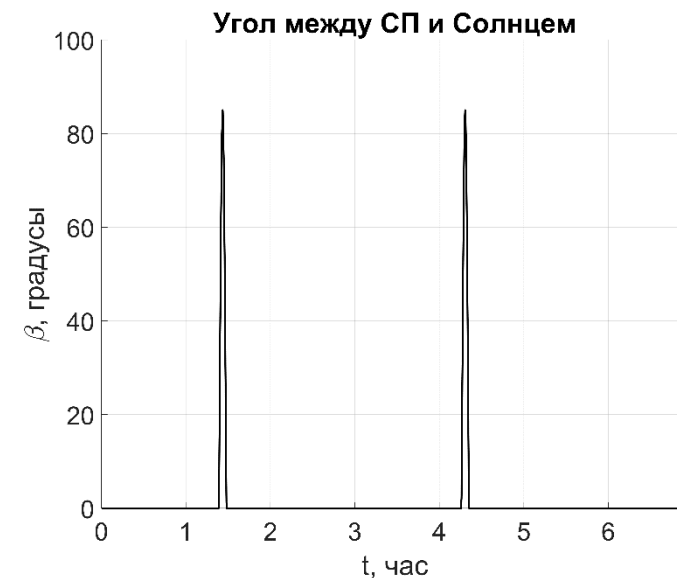
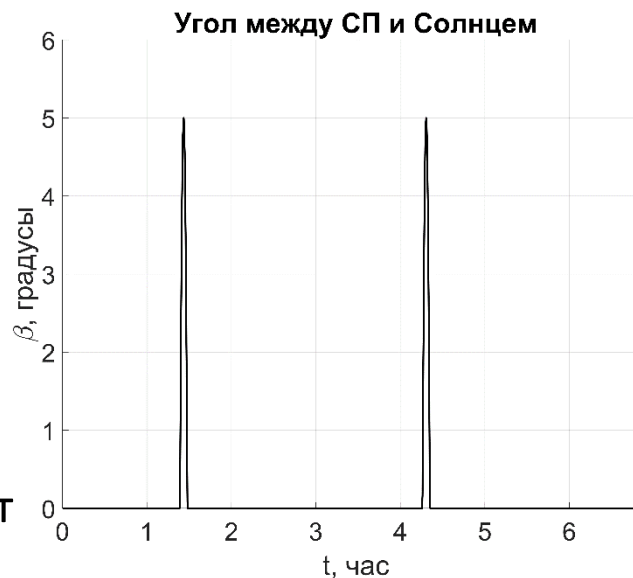
# Периодический разворот

Плюсы:

- Нормаль к солнечным панелям направлена точно на Солнце, за исключением времени разворота
- Нет зависимости от взаимного расположения оси тяги и направления на Солнце

Минусы:

- Накопленный кинетический момент может оказаться существенно больше, чем в закрутке
- Быстрые развороты могут негативно сказаться на полезной нагрузке



Угол между вектором тяги и направлением на Солнце составляет 5 (слева) и 85 (справа) градусов



# Заключение

- Оба алгоритма демонстрируют, что можно существенно снизить накопление избыточного кинетического момента
- Рассматривалась упрощенная модель. Сдвиг центра масс, вызванный поворотом солнечных панелей, может несколько ухудшить полученные результаты
- Не учитывалось влияние солнечного излучения
- Необходимо провести анализ эволюции кинетического момента на всем перелете, с учетом поворота вектора тяги в ИСК