

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО»

ФАКУЛЬТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РОБОТОТЕХНИКИ

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №5
по дисциплине
«НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ»
на тему
**«СИНТЕЗ РАЗРЫВНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО
СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ РЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ
СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ»**

Выполнили: студенты

Румянцев А. А., R3441

Дьячихин Д. Н., R3480

Проверил: преподаватель

Зименко К. А.

Санкт-Петербург

2025

Содержание

1	Задание 1	3
1.1	Условие	3
1.2	Выполнение	3
2	Задание 2	8
2.1	Условие	8
2.2	Выполнение	8
3	Задание 3	8
3.1	Условие	8
3.2	Выполнение	9
4	Вывод	9

1. Задание 1

1.1. Условие

Рассмотрим систему:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \sin x_1, \\ \dot{x}_2 = \theta_1 x_1^2 + (2 + \theta_2) u, \end{cases}$$

где $|\theta_1| \leq 1, |\theta_2| \leq 1$. Весь вектор состояния измерим. Необходимо:

1. синтезировать стабилизирующий разрывный регулятор на основе скользящих режимов;
2. синтезировать стабилизирующий непрерывный регулятор на основе скользящих режимов;
3. провести соответствующий анализ устойчивости;
4. провести математическое моделирование.

1.2. Выполнение

Выберем скользящую поверхность, на которой упростим динамику системы и зададим ей желаемые свойства:

$$s = ax_1 + x_2 = 0, \quad a > 0$$

На поверхности $s = 0$:

$$x_2 = -ax_1, \quad x_2 = \dot{x}_1 - \sin x_1 \Rightarrow \dot{x}_1 = -ax_1 + \sin x_1$$

При малых x_1 получаем $\sin x_1 \sim x_1$:

$$\dot{x}_1 \approx -(a - 1)x_1$$

Для асимптотической устойчивости $a > 1 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) = 0$.

Динамика скользящей переменной:

$$s = ax_1 + x_2 \Rightarrow \dot{s} = a\dot{x}_1 + \dot{x}_2$$

Подставим \dot{x}_1, \dot{x}_2 :

$$\dot{s} = a(x_2 + \sin x_1) + \theta_1 x_1^2 + (2 + \theta_2)u,$$

$$\dot{s} = \Delta(x) + (2 + \theta_2)u, \quad \Delta(x) \equiv ax_2 + a \sin x_1 + \theta_1 x_1^2$$

Необходимо выбрать u так, чтобы выполнялось условие достижения скользящего режима:

$$s\dot{s} \leq -\eta|s|, \quad \eta > 0$$

Это эквивалентно:

$$\dot{V} \leq -\eta|s|, \quad V = 0.5s^2$$

Синтезируем дискретный регулятор на основе скользящих режимов.

Выберем управление как сумму эквивалентной и переключающей составляющих:

$$u = u_{\text{eq}} + u_{\text{sw}}$$

Эквивалентная часть при $s = 0$:

$$u_{\text{eq}} = -\frac{\Delta(x)}{2 + \theta_2}$$

Параметры θ_1, θ_2 неизвестны, поэтому положим их нулевыми.

Такое допущение возможно вследствие наличия переключающей части с коэффициентом переключения β_0 , который при верном подборе компенсирует влияние отклонений θ_i .

Кроме того, скользящий режим является робастным к параметрическим неопределенностям и возмущениям.

Тогда, номинальная эквивалентная часть:

$$u_{\text{eq,nom}} = -\frac{ax_2 + a \sin x_1}{2}$$

Добавим переключающую часть:

$$u_{\text{sw}} = -\beta_0 \text{sign}(s), \quad \beta_0 > 0$$

Итоговый разрывный регулятор:

$$u = -\frac{ax_2 + a \sin x_1}{2} - \beta_0 \operatorname{sign}(s), \quad \beta_0 > 0$$

Подставим u в \dot{s} :

$$\dot{s} = a(x_2 + \sin x_1) + \theta_1 x_1^2 + (2 + \theta_2) \left(-\frac{ax_2 + a \sin x_1}{2} - \beta_0 \operatorname{sign}(s) \right),$$

$$\dot{s} = \theta_1 x_1^2 - \frac{2 + \theta_2}{2} (ax_2 + a \sin x_1) + ax_2 + a \sin x_1 - (2 + \theta_2) \beta_0 \operatorname{sign}(s),$$

$$\dot{s} = \theta_1 x_1^2 - \frac{\theta_2}{2} (ax_2 + a \sin x_1) - (2 + \theta_2) \beta_0 \operatorname{sign}(s)$$

Оценим модуль «невязки» (первые два слагаемых).

Получим верхнюю оценку при $|\theta_1| \leq 1, |\theta_2| \leq 1, |\sin x_1| \leq |x_1|$:

$$\left| \theta_1 x_1^2 - \frac{\theta_2}{2} a(x_2 + \sin x_1) \right| \leq |x_1|^2 + \frac{a}{2} (|x_2| + |x_1|) \equiv W(x)$$

Тогда:

$$\dot{s} \leq W(x) - (2 + \theta_2) \beta_0 \operatorname{sign}(s)$$

Умножим выражение на s и учтем $\operatorname{sign}(s) \cdot s = |s|$:

$$s\dot{s} \leq sW(x) - (2 + \theta_2) \beta_0 |s|$$

В правой части на s не хватает модуля в первом слагаемом – заменим на верхнюю границу:

$$W(x) \geq 0 \Rightarrow sW(x) \leq |s|W(x)$$

Тогда:

$$s\dot{s} \leq |s|W(x) - (2 + \theta_2) \beta_0 |s|$$

Так как $2 + \theta_2 \geq g_0 = 1$, достаточное условие достижения скольжения:

$$\beta_0 > \sup_{x \in \mathcal{D}} W(x) + \delta,$$

где \mathcal{D} – рассматриваемая область состояний, $\delta > 0$ – небольшой запас.

Тогда:

$$s\dot{s} \leq -\mu|s|, \mu = (\beta_0 g_0 - \sup W(x)) > 0$$

Т.е. гарантируем, что при минимально возможном g_0 и максимально возможном $W(x)$ их разница при $\beta_0 g_0$ будет положительна.

Таким образом, для $V = 0.5s^2$ имеем $\dot{V} = s\dot{s} \leq -\mu|s|, \mu > 0$, что гарантирует достижение $s = 0$ за конечное время.

Синтезируем непрерывный регулятор на основе скользящих режимов.

Для уменьшения дрожания из-за задержки переключения управления, заменим в управлении функцию sign функцией насыщения:

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) = \begin{cases} s/\varepsilon, & |s| \leq \varepsilon, \\ \text{sign}(s), & |s| > \varepsilon \end{cases}$$

Непрерывный регулятор:

$$u = -\frac{ax_2 + a \sin x_1}{2} - \beta_0 \text{sat}\left(\frac{s}{\varepsilon}\right)$$

Подставим u в \dot{s} :

$$\dot{s} = \theta_1 x_1^2 - \frac{\theta_2}{2} (ax_2 + a \sin x_1) - (2 + \theta_2) \beta_0 \text{sat}\left(\frac{s}{\varepsilon}\right)$$

Аналогично оценим невязку абсолютной величиной $W(x)$ и зададим $V = 0.5s^2$, тогда:

$$\dot{V} = s\dot{s} \leq |s|W(x) - (2 + \theta_2) \beta_0 |s| \left| \text{sat}\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) \right|$$

Если $|s| > \varepsilon$, то $|\text{sat}| = 1$ – аналогичное разрывному случаю условие на β_0 , следовательно $\dot{V} \leq -\mu|s|, \mu > 0$ и достижение уменьшает s до слоя $|s| \leq \varepsilon$.

На слое $|s| \leq \varepsilon$ имеем $\text{sat}(s/\varepsilon) = s/\varepsilon$, тогда:

$$\dot{V} \leq |s|W(x) - (2 + \theta_2) \beta_0 \frac{s^2}{\varepsilon}$$

Пусть на рассматриваемой рабочей области \mathcal{D} есть оценка:

$$|\Delta(x)| \leq D_{\max} \leq |x_1|^2 + \frac{a}{2}(|x_2| + |x_1|)$$

Тогда, для $r = |s| \leq \varepsilon$ оценивающее неравенство:

$$\dot{V} \leq r D_{\max} - g_0 \frac{\beta_0}{\varepsilon} r^2, \quad g_0 = \inf (2 + \theta_2) = 1$$

Правая часть в \dot{V} отрицательна, если:

$$g_0 \frac{\beta_0}{\varepsilon} r^2 > r D_{\max} \Rightarrow r > \frac{D_{\max} \varepsilon}{g_0 \beta_0}$$

Предельный радиус:

$$r_* := \frac{D_{\max} \varepsilon}{g_0 \beta_0}$$

Тогда, при $r \in (r_*, \varepsilon]$ имеем $\dot{V} < 0$ и $r(t)$ убывает до нее не более чем r_* . Следовательно, система обладает практической устойчивостью: внутри слоя $|s| \leq \varepsilon$ значения $s(t)$ стремятся к компактному множеству $|s| \leq r_*$.

Моделирование системы при $a = 2, \beta_0 = 0.8, \varepsilon = 0.01, x_0 = [1 \ 0]^T, \theta_1 = 0.5, \theta_2 = -0.5$:

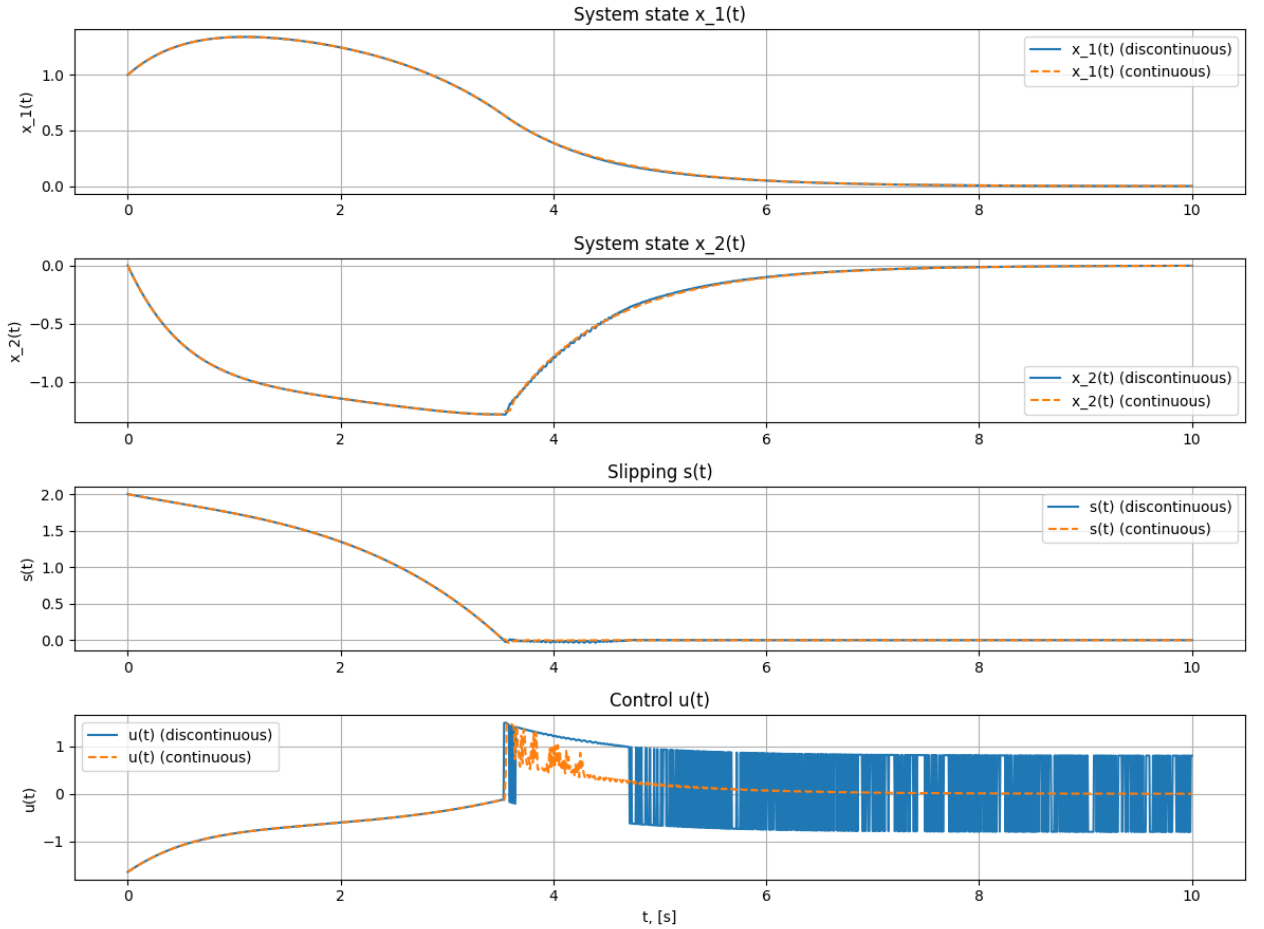


Рис. 1: Графики $x_i(t), s(t), u(t)$

Все графики сошлись к нулю, кроме разрывного управления.

В разрывном управлении две составляющие – эквивалентная и переключающая. Первая стремится к нулю вместе с состоянием. Вторая не стремится к нулю, а переключается между $\pm\beta_0$, из-за чего получается высокочастотное дрожание – график $u(t)$ выглядит как импульсный сигнал при устоявшейся системе. По графику видно, что управление скачет от $\approx -\beta_0 = -0.8$ до $\approx +\beta_0 = 0.8$.

2. Задание 2

2.1. Условие

Рассмотрим систему:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + a_1 x_1 \sin x_1, \\ \dot{x}_2 = a_2 x_1 x_2 + 3u, \end{cases}$$

где a_1, a_2 – неизвестные параметры, $|a_1 - 1| \leq 1, |a_2 - 1| \leq 1$. Весь вектор состояния измерим. Необходимо синтезировать стабилизирующий регулятор на основе скользящих режимов, провести соответствующий анализ устойчивости и провести математическое моделирование.

2.2. Выполнение

...

3. Задание 3

3.1. Условие

Рассмотрим уравнение движения для маятника в виде:

$$ml\ddot{\theta} + mg \sin \theta + kl\dot{\theta} = \frac{T}{l} + mh(t) \cos \theta,$$

где h – горизонтальное ускорение, T – управляющий момент.

Предположим, что:

$$0.8 \leq l \leq 1, 0.5 \leq m \leq 1, 0.1 \leq k \leq 0.2, |h(t)| \leq 0.5$$

и $g = 9.81$. Требуется стабилизировать маятник при $\theta = 0$ для произвольных начальных условий. Необходимо разработать непрерывный регулятор на основе скользящего режима с обратной связью по состоянию.

3.2. Выполнение

...

4. Вывод

...