

# Модель восстановления человеком исходной позы после толчка

**Романов Андрей Владимирович**

МГУ им. М.В. Ломоносова  
Механико-математический факультет  
Кафедра прикладной механики и управления

30 марта 2022 г.

# Описание задачи

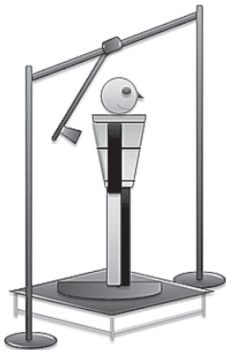


Рис.: Схематическое изображение толкателя и положения испытуемого на стабиллоплатформе

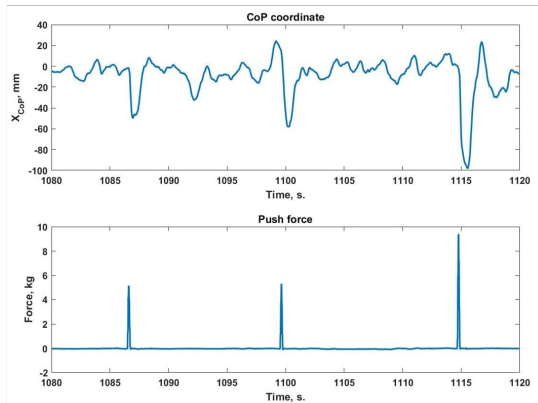


Рис.: Отклонение сагиттальной координаты при различных по силе толчках (данные предоставлены сотрудниками ИМБП РАН)

# Задача быстрогодействия

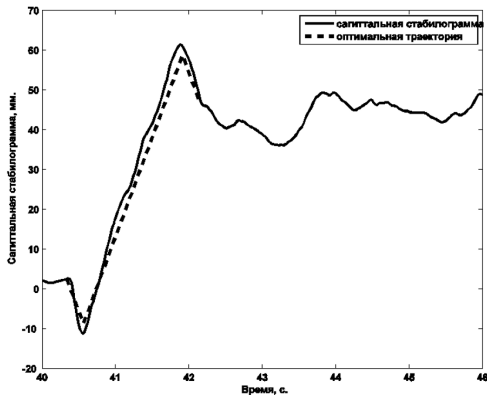
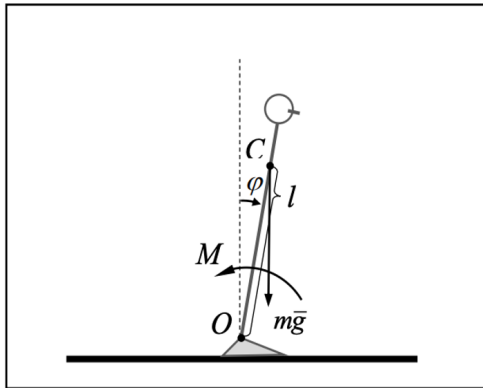


Рис.: Характерный вид сагиттальной стабиллограммы при выполнении теста со ступенчатым воздействием

В работе рассматривается задача быстрогодействия для установки перевернутого маятника в неустойчивое вертикальное положение равновесия.

Предполагается сравнение результатов стабиллометрических проб, при которых человек возвращается в исходную вертикальную позу после толчка, с решением этой оптимальной задачи для начальных условий, соответствующих моменту времени завершения толчка.

# Математическая модель



$$J\ddot{\varphi} = mgl\varphi + M$$

$$\varphi(0) = \varphi_0, \dot{\varphi}(0) = \omega_0$$

$$\varphi(t) = \varphi_k, \dot{\varphi}(t_k) = 0$$

$$M(0) = M(t_k) = -mgl\varphi_k$$

$$U^- \leq \dot{M} \leq U^+$$

Рис.: Модель перевернутого маятника

# Переход к безразмерным величинам

$$\theta'' = \theta + m; \quad m' = u$$

Необходимо решение системы перевести из начального положения

$$\theta(0) = 1; \quad \dot{\theta}(0) = \frac{t_*}{\varphi_*} \omega_0 = \Omega_0; \quad m(0) = 0$$

в положение

$$\theta = \frac{\varphi - \varphi_k}{\varphi_*}, \quad m = \frac{M - M_f}{mgl\varphi} \quad \theta(\tau_f) = 0; \quad \dot{\theta}(\tau_f) = 0; \quad m(\tau_f) = 0$$

с помощью ограниченного управления

$$u^- \leq u \leq u^+, \quad \text{где } u^- = \frac{U^-}{mgl\varphi_* t_*} = -u^+$$

# Принцип максимума Понтрягина

Система в форме Коши

$$\begin{cases} \theta' = \omega, \\ \omega' = \theta + m, \\ m' = u. \end{cases} \quad (1)$$

Функция Понтрягина

$$H = \psi_1 \cdot \omega + \psi_2 \cdot (\theta + m) + \psi_3 \cdot u$$

Сопряженная система уравнений

$$\begin{cases} \dot{\psi}_1 = -\psi_2 \\ \dot{\psi}_2 = -\psi_1 \\ \dot{\psi}_3 = -\psi_2. \end{cases} \quad (2)$$

# Анализ сопряженной системы

$$\begin{cases} \psi_1 = -C_1 e^{\tau} + C_2 e^{-\tau} + C_3, \\ \psi_2 = C_1 e^{\tau} + C_2 e^{-\tau}, \\ \psi_3 = -C_1 e^{\tau} + C_2 e^{-\tau} + C_3. \end{cases} \quad (3)$$

Анализируя корни уравнения  $\psi_3(\tau) = 0$ , для различной комбинации коэффициентов  $C_1, C_2, C_3$ , получим, что число корней не может быть больше двух. В системе может быть не более двух переключений  $u$ .

# Решение системы на 1 этапе

Этап 1.  $u = u_*$  начальные условия

$$\theta(0) = 1; \quad \omega(0) = \Omega_0; \quad m(0) = 0$$

Решение

$$\begin{cases} m_1(\tau) = u_*\tau, \\ \theta_1(\tau) = \frac{u_* + \Omega_0}{2}(e^\tau - e^{-\tau}) + \frac{1}{2}(e^\tau + e^{-\tau}) - u_*\tau, \\ \omega_1(\tau) = \frac{1}{2}(e^\tau - e^{-\tau}) + \frac{u_* + \Omega_0}{2}(e^\tau + e^{-\tau}) - u_*. \end{cases} \quad (4)$$



## Решение системы на 2 этапе

Этап 2.  $u = -u_*$  начальные условия

$$\theta(\tau_1) = \theta_1(\tau_1); \quad \omega(\tau_1) = \omega_1(\tau_1); \quad m(\tau_1) = m_1(\tau_1)$$

Решение

$$\begin{cases} m_2(\tau) = 2u_*\tau_1 - u\tau, \\ \theta_2(\tau) = \frac{u_* + \Omega_0}{2}(e^{\tau_1} - e^{-\tau_1}) + \frac{1}{2}(e^{\tau_1} + e^{-\tau_1}) - u_*(2\tau_1 - e^{\tau_1-\tau} + e^{-\tau_1+\tau} - \tau), \\ \omega_2(\tau) = \frac{1}{2}(e^{\tau_1} - e^{-\tau_1}) + \frac{u_* + \Omega_0}{2}(e^{\tau_1} + e^{-\tau_1}) + u_*(1 - e^{\tau_1-\tau} - e^{-\tau_1+\tau}). \end{cases} \quad (5)$$

# Решение системы на 3 этапе

Этап 3.  $u = u_*$  конечные условия

$$\theta(\tau_f) = 0; \quad \omega(\tau_f) = 0; \quad m(\tau_f) = 0$$

Решение

$$\begin{cases} m_3(\tau) = -u_*\tau_f + u_*\tau, \\ \theta_3(\tau) = \frac{u_*}{2}(e^{-\tau_f+\tau} - e^{\tau_f-\tau}) - u_*(\tau - \tau_f), \\ \omega_3(\tau) = \frac{u_*}{2}(e^{-\tau_f+\tau} + e^{\tau_f-\tau}) - u_*. \end{cases} \quad (6)$$

# Сопряжение уравнений

$$\begin{cases} m_2(\tau_2) = m_3(\tau_2), \\ \theta_2(\tau_2) = \theta_3(\tau_2), \\ \omega_2(\tau_2) = \omega_3(\tau_2). \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \tau_f = 2(\tau_2 - \tau_1), \\ \frac{u_*}{2}(e^{-\tau_f + \tau_2} - e^{\tau_f - \tau_2}) = \frac{u_* + \Omega_0}{2}(e^{\tau_1} - e^{-\tau_1}) + \frac{1}{2}(e^{\tau_1} + e^{-\tau_1}) - u_*(-e^{\tau_1 - \tau_2} + e^{-\tau_1 + \tau_2}), \\ \frac{u_*}{2}(e^{-\tau_f + \tau_2} + e^{\tau_f - \tau_2}) - 2u_* = \frac{1}{2}(e^{\tau_1} - e^{-\tau_1}) + \frac{u_* + \Omega_0}{2}(e^{\tau_1} + e^{-\tau_1}) + u_*(-e^{\tau_1 - \tau_2} - e^{-\tau_1 + \tau_2}) \end{cases} \quad (8)$$




# Замена переменных

$$x = e^{\tau_1}, \quad y = e^{\tau_2}, \quad z = e^{\frac{\tau_f}{2}}$$

$$\begin{cases} z = \frac{y}{x}, \\ \frac{u_*}{2} \left( \frac{y}{z^2} - \frac{z^2}{y} \right) = \frac{u_* + \Omega_0}{2} \left( x - \frac{1}{x} \right) + \frac{1}{2} \left( x + \frac{1}{x} \right) - u_* \left( \frac{y}{x} - \frac{x}{y} \right), \\ \frac{u_*}{2} \left( \frac{y}{z^2} + \frac{z^2}{y} \right) - 2u_* = \frac{1}{2} \left( x - \frac{1}{x} \right) + \frac{u_* + \Omega_0}{2} \left( x + \frac{1}{x} \right) - u_* \left( \frac{y}{x} + \frac{x}{y} \right). \end{cases} \quad (9)$$

# Заключение

# Используемая литература

-  Атанс М., Фалб П., Оптимальное управление. Москва, Машиностроение, 1968, 764 с.
-  Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкrellидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. Москва, Наука, 1983, 393 с.
-  Мостовской А.П. Численные методы и система Mathematica. Мурманск: 2009. - 249 с.