

Макаров Д.С

КАНДИДАТСКАЯ

Ульяновск

Издательство Ульяновского государственного университета

2016

Оглавление

I	Глава 1	4
1	Предельные уравнения и устойчивость	4
II	Глава 2	11
1	Постановка задачи управления трехзвенным манипулятором	11
2	Построение управления	13
III	Глава 3	15
1	Задача управления трехзвенным манипулятором	15
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК		17

Глава I

Глава 1

1 Предельные уравнения и устойчивость

Пусть R^p — линейное действительное пространство p — векторов x с нормой $|x|$, R — действительная ось, $h > 0$ — заданное действительное число, C — банахово пространство непрерывных функций $\varphi : [-h, 0] \rightarrow R^p$ с нормой $\|\varphi\| = \max(|\varphi(s)|, -h \leq s \leq 0)$. Для непрерывной функции $x : [\alpha - h, \beta) \rightarrow R^p$ ($\alpha, \beta \in R, \alpha < \beta$) и каждого $t \in [\alpha, \beta)$ функцию $x_t \in C$ определим равенством $x_t(s) = x(t + s)$ ($-h \leq s \leq 0$), под $\dot{x}(t)$ будем понимать правостороннюю производную.

Рассмотрим неавтономное функционально-дифференциальное уравнение запаздывающего типа

$$\dot{x}(t) = f(t, x_t), \quad (1.1)$$

где $f : R \times C_H \rightarrow R^p$ — некоторое непрерывное отображение, удовлетворяющее следующему предположению.

ПРЕДПОЛОЖЕНИЕ 1.1 Для каждого числа r , $0 < r < H$, существует такое число $m_r > 0$ что выполняется неравенство

$$|f(t, \varphi)| \leq m_r, \forall \varphi \in \bar{C}_r. \quad (1.2)$$

Пусть выполняется I.1.1 выполнено и $\{r_n\}$ — последовательность чисел такая, что $r_1 < r_2 < \dots < r_n < \dots$, $r_n \rightarrow H$ при $n \rightarrow \infty$. Определим для всех r_i множество $K_i \subset C$ функций $\varphi \in C$, таких, что для $s, s_1, s_2 \in [-h, 0]$

$$|\varphi(s)| \leq r_i, \quad |\varphi(s_2) - \varphi(s_1)| \leq m_{r_i} |s_2 - s_1|.$$

Множество K_i очевидно, будет компактом. Положим $\Gamma = \bigcup_{i=1}^{\infty} K_i$.

Рассмотрим F - множество всех непрерывных функций f , определенных на $R \times \Gamma$, со значениями в R^p . Через f^τ обозначим сдвиг функции f , $f^\tau(t, \varphi) = f(\tau + t, \varphi)$. Для $f \in F$ семейство сдвигов $F_0 = \{f^\tau : \tau \in R\}$ будет являться подмножеством F .

Дадим определение сходимости в F как равномерной на каждом компакте $K' \subset R \times \Gamma$: последовательность $\{f_n \in F\}$ сходится к $f \in F$, если $\forall K' \subset R \times \Gamma$ и $\forall \varepsilon > 0$ выполняется $|f_n(t, \varphi) - f(t, \varphi)| < \varepsilon$, при $n > N = N(\varepsilon)$ и $(t, \varphi) \in K'$.

В силу определения области Γ эта сходимость метризуема: для всех n определим для двух функций $f_1, f_2 \in F$ полунорму $\|\cdot\|_n$ и соответствующую псевдометрику ρ_n следующим образом

$$\|f\|_n = \sup \{|f(t, \varphi)|, \forall (t, \varphi) \in K'_n\},$$

$$\rho_n(f_1, f_2) = \frac{\|f_2 - f_1\|_n}{1 + \|f_2 - f_1\|_n},$$

где $K'_n = [0, n] \times K_n$, $n = 1, 2, \dots$ (K_n определено выше).

Определим расстояние между функциями $f_1, f_2 \in F$ как

$$\rho(f_1, f_2) = \sum_{n=1}^{\infty} 2^{-n} \rho_n(f_1, f_2). \quad (1.3)$$

Можно убедиться, что при этом будут выполнены все аксиомы метрического пространства. И пространство F будет полным по отношению к введенной метрике.

Допустим, что правая часть (1.1) удовлетворяет также следующему предположению.

ПРЕДПОЛОЖЕНИЕ 1.2 Для любого $K \subset C_H$ (K - компакт) функция $f = f(t, \varphi)$ равномерно непрерывна по $(t, \varphi) \in R \times K$, т.е. $\forall K \subset C_H$ и для произвольного малого $\varepsilon > 0$ найдется $\delta = \delta(\varepsilon, K) > 0$, такое, что для любых $(t, \varphi) \in R \times K$, $(t_1, \varphi_1), (t_2, \varphi_2) \in R \times K : |t_2 - t_1| < \delta$, $\varphi_1, \varphi_2 \in K : \|\varphi_2 - \varphi_1\| < \delta$, выполняются неравенства

$$|f(t_2, \varphi_2) - f(t_1, \varphi_1)| < \varepsilon. \quad (1.4)$$

ЛЕММА 1.1 При условии выполнения предположений I.1.1 и I.1.2 семейство сдвигов $\{f^\tau : \tau \in R\}$ предкомпактно в F .

Доказательство леммы следует непосредственно из (1.4), построения F и соотношения

$$|f^\tau(t_2, \varphi_2) - f^\tau(t_1, \varphi_1)| = |f(\tau + t_2, \varphi_2) - f(\tau + t_1, \varphi_1)|.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1.1 Функция $f^* : R \times \Gamma \rightarrow R^p$ называется предельной к f , если существует последовательность t_n такая, что $f^{(n)}(t, \varphi) = f(t_n + t, \varphi)$ сходится к $f^*(t, \varphi)$ при $t \rightarrow \infty$ в F . Замыкание семейства $\{f^\tau : \tau \in R\}$ в F называется оболочкой $S^+(f)$.
Уравнение

$$\dot{x}(t) = f^*(t, x_t) \quad (1.5)$$

называется предельным к (1.1).

При условиях (1.2) и (1.4) уравнение (1.1) является предкомпактным.

ПРЕДПОЛОЖЕНИЕ 1.3 Для любого компактного множества $K \subset C_H$ функция $f = f(t, \varphi)$ удовлетворяет условию Липшица т.е., $\forall K \subset C_H$ существует $m = m(K)$, такое, что для любых $t \in R$; $\varphi_1, \varphi_2 \in K$ будет выполнено неравенство

$$|f(t, \varphi_2) - f(t, \varphi_1)| \leq m \|\varphi_2 - \varphi_1\|. \quad (1.6)$$

При выполнении условия (1.6), каждая предельная функция $f^*(t, \varphi)$ также будет удовлетворять аналогичному условию Липшица относительно компакта $K \subset \Gamma$.

Вследствие этого получим, что при предположении 1.1.3 решения уравнения (1.1) при начальном условии $(t, \varphi) \in R \times C_H$ и уравнения (1.5) для $(t, \varphi) \in R \times \Gamma$ будут единственными.

Связь между решениями уравнений (1.1) и (1.5) определяется следующей теоремой:

ТЕОРЕМА 1.1 Пусть функция $f^* : R \times \Gamma \rightarrow R^p$ есть предельная к f в F относительно последовательности $t_n \rightarrow +\infty$, а последовательности $\{\alpha_n \in \mathbb{R}\}$ и $\{\varphi_n \in F\}$ таковы, что $\alpha_n \rightarrow \alpha \in \mathbb{R}$, $\varphi_n \rightarrow \varphi \in \Gamma$ при $n \rightarrow \infty$. Пусть $x = x(t, t_n + \alpha_n, \varphi_n)$ есть решения уравнения (1.1), а $y(t, \alpha, \varphi)$ есть решение уравнения $\dot{x}(t) = f^*(t, x_t)$, определенное для $t \in [\alpha - h, \beta)$.

Тогда последовательность функций $y^n(t) = x(t_n + t, t_n + \alpha_n, \varphi_n)$ сходится к $y(t, \alpha, \varphi)$ равномерно по $t \in [\alpha - h + \varepsilon, \gamma]$ для малого $\varepsilon > 0$ ($\varepsilon = 0$ при $\{\alpha_n = \alpha\}$) и каждого γ , $\alpha < \gamma < \beta$.

ТЕОРЕМА 1.2 Пусть решение (1.1) $x = x(t, \alpha, \varphi)$ ограничено, $|x(t, \alpha, \varphi)| \leq r < H$ для всех $t \geq \alpha - h$. Тогда множество $\omega^+(\alpha, \varphi)$ полуквазиинвариантно по отношению к семейству предельных уравнений $\{\dot{x} = f^*(t, x_t)\}$, а именно, для каждой точки $\psi \in \omega^+(\alpha, \varphi)$ существует предельное уравнение $\dot{x} = f^*(t, x_t)$, такое, что точки его решения $y(t, 0, \psi)$ в пространстве C содержатся в $\omega^+(\alpha, \varphi)$, $\{y_t(0, \psi), t \in R\} \subset \omega^+(\alpha, \varphi)$.

Пусть $V : R^+ \times C_H \rightarrow R$ — непрерывный функционал Ляпунова и $x = x(t, \alpha, \varphi)$ — решение уравнения. Функция $V(t) = V(t, x_t(\alpha, \varphi))$ представляет собой непрерывную функцию времени $t \geq \alpha$.

Верхней правосторонней производной от V вдоль решения $x(t, \alpha, \varphi)$ называется значение $\dot{V}^+(t, x_t(\alpha, \varphi)) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \sup \frac{1}{\Delta t} [V(t + \Delta t, x_{t+\Delta t}(\alpha, \varphi)) - V(t, x_t(\alpha, \varphi))]$

Основным используемым свойством при этом определении и условии $\dot{V}(t, \varphi) \leq -W(t, \varphi) \leq 0$ является невозрастание функции $V(t) = V(t, x_t(\alpha, \varphi))$ для всех $t \geq \alpha$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1.2 Пусть $t_n \rightarrow +\infty$ есть некоторая последовательность. Для каждого $t \in R$ и $c \in R$ определим множество $V_\infty^{-1}(t, c) \subset C_H$ следующим образом: точка $\varphi \in V_\infty^{-1}(t, c)$, если существуют последовательность $\{t_{n_k}\} \subset \{t_n\}$ и последовательность $\{\varphi_k \in \Gamma, \varphi_k \rightarrow \varphi\}$, такие, что

$$\lim_{k \rightarrow \infty} V(t_{n_k} + t, \varphi_k) = c. \quad (1.7)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1.3 Будем говорить, что отображение $u : (\alpha, \beta) \rightarrow C_H$ или $u : R \rightarrow C_H$ принадлежит множеству $\{V_\infty^{-1}(t, c), c = c_0 = \text{const}\}$, если для любого $\gamma > 0$ (соответственно для любого $T > 0$) существуют последовательность $\{t_{n_k}\} \subset \{t_n\}$ и последовательность непрерывных отображений $u_k(t)$, такие, что $\{u_k(t)\}$ сходится к $u(t)$ равномерно по $t \in [\alpha + \gamma, \beta - \gamma]$ (соответственно по $t \in [-T, T]$), таким образом, что

$$\lim_{k \rightarrow \infty} V(t_{n_k} + t, u_k(t)) = c_0. \quad (1.8)$$

Допустим, что производная $\dot{V}(t, \varphi)$ оценивается неравенством

$$\dot{V}(t, \varphi) \leq -W(t, \varphi) \leq 0, \quad (1.9)$$

где функционал $W = W(t, \varphi)$ ограничен, равномерно непрерывен на каждом множестве $R \times K$, т.е. для каждого компактного множества $K \subset C_H$ и любого $\varepsilon > 0$ найдутся $m = m(K)$ и $\delta = \delta(\varepsilon, K) > 0$, такие, что имеют место неравенства

$$W(t, \varphi) \leq m, \quad |W(t_2, \varphi_2) - W(t_1, \varphi_1)| \leq \varepsilon \quad (1.10)$$

для всех $(t, \varphi) \in R \times K$; $(t_1, \varphi_1), (t_2, \varphi_2) \in R \times K : |t_2 - t_1| \leq \delta, \|\varphi_2 - \varphi_1\| \leq \delta$. Как и в случае f , при этих условиях семейство сдвигов $\{W^\tau(t, \varphi) = W(t + \tau, \varphi), \tau \in \Gamma\}$ предкомпактно в некотором пространстве непрерывных функций $F_W = \{W : R \times \Gamma \rightarrow R\}$ с метризуемой компактно открытой топологией.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1.4 Функция $W^* \subset F_W$ есть предельная к W , если существует $t_n \rightarrow +\infty$, такая, что последовательность $\{W_n(t, \varphi) = W(t_n + t, \varphi)\}$ сходится к W^* в F_W .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1.5 Будем говорить, что отображение $u : (\alpha, \beta) \rightarrow C_H$ ($u : R \rightarrow C_H$) принадлежит множеству $\{\varphi \in C_H : W(t, \varphi) = 0\}$, если тождество $W(t, u(t)) \equiv 0$ выполняется для всех $t \in (\alpha, \beta)$ (соответственно для всех $t \in R$), $u(t) \in \{W(t, \varphi) = 0\}$ для $t \in (\alpha, \beta)$ и (для всех $t \in R$).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1.6 Пусть предельный функционал $W^*(t, \varphi)$ задается согласно определению I.1.4 относительно некоторой последовательности $t_n \rightarrow +\infty$. Множество $V_\infty^{-1}(t, c)$, определяемое этой же последовательностью $t_n \rightarrow +\infty$ согласно определению I.1.5, назовем соответствующим $W^*(t, \varphi)$.

Рассмотрим задачу об определении свойств устойчивости уравнения (1.1) на основе функционала Ляпунова со знакопостоянной производной в предположениях (1.4) и (1.6) предкомпактности (1.1), существования семейства предельных уравнений $\{\dot{x} = g(t, x_t)\}$ и единственности решений.

Пусть $V = R^+ \times C_H \rightarrow R$ есть непрерывный функционал, производная которого удовлетворяет неравенству (1.9). Введем следующее

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1.7 Функции $f^* \in F$ и $W^* \in F_W$ образуют предельную пару (f^*, W^*) , если они являются предельными к f и W для одной и той же последовательности $t_n \rightarrow +\infty$. Множество $V_\infty^{-1}(t, c)$, определяемое в соответствии этой же последовательности $t_n \rightarrow +\infty$, есть соответствующее (f^*, W^*) .

ТЕОРЕМА 1.3 *Предположим, что:*

1) существует непрерывный функционал $V : R \times C_H \rightarrow R$, ограниченный снизу на каждом компакте $K \subset C_H$, $V(t, \varphi) \geq m(K)$ для всех $(t, \varphi) \in R \times K$, и такой, что $\dot{V}(t, \varphi) \leq -W(t, \varphi) \leq 0$ для всех $(t, \varphi) \in R \times C_H$;

2) решение $x = x(t, \alpha, \varphi)$ уравнения (1.1) ограничено, $|x(t, \alpha, \varphi)| \leq H_1 < H$ для всех $t \geq \alpha - h$.

Тогда имеется $c = c_0 \geq m$, при котором для каждой предельной точки $\psi \in \omega^+(\alpha, \varphi)$ существуют предельная пара (f^*, W^*) и соответствующее множество $V_\infty^{-1}(t, c)$, решение $y = y(t)$, $y_0 = \psi$, уравнения $\dot{x} = f^*(t, x_t)$, такие, что $y_t \in \omega^+(\alpha, \varphi)$ и $y_t \subset \{V_\infty^{-1}(t, c) : c = c_0 = \text{const}\} \cap \{W^*(t, \varphi) = 0\}$ для всех $t \in R$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1.8 Множество $M(t) \subset C_H$ не содержит решений уравнения $\dot{x}(t) = f^*(t, x_t)$, если для каждой точки $\psi \in M(\alpha)$ соответствующее решение $y(t, \alpha, \psi)$ таково, что при некотором $\beta \in R$ имеем $y_\beta(\alpha, \psi) \notin M(\beta)$.

ТЕОРЕМА 1.4 Если в условиях теоремы 1.1.3 предположить также, что существует последовательность $t_n \rightarrow +\infty$, определяемые которой предельная пара (g_0, U_0) и множество $V_\infty^{-1}(t, c)$ будут такими, что для каждого $c_0 > c_1$ множество $\{V_\infty^{-1}(t, c) : c = c_0 = \text{const} > c_1\} \cap \{U_0(t, \varphi) = 0\}$ не содержит решений $\dot{x}(t) = g_0(t, x_t)$, то в дополнение к выводу теоремы 1.1.3 имеем также соотношение $\lim_{n \rightarrow \infty} V(t, x_t(\alpha, \varphi_n))$.

Перейдем к исследованию асимптотической устойчивости нулевого решения уравнения (1.1), полагая, что $f(t, 0) \equiv 0$.

ТЕОРЕМА 1.5 *Предположим, что:*

1) существует функционал $V : R^+ \times C_{H_1} \rightarrow R^+$, $(0 < H_1 < H)$, такой, что $V(t, 0) = 0$, $V(t, \varphi) \geq a(|\varphi(0)|)$, $\dot{V}(t, \varphi) \leq -W(t, \varphi) \leq 0$ для всех $(t, \varphi) \in R^+ \times C_{H_1}$;

2) последовательность $t_n \rightarrow +\infty$ такова, что определяемые которой предельная пара (g_0, U_0) и множество $V_\infty^{-1}(t, c)$ будут такими, что множество $\{V_\infty^{-1}(t, c) : c = c_0 > 0\} \cap \{U_0(t, \varphi) = 0\}$ не содержит решений уравнения $\dot{x} = g_0(t, x_t)$.

Тогда решение (1.1) $x = 0$ асимптотически устойчиво равномерно по φ .

Значительный интерес представляет следующий результат о равномерной асимптотической устойчивости.

ТЕОРЕМА 1.6 *Предположим, что:*

1) *существует функционал $V : R \times C_{H_1} \rightarrow (0 < H_1 < H)$, такой, что $V(t, 0) = 0$, $a_1(|\varphi(0)|) \leq V(t, \varphi) \leq a_2(\|\varphi\|)$, $\dot{V}^+(t, \varphi) \leq -W(t, \varphi) \leq 0$ для всех $(t, \varphi) \in R \times C_{H_1}$;*

2) *для каждой предельной пары (g, U) множество $\{U(t, \varphi) = 0\}$ не содержит решения уравнения $\dot{x}(t) = g(t, x_t)$, кроме нулевого.*

Тогда решение (1.1) $x = 0$ равномерно асимптотически устойчиво.

Глава II

Глава 2

1 Постановка задачи управления трехзвенным манипулятором

Рассмотрим математическую модель трехзвенного манипулятора, состоящую из трех абсолютно жестких звеньев G_1, G_2, G_3 , представляющих собой однородные стержни. Манипулятор установлен на неподвижном основании, на которое опирается звено G_1 . Звено G_1 таким образом, может совершать только вращения вокруг вертикальной оси. Звенья соединены между собой двумя идеальными цилиндрическими шарнирами O_1 , и O_2 таким образом, что звенья G_2 и G_3 могут совершать движения только в вертикальной плоскости. Центр масс C_1 звена G_1 лежит на луче O_1O_2 . Положение центра масс C_2 звена G_2 не совпадает с положением шарнира O_2 . На конце звена G_3 находится груз, перемещаемый манипулятором.

Введем обозначения: $q_i (i = 1, 2, 3)$ — углы поворотов звеньев манипулятора; $Q_i (i = 1, 2, 3)$ — управляющие моменты относительно осей соответствующих звеньев; l_i — длина i -го звена; m_i — масса i -го звена; m_0 — масса перемещаемого груза; $m_30 = m_0 + m_3$; J_{01} — момент инерции первого звена относительно оси вращения; r_2 и r_3 — соответственно расстояния от центров тяжести второго звена и третьего звена с перемещаемым грузом относительно осей соответствующих звеньев; g — ускорение свободного падения. Уравнения движения манипулятора имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} (J_{01} + m_2 r_2^2 \sin^2 q_2 + m_{30}(l_2 \sin q_2 + r_3 \sin q_3)^2) \ddot{q}_1 + \\ + 2(m_2 r_2^2 \sin q_2 \cos q_2 + m_{30}(l_2 \sin q_2 + r_3 \sin q_3) l_2 \cos q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \\ + 2m_{30}(l_2 \sin q_2 + r_3 \sin q_3) r_3 \cos q_3 \dot{q}_1 \dot{q}_3 = Q_1, \\ (m_2 r_2^2 + m_3 l_2^2) \ddot{q}_2 + \frac{1}{2} m_{30} l_2 r_3 \cos(q_2 - q_3) \ddot{q}_3 + \frac{1}{2} m_{30} l_2 r_3 \sin(q_2 - q_3) \dot{q}_3^2 - \\ - (m_{30}(l_2 \sin q_2 + r_3 \sin q_3) l_2 + m_2 r_2^2 \sin q_2) \cos q_2 \dot{q}_1^2 + (m_2 r_2 + m_{30} l_2) g \sin q_2 = Q_2, \\ \frac{1}{2} m_{30} l_2 r_3 \cos(q_2 - q_3) \ddot{q}_2 + m_{30} r_3^2 \ddot{q}_3 - \frac{1}{2} m_{30} l_2 r_3 \sin(q_2 - q_3) \dot{q}_2^2 - \\ - m_{30}(l_2 \sin q_2 + r_3 \sin q_3) r_3 \cos q_3 \dot{q}_1^2 + m_{30} g r_3 \sin q_3 = Q_3. \end{array} \right.$$

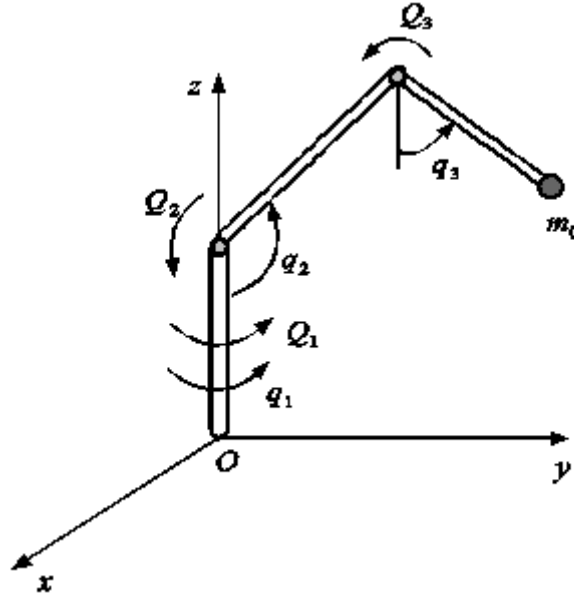


Рис. II.1: Модель трехзвенного манипулятора

Пусть $q = (q_1, q_2, q_3)$ — вектор обобщенных координат представленной выше системы. Таким образом, уравнения движения можно представить в следующей векторно-матричной форме: $A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + K\dot{q} = Q$ где

$$A(q) = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

Элементы матрицы инерции $A(q)$:

$$a_{11} = J_{01} + m_2 r_2^2 \sin^2 q_2 + m_{30}(l_2 \sin q_2 + r_3 \sin q_3)^2$$

$$\begin{aligned}
a_{22} &= m_2 r_2^2 + m_3 l_2^2 \\
a_{23} &= \frac{1}{2} m_{30} l_2 r_3 \cos(q_2 - q_3) \\
a_{32} &= a_{23} \\
a_{33} &= m_{30} r_3^2 \\
C(q, \dot{q}) &= \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & c_{13} \\ c_{21} & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & 0 \end{pmatrix} \\
\text{Элементы матрицы } C(q, \dot{q}) : &
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_{11} &= 2(m_2 r_2^2 \sin q_2 \cos q_2 + m_{30}(l_2 \sin q_2 + r_3 \sin q_3) l_2 \cos q_2) \dot{q}_2 \\
c_{13} &= 2m_{30}(l_2 \sin q_2 + r_3 \sin q_3) r_3 \cos q_3 \dot{q}_3 \\
c_{21} &= -(m_{30}(l_2 \sin q_2 + r_3 \sin q_3) l_2 + m_2 r_2^2 \sin q_2) \cos q_2 \dot{q}_1 \\
c_{31} &= -m_{30}(l_2 \sin q_2 + r_3 \sin q_3) r_3 \cos q_3 \dot{q}_1 \\
c_{32} &= -\frac{1}{2} m_{30} l_2 r_3 \sin(q_2 - q_3) \dot{q}_2
\end{aligned}$$

$A(q)$ — положительно определенная матрица инерции системы.

2 Построение управления

Пусть $q = (q_1, q_2, q_3)^T$ — вектор обобщенных координат рассматриваемой механической системы и $X = q^0(t) : [t_0, +\infty) \rightarrow R^3, \|q^0(t)\| \leq q_0, \|\dot{q}^0\| \leq g_1, \|q^0(t)\| \leq q_0, \|\dot{q}^0\| \leq g_2$ есть заданное множество программных движений манипулятора в виде ограниченных дважды непрерывно дифференцируемых функций $q = q^0(t)$ с ограниченными производными при $t \in [t_0, +\infty)$. Символом $\|\cdot\|$ обозначена евклидова норма вектора. Уравнения движения (1) можно представить в следующей векторно-матричной форме: $A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + K\dot{q} = Q$, (2) где $A(q)$ — положительно определенная матрица инерции системы, $C(q, \dot{q}) = \sum_{i=1}^3 \dot{q}_i C_{(i)}(q)$, j, k -ый элемент $c_{(i)jk}(q)$ матрицы $C_{(i)}(q)$ определяется в виде $c_{(i)jk}(q) = \frac{1}{2}(\frac{\partial a_{ij}}{\partial q_k} + \frac{\partial a_{ij}}{\partial q_i} - \frac{\partial a_{ij}}{\partial q_j})$; K — матрица коэффициентов моментов сил вязкого трения, действующих в системе. Система (2) имеет следующее свойство: матрица $\dot{A}(q(t)) - 2C(q(t), \dot{q}(t))$ является кососимметричной. Пусть $q^0(t) \in X$ — какое-либо программное движение системы (2),

реализуемое программным управлением $Q = Q^{(0)}(t)$, т.е. имеет место тождество $A(q^0(t))\ddot{q}^0(t) + C(q^0(t), \dot{q}^0(t))\dot{q}^0(t) + K\dot{q}^0(t) \equiv Q^{(0)}(t)$. Введем возмущения $x = q - q^0(t)$ и составим уравнения возмущенного движения в векторно-матричном виде: $A^{(1)}(t, x)\ddot{x} + C^{(1)}(t, x, \dot{x})\dot{x} + K\dot{x} = Q^{(1)}(t, x, \dot{x}) + Q^{(2)}(t, x, \dot{x})$, (3) где $A^{(1)}(t, x) = A(x + q^0(t))$, $C^{(1)}(t, x, \dot{x}) = C(x + q^0(t), \dot{x} + \dot{q}^0(t))$, $Q^{(1)}(t, x, \dot{x}) = Q - Q^{(0)}(t)$, $Q^{(2)}(t, x, \dot{x}) = (A^{(1)}(t, 0) - A^{(1)}(t, x))\ddot{q}^0(t) + (C^{(1)}(t, 0, 0) - C^{(1)}(t, x, \dot{x}))\dot{q}^0(t)$. Рассмотрим задачу построения управляющего воздействия $Q^{(1)}(t, x, \dot{x})$, при котором невозмущенное движение $\dot{x} = x = 0$ системы (3) было бы равномерно асимптотически устойчиво, или, иначе, управление $Q = Q^{(1)}(t, q - q^0(t), \dot{q} - \dot{q}^0(t)) + Q^{(0)}(t)$ обеспечивало бы стабилизацию программного движения системы (2).

2 Синтез управления в задаче стабилизации программного движения манипулятора Рассмотрим решение задачи стабилизации в области $G = (x, \dot{x}) \in R^6 : \|x\| < \epsilon, \|\dot{x}\| < \epsilon, \epsilon = const > 0$ с помощью непрерывного управления вида $Q^{(1)}(x, \dot{x}) = B(\dot{x} + p(x))$, (4) где $B \in R^{3 \times 3}$ есть матрица коэффициентов усиления сигналов, подлежащая определению; $p(x)$ — непрерывно дифференцируемая вектор-функция, такая, что $\|p(x)\| \geq p_0(x) > 0, p_0(0) = 0$. Возьмем для системы (3) вектор-функцию Ляпунова $V = (V^1, V^2)^T$ с коэффициентами вида $V^1 = \|p(x)\|, V^2 = \sqrt{(\dot{x} + p(x))^T A^{(1)}(t, x)(\dot{x} + p(x))}$.

Вычисляя производные по времени от квадратов компонент вектор-функции Ляпунова в силу системы (3), получим $\frac{d}{dt}(V^1(x))^2 = 2V^1\dot{V}^1 = 2p^T\dot{p} = 2p^T\frac{\partial p}{\partial x}\dot{x} = -2p^T\frac{\partial p}{\partial x}p + 2p^T\frac{\partial p}{\partial x}(\dot{x} + p)$,

$$\frac{d}{dt}(V^2(x))^2 = 2V^2\dot{V}^2 = 2(\ddot{x} + \dot{p})^T A^{(1)}(\dot{x} + p) + (\dot{x} + p)^T \dot{A}^{(1)}(\dot{x} + p) = 2(-C^{(1)}(t, x, \dot{x})\dot{x} - R\dot{x} + \dot{p})^T A^{(1)}(\dot{x} + p) + (\dot{x} + p)^T \dot{A}^{(1)}(\dot{x} + p)$$

Отсюда получим следующие оценки: $\dot{V}^1 \leq -\mu_1 V^1 + \frac{m_1}{\lambda(t, x)} V^2, \dot{V}^2 \leq \frac{m_2}{\lambda(t, x)} V^1 - \frac{\mu_2}{\lambda^2(t, x)} V^2$ где положительные постоянные μ_1, μ_2, m_1, m_2 и функция $\lambda(t, x)$ определяются из следующих условий: $p^T \frac{\partial p}{\partial x} p \geq \mu_1 \|p\|^2, \|\frac{\partial p}{\partial x}\| \leq m_1, \lambda(t, x) \|\dot{x} + p\| = V^2$,

$$\|Q^{(2)}(t, x, \dot{x})\| \leq (m_2 - \|C^{(1)}(t, x, \dot{x}) + K - A^{(1)}(t, x)\frac{\partial p}{\partial x}\|)\|p\|$$

$$\lambda_{max}(B + B^T - K - K^T + A^{(1)}(t, x)\frac{\partial p}{\partial x} + (\frac{\partial p}{\partial x})^T A^{(1)}(t, x)) \leq -2\mu_2$$

Здесь $\lambda_{max}()$ есть максимальное собственное значение соответствующей матрицы. Тогда для системы (3) можно построить следующую систему сравнения: $\dot{u}^1 = -\mu_1 u^1 + \frac{m_1}{\lambda(t,x)} u^2, \dot{u}^2 = \frac{m_2}{\lambda(t,x)} u^1 - \frac{\mu_2}{\lambda^2(t,x)} u^2$.

(5) Согласно теореме сравнения об экспоненциальной устойчивости [5] из свойства экспоненциальной устойчивости нулевого решения системы сравнения (5) следует аналогичное свойство нулевого решения системы (3). Можно показать, что нулевое решение системы сравнения (5) будет экспоненциально устойчиво при следующем условии $4\mu_1\mu_2 > (m_1/k + m_2k)^2, k = const > 0$. Численное моделирование движения манипулятора при действии управления (4) проводилось при следующих значениях параметров манипулятора и программной траектории

$$m_2 = 15, m_3 = 2, 5, m_0 = 2, l_2 = 1, r_2 = 0, 5, r_3 = 0, 5, J_{01} = 0, 1 \cdot 10^{-2}, q_1^0(t) = 0, 2t, q_2^0(t) = 0, 2t$$

На рисунках 2–4 представлены результаты моделирования. Пунктирной линией обозначены составляющие программного движения, а сплошной – реального движения системы.

Глава III

Глава 3

1 Задача управления трехзвенным манипулятором

Рассмотрим математическую модель двухзвенного манипулятора. Манипулятор состоит из неподвижного основания и двух абсолютно жестких звеньев G_1 , G_2 . Элементы конструкции соединены между собой двумя идеальными цилиндрическими шарнирами O_1 , и O_2 таким образом, что оба звена могут совершать движения только в вертикальной плоскости. Центр масс C_1 звена G_1 лежит на луче O_1O_2 . Положение центра масс C_2 звена G_2 не совпадает с положением шарнира O_2 .

Введем обозначения: $q_i (i = 1, 2)$ — углы поворотов звеньев манипулятора; l_{q_i} — длина отрезка O_iC_i ; l_1 — длина отрезка O_2C_2 ; m_i — масса i -го звена; I_i — момент инерции i -го звена относительно оси шарнира O_i ; g — ускорение свободного падения.

Выражение для кинетической энергии манипулятора имеет в таком случае следующий вид:

$$T = \frac{1}{2}I_1\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}m_2l_1^2\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}I_2\dot{q}_2^2 + m_2l_1l_{q_2}\cos(q_2 - q_1)\dot{q}_1\dot{q}_2$$

Составим уравнения Лагранжа второго рода:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_1} = M_1 + U_1, \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_2} = M_2 + U_2, \end{cases}$$

где M_i — момент, создаваемый силой тяжести в i -м шарнире, $M_1 = (m_1l_{q_1} + m_2l_1)g \sin q_1$, $M_2 = m_2l_{q_2}g \sin q_2$, U_i — управляющие воздействия.

Из выражения для кинетической энергии T находим уравнения движения

$$\begin{cases} (I_1 + m_2 l_1^2) \ddot{q}_1 + m_2 l_1 l_{g_2} \cos(q_2 - q_1) \ddot{q}_2 - m_2 l_1 l_{g_2} \sin(q_2 - q_1) \dot{q}_2^2 = \\ = (m_1 l_{g_1} + m_2 l_1) g \sin q_1 + U_1, \\ I_2 \ddot{q}_2 + m_2 l_1 l_{g_2} \cos(q_2 - q_1) \ddot{q}_1 + m_2 l_1 l_{g_2} \sin(q_2 - q_1) \dot{q}_1^2 = m_2 l_{g_2} g \sin q_2 + U_2. \end{cases}$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] Азбелев Н.В., Максимов В.П., Рахматуллина Л.Ф. Введение в теорию функционально дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1991. 277 с.
- [2] Алексеенко Н.В. Устойчивость решений нелинейных почти периодических систем функционально-дифференциальных уравнений запаздывающего типа // Известия Вузов. Сер. Математика. 2000. №2. С.3–6.
- [3] Ананьевский И.М., Колмановский В.Б. О стабилизации некоторых регулируемых систем с последействием // Автоматика и телемеханика. 1989. №9. С.34–42.
- [4] Анашкин О.В. Достаточные условия устойчивости и неустойчивости для одного класса нелинейных функционально-дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения. 1998. Т.34. №7. С.867–875.
- [5] Андреев А.С. Об асимптотической устойчивости и неустойчивости неавтономных систем // ПММ. 1979. Т.43. Вып.5. С.796–805.
- [6] Андреев А.С. Об асимптотической устойчивости и неустойчивости неавтономных систем // ДАН УзССР. 1980. №7. С.20–22.
- [7] Андреев А.С. Об асимптотической устойчивости и неустойчивости нулевого решения неавтономной системы // ПММ. 1984. Т.48. Вып.2. С.225–232.
- [8] Андреев А.С. Об асимптотической устойчивости и неустойчивости относительно части переменных // ПММ. 1984. Т.48. Вып.5. С.707–713.
- [9] Андреев А.С. Об исследовании частичной асимптотической устойчивости и неустойчивости на основе предельных уравнений // ПММ. 1987. Т.51. Вып.2. С.253–260.

- [10] Андреев А.С. Об исследовании частичной асимптотической устойчивости // ПММ. 1991. Т.55. Вып.4. С.539–547.
- [11] Андреев А.С. Об асимптотической устойчивости и неустойчивости нулевого решения неавтономного функционально-дифференциального уравнения // Проблемы аналитической механики, устойчивости и управления движением. Новосибирск: Изд-во "Наука 1991. С.36–40.
- [12] Андреев А.С. Методы исследования устойчивости неавтономных уравнений. Учебное пособие. Ульяновск: Изд-во фМГУ, 1994. 80 с.
- [13] Андреев А.С. Об устойчивости неавтономного функционально дифференциального уравнения // Доклады РАН. 1997. Т.356. №7. С.151–153.
- [14] Андреев А.С. Об управляемости нестационарной нелинейной системы // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2003. Т.10. Вып.1. С.88.
- [15] Андреев А.С. Некоторые задачи об устойчивости функционально-дифференциальных уравнений с конечным и неограниченным запаздыванием // Ученые записки Ульяновского государственного университета. Сер. Фундаментальные проблемы математики и механики. Ульяновск. 2003. Вып.1(13). С.3–11.
- [16] Андреев А.С. К методу К.П. Персидского в задачах о неустойчивости // Математический журнал. Алматы. 2004. Т.4. №2(12). С.76–82.
- [17] Андреев А.С. О стабилизации движения управляемой системы с запаздывающей обратной связью // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2004. Т.11. Вып. 3. С. 612–613.
- [18] Андреев А.С., Бойкова Т.А. Знакопостоянные функции Ляпунова в задачах об устойчивости // Механика твердого тела. 2002. Вып.32. С.109–116.
- [19] Андреев А.С., Лысяков В.Н. К методу Ляпунова в задаче об устойчивости функционально дифференциального уравнения // Ученые записки Ульяновского государственного университета. Сер. Фундаментальные проблемы математики и механики. Ульяновск. 1996. Вып.1(2). С.5–10.

- [20] Андреев А.С., Павликов С.В. Об устойчивости по части переменных неавтономного функционально дифференциального уравнения // ПММ. 1999. Т.63. Вып.1. С. 3–12.
- [21] Андреев А.С., Павликов С.В. Исследование устойчивости функционально-дифференциальных уравнений на основе знакопостоянных функционалов Ляпунова // Труды Средневолжского математического общества. 1999. Т.2(1) С.74–75.
- [22] Андреев А.С., Павликов С.В. Метод функционалов Ляпунова в исследовании устойчивости функционально-дифференциальных уравнений // Матем. заметки. 2000. Т.68. №3. С.323–331.
- [23] Андреев А.С., Павликов С.В. Знакопостоянные функционалы Ляпунова в задаче об устойчивости относительно части переменных // Труды Четвертой Международной научно-практической конференции "Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов". (10-12 декабря 2001г., г.Ульяновск). Секция Математики. Ульяновск: УлГУ, 2001. С.15–16.
- [24] Андреев А.С., Павликов С.В. К задаче об устойчивости по части переменных функционально-дифференциальных уравнений // Ученые записки Ульяновского государственного университета. Сер. Фундаментальные проблемы математики и механики. Ульяновск. 2003. Вып.1(13). С.12–21.
- [25] Андреев А.С., Павликов С.В. Незнакоопределенные функционалы Ляпунова в задаче об устойчивости функционально-дифференциальных уравнений с конечным запаздыванием // Механика твердого тела. 2004. Вып.34. С.112–120.
- [26] Андреев А.С., Седова Н.О. Методы исследования устойчивости неавтономных уравнений. Учебное пособие. Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2001. 60 с.
- [27] Андреев А.С., Хусанов Д.Х. Предельные уравнения в задаче об устойчивости функционально-дифференциального уравнения // Дифференциальные уравнения. 1998. Т.34. №4. С.435–440.
- [28] Андреев А.С., Хусанов Д.Х. К методу функционалов Ляпунова в задаче об асимптотической устойчивости и неустойчивости // Дифференциальные уравнения. 1998. Т.34. №7. С.876–885.

- [29] Андреев А.С., Хусанов Д.Х. Об асимптотической устойчивости и неустойчивости функционально-дифференциального уравнения с периодической правой частью // Ученые записки Ульяновского государственного университета. Сер. Фундаментальные проблемы математики и механики. Ульяновск. 1999. Вып.1(6). С.3–17.
- [30] Андреева Е.А., Колмановский В.Б., Шайхет Л.Е. Управление системами с последействием. М.: Наука, 1992. 333 с.
- [31] Астанов И.С., Белоцерковский С.М., Каганов Б.О., Кочетков Ю.А. О системах интегро-дифференциальных уравнений, описывающих неустановившееся движение тел в сплошной среде // Дифференциальные уравнения. 1982. Т.18. №9. С.1628–1637.
- [32] Беллман Р., Кук К. Дифференциально-разностные уравнения. М.: Мир, 1967. 548 с.
- [33] Билашевич И.В., Габасов Р., Кириллова Ф.М. Стабилизация динамических систем при наличии запаздываний в канале обратной связи // Автоматика и телемеханика. 1996. №6. С.31–39.
- [34] Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.
- [35] Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование. М.: Наука, 1976. 288 с.
- [36] Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегро дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1982. 302 с.
- [37] Воротников В.И. Устойчивость динамических систем по отношению к части переменных. М.: Наука, 1991. 288 с.
- [38] Воротников В.И., Румянцев В.В. Устойчивость и управление по части координат фазового вектора динамических систем: теория, методы и приложения. М.: Научный мир, 2001. 320 с.
- [39] Гайшун И.В. Асимптотическая устойчивость одной системы с запаздыванием // Дифференциальные уравнения. 1972. Т.8. №5. С. 906–908.

- [40] Гайшун И.В., Княжище Л.Б. Теоремы устойчивости уравнений с запаздыванием, использующие немонотонные функционалы Ляпунова // Докл. Ан Беларуси. 1994. Т.38. №3. С.5–8.
- [41] Гайшун И.В., Княжище Л.Б. Немонотонные функционалы Ляпунова. Условия устойчивости уравнений с запаздыванием // Дифференциальные уравнения. 1994. Т.30. №8. С.1291–1298.
- [42] Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1967. 575 с.
- [43] Горяченко В.Д. Методы теории устойчивости в динамике ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1971. 264 с.
- [44] Горяченко В.Д. Методы исследования устойчивости ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1977. 296 с.
- [45] Далецкий Ю.Л., Крейн М.Г. Устойчивость решений дифференциальных уравнений в банаховом пространстве. М.: Наука, 1970. 534 с.
- [46] Дроздов А.Д., Колмановский В.Б., Триджанте Д. Об устойчивости системы хищник-жертва // Автоматика и телемеханика. 1992. №11. С.57–64.
- [47] Жиков В.В., Левитан Б.М. Почти периодические функции и дифференциальные уравнения. М.: Изд-во МГУ, 1978. 205 с.
- [48] Журавлев В.Ф. Теоретическая механика. М.: Наука, Физматлит, 1997. 320 с.
- [49] Калистратова Т.А. Об устойчивости по части переменных систем с запаздыванием // Авт. и телемех. 1986. №5. С.32–37.
- [50] Ким А.В. К методу функций Ляпунова для систем с последствием // Метод функций Ляпунова в анализе динамики систем. Новосибирск, 1987. С.79–83.
- [51] Ким А.В. О методе функционалов Ляпунова для систем с последствием // Авт. и телемех. 1990. №2. С.24–31.
- [52] Ким А.В. Прямой метод Ляпунова в теории устойчивости систем с последствием. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 1992. 142 с.

- [53] Ким А.В. i -Гладкий анализ и функционально-дифференциальные уравнения. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 234 с.
- [54] Княжище Л.Б. Локализация предельных множеств и асимптотическая устойчивость уравнений с запаздыванием // Докл. АН Беларуси. 1997. Т.41. №1. С.26–29.
- [55] Княжище Л.Б. Локализация предельных множеств и асимптотическая устойчивость неавтономных уравнений с запаздыванием. I // Дифференциальные уравнения. 1998. Т.34. №2. С.189–196.
- [56] Княжище Л.Б. Локализация предельных множеств и асимптотическая устойчивость неавтономных уравнений с запаздыванием. II // Дифференциальные уравнения. 1998. Т.34. №8. С.1056–1065.
- [57] Княжище Л.Б. Функционалы Ляпунова и условия равномерной асимптотической устойчивости уравнений с запаздыванием // Докл. НАН Беларуси. 2000. Т.44. №5. С.40–43.
- [58] Княжище Л.Б., Щавель Н.А. Немонотонные функционалы Ляпунова и оценки решений дифференциальных уравнений с запаздыванием // Дифференциальные уравнения. 1997. Т.33. №2. С.205–211.
- [59] Коддингтон Э.А., Левинсон Н. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: ИЛ, 1958. 474 с.
- [60] Колмановский В.Б. Об устойчивости некоторых систем с произвольным последствием // Докл. РАН. 1993. Т.331. №4. С.421–424.
- [61] Колмановский В.Б. Об устойчивости некоторых систем с последствием и переменными коэффициентами // ПММ. 1995. Т.59. Вып.1. С.71–81.
- [62] Колмановский В.Б. Об устойчивости систем с последствием нейтрального типа // ПММ. 1996. Т.60. Вып.2. С.210–222.
- [63] Колмановский В.Б., Носов В.Р. Устойчивость и периодические режимы регулируемых систем с последствием. М.: Наука, 1981. 448 с.
- [64] Колмановский В.Б., Носов В.Р. Системы с последствием нейтрального типа // Автоматика и телемеханика. 1984. №1. С.5–35.

- [65] Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1976. 543с.
- [66] Кордуняну К., Лакшмикантам В. Уравнения с неограниченным запаздыванием // Автоматика и телемеханика. 1985. №7. С.5–44.
- [67] Красовский Н.Н. О применении второго метода А.М.Ляпунова для уравнений с запаздыванием по времени // ПММ. 1956. Т.20. №3. С.315–327.
- [68] Красовский Н.Н. Об асимптотической устойчивости систем с последствием // ПММ. 1956. Т.20. №4. С.513–518.
- [69] Красовский Н.Н. Некоторые задачи теории устойчивости движения. М.: Физматгиз, 1959. 211 с.
- [70] Красовский Н.Н., Осипов Ю.С. О стабилизации движений управляемого объекта с запаздыванием в системе регулирования // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1963. №6. С.3–15.
- [71] Красовский Н.Н. Проблемы стабилизации управляемых движений // Малкин И.Г. Теория устойчивости. Доп.4. М.: Наука, 1966. С.475–514.
- [72] Лакшмикантам В., Лиля С., Мартынюк А.А. Устойчивость движения: метод сравнения. Киев: Наукова думка, 1991. 248 с.
- [73] Лакшмикантам В., Мартынюк А.А. Развитие прямого метода Ляпунова для систем с последствием (обзор) // Прикладная механика. 1993. Т.29(39). №2. С.3–15.
- [74] Люстерник Л.А., Соболев В.И. Краткий курс функционального анализа. М.: Высшая школа, 1982. 271 с.
- [75] Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. Л.: Гостехиздат, 1950. 472 с.
- [76] Малкин И.Г. Теория устойчивости движения. Изд. 2-е. М.: Наука, 1966. 530 с.
- [77] Маркеев А.П. Теоретическая механика. М.: Наука, 1991. 414 с.
- [78] Мартынюк А.А., Като Д., Шестаков А.А. Устойчивость движения метод предельных уравнений. Киев: Наукова думка, 1990. 256 с.

- [79] Матросов В.М. Метод векторных функций Ляпунова: анализ динамических свойств нелинейных систем. М.: Физматлит, 2000. 380 с.
- [80] Мышкис А.Д. Линейные дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом. М.: Наука, 1972. 352 с.
- [81] Мышкис А.Д. О некоторых проблемах теории дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом // Успехи матем. наук. 1977. Т.32. Вып.2(194). С.173–202.
- [82] Мышкис А.Д. Предисловие редактора перевода. В кн.: Хейл Дж. Теория функционально-дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1984. С.5–6.
- [83] Мышкис А.Д., Эльсгольц Л.Э. Состояние и проблемы теории дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом // Успехи матем. наук. 1967. Т.22. Вып.2. С.21–57.
- [84] Немыцкий В.В., Степанов В.В. Качественная теория дифференциальных уравнений. М.-Л., Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры. 1949. 550 с.
- [85] Новоселов В.С. Аналитическая механика систем с переменными массами. Л.: Изд-во ЛГУ, 1969. 239 с.
- [86] Норкин С.Б. Дифференциальные уравнения второго порядка с запаздывающим аргументом. М.: Наука, 1965. 354 с.
- [87] Осипов Ю.С. О стабилизации управляемых систем с запаздыванием // Дифференциальные уравнения. 1965. Т.1. №5. С.605–618.
- [88] Павликов С.В. Метод функционалов Ляпунова в исследовании устойчивости функционально-дифференциальных уравнений // Ученые записки Ульяновского государственного университета. Сер. Фундаментальные проблемы математики и механики. Ульяновск: Изд-во УлГУ, 1996. Вып. 1. Ч.II. С. 46–56.
- [89] Павликов С.В. Об устойчивости нулевого решения функционально-дифференциального уравнения второго порядка// Ученые записки Ульяновского государственного университета. Сер. Фундаментальные проблемы математики и механики. Ульяновск: УлГУ, 1996. Вып. 2. С. 32–33

- [90] Павликов С.В. О стабилизации управляемых механических систем с обратной связью с запаздыванием // Ученые записки Ульяновского государственного университета. Сер. Фундаментальные проблемы математики и механики. Ульяновск: УлГУ, 1997. Вып. 2(4). С. 66–70.
- [91] Павликов С.В. Знакопостоянные функционалы Ляпунова в задаче об устойчивости функционально-дифференциальных уравнений с конечным запаздыванием // Ученые записки Ульяновского государственного университета. Сер. Фундаментальные проблемы математики и механики. Ульяновск: УлГУ, 2002. Вып.2(12). С.30–39.
- [92] Павликов С.В. Предельные уравнения и функционалы Ляпунова в задаче об устойчивости по части переменных // Ученые записки Ульяновского государственного университета. Сер. Фундаментальные проблемы математики и механики. Ульяновск: УлГУ, 2003. Вып.1(13). С.63–74.
- [93] Павликов С.В. Об управляемости и стабилизации управляемых систем с запаздыванием // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2003. Т.10. Вып.1. С.201.
- [94] Павликов С.В. О стабилизации движения управляемой системы с запаздыванием // Механика твердого тела. 2005. Вып.34.
- [95] Перегудова О.А. К методу сравнения в исследовании устойчивости функционально-дифференциальных уравнений запаздывающего типа // Ученые записки Ульяновского государственного университета. Сер. Фундаментальные проблемы математики и механики. Ульяновск: УлГУ, 1999. Вып.2(7). С.32–36.
- [96] Перегудова О.А. Методы сравнения и преобразования в задачах об устойчивости систем с запаздыванием. Учебное пособие. Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2005. 83 с.
- [97] Прасолов А.В. О применении функций Ляпунова для исследования неустойчивости решений систем с последействием // Вестник ЛГУ. 1981. Сер.1. 19. С.116–118.
- [98] Разумихин Б.С. Об устойчивости систем с запаздыванием // ПММ. 1956. Т.20. Вып. 4. С. 500–512.

- [99] Разумихин Б.С. Устойчивость по первому приближению систем с запаздыванием // ПММ. 1958. Т.22. Вып. 2. С.155–166.
- [100] Разумихин Б.С. Применение метода Ляпунова к задачам устойчивости систем с запаздыванием // Автоматика и телемеханика. 1960. Т.21. №6. С.740–748.
- [101] Разумихин Б.С. Метод исследования устойчивости систем с последствием // Доклады АН СССР. 1966. Т.167. №6. С.1234–1236.
- [102] Разумихин Б.С. Устойчивость эредитарных систем. М.: Наука, 1988. 106 с.
- [103] Резван В. Абсолютная устойчивость автоматических систем с запаздыванием. М.: Наука, 1983. 300 с.
- [104] Румянцев В.В. Об устойчивости движения по отношению к части переменных // Вестник МГУ. Сер. Мат., механ., физ., астрон., хим. 1957. №4. С.9-16.
- [105] Румянцев В.В. Метод функции Ляпунова в теории устойчивости движения // Механика в СССР за 50 лет. Т.1. М.: Наука, 1968. С.7–66.
- [106] Румянцев В.В., Озиранер А.С. Устойчивость и стабилизация движения по отношению к части переменных. М.: Наука, 1987. 253 с.
- [107] Руш Н., Абетс П., Лалуа М. Прямой метод Ляпунова в теории устойчивости. М.: Мир, 1980. 300 с.
- [108] Седова Н.О. Вырожденные функции в исследовании асимптотической устойчивости решений функционально-дифференциальных уравнений // Мат. заметки. 2005. Т.8. №3. С.468–472.
- [109] Сергеев В.С. Об асимптотической устойчивости движений в некоторых классах с последствием // ПММ. 1993. Т. 57. Вып. 5. С. 166–174.
- [110] Сергеев В.С. Об асимптотической устойчивости и оценке области притяжения в некоторых системах с последствием // ПММ. 1996. Т. 60. Вып. 5. С. 744–751.

- [111] Тереки Й. Экспоненциальная и степенная асимптотическая устойчивость функционально-дифференциальных уравнений. В кн. Развитие и применение метода функций Ляпунова. Новосибирск: Наука, 1992. С.101–107.
- [112] Троценко Г.А. Об устойчивости решений почти периодической системы // Механика твердого тела. 2002. Вып. 32. С.129–133.
- [113] Хейл Дж. Теория функционально-дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1984. 421 с.
- [114] Хусаинов Д.Я. Об экспоненциальной устойчивости линейных систем с запаздыванием // Дифференциальные уравнения. 1989. Т.25. №2. С.357–359.
- [115] Хусаинов Д.Я. Экспоненциальная оценка решений линейных систем с запаздыванием при произвольном отклонении аргумента // Дифференциальные уравнения. 1989. Т.25. №9. С.1631–1633.
- [116] Четаев Н.Г. Устойчивость движения. М.: Наука, 1990. 276 с.
- [117] Шестаков А.А. Прямой метод Ляпунова как метод локализации функциями Ляпунова предельных множеств неавтономных динамических процессов (на базе предельных уравнений и динамических систем) // Функции Ляпунова и их применение. Ан СССР. Сибирское отд., Иркутский вычислит. центр. Новосибирск: Наука, 1987. С.14–48.
- [118] Шестаков А.А. Обобщенный прямой метод Ляпунова для систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1990. 316 с.
- [119] Шиманов С.Н. О неустойчивости движения систем с запаздыванием по времени // ПММ. 1960. Т.24. Вып. 1. С.55–63.
- [120] Шиманов С.Н. Устойчивость систем с запаздыванием // Труды II Всес. съезда по теорет. и прикл. механике. Москва, 1964, вып. 1. М.: Наука, 1965. С.170–180.
- [121] Щеглов В.А. Устойчивость линейного дифференциального уравнения с распределенным запаздыванием // Дифференциальные уравнения. 1996. Т.32. №12. С.1665–1669.

- [122] Щеглов В.А. Устойчивость решений одного уравнения второго порядка с запаздыванием // Дифференциальные уравнения. 1998. Т.34. №12. С.1710–1713.
- [123] Эльсгольц Л.Э. Устойчивость решений дифференциально-разностных уравнений // Успехи мат. наук. 1954. Т.9. №4. С.95-112.
- [124] Эльсгольц Л.Э. Введение в теорию дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. М.: Наука, 1964. 127 с.
- [125] Эльсгольц Л.Э., Норкин С.Б. Введение в теорию дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. М.: Наука, 1971. 296 с.
- [126] Янушевский Р.Т. Управление объектами с запаздыванием. М.: Наука, 1978. 416 с.
- [127] Andreev A. Sulla stabilitá asintotica ed instabilitá // Rend. Sem. Univ. Padova. 1986. V.75. P.235–245.
- [128] Andreev A. On the stability of nonautonomous functional differential equations // Nonlinear Analysis. TMA. 1997. V.30. Part 5. P. 2847–2854.
- [129] Andreev A., Khusanov D. On asymptotic stability and nonstability functional-differential equations with periodic right side // Nonlinear oscillations, 2001. V.4. №3. P.290–298.
- [130] Andreev A.S., Sedova N.O. On the stability of nonautonomous equations with delay via limiting equations // Functional Differential Equations. 1998. V.5. №1-2. P. 21–37.
- [131] Andreev A., Zappala'G. On stability for perturbed differential equations // Le Natematiche. 1996. V.51. F. I. P. 27–41.
- [132] Artstein Z. Topological dynamics of ordinary differential equations // J. Differ. Equations. 1977. V.23. P.216–223.
- [133] Artstein Z. The limiting equations of nonautonomous differential equations // J. Differ. Equations. 1977. V. 25. P.184–202.
- [134] Artstein A. Uniform asymptotic stability via the limiting equations // J. Differ. Equat. 1978. V.27. P.172–189.

- [135] Becker L.C., Burton T.A., Zhang S. Functional differential equations and Jensen's Inequality // J. of Math. Anal. and Appl. 1989. V.138. N 1. P.135–156.
- [136] Bernfeld S.R., Corduneanu C., Ignatyev A.O. On the stability of invariant sets of functional differential equations // Nonlinear Analysis. 2003. V.55. P.641–656.
- [137] Burton T.A. Uniform asymptotic stability in functional differential equations Proc. Amer. Math. Soc. 1978. V.68. P.195–199.
- [138] Burton T.A. Stability theory for delay equations // Funkcial. Ekvac. 1979. V. 22. №1. P.67–76.
- [139] Burton T.A., Casal A., Somolinos A. Upper and lower bounds for Liapunov functionals // Funkcial. Ekvac. 1989. V. 32. №1. P.23–55.
- [140] Burton T.A., Hatvani L. Stability theorems for nonautonomous functional differential equations by Liapunov functionals // Tohoku Math. J. 1989. V.41. P.65–104.
- [141] Burton T.A., Hatvani L. On nonuniform asymptotic stability for nonautonomous functional differential equations // Differential and Integral Equations. 1990. V.3. P.285–293.
- [142] Burton T.A., Makay G. Marachkov stability results for functional differential equations // EJTDE, 1998. №1. P.1–17.
- [143] Conley C.C., Miller R.K. Asymptotic stability without iniform stability. Almost periodic coefficients // J. Differ. Equat. 1965. V.1. №1. P.333–336.
- [144] Corduneanu C. On partial stability for delay systems // Ann. Polon. Math. 1975. V.29. P.357–362.
- [145] Corduneanu C., Ignatyev O.A. Stability of invariant sets of functional differential equations with delay // Nonlinear Func. Anal. and Appl. 2005. №1. P.11–24.
- [146] Gyori I., Hartung F. Preservation of stability in delay equations under delay perturbations // Journal of Math. Anal. and Appl. 1998. V. 220. P.290–312.

- [147] Haddock J. The "evolution" of invariance principles a la Liapunov's direct method // Advances in nonlinear dynamics. Stability and Control: Theory, Methods and Applications. V.5. 1997. P. 261–272.
- [148] Haddock J., Ko Y. Lyapunov-Razumikhin functions and an instability theorem for autonomous functional-differential equations with finite delay // Rocky Mtn. J. Math. 1995. V.25. P. 261–267.
- [149] Haddock J., Krisztin T., Terjeki J. Invariance principles for autonomous functional differential equations // J. Integral Equations. 1985. V.10. P.123–136.
- [150] Haddock J., Terjéki J. Liapunov-Razumikhin functions and an invariance principle for functional differential equations // J. Differential Equations. 1983. V.48. №1. P.95–122.
- [151] Haddock J., Terjéki J. On the location of positive limit sets for autonomous functional differential equations with infinite delay // J. Differential Equations. 1990. V.86. P.1–32.
- [152] Haddock J., Zhao J. Instability for autonomous and periodic functional differential equations with finite delay // Funkcialaj Ekvacioj. 1996. V.39. P.553–570.
- [153] Hale J. A stability theorem for functional-differential equations // Proc. N.A.S. 1963. V.50. P.942–946.
- [154] Hale J. Dynamical systems and stability // J. Math. Anal. Appl. 1969. V.26. P.39–59.
- [155] Hale J. Functional differential equations with infinite delays // J. of Math.An. and Applic., 1974. V. 48. P.276–293.
- [156] Hale J.K., Kato J. Phase space for retarded equations with infinite delay // Funk. Ekv., 1978. V.21. P.11–41.
- [157] Hatvani L. On the asymptotic stability of the solutions of functional differential equations // Qualitative theory of differential equations. Colloq. Math. Soc. J.Bolyai. Vol.53. North Holland, Amsterdam. 1990. P.227–238.
- [158] Hatvani L. On the asymptotic stability in differential systems by Liapunov direct method // Proceedings of the First World Congress

- of Nonlinear Analysts. Tampa, Florida, August 19-26, 1992. W.de 6., Berlin -N.Y. 1996. P.1341–1348.
- [159] Hatvani L. On the asymptotic stability by Lyapunov functionals with semidefinite derivatives // Nonlinear Analysis, TMA. 1997, V.30. №8. P. 4713–4721.
- [160] Hatvani L. Annulus arguments in the stability theory for functional differential equations // Differ. and Integral Equations. 1997. V. 10. №5. P. 975–1002.
- [161] Hatvani L. On Lyapunov's direct method for nonautonomous fde's // Functional Differential Equations. 1998. V. 5. №3–4. P.315–323.
- [162] Hatvani L. On the asymptotic stability for functional differential equations by Lyapunov functionals // Nonlinear Anal., Theory Methods Appl. 2001. 47.№7. P.4333–4343.
- [163] Hornor W.E. Invariance principles and asymptotic constancy of solutions of precompact functional differential equations // Tohoku Math. J. 1990. V.42. P.217–229.
- [164] Ignatyev A.O. On the asymptotic stability in functional differential equations // Proceedings of the American Math. Society. 1999. V.127. №6. P. 1753–1760.
- [165] Ignatyev A.O. On the partial equiasymptotic stability in functional differential equations // J. of Math. Anal. and Appl. 2002. V. 268. P.615–628.
- [166] Jankovic M. Control Lyapunov-Razumikhin functions and robust stabilization of time delay systems // IEEE Trans. on Automatic Control. 2001. V.46. P. 1048–1060.
- [167] Kato J. Uniform asymptotic stability and total stability // Tohoku Math. Journ. 1970, V.22. P.254–269.
- [168] Kato J. On Liapunov–Razumikhin type theorems for functional differential equations // Funkc. Ekvac., 1973. V.16. №3. P.225–239.
- [169] Kato J. Liapunov's second methods in functional differential equations // Tohoku Math. J. 1980. V. 32. №4. P. 487–492.

- [170] Makay G. An example on the asymptotic stability for functional differential equations // *Nonl. Anal., TMA*// 1994. V.23. P.365–368.
- [171] Mao X. Comments on "An improved Razumikhin-type theorem and its Applications"// *IEEE Transactions on automatic control*. 1997. V. 42. P. 429–430.
- [172] Mikolajska Z. Une remarque sur des notes der Razumichin et Krasovskij sur la stabilite asimptotique // *Ann. Polon. Math.*, **22** (1969). P.69–72.
- [173] Murakami S. Perturbation theorems for functional differential equations with infinite delay via limiting equations // *J. Differ. Equat.* 1985. V.59. P.314–335.
- [174] Saperstone S.N. *Semidynamical system in the infinite dimentional space*. N.Y.: Springer – Verlag. 1981. 474 p.
- [175] Sedova N. On employment of semi-definite function in stability of delayed equations // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 2003. V.281, №1. P.307–319.
- [176] Sedova N. Razumikhin-type theorems in the problem on instability of nonautonomous equations with finite delay // *Funckcialaj Ekvacioj*. 2004. V.47. P.187–204.
- [177] Seifert G. Liapunov-Razumikhin conditions for asymptotic stability in functional differential equations of Volterra type // *J. Differential equations*. 1974. 16. P.289–297.
- [178] Sell G.R. Nonautonomous differential equations and topological dynamics. 1, 2 // *Trans. Amer. Math. Soc.*, 1967. V.22. P.241–283.
- [179] Taniguchi T. Asymptotic behavior theorems for non-autonomous functional differential equations via Lyapunov-Razumikhin method // *Journal of Math. Analysis and Appl.* 1995. V. 189. P.715–730.
- [180] Taniguchi T. Asymptotic behavior theorems of solutions of functional differential equations with finite delay // *Journal of Math. Analysis and Appl.* 1996. V. 199. P.776–786.
- [181] Terjéki J. On the asymptotic stability of solutions of functional differential equations // *Annalea Polonici Mathematici*. 1979. V. 36. P. 299–314.

-
- [182] Wang Z. Comparison method and stability problem for functional differential equations // Tohoku Math. J. 1983. V.35. P. 349–356.
- [183] Wang T. Weakening the condition $W_1(|\varphi(\theta)|) \leq V(t, \varphi) \leq W_2(\|\varphi\|)$ for uniform asymptotic stability // Nonl. Anal., TMA. 1994. V.23. №2. P.251–264.
- [184] Yorke J.A. Some extensions of Liapunov's second method. – SIAM, Diff. integ. equat., Pa, 1969, p.206–207.
- [185] Yoshizawa T. Stability theory by Liapunov's second method. Tokio: The Math. Soc. of Japan, 1966, 216 p.
- [186] Yoshizawa T. Stability Theory and the Existence of Periodic Solutions and Almost-Periodic Solutions. Applied Math. Sciences, vol. 14, 1975. Springer-Verlag. N.Y. 233 p.
- [187] Zhang Bo. Asymptotic stability in functional differential equations by Lyapunov functionals // Trans. Amer. Math. Soc., 1995. V.347. №4. P.1375–1382.

Научное издание

Андреев Александр Сергеевич

**УСТОЙЧИВОСТЬ НЕАВТОНОМНЫХ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ
УРАВНЕНИЙ**

Зав. отделом: Г.А. Углева

Обложка: Н.В.Пенькова

Редактор Л.Г.Соловьева