

Сравнение методов управления ориентацией космических аппаратов

Шигаева Маргарита ¹, Ткачев С. С.²

¹ Студент, выполнявший НИР, МФТИ

² Научный Руководитель, ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

5 июля 2022 г.



Целью дипломной работы является: Моделирование движения КА под действием гравитационного момента, моделирование управления, сравнение методов управления в точности, быстродействии и устойчивости к возмущениям.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

- 1 Постановка задачи
- 2 Уравнения движения КА
- 3 Методы управления
 - Ляпуновское управление
 - Скользящее управление
 - Управление с прогнозирующей моделью
- 4 Анализ и сравнение методов
 - Эффективность
 - Скорость работы
 - Устойчивость к шуму
- 5 Заключение
- 6 Приложение

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Постановка задачи

Постановка
задачи

Уравнения
движения
КА

Методы
управления

Ляпуновское
управление

Скользящее
управление

Управление с
прогнозирующей
моделью

Анализ и
сравнение
методов

Эффективность

Скорость
работы

Устойчивость к
шуму

Заключение

Приложение

Постановка Задачи

Решаем задачу управления КА, двигающегося в поле гравитирующего тела. Т.е. будем генерировать управляющие моменты, чтобы КА достиг нужного состояния.

Будем использовать 3 метода генерации управляющих моментов:

- Ляпуновское управление.
- Скользящее управление.
- Управление с прогнозирующей моделью.

Шаг управления будет равен $0.1c$, подбирать коэффициенты управления будем исходя из ограничения $\mathbf{u}_i \leq 0.01N \cdot \text{м}$.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Уравнения движения КА

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Q}} = \frac{1}{2} \mathbf{Q} \circ \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J} \boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}_{ext} + \mathbf{u} \end{cases}$$

В качестве внешнего момента будем использовать гравитационный момент

$$\mathbf{M}_{ext} = 3 \frac{\mu}{R^5} \mathbf{R} \times \mathbf{J} \mathbf{R}.$$

Движение центра масс описывается системой:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{v}} = -\frac{\mu \mathbf{r}}{r^3}, \\ \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v}. \end{cases}$$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Методы управления

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность
Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Q}} = \frac{1}{2} \mathbf{Q} \circ \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J} \boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}_{ext} + \mathbf{u} \end{cases}$$

Функция Ляпунова: $V = \frac{1}{2}(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}}) + 2k_q(1 - q_0)$. Ее производная:

$$\dot{V} = (\boldsymbol{\omega}, \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}}) - 2k_q \dot{q}_0 = (\boldsymbol{\omega}, -\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J} \boldsymbol{\omega} + \mathbf{M}_{ext} + \mathbf{u} + k_q \mathbf{q}) = -k_\omega (\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega})$$

Тогда управляющий момент

$$\mathbf{u} = -\mathbf{M}_{ext} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J} \boldsymbol{\omega} - k_\omega \boldsymbol{\omega} - k_q \mathbf{q}$$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

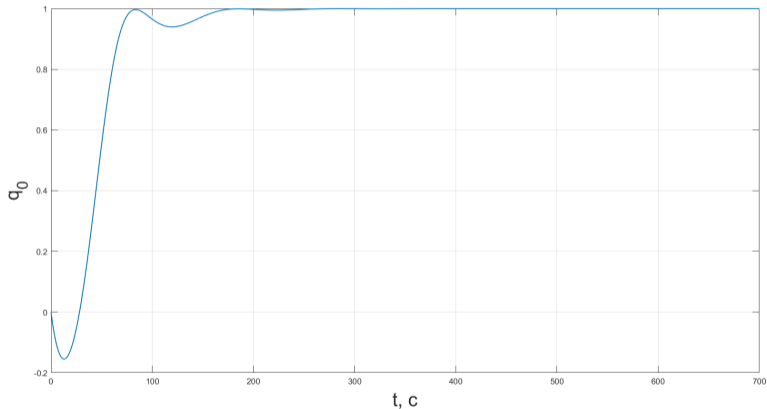


Рис. 1: Зависимость $q_0(t)$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

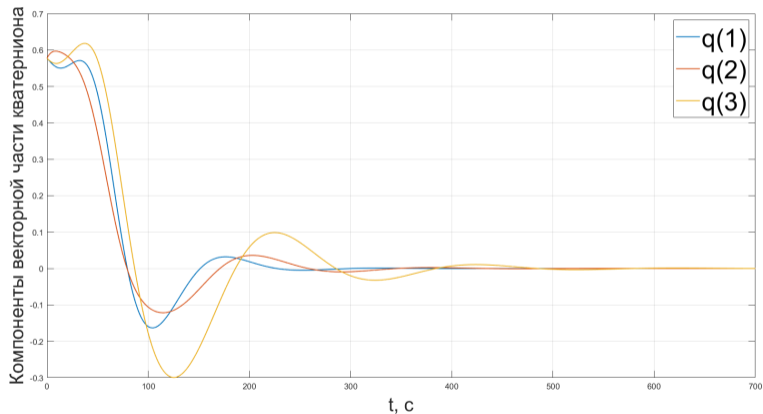


Рис. 2: Зависимость $q(t)$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

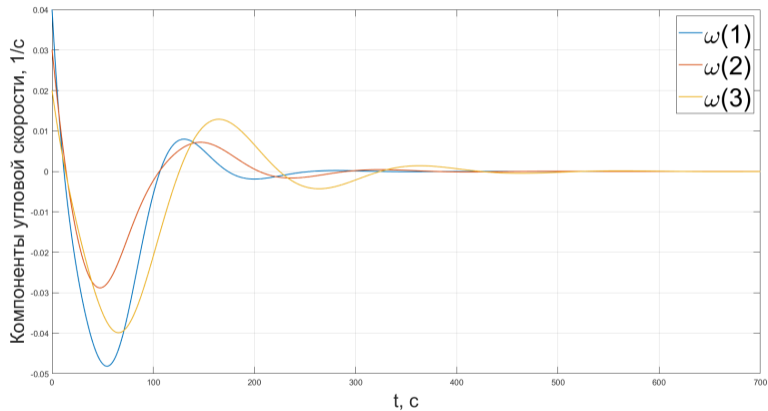


Рис. 3: Зависимость $\omega(t)$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

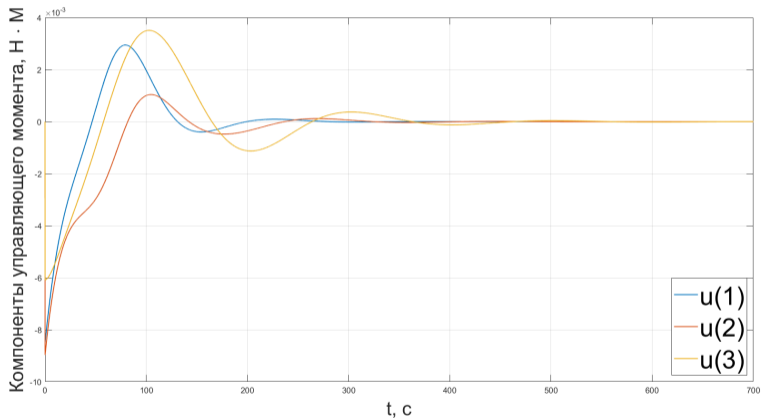


Рис. 4: Зависимость $u(t)$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Основная идея - строим поверхность скольжения, двигаясь по которой получаем асимптотическую устойчивость требуемой ориентации.

Поверхность скольжения : $s = \omega_e + Kq_e$, где $Q_e = Q \circ Q'_d = \begin{pmatrix} q_{0e} \\ q_e \end{pmatrix}$.

Получается, если движение спутника удовлетворяет $s = 0$, то Q_d , ω_d оказываются асимптотически устойчивые [2].

Функция Ляпунова: $V = \frac{1}{2}s^T J s \geq 0$ Ее производная:

$\dot{V} = s^T \{-\omega \times J\omega + u + M_{ext} + JK(\dot{q} - \dot{q}_d)\} \leq 0$ Управляющий момент:

$u = \omega \times J\omega + \frac{1}{2}JKT(Q)\omega - \text{diag}(g) \cdot \text{sign}(s)$, $T(Q)$ - матрица кватернионного произведения

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

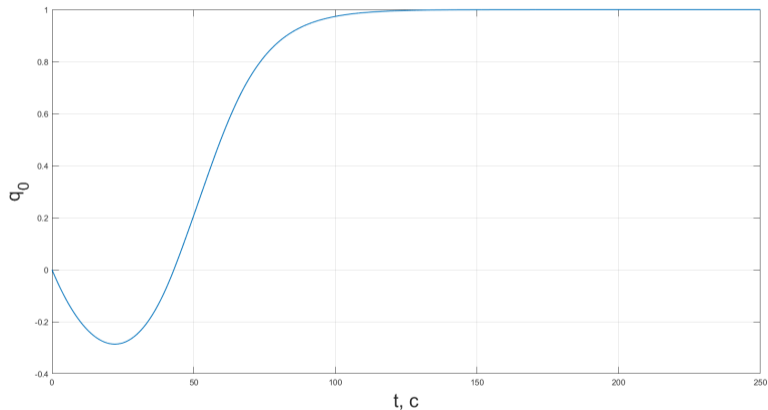


Рис. 5: Зависимость $q_0(t)$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скольльзящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

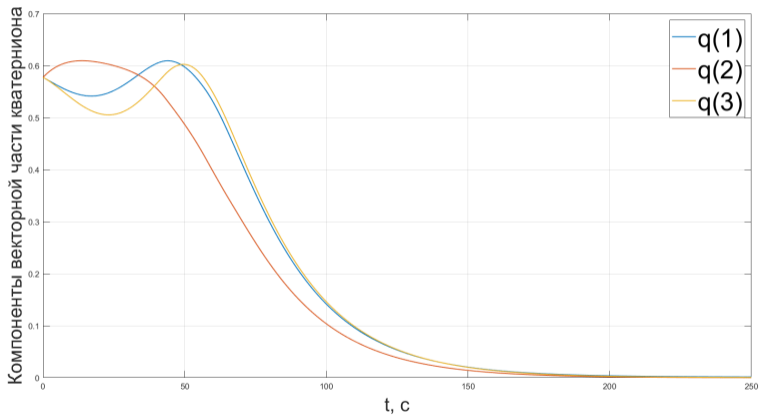


Рис. 6: Зависимость $q(t)$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

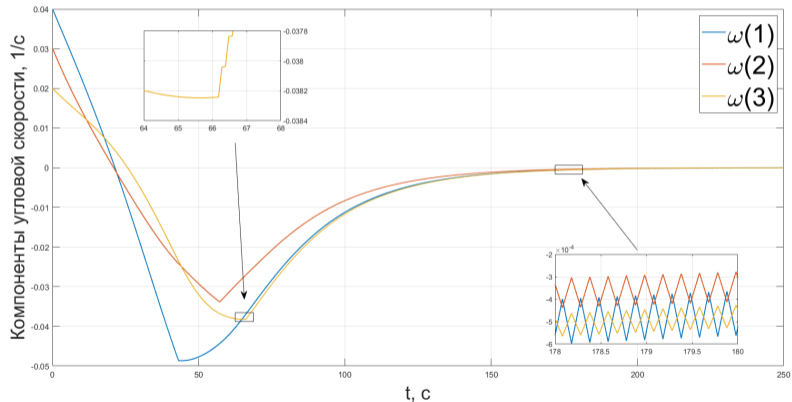


Рис. 7: Зависимость $\omega(t)$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

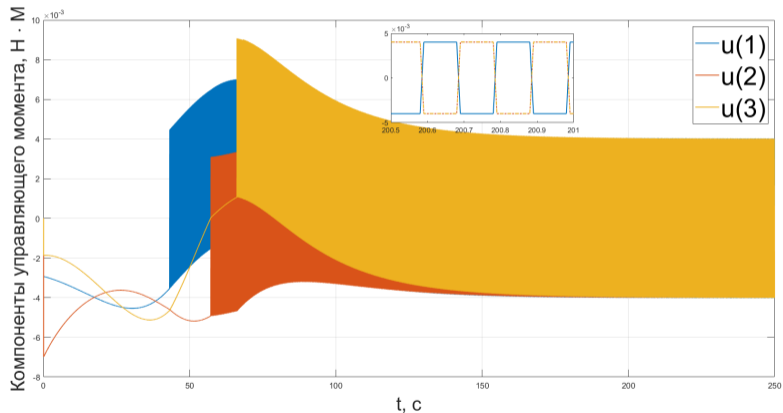


Рис. 8: Зависимость $u(t)$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Основная идея - делим отрезок по времени на N интервалов, дискретизируем и аппроксимируем задачу, оптимизируем функционал, зависящий от управления и отклонения от целевого состояния, применяем управляющий момент на $k < N$ интервалах.

Шаг 1: Прогноз

$$x_k = \begin{pmatrix} q_k \\ \omega_k \end{pmatrix} = Ax_{k-1} + Bu_{k-1}.$$

Матрицы A, B :

$$A = \begin{pmatrix} -[\omega]_{\times} & \frac{1}{2}I_3 \\ \frac{\mu}{R^5}J^{-1}([R]_{\times}J[R]_{\times} - [JR]_{\times}[R]_{\times}) & J^{-1}([J\omega]_{\times} - [\omega]_{\times}J) \end{pmatrix} + I_6$$

$$B = (O_3 \quad J^{-1})^T$$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление
Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность
Скорость работы
Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Шаг 2: Оптимизация

Функционал за N интервалов:

$$F(\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_{N-1}) = \sum_{k=0}^{N-1} \Delta \mathbf{x}_k^T \mathbf{Q} \Delta \mathbf{x}_k + \mathbf{u}_k^T \mathbf{R} \mathbf{u}_k$$

\mathbf{Q} , \mathbf{R} - положительно определенные матрицы весов. Теперь ищем такой вектор $(\mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_{N-1})$, решающий задачу оптимизации

$$F \rightarrow \min$$

С учетом ограничений:

$$\begin{cases} G(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, t_k) = 0 \\ h(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, t_k) \leq 0 \\ \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k. \end{cases}$$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Шаг 3: Из полученного вектора $(u_0, u_1, \dots, u_{N-1})$, к первому промежутку по времени применим u_0 , получив x' - новый вектор состояния. Сдвинем прогнозируемый предел на 1 временной промежуток. Повторяем шаг 2 и шаг 3, притом, что $x_0 = x'$.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

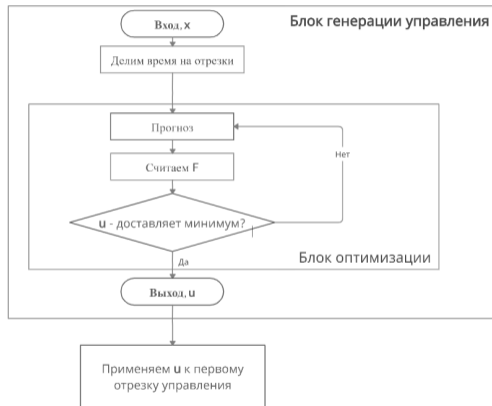


Рис. 9: Блок-схема алгоритма УПМ

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

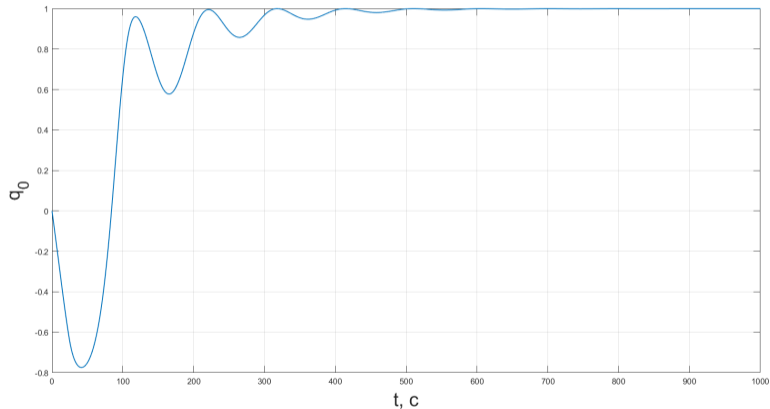


Рис. 10: Зависимость $q_0(t)$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

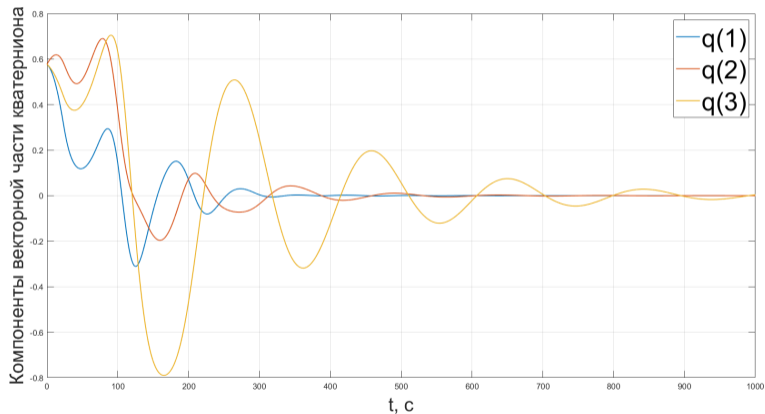


Рис. 11: Зависимость $q(t)$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

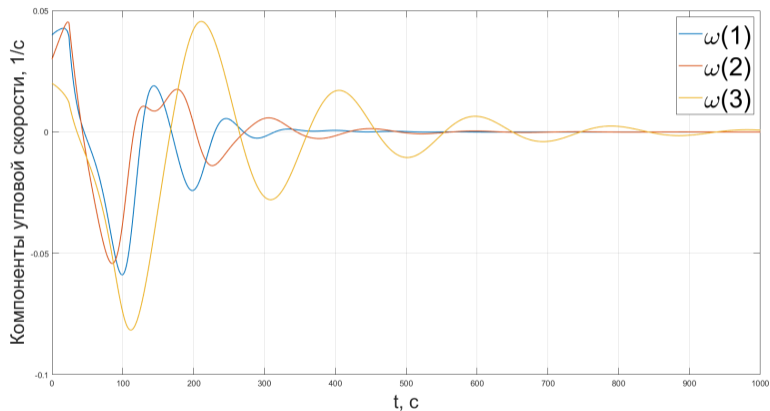


Рис. 12: Зависимость $\omega(t)$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

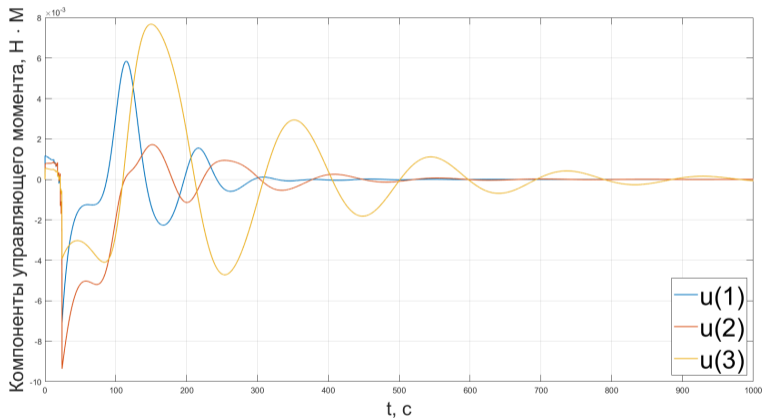


Рис. 13: Зависимость $u(t)$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Анализ и сравнение методов

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

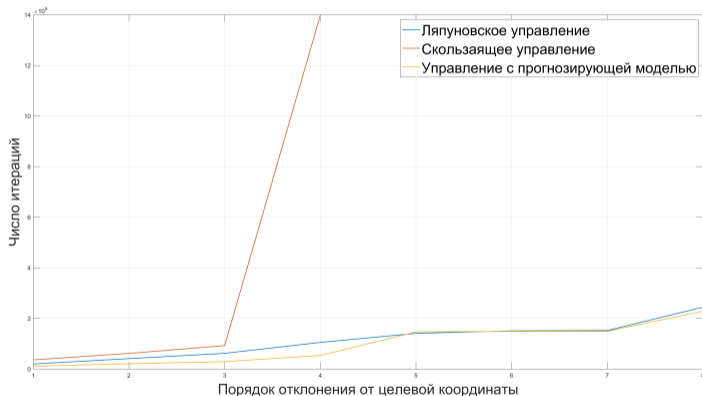


Рис. 14: Зависимость числа итераций от порядка отклонения ориентации КА от целевой ориентации КА

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользаящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

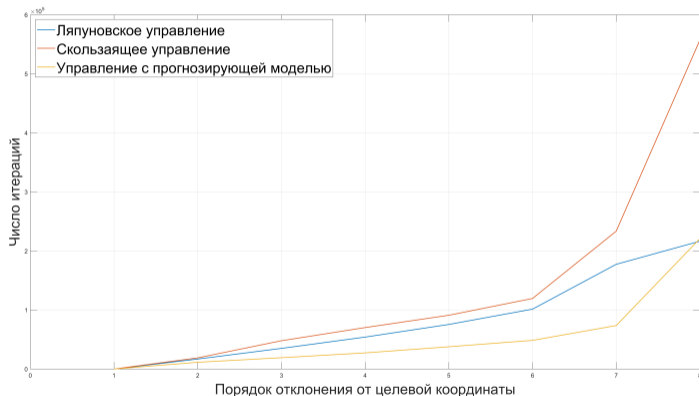


Рис. 15: Зависимость числа итераций от порядка отклонения угловой скорости КА от целевой угловой скорости КА

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

По графикам видно, что

- **Управление с прогнозирующей моделью** - Дает большую точность (по Q и ω), за наименьшее число итераций.
- **Скользящее управление** - требует резкое увеличение числа итераций для приближения к целевой ориентации.
- **Ляпуновское управление** - проигрывает УПМ в эффективности, но позволяет достичь высокой точности.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

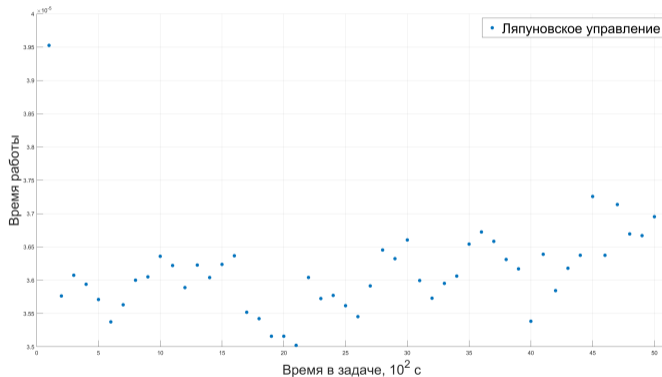


Рис. 16: Зависимость времени генерации сигнала ляпуновским управлением от времени в задаче.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

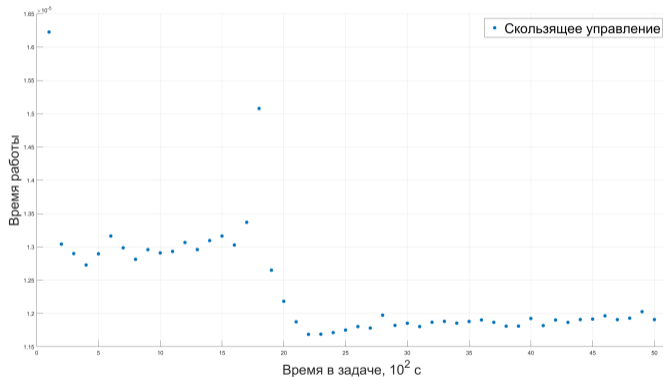


Рис. 17: Зависимость времени генерации сигнала скольльзящим управлением от времени в задаче.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скольльзящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

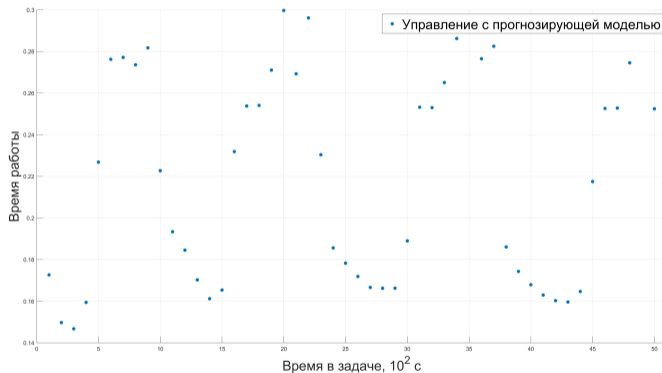


Рис. 18: Зависимость времени генерации сигнала управлением с прогнозирующей моделью от времени в задаче.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

- **Скользящее управление** — расчет управляющих моментов происходит быстрее всех.
- **Ляпуновское управление** — расчет управляющих моментов сравним по длительности со скользющим.
- **Управление с прогнозирующей моделью** — наиболее медленный метод, каждая итерация на 4 порядка медленнее конкурентов.

Таблица 1: Время работы алгоритмов за 50000 вызовов

Метод управления	Общее время работы, с	Среднее время работы, с
Ляпуновское управление	0,181	$3,61 \cdot 10^{-5}$
Скользящее управление	0,061	$1,24 \cdot 10^{-5}$
УПМ	1184	$2,35 \cdot 10^{-1}$

Ляпуновское управление

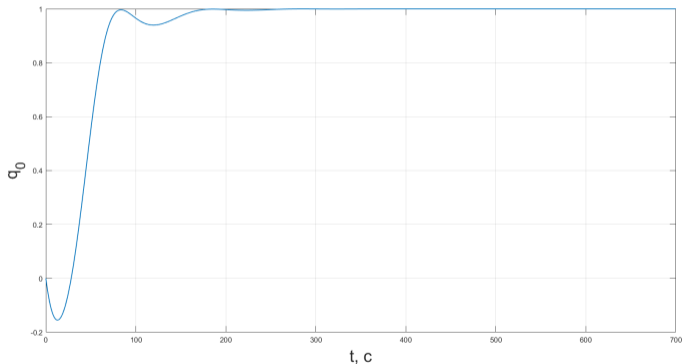


Рис. 19: Зависимость $q_0(t)$, с шумами.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность скорости работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Ляпуновское управление

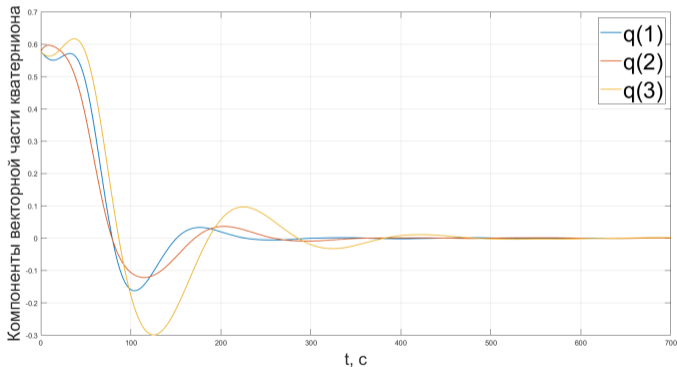


Рис. 20: Зависимость $q(t)$, с шумами.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Ляпуновское управление

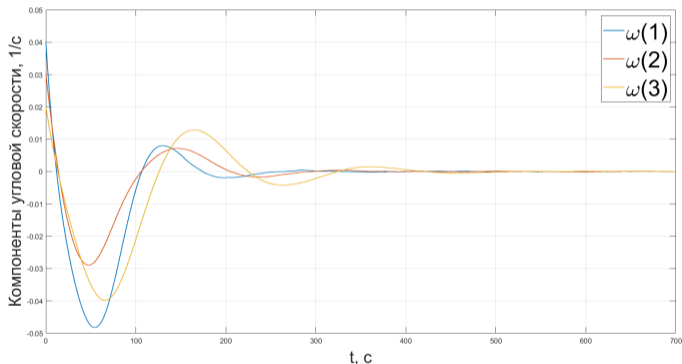


Рис. 21: Зависимость $\omega(t)$, с шумами.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность скорости работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Ляпуновское управление

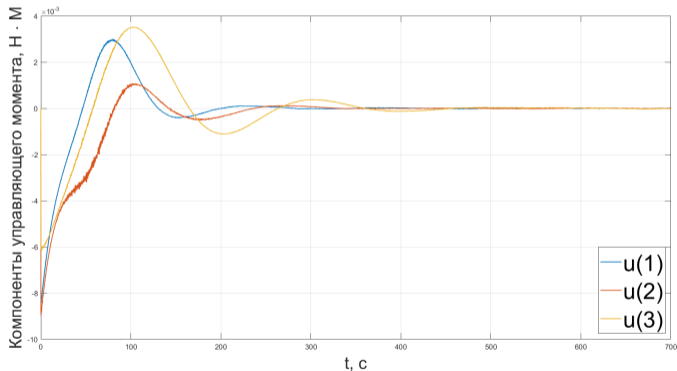


Рис. 22: Зависимость $u(t)$, с шумами.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность скорости работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Скользящее управление

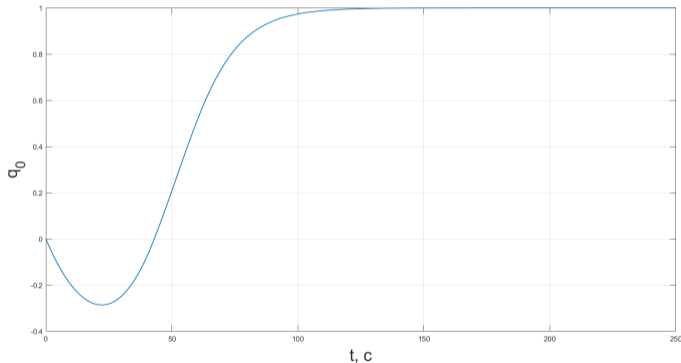


Рис. 23: Зависимость $q_0(t)$, с шумами.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность скорости работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Скользящее управление

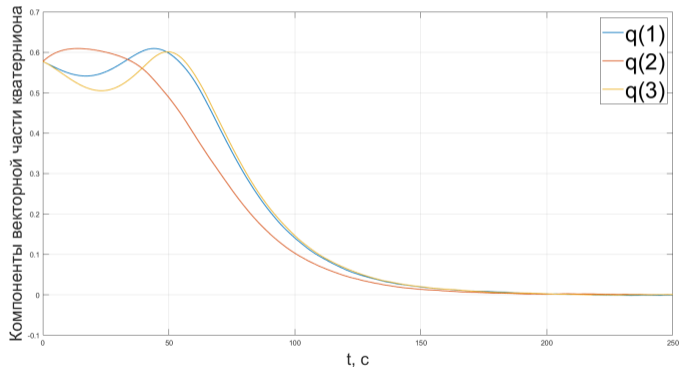


Рис. 24: Зависимость $q(t)$, с шумами.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность скорости работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Скользящее управление

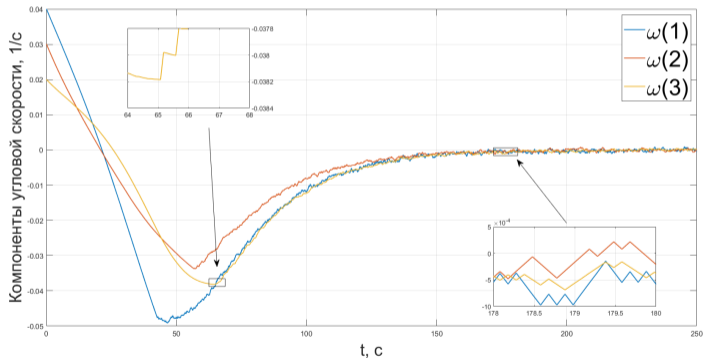


Рис. 25: Зависимость $\omega(t)$, с шумами.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Скользящее управление

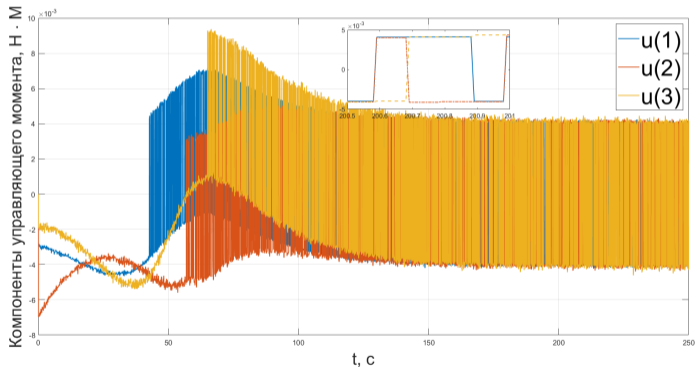


Рис. 26: Зависимость $u(t)$, с шумами.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность скорости работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Управление с прогнозируемой моделью

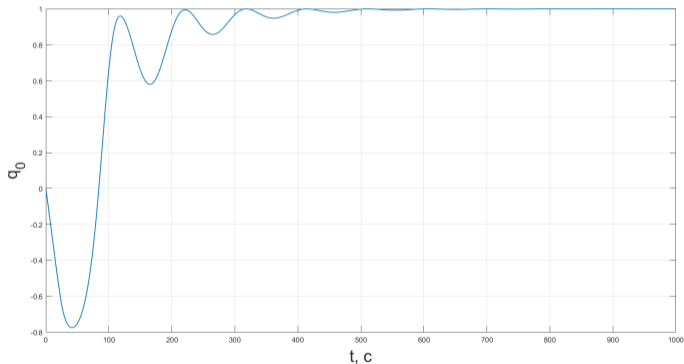


Рис. 27: Зависимость $q_0(t)$, с шумами.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность скорости работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Управление с прогнозируемой моделью

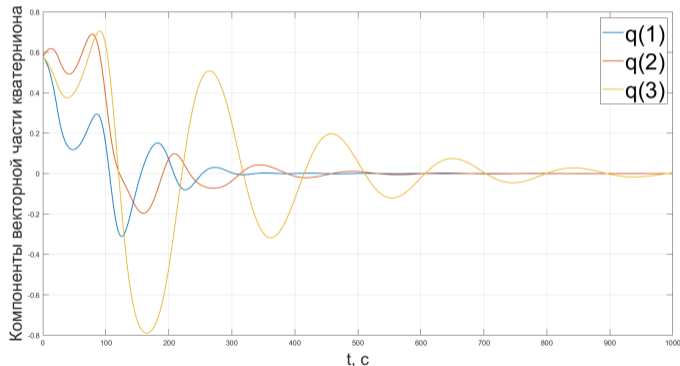


Рис. 28: Зависимость $q(t)$, с шумами.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность скорости работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Управление с прогнозируемой моделью

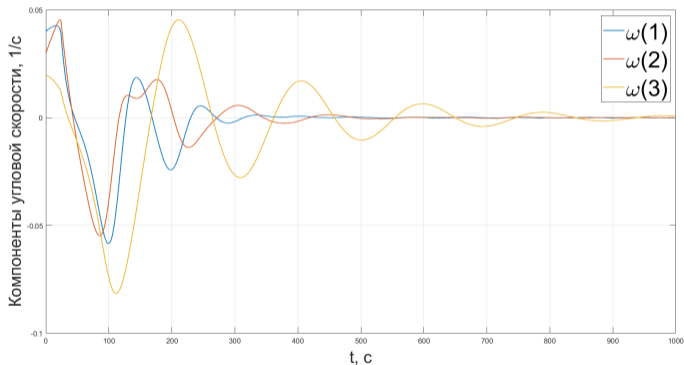


Рис. 29: Зависимость $\omega(t)$, с шумами.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Управление с прогнозируемой моделью

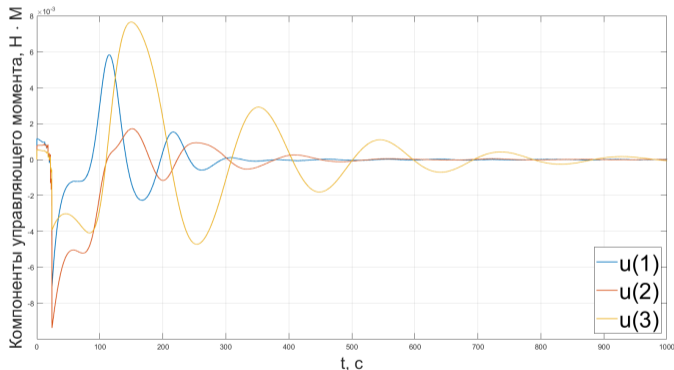


Рис. 30: Зависимость $u(t)$, с шумами.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность скорости работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Заключение

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

В работе проведено моделирование движения КА с тремя методами управления: ляпуновское, Скользящее и с прогнозирующей моделью.

- **Скорость работы** Самый быстрый метод — скользящее управление, самый медленный — управление с прогнозирующей моделью.
- **Эффективность** — Лучшая точность, при меньшем числе итераций — УПМ, а худшая — скользящее управление.
- **Устойчивость к шуму** — Все три метода устойчивы к внешним возмущениям
- **Сложность реализации** — Наиболее сложным оказалось реализовать управление с прогнозирующей моделью, а ляпуновское управления - проще всего.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов




Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

-  Маштаков Я.В., Ткачѐв С. С. Построение углового движения космического аппарата при межпланетном перелете, Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 24. 16 с. URL:
<http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-24>
-  Shih-Che Lo, Yon-Ping Chen. Smooth Sliding-Mode Control for Spacecraft Attitude Tracking Maneuvers, Journal of Guidance, Control, and Dynamics Vol. 18, No. 6, November-December 1995.
-  Song C., Genaro I., Klaus S. Inverse Dynamics based Model Predictive Control for Spacecraft Rapid Attitude Maneuver, IFAC PapersOnLine 52-12 (2019) 111–116

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов




Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

-  Stoll E., Yang J., Klaus S. Adaptive Sliding Mode Control for Spacecraft Proximity Operations Based on Dual Quaternions, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, July 2019
-  Овчинников М. Ю., Ролдугин Д. С., Пеньков В. И., Ткачев С. С., Маштаков Я. В. Скользящее управление для трехосной магнитной ориентации спутника, Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша 2014 № 56. 7с. URL: https://keldysh.ru/papers/2014/rep2014_56_rus.pdf
-  Аристова Е. Н., Лобанов А. И., Практические занятия по вычислительной математике в МФТИ, МФТИ 2015 с. 25-28.

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Приложение

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение

Таблица 2: Таблица коэффициентов управления

Метод управления	соответствующие коэффициенты
Ляпуновское управление	$k_{\omega} = 9 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с};$
	$k_q = 9 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}$
Скользящее управление	$K = I_3 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$
Управление с прогнозирующей моделью	$0,1 \cdot I_6$
	$50 \cdot I_3$

Постановка задачи

Уравнения движения КА

Методы управления

Ляпуновское управление

Скользящее управление

Управление с прогнозирующей моделью

Анализ и сравнение методов

Эффективность

Скорость работы

Устойчивость к шуму

Заключение

Приложение