

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 №2
по дисциплине
«НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ»
на тему
**«ФУНКЦИЯ ЛЯПУНОВА, УСТОЙЧИВОСТЬ И
РЕГУЛЯТОРЫ»**

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
1.2.1	Первая система	3
1.2.2	Вторая система	4
1.2.3	Третья система	5
1.2.4	Четвертая система	5
1.2.5	Пятая система	7
2	Задание 2	7
2.1	Условие	7
2.2	Выполнение	8
3	Задание 3	10
3.1	Условие	10
3.2	Выполнение	10
4	Задание 4	11
4.1	Условие	11
4.2	Выполнение	11
5	Задание 5	13
5.1	Условие	13
5.2	Выполнение	14
6	Задание 6	16
6.1	Условие	16
6.2	Выполнение	16
7	Вывод	18

1. Задание 1

1.1. Условие

Для каждой из данных систем используйте кандидат квадратичной функции Ляпунова, чтобы показать, что начало координат асимптотически устойчиво.

1.2. Выполнение

1.2.1. Первая система

Рассмотрим систему:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1 + x_1x_2, \\ \dot{x}_2 = -2x_2 \end{cases} \quad (1)$$

Функция Ляпунова в квадратичной форме:

$$V(x) = x^T P x, \text{ пусть } P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \Rightarrow V(x) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix},$$

$$V = \frac{1}{2} (x_1^2 + x_2^2), \quad V(x_1, x_2) > 0 \forall (x_1, x_2) \neq (0, 0), \quad V(0, 0) = 0$$

Ее производная:

$$\dot{V} = x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2 = x_1 (-x_1 + x_1x_2) + x_2 (-2x_2) = -x_1^2 + x_1^2x_2 - 2x_2^2,$$

$$\dot{V} = -x_1^2 (1 - x_2) - 2x_2^2$$

Область, где производная отрицательна:

$$r^2 = x_1^2 + x_2^2 < 1$$

Тогда:

$$\forall (x_1, x_2) \neq (0, 0), x_1^2 + x_2^2 < 1 : \dot{V} < 0$$

В окрестности нуля $\dot{V} < 0$, следовательно начало координат локально асимптотически устойчиво.

Глобальная асимптотическая устойчивость достигалась бы в случае, когда $\forall (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 \setminus \{0\} : \dot{V} < 0$.

1.2.2. Вторая система

Рассмотрим систему:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_2 - x_1 (1 - x_1^2 - x_2^2), \\ \dot{x}_2 = x_1 - x_2 (1 - x_1^2 - x_2^2) \end{cases} \quad (2)$$

Функция Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2} (x_1^2 + x_2^2), \quad V(x_1, x_2) > 0 \forall (x_1, x_2) \neq (0, 0), \quad V(0, 0) = 0$$

Ее производная:

$$\dot{V} = x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2 = x_1 (-x_2 - x_1 (1 - x_1^2 - x_2^2)) + x_2 (x_1 - x_2 (1 - x_1^2 - x_2^2)),$$

$$\dot{V} = x_1^4 + x_2^4 + 2x_1^2 x_2^2 - x_1^2 - x_2^2 = (x_1^2 + x_2^2) (x_1^2 + x_2^2 - 1)$$

Сделаем замену $r^2 = x_1^2 + x_2^2$:

$$\dot{V} = r^2 (r^2 - 1)$$

Тогда:

$$r^2 - 1 < 0 \Rightarrow r \in (-1, 1) : \dot{V} < 0,$$

$$r^2 - 1 = 0 \Rightarrow r = \pm 1 : \dot{V} = 0,$$

$$r^2 - 1 > 0 \Rightarrow r \in (-\infty, -1) \cup (1, \infty) : \dot{V} > 0$$

Внутри единичной окружности $r^2 = x_1^2 + x_2^2 < 1$ начало координат локально асимптотически устойчиво.

1.2.3. Третья система

Рассмотрим систему:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 (1 - x_1^2) - 2x_1, \\ \dot{x}_2 = -(x_1 + x_2) (1 - x_1^2) \end{cases} \quad (3)$$

Функция Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2} (x_1^2 + x_2^2), \quad V(x_1, x_2) > 0 \forall (x_1, x_2) \neq (0, 0), \quad V(0, 0) = 0$$

Ее производная:

$$\dot{V} = x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2 = x_1 (x_2 (1 - x_1^2) - 2x_1) + x_2 (-(x_1 + x_2) (1 - x_1^2)),$$

$$\dot{V} = x_1 x_2 (1 - x_1^2) - 2x_1^2 - x_1 x_2 (1 - x_1^2) - x_2^2 (1 - x_1^2) = -2x_1^2 - x_2^2 (1 - x_1^2)$$

Область, в которой производная отрицательна:

$$r^2 = x_1^2 + x_2^2 < 1$$

Тогда:

$$\forall (x_1, x_2) \neq (0, 0), x_1^2 + x_2^2 < 1 : \dot{V} < 0$$

В окрестности нуля $\dot{V} < 0$, следовательно начало координат локально асимптотически устойчиво.

1.2.4. Четвертая система

Рассмотрим систему:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -3x_1 - x_2, \\ \dot{x}_2 = 2x_1 - x_2^3 \end{cases} \quad (4)$$

Функция Ляпунова:

$$V(x) = x^T P x, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T,$$

где P – симметрическая матрица.

Найдем P :

$$A^T P + P A = -I, \quad A = \begin{bmatrix} -3 & -1 \\ 2 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

$P \succ 0$ $[\lambda_{1,2} = (\pm\sqrt{5} + 3) / 4] - V(x)$ положительно определена и эквивалентна $\|x\|^2$.

Нелинейная составляющая:

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 & -x_2^3 \end{bmatrix}^T$$

Производная функции Ляпунова:

$$\dot{V} = x^T (A^T P + P A) x + 2x^T P g(x) = -\|x\|^2 + 2x^T P \begin{bmatrix} 0 & -x_2^3 \end{bmatrix}^T$$

Оценим остаточный член по модулю.

Обозначим операторную норму матрицы P через $\|P\|$ (наибольшее собственное значение P):

$$\|P\| = \frac{\sqrt{5} + 3}{4}$$

Тогда:

$$\left| 2x^T P \begin{bmatrix} 0 & -x_2^3 \end{bmatrix}^T \right| \leq 2\|x\| \|P\| \left\| \begin{bmatrix} 0 & -x_2^3 \end{bmatrix} \right\| \leq 2\|P\| \|x\| |x_2|^3 \leq 2\|P\| \|x\|^4$$

Производная функции Ляпунова:

$$\dot{V}(x) \leq -\|x\|^2 + 2\|P\| \|x\|^4 = -\|x\|^2 (1 - 2\|P\| \|x\|^2)$$

Положим радиус окрестности нуля $r > 0$ такой, что:

$$2\|P\| r^2 \leq 0.5 \Rightarrow r \leq 0.43, \quad r^2 = x_1^2 + x_2^2 \leq 0.43^2$$

Тогда, для всех $x \neq 0$ с $\|x\| \leq r$:

$$\dot{V}(x) \leq -0.5\|x\|^2 < 0$$

Таким образом, начало координат локально асимптотически устойчиво.

1.2.5. Пятая система

Рассмотрим систему:

$$\dot{x} = -\arctan(x) \quad (5)$$

Функция Ляпунова:

$$V(x) = \frac{1}{2}x^2, \quad V(x) > 0 \forall x \neq 0, \quad V(0) = 0$$

Ее производная:

$$\dot{V} = x\dot{x} = x(-\arctan(x)) = -x \arctan(x)$$

Для всех $x \in \mathbb{R}$:

$$\arctan(x) \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$$

и $\arctan(x)$ – неубывающая нечетная функция. Она имеет тот же знак, что x .

Тогда:

$$x > 0 \Rightarrow \arctan(x) > 0 \Rightarrow \dot{V} = -x \arctan(x) < 0 \forall x \neq 0,$$

$$x = 0 \Rightarrow \arctan(x) = 0 \Rightarrow \dot{V} = 0,$$

$$x < 0 \Rightarrow \arctan(x) < 0 \Rightarrow \dot{V} = -x \arctan(x) < 0 \forall x \neq 0$$

Таким образом, для всех $x \neq 0 : \dot{V} < 0$, следовательно начало координат глобально асимптотически устойчиво.

2. Задание 2

2.1. Условие

Рассмотрим скалярную систему $\dot{x} = \alpha x^p + h(x)$, где p – натуральное число, а $h(x)$ удовлетворяет условию $|h(x)| \leq k|x|^{p+1}$ в некоторой окрестности точки начала координат. При каких условиях система асимптотически устойчива?

2.2. Выполнение

Положим влияние $h(x)$ незначительным при малых x около начала координат, так как оно имеет порядок x^{p+1} и стремится к нулю быстрее, чем x^p .

Рассмотрим упрощенную систему:

$$\dot{x} = \alpha x^p$$

При нечетном p функция x^p сохраняет знак x :

$$x > 0 \Rightarrow x^p > 0,$$

$$x < 0 \Rightarrow x^p < 0$$

Направление поля на прямой зависит от знака α :

$$\alpha > 0 \Rightarrow \text{sign}(\dot{x}) = \text{sign}(x) \Rightarrow x > 0 : \dot{x} > 0, x < 0 : \dot{x} < 0$$

$$\alpha < 0 \Rightarrow \text{sign}(\dot{x}) = -\text{sign}(x) \Rightarrow x > 0 : \dot{x} < 0, x < 0 : \dot{x} > 0$$

При $\alpha > 0$ функция $x(t)$ или растет или убывает в противоположном от нуля направлении – начало координат неустойчиво.

При $\alpha < 0$ функция $x(t)$ либо растет к нулю слева, либо убывает к нулю справа – начало координат асимптотически устойчиво.

При четном p функция x^p всегда положительна.

Направления полей:

$$\alpha > 0 \Rightarrow \dot{x} = \alpha x^p > 0 \forall x \neq 0 \Rightarrow x > 0 : \dot{x} > 0, x < 0 : \dot{x} > 0$$

$$\alpha < 0 \Rightarrow \dot{x} = \alpha x^p < 0 \forall x \neq 0 \Rightarrow x > 0 : \dot{x} < 0, x < 0 : \dot{x} < 0$$

При $\alpha > 0$ функция $x(t)$ приближается к нулю слева, но справа расходится – неустойчиво.

При $\alpha < 0$ функция $x(t)$ приближается к нулю справа, но слева расходится – неустойчиво.

Таким образом, p должно быть нечетным, а $\alpha < 0$.

Теперь учтем возмущение $h(x)$:

$$\dot{x} = \alpha x^p + h(x)$$

Оно мало в окрестности нуля.

Для $x \neq 0$ перепишем:

$$\dot{x} = x^p \left(\alpha + \frac{h(x)}{x^p} \right)$$

Из условия $|h(x)| \leq k|x|^{p+1}$ следует:

$$\left| \frac{h(x)}{x^p} \right| \leq k|x|, \quad k > 0$$

Возьмем $\varepsilon > 0$ такой, что:

$$k\varepsilon < \frac{|\alpha|}{2},$$

тогда для всех $|x| < \varepsilon$:

$$\alpha + \frac{h(x)}{x^p} \leq \alpha + k|x| \leq \frac{\alpha}{2} < 0$$

Учтем для $|x|$:

$$\frac{d|x|}{dx} = \dot{x} \operatorname{sign}(x), \quad x^p \operatorname{sign}(x) = |x|^p, \quad p = 2n + 1, \quad n \in \mathbb{N}_0,$$

$$\dot{x} \operatorname{sign}(x) = (\alpha x^p + h(x)) \operatorname{sign}(x) = x^p \operatorname{sign}(x) \left(\alpha + \frac{h(x)}{x^p} \right)$$

Следовательно, для $|x| < \varepsilon$:

$$\dot{x} \operatorname{sign}(x) = |x|^p \left(\alpha + \frac{h(x)}{x^p} \right) \leq \frac{\alpha}{2} |x|^p < 0,$$

то есть $|x|$ монотонно убывает вдоль траекторий, пока решение остаётся в окрестности нуля.

Таким образом, $|x(t)| \xrightarrow[t \rightarrow \infty]{} 0$ при малых x , $p = 2n + 1$, $n \in \mathbb{N}_0$ и $\alpha < 0$ – начало координат локально асимптотически устойчиво.

Также это задание можно решить через функцию Ляпунова $V = 0.5x^2$.

3. Задание 3

3.1. Условие

На основе применения LMI построить линейный регулятор, стабилизирующий систему экспоненциально со степенью 2:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = 2x_1 + u \end{cases} \quad (6)$$

3.2. Выполнение

Приведем систему к виду:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad u = Kx$$

Матрицы A, B :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Собственные числа матрицы A :

$$\sigma(A) = \{1.41, -1.41\}$$

Проверим управляемость:

$$A = PJP^{-1}, B_J = P^{-1}B \Rightarrow J = \begin{bmatrix} 1.41 & 0 \\ 0 & -1.41 \end{bmatrix}, \quad B_J = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

Система полностью управляема – можно задать регулятору любую степень устойчивости.

Синтезируем LMI со степенью устойчивости $\alpha = 2$ без ограничения на управление при помощи матричного неравенства типа Ляпунова:

$$PA^T + AP + 2\alpha P + Y^T B^T + BY \preceq 0, \quad K = YP^{-1}$$

Получим:

$$K = \begin{bmatrix} -39.02 & -10.81 \end{bmatrix}$$

Проверим собственные числа замкнутой системы $A + BK$:

$$\sigma(A + BK) = \{-5.4 \pm 2.8i\}$$

Замкнутая система асимптотически устойчива, и, убывает быстрее, чем требуемая скорость e^{-2t} (см. действительную часть собственных чисел).

4. Задание 4

4.1. Условие

Найти ограничивающее условие на параметр γ , при котором система является экспоненциально устойчивой со степенью 1. Закон управления взять из предыдущего задания.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \gamma \sin(x_2), \\ \dot{x}_2 = 2x_1 + u, \end{cases} \quad (7)$$

$$u = Kx, \quad K = \begin{bmatrix} -39.02 & -10.81 \end{bmatrix}$$

4.2. Выполнение

Подставим закон управления:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \gamma \sin(x_2), \\ \dot{x}_2 = 2x_1 + Kx = 2x_1 - 39.02x_1 - 10.81x_2 \end{cases}$$

Получим систему:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \gamma \sin(x_2), \\ \dot{x}_2 = -37.02x_1 - 10.81x_2 \end{cases}$$

Замкнутая система будет иметь вид:

$$\dot{x} = (A + BK)x + \gamma f(x),$$

$$A + BK = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -37.02 & -10.81 \end{bmatrix}, \quad f(x) = \begin{bmatrix} \sin(x_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Линеаризуем систему. При малых x_2 :

$$\sin(x_2) \approx x_2$$

Тогда система примет вид:

$$\dot{x} = \left[(A + BK) + \gamma \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right] x = A_\gamma x,$$

$$A_\gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 + \gamma \\ -37.02 & -10.81 \end{bmatrix}$$

Экспоненциальная устойчивость степени 1 требует:

$$\operatorname{Re}(\lambda_{A_\gamma i}) \leq -1$$

Характеристический полином:

$$\det(\lambda I - A_\gamma) = \lambda^2 + 10.81\lambda + 37.02(\gamma + 1) = 0$$

Собственные числа:

$$\lambda_{1,2} = \frac{-10.81 \pm \sqrt{10.81^2 - 4 \cdot 37.02(\gamma + 1)}}{2}$$

Рассмотрим дискриминант:

$$D = 10.81^2 - 4 \cdot 37.02(\gamma + 1)$$

Если $D < 0$, то корни комплексно-сопряженные с отрицательной действительной частью $-10.81/2 < -1$:

$$10.81^2 - 4 \cdot 37.02(\gamma + 1) < 0 \Rightarrow \gamma > \frac{10.81^2}{4 \cdot 37.02} - 1 \Rightarrow \gamma > -0.21$$

Если $D \geq 0$, то корни действительные и должны удовлетворять условию:

$$\lambda_i = \frac{-10.81 \pm \sqrt{10.81^2 - 4 \cdot 37.02 (\gamma + 1)}}{2} \leq -1,$$

Так как $\lambda_{1+} \geq \lambda_{2-}$, то достаточно проверить λ_{1+} :

$$\sqrt{10.81^2 - 4 \cdot 37.02 (\gamma + 1)} \leq 8.81 \Rightarrow \gamma \geq \frac{8.81^2 - 10.81^2}{-4 \cdot 37.02} - 1 \Rightarrow \gamma \geq -0.74$$

Таким образом, экспоненциальная устойчивость степени 1 достигается при:

$$\gamma \geq -0.74$$

При $\gamma > -0.21$ собственные числа будут комплексными.

5. Задание 5

5.1. Условие

Рассмотрим систему:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 - 0.5x_1^3, \\ \dot{x}_2 = u, \\ u = Kx \end{cases} \quad (8)$$

Весь вектор состояния $x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T$ измерим.

1. Синтезируйте линейный регулятор с обратной связью по состоянию, чтобы глобально стабилизировать начало координат.
2. Исследуйте устойчивость по входу к состоянию при наличии шумов измерений.
3. Исследуйте устойчивость по входу к состоянию при наличии аддитивных возмущений.

5.2. Выполнение

Линейная обратная связь:

$$u = Kx = -k_1x_1 - k_2x_2$$

Замкнутая система:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 - 0.5x_1^3, \\ \dot{x}_2 = -k_1x_1 - k_2x_2 + d \end{cases}$$

В качестве d учитываем шумы измерений или аддитивные возмущения.

В доказательстве глобальной устойчивости полагаем $d = 0$.

Функция Ляпунова:

$$V = \frac{k_1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2, \quad V(x_1, x_2) > 0 \forall (x_1, x_2) \neq (0, 0), \quad k_1 > 0, \quad V(0, 0) = 0$$

Ее производная:

$$\dot{V} = k_1x_1\dot{x}_1 + x_2\dot{x}_2 = k_1x_1(x_2 - 0.5x_1^3) + x_2(-k_1x_1 - k_2x_2) = -0.5k_1x_1^4 - k_2x_2^2$$

Член $k_1x_1x_2$ сократился.

При всех $k_1, k_2 > 0$:

$$\dot{V} < 0, \quad \dot{V} = 0 : (x_1, x_2) = (0, 0)$$

Начало координат глобально асимптотически устойчиво.

При наличии шумов измерений вектор состояния объекта:

$$\tilde{x} = x + n(t),$$

где $n(t)$ – векторный шум.

Управление:

$$u = K\tilde{x} = Kx + Kn(t) = Kx + w(t)$$

Производная функции Ляпунова:

$$\dot{V} = k_1 x_1 (x_2 - 0.5x_1^3) + x_2 (-k_1 x_1 - k_2 x_2 + w(t)) = -0.5k_1 x_1^4 - k_2 x_2^2 + x_2 w(t)$$

Неравенство Коши-Шварца:

$$ab \leq \frac{\varepsilon}{2} a^2 + \frac{1}{2\varepsilon} b^2, \quad a, b \in \mathbb{R}, \varepsilon > 0$$

Положим $a = |x_2|$, $b = |w(t)|$, $\varepsilon = k_2 > 0$:

$$x_2 w(t) \leq |x_2| |w(t)| \leq \frac{k_2}{2} x_2^2 + \frac{1}{2k_2} |w(t)|^2$$

Тогда:

$$\dot{V} \leq -0.5k_1 x_1^4 - k_2 x_2^2 + \frac{k_2}{2} x_2^2 + \frac{1}{2k_2} |w(t)|^2 = -0.5k_1 x_1^4 - 0.5k_2 x_2^2 + \frac{1}{2k_2} |w(t)|^2$$

Получили:

$$\dot{V} \leq -\alpha(|x|) + \gamma(|w(t)|^2),$$

где $\alpha(|x|)$ – положительно определенная функция, $\gamma(|w(t)|^2)$ – положительная функция входа.

Пусть:

$$\|w\|_\infty := \sup_t |w(t)| \leq W$$

Тогда при $\dot{V} \geq 0$:

$$0.5k_1 x_1^4 + 0.5k_2 x_2^2 \leq \frac{1}{2k_2} W^2$$

Отдельно для компонент:

$$0.5k_1 x_1^4 \leq \frac{1}{2k_2} W^2 \Rightarrow |x_1| \leq (k_1 k_2)^{-1/4} W^{1/2},$$

$$0.5k_2 x_2^2 \leq \frac{1}{2k_2} W^2 \Rightarrow |x_2| \leq \frac{W}{k_2}$$

То есть x_1 ограничено пропорционально \sqrt{W} , x_2 линейно по W .

Таким образом, при наличии шумов измерений система устойчива по входу-к-состоянию (ISS) – при любом ограниченном входе $w(t)$ состояния x_1, x_2

тоже остаются ограниченными.

При наличии аддитивных возмущений уравнение динамики x_2 :

$$\dot{x}_2 = -k_1 x_1 - k_2 x_2 + d(t)$$

Этот случай аналогичен случаю с измерительным шумом $w(t)$.

Производная функции Ляпунова:

$$\dot{V} = -0.5k_1 x_1^4 - k_2 x_2^2 + x_2 d(t)$$

Аналогичные преобразования:

$$\dot{V} \leq -0.5k_1 x_1^4 - 0.5k_2 x_2^2 + \frac{1}{2k_2} |d(t)|^2$$

Ограничения для компонент будут аналогичны $W \sim |d|_\infty$.

Таким образом, при наличии аддитивных возмущений система устойчива по входу-к-состоянию. Ограниченный возмущающий сигнал дает ограниченное состояние.

6. Задание 6

6.1. Условие

Исследуйте устойчивость по входу-к-состоянию системы по отношению к возмущению d :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -2x_1 + x_2, \\ \dot{x}_2 = -x_1 - \sigma(x_1) - x_2 + d, \end{cases} \quad (9)$$

где σ – локально липшицева, $\sigma(0) = 0$, $y\sigma(y) \geq 0$.

6.2. Выполнение

Из условия $y\sigma(y) \geq 0$ следует, что $\sigma(y)$ имеет тот же знак, что и y .

Функция Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2} (x_1^2 + x_2^2), \quad V(x_1, x_2) > 0 \forall (x_1, x_2) \neq (0, 0), \quad V(0, 0) = 0$$

Ее производная:

$$\dot{V} = x_1 (-2x_1 + x_2) + x_2 (-x_1 - \sigma(x_1) - x_2 + d) = -2x_1^2 - x_2^2 - x_2\sigma(x_1) + x_2d$$

При $d = 0$ член $x_2\sigma(x_1)$ может иметь произвольный знак, поэтому производная функции Ляпунова не всегда строго отрицательна.

Неравенство Коши-Буняковского:

$$x_2d \leq \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}d^2$$

Тогда:

$$\dot{V} \leq -2x_1^2 - x_2^2 - x_2\sigma(x_1) + \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}d^2 = -2x_1^2 - \frac{1}{2}x_2^2 - x_2\sigma(x_1) + \frac{1}{2}d^2$$

Так как $\sigma(0) = 0$, то для $x_2 = 0$ можно для малых x_1 записать:

$$|\sigma(x_1)| = |\sigma(x_1) - \sigma(0)| \leq L|x_1 - 0| = L|x_1|,$$

где L – константа Липшица.

В окрестности нуля функция растёт не быстрее, чем $L|x_1|$.

Оценим член $-x_2\sigma(x_1)$:

$$|-x_2\sigma(x_1)| \leq |x_2||\sigma(x_1)| \leq L|x_1||x_2| \leq \frac{L}{2}(x_1^2 + x_2^2)$$

Тогда производная функции Ляпунова:

$$\dot{V} \leq -2x_1^2 - \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{L}{2}x_1^2 + \frac{L}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}d^2 = -\left(2 - \frac{L}{2}\right)x_1^2 - \left(\frac{1}{2} - \frac{L}{2}\right)x_2^2 + \frac{1}{2}d^2$$

Скобки должны быть положительны:

$$\begin{cases} 2 - \frac{L}{2} > 0, \\ 1 - L > 0 \end{cases} \Rightarrow L < 1$$

Положительно определенная функция:

$$\alpha = \min(\alpha_1, \alpha_2) > 0, \quad \alpha_1 = 2 - L/2, \alpha_2 = 1/2 - L/2$$

Обозначим:

$$\|x\|^2 = x_1^2 + x_2^2, \quad \gamma(s) = \frac{1}{2}s, \quad s = \|d\|^2$$

Тогда производная функции Ляпунова:

$$\dot{V} \leq -\alpha\|x\|^2 + \frac{1}{2}d^2 = -\alpha\|x\|^2 + \gamma(\|d\|^2)$$

Ограничение величины состояния при $\dot{V} \geq 0$:

$$\|x\|^2 \leq \frac{1}{2\alpha}d^2 \Rightarrow \|x\| \leq \frac{1}{\sqrt{2\alpha}}|d|$$

Величина состояния ограничена линейно по $|d|$.

Таким образом, система устойчива по входу-к-состоянию (ISS) при $L < 1$. С возмущением $d \neq 0$ состояние остается ограниченным, величина пропорциональна размеру d .

При $d = 0$ система асимптотически устойчива.

7. Вывод

В ходе данной лабораторной работы были исследованы различные нелинейные системы. Устойчивость определялась по производной функции Ляпунова. Был синтезирован регулятор с условием на параметр для степени экспоненциальной устойчивости. Была исследована устойчивость системы с регулятором при наличии шумов измерений и аддитивных возмущений. Была исследована устойчивость по входу-к-состоянию системы по отношению к возмущению. Каждый результат был обоснован.