

**ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ
МЕТОДА СЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА
В ЗАДАЧЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО СИНТЕЗА
СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ДВУНОГОГО
ШАГАЮЩЕГО РОБОТА***

Б.Б. Кулаков, А.С. Жаркова, Д.Э. Казарян

Кафедра кибернетики и мехатроники
Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 117923

Рассматривается задача стабилизации углового положения двуногого шагающего робота, описываемого моделью двухзвенного обратного маятника. Управление ищется в виде обратной связи по вектору состояния. С помощью параллельного генетического алгоритма, использующего метод сетевого оператора, строится множество Парето эффективных решений на пространстве двух функционалов: время стабилизации и норма вектора состояния. В статье приводятся результаты численного эксперимента.

Ключевые слова: параллельный генетический алгоритм, многокритериальная оптимизация, сетевой оператор.

Введение. Двухзвенным обратным маятником можно, в частности, упрощенно описать двуногий шагающий робот [1] при решении задачи стабилизации на основе использования его инерционных свойств. Идея управления таким маятником лежит в перераспределении момента импульса поступательного движения во вращательное движение и наоборот. Это позволяет управлять, в частности, знаком и величиной момента силы тяжести и уменьшить момент со стороны опоры, что и является практической целью управления.

Модель объекта управления. Рассмотрим двухзвенный обратный маятник (рис. 1). Оси шарниров параллельны и допускают движение маятника в вертикальной плоскости. Длины стержней l_1 и l_2 . Масса стержней распределена по ним равномерно и составляет m_1 и m_2 . Управляющее воздействие — угол поворота стержня 1 относительно вертикали β .

Момент импульса \bar{K}_O объекта, представленного на рис. 1, определяем из соотношения

$$\bar{K}_O = \bar{K}_{O_1} + \bar{K}_{O_2}.$$

Пусть $K_{O_{1z}}, K_{O_{2z}}$ — проекции на ось Oz (на рисунке не показана) моментов импульса стержней 1 и 2 относительно т. O соответственно. Для стержня 2 получаем [2]

$$K_{O_{2z}} = \dot{\alpha} J_{2O},$$

где $J_{2O} = \frac{m_2 l_2^2}{3}$ — момент инерции стержня 2 относительно т. O .

* Работа выполнена по гранту РФФИ 10-08-00618-а.

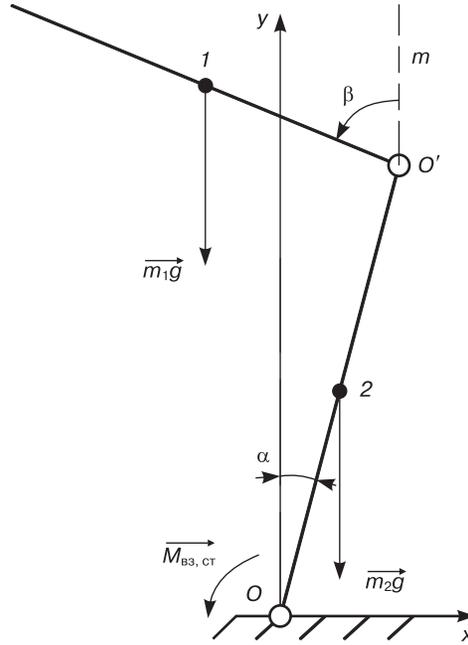


Рис. 1. Двухзвенный обратный маятник

Для стержня 1, согласно [2]

$$\bar{K}_{O1} = \bar{r}_{C1} \cdot m_1 \bar{v}_{C1} + \bar{K}_{C1}^{(r)}, \quad (1)$$

где $\bar{K}_{C1}^{(r)}$, \bar{r}_{C1} , \bar{v}_{C1} — главный момент импульса 1-го стержня относительно его центра масс, вектора его положения и скорости центра масс соответственно.

В нашем случае $K_{C1z}^{(r)} = J_{11} \dot{\beta}$, где $J_{11} = \frac{m_1 l_1^2}{12}$ момент инерции стержня 1 относительно т. I .

Раскрывая (1), получаем

$$K_{O1z} = m_1 \overline{r_{C1} \times v_{C1}} \Big|_z + J_{11} \dot{\beta} = m_1 \left[\frac{l_1^2}{4} \dot{\beta} + l_2^2 \dot{\alpha} + \frac{l_1 l_2}{2} (\dot{\alpha} + \dot{\beta}) c(\alpha - \beta) \right] + \frac{m_1 l_1^2}{12} \dot{\beta}.$$

Здесь и далее $s\alpha = \sin \alpha$, $c\alpha = \cos \alpha$. Тогда

$$K_{Oz} = \dot{\alpha} \left(m_1 l_2^2 + m_2 \frac{l_2^2}{3} \right) + \dot{\beta} m_1 \frac{l_1^2}{3} + m_1 \frac{l_1 l_2}{2} (\dot{\alpha} + \dot{\beta}) c(\alpha - \beta), \quad (2)$$

где $\bar{L}_O^{(e)}$ — главный момент внешних сил относительно центра O .

Согласно [2] и рис. 1,

$$\frac{dK_{Oz}}{dt} = \sum_{i=1}^N M_{Oz}(F_i^{(e)}) = M_{ст} + M_{mg} + M_{вз}, \quad (3)$$

где $M_{ст}$ — момент со стороны опорной поверхности. $M_{ст} = K_{ст\alpha} \cdot \alpha$, $K_{ст\alpha}$ — постоянный коэффициент стабилизации по углу α .

Момент силы тяжести, согласно рис. 1, определяем из соотношения

$$M_{mg} = s\alpha \underbrace{\left(m_1 g l_2 + m_2 g \frac{l_2}{2} \right)}_{K_{g\alpha}} + s\beta \underbrace{m_1 g \frac{l_1}{2}}_{K_{g\beta}} = s\alpha K_{g\alpha} + s\beta K_{g\beta}.$$

Тогда можно переписать (3) в виде

$$\frac{dK_{Oz}}{dt} = \alpha K_{cт\alpha} + s\alpha K_{g\alpha} + s\beta K_{g\beta} + M_{вз}. \quad (4)$$

Дифференцируя по времени соотношение (2), получим:

$$\begin{aligned} \frac{dK_{Oz}}{dt} = \ddot{\alpha} \underbrace{\left[\left(m_1 + \frac{m_2}{3} \right) l_2^2 + m_1 \frac{l_1 l_2}{2} c(\alpha - \beta) \right]}_{K_{\alpha(\alpha, \beta)}} + \\ + \ddot{\beta} \underbrace{\left[\frac{m_1 l_1^2}{3} + m_1 \frac{l_1 l_2}{2} c(\alpha - \beta) \right]}_{K_{\beta(\alpha, \beta)}} - m_1 \frac{l_1 l_2}{2} (\dot{\alpha}^2 - \dot{\beta}^2) s(\alpha - \beta). \end{aligned} \quad (5)$$

Сравнивая (4) и (5), получим (6):

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} = \frac{1}{K_{\alpha(\alpha, \beta)}} \left[-K_{\beta(\alpha, \beta)} \ddot{\beta} + K_{cт\alpha} \alpha + K_{g\alpha} s\alpha + K_{g\beta} s\beta + \right. \\ \left. + M_{вз} + m_1 \frac{l_1 l_2}{2} (\dot{\alpha}^2 - \dot{\beta}^2) s(\alpha - \beta) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Полагаем, что осуществляется кинематическое управление обратным маятником, путем задания желаемого угла $\beta_{ж}$. Учтем тот факт, что желаемый угол $\beta_{ж}$ поворота стержня l (см. рис. 1) будет отличаться от отрабатываемого, или реального β_p . Опишем динамику исполнительного механизма, отрабатывающего угол β , колебательным звеном, т.е.

$$\ddot{\beta}_p = -\frac{2\xi}{T} \dot{\beta}_p - \frac{1}{T^2} \beta_p + \frac{K}{T^2} \beta_{ж}. \quad (7)$$

На основании (6), (7) построим модель маятника в пространстве состояний:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{T^2} x_1 - \frac{2\xi}{T} x_2 + \frac{K}{T^2} u, \\ \dot{x}_3 &= x_4, \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{\left(m_1 + \frac{m_2}{3} \right) l_2^2 + m_1 \frac{l_1 l_2}{2} c(x_3 - x_1)}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\left[\left(\frac{m_1 l_1^2}{3} + m_1 \frac{l_1 l_2}{2} c(x_3 - x_1) \right) \left(\frac{1}{T^2} x_1 + \frac{2\xi}{T} x_2 - \frac{K}{T^2} u \right) + K_{\text{ста}} x_3 + K_{g\alpha} s x_3 + K_{g\beta} s x_1 + m_1 \frac{l_1 l_2}{2} [x_4^2 - x_2^2] s (x_3 - x_1) + w \right].$$

Здесь \mathbf{x} — вектор состояния объекта управления, u — управления, $\mathbf{x} = [\beta_p \quad \dot{\beta}_p \quad \alpha \quad \dot{\alpha}]^T$, $K_{g\alpha} = m_1 g l_2 + m_2 g \frac{l_2}{2}$, $K_{g\beta} = m_1 g \frac{l_1}{2}$, $u = \beta_{\text{ж}}$, $w = M_{\text{вз}}$.

Постановка задачи. Для системы (8) заданы начальные условия

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0. \quad (9)$$

Необходимо найти управление в виде

$$u = g(\mathbf{x}), \quad (10)$$

которое должно удовлетворять ограничениям

$$u^- \leq u \leq u^+ \quad (11)$$

и обеспечивать минимум функционалов

$$J_1 = \sqrt{\sum_1^4 x_i^2(t_f)} + \sum_{i=1}^4 \int_0^t x_i^2(t_f) \rightarrow \min, \quad (12)$$

$$J_2 = t_f \rightarrow \min, \quad (13)$$

где t_f — время управления $t_f = \begin{cases} t, & \text{если } \|\mathbf{x}(t)\| \leq \varepsilon \\ t^+, & \text{иначе} \end{cases}$, ε — малая положительная величина,

t^+ — максимальное время процесса управления.

Функционалы описывают минимальные величины текущих и терминальных значений углов и угловых скоростей, а также минимальное время управления.

В работе [3] рассмотрена задача с одним функционалом, управление ищется с помощью аппарата нейронных сетей и модели авторегрессии — скользящего среднего. В работе [4] синтез управления линейной и нелинейной моделью двухзвенного обратного маятника проводится путем минимизации функционала по градиентной схеме первого порядка. В настоящей работе для синтеза управления используем метод сетевого оператора [5—12].

Метод сетевого оператора [5—12] предназначен для записи формулы в наиболее удобном виде для вычисления на компьютере.

Для построения сетевого оператора вводится четыре конечных упорядоченных множества: переменных $X = (x_1, \dots, x_p)$, параметров $Q = (q_1, \dots, q_R)$, унарных операций $O_1 = (\rho_1(z), \dots, \rho_W(z))$ и бинарных операций $O_2 = (\chi_0(z', z''), \chi_1(z', z''), \dots, \chi_{V-1}(z', z''))$.

В множестве унарных операций должна обязательно присутствовать тождественная операция $\rho_1(z) = z$. Все бинарные операции должны быть коммутативны $\chi_i(z', z'') = \chi_i(z'', z')$, ассоциативны $\chi_i(\chi_i(z', z''), z''') = \chi_i(z', \chi_i(z'', z'''))$ и иметь единичные элементы $\chi_i(e_i, z) = \chi_i(z, e_i) = z, i = \overline{1, V}$.

Сетевой оператор представляет собой ориентированный граф, который описывает математические выражения. Любому узлу соответствуют элементы из множеств параметров Q или переменных X ; любому узлу, не являющемуся источником, соответствует бинарная операция из множества O_2 ; любой дуге графа соответствует унарная операция из множества O_1 .

Для любого математического выражения можно построить сетевой оператор, вычисления по которому будут давать те же результаты, что и вычисления по математическому выражению.

Для представления сетевого оператора в памяти компьютера используется матрица сетевого оператора $\Psi = [\psi_{ij}]$, $i, j = \overline{1, L}$, которая имеет верхнетреугольный вид и строится по матрице смежности графа сетевого оператора. Недиагональные ненулевые элементы указывают номера унарных операций, а диагональные элементы — номера бинарных операций. Для вычислений результата математического выражения по матрице сетевого оператора вводятся векторы номеров узлов входных переменных $\mathbf{b} = [b_1 \dots b_p]^T$, где b_i — номер узла-источника в сетевом операторе, параметров $\mathbf{s} = [s_1 \dots s_r]^T$, где s_i — номер узла-источника в сетевом операторе, с которым связан параметр $q_i, i = \overline{1, R}$, номеров выходных переменных $\mathbf{d} = [d_1 \dots d_m]^T$.

Для удобства вычислений и хранения промежуточных результатов вводится вектор узлов $\mathbf{z} = [z_1 \dots z_L]^T$, размерностью L , равной количеству узлов сетевого оператора. При вычислении первоначально задаются значения компонент вектора узлов $\mathbf{z}^{(0)} = [z_1^{(0)} \dots z_L^{(0)}]^T$. Если узел является источником, то в качестве начального значения устанавливается значение соответствующего элемента из множеств переменных или параметров $z_{s_i}^{(0)} = x_i \in X, i = \overline{1, P}, z_{b_i}^{(0)} = q_i \in Q, i = \overline{1, R}$. Остальные значения узлов являются единичными элементами для соответствующей бинарной операции.

При вычислении рассматриваются ненулевые элементы в матрице на каждой строке. Если $\psi_{ij} \neq 0$, то модифицируем значения компоненты $z_j^{(i)}$ вектора узлов с помощью соотношения

$$z_j^{(i)} = \begin{cases} \chi_{\psi_{ij}}(z_j^{(i-1)}, \rho_{\psi_{ij}}(z_i^{(i-1)})), & \text{если } \psi_{ij} \neq 0, \\ z_j^{(i-1)}, & \text{если } \psi_{ij} = 0. \end{cases}$$

После прохождения всех строк матрицы сетевого оператора результат вычислений будет храниться в компонентах вектора узлов, которые определяются по номерам выходных переменных $z_{d_i}^{(L)}, i = \overline{1, M}$.

Параллельный генетический алгоритм для задачи многокритериального синтеза системы стабилизации нелинейного объекта управления. Поиск матрицы сетевого оператора удобно производить с помощью генетического алгоритма [7]. В связи с широким распространением многоядерных и многопроцессорных систем, а также распределенных вычислительных систем целесообразно применять для задачи синтеза эффективные методы распараллеливания генетических алгоритмов.

Согласно одной из существующих классификаций [13] выберем региональную модель распараллеливания. Генерируем $R = p$ популяций, где p — количество процессоров (ядер) вычислительной системы, размера n .

В параллельном генетическом алгоритме дополнение к классическим генетическим операциям, таким как отбор, кроссовер, мутация, вводим операцию миграции [14].

Каждая популяция проходит $g = \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ поколений, причем каждые $e_s = \left\lfloor \frac{g}{8} \right\rfloor$

поколений происходит миграция. Из популяции-отправителя мигрируют лучшие особи. В популяции-приемнике прибывшие особи заменяют особей с наихудшей приспособленностью, т.е. если $fitness_{source} \geq fitness_{sink}$. Топология миграции —

кольцо, количество мигрирующих особей — $m = \left\lfloor \frac{n}{8} \right\rfloor$.

Схематически параллельный генетический алгоритм применительно к задаче структурного синтеза регулятора нелинейного объекта управления имеет следующий вид.

1. Задана система управления и вид вектора параметров $\mathbf{q} = [q_1 \dots q_k]^T$ и вектора вариаций базисного решения $\mathbf{w} = [w_1 \dots w_4]^T$. Имеются ограничения на параметры $q_i^- \leq q_i \leq q_i^+, i = \overline{1, k}$. Задаются функционалы качества. Задается число поколений g , число скрещиваемых пар C , длина хромосомы, кодирующей параметры N_p и хромосомы, кодирующей вариации N_s . Для параметрической хромосомы задается количество бит под целую и дробную части: c и d соответственно. Задаем количество эпох e_s и количество мигрирующих особей m . Задаем количество процессов p . Задаем базисную матрицу Ψ_0 .

2. Генерируем $n \cdot p$ хромосом каждого типа, распределяем их по R популяциям равномерно.

3. В каждой популяции выполняем начальное вычисление функционалов и, в соответствии с получившимися значениями, вычисляем расстояние каждой хромосомы от множества Парето.

4. Задаем $g_n = 1$ — номер текущего поколения.

5. Для каждой популяции запускается процесс эволюции.

6. Задаем $C_n = 1$ — номер текущей скрещиваемой пары.
 7. Отбираем пару хромосом для скрещивания. Если условие скрещивания не выполняется, то повторяем п. 7.
 8. Выполняем скрещивание.
 9. В соответствии с заданной вероятностью мутации применяется оператор мутации.
 10. Вычисляем значение функционалов для потомков, получившихся при скрещивании. Вычисляем расстояние до множества Парето. Если расстояние до множества Парето меньше, чем у наихудшей хромосомы в популяции, заменяем ее потомком. Повторяем для всех потомков.
 11. Если $C_n \leq C$, то $C_n = C_n + 1$ и переходим к п. 7.
 12. Если в одном из потоков $g_n \bmod e_s = 0$ $g_n \bmod e_s = 0$, то переходим к п. 13, иначе переходим к п. 16.
 13. Ожидаем, пока все потоки пройдут то же количество поколений, что и поток, инициировавший миграцию.
 14. В каждой популяции отбираем m особей с наименьшим расстоянием до множества Парето.
 15. Копируем из популяций с номером k в популяции с номером $(k + 1) \bmod R$ заданное количество особей, заменяя в популяции-приемнике наихудших особей (в случае, если приспособленность прибывших особей выше, чем у наихудших в популяции-приемнике).
 16. Возобновляем процесс эволюции: $g_n = g_n + 1$. Если $g_n \leq g$, то переходим к п. 6, иначе переходим к п. 17.
 17. Объединяем все популяции.
 18. Для объединенной популяции строим множество Парето.
 19. Завершение параллельного генетического алгоритма.
- Выбираем из множества Парето решение j и получаем соответствующие ему матрицу сетевого оператора Ψ_j и параметры $\mathbf{q}_j = [q_1^j \dots q_k^j]^T$.

Численный эксперимент. Для проведения численного эксперимента были использованы следующие параметры модели: $x_1(0) = \frac{\pi}{12}$ рад, $x_2(0) = 0$ рад/с, $x_3(0) = \frac{\pi}{12}$ рад, $x_4(0) = 0$ рад/с. Параметры генетического алгоритма приведены в таблице.

Таблица

Параметры генетического алгоритма

Параметр ГА	Значение параметра
Размер популяции, особей	256
Длина структурной хромосомы, бит	12
Количество параметров	4
Длина параметрической хромосомы, бит	12
Длина целой части параметрической хромосомы, бит	4
Длина дробной части параметрической хромосомы, бит	8
Количество скрещивающихся пар	128

Окончание

Параметр ГА	Значение параметра
Число поколений	48
Вероятность мутации, %	70%
Параметр отбора	0,4

Терминальное время моделирования $t_f = 20$. Количество ядер $p = 4$.

Алгоритм был реализован на языке C++. Результаты моделирования приведены на рис. 2—5.

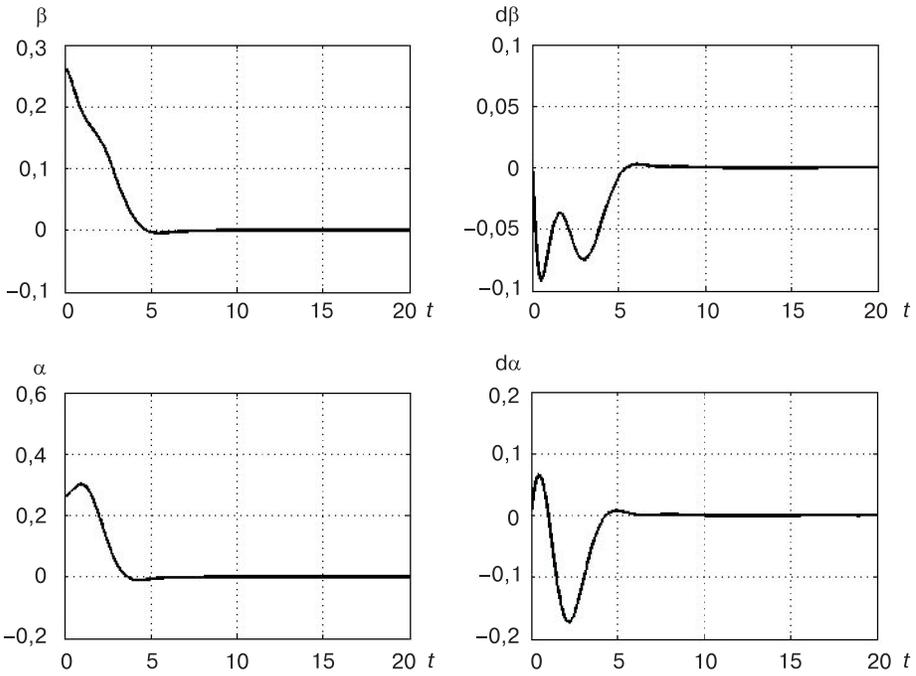


Рис. 2. Зависимость углов α и β и скоростей их изменения $\dot{\alpha}$, $\dot{\beta}$ от времени

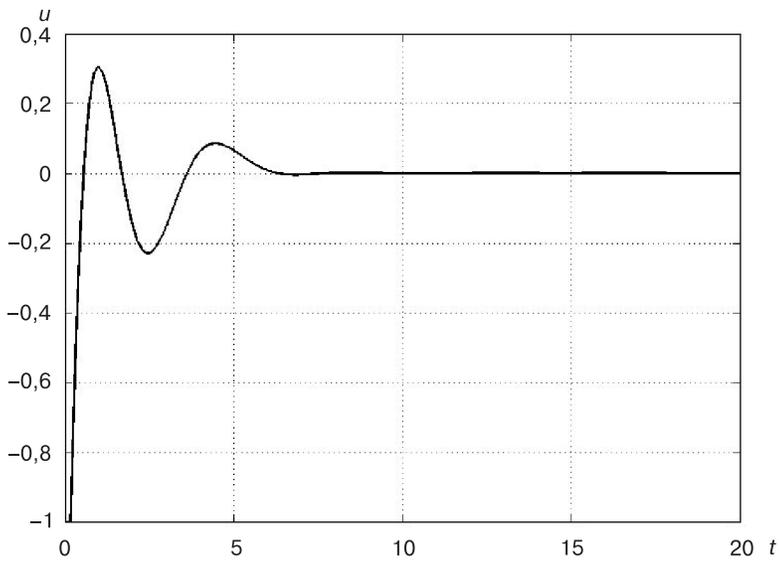


Рис. 3. Полученный закон управления

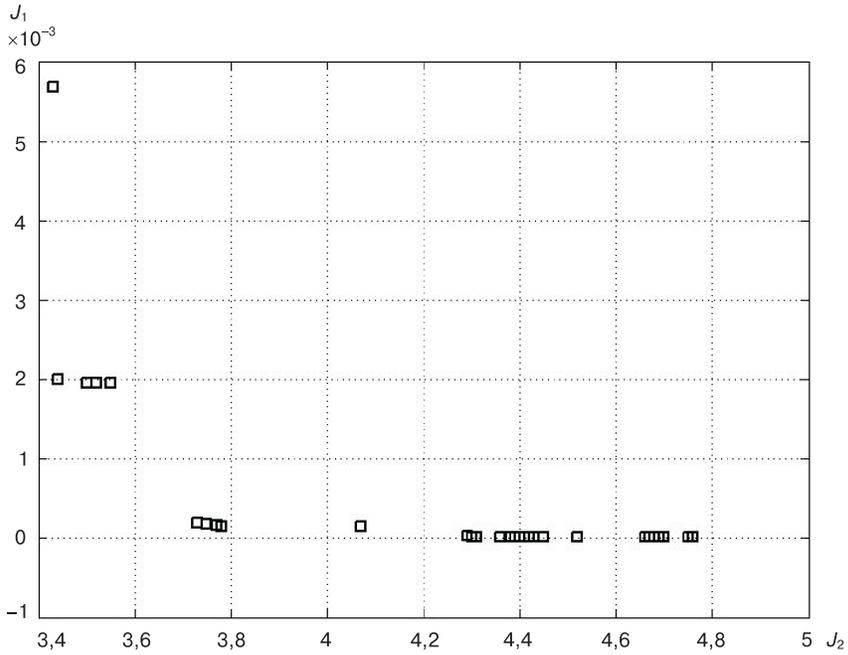


Рис. 4. Парето-область решений

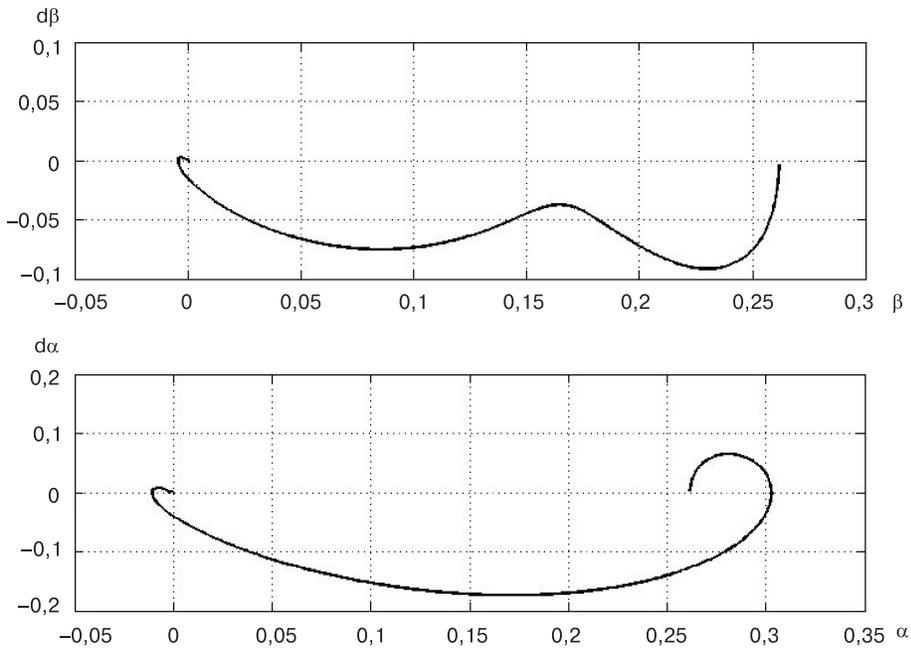


Рис. 5. Фазовые портреты параметров системы

Из множества Парето было выбрано одно решение, дающее значения функционалов

$$\begin{cases} J_1 = 4,718 \cdot 10^{-8}, \\ J_2 = 4,67. \end{cases} \quad (14)$$

Вектор параметров, соответствующий этому решению:

$$\mathbf{q} = [13,7852, 9,58594, 7,76562, 0,683594]^T. \quad (15)$$

Решение соответствует следующей матрице сетевого оператора

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

которая соответствует следующему закону управления

$$y = -x_1q_1 - x_2q_2 + x_3q_3 + x_4q_4. \quad (16)$$

Заключение. В результате применения параллельного алгоритма для синтеза системы стабилизации двуногого шагающего робота методом сетевого оператора была получена нелинейный закон управления по координатам состояния, который удовлетворяет заданному качеству.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Huang Q., Nakamura Y. Sensory reflex control for humanoid walking // IEEE Transaction on robotics. — 2005. — Vol. 21. — № 5. — P. 977—984.
- [2] Курс теоретической механики / Под ред. К.С. Колесникова. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
- [3] Chetouane F., Darenfed S. Neural network NARMA control of a Gyroscopic inverted pendulum // Engineering letters, 16:3, EL_16_3_01
- [4] Крутько П.Д., Паллош В.Е. Стабилизация состояния равновесия двойного маятника, нагруженного следящей и консервативной силами // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2009. — № 2. — С. 3—17.
- [5] Дивеев А.И., Софронова Е.А. Метод генетического программирования для автоматического подбора формул в задаче структурного синтеза системы управления // Труды института Системного анализа РАН. Динамика неоднородных систем / Под ред. Ю.С. Попкова. — М.: ИСА РАН: КомКнига, 2006. — Вып. 10(1). — С. 14—26.

- [6] Дивеев А.И., Софронова Е.А. Метод построения функциональных зависимостей для решения задачи синтеза оптимального управления // Труды института Системного анализа РАН. Динамика неоднородных систем / Под ред. Ю.С. Попкова. — М.: ИСА РАН: Ком-Книга, 2007. — Вып. 31(2). — С. 14—27.
- [7] Дивеев А.И., Софронова Е.А. Генетический алгоритм для многокритериального структурно-параметрического синтеза // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования». — 2007. — № 4. — С. 126—131.
- [8] Diveyev A.I., Sofronova E.A. Application of network operator method for synthesis of optimal structure and parameters of automatic control system // Proceedings of 17-th IFAC World Congress, Seoul, 05.07.2008—12.07.2008. — P. 6106—6113.
- [9] Дивеев А.И., Северцев Н.А., Софронова Е.А. Синтез системы управления метеорологической ракетой методом генетического программирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2008. — № 5. — С. 104—108.
- [10] Дивеев А.И., Северцев Н.А. Метод сетевого оператора для синтеза системы управления спуском космического аппарата при неопределенных начальных условиях // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2009. — № 3. — С. 85—91.
- [11] Дивеев А.И., Крылова М.В., Софронова Е.А. Метод генетического программирования для многокритериального структурно-параметрического синтеза систем автоматического управления // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. — М.: ВЦ РАН, 2008. — Вып. 10. — С. 93—100.
- [12] Дивеев А.И., Пупков К.А., Софронова Е.А. Повышение качества систем управления на основе многокритериального синтеза методом сетевого оператора // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования». — 2009. — № 4. — С. 1—8.
- [13] Schwehm M. Parallel Population Models for Genetic Algorithms // Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Arbeitsberichte des IMMD Band 30 Nummer 1, 1997.
- [14] Nowostawski M., Poli R. Parallel Genetic Algorithm Taxonomy // Knowledge-based Intelligent Information Engineering Systems, KES'99, Proceedings of International Conference, IEEE. — 1999. — P. 88—92.

THE PARALLEL REALIZATION OF GENETIC ALGORITHM ON THE BASE OF NETWORK OPERATOR METHOD FOR THE TASK OF TWO-TIER INVERTED PENDULUM STABILISATION PROBLEM

B.B. Kulakov, K.E. Kazaryan, A.S. Zharkova

Cybernetic and mechatronics department
Peoples' Friendship University of Russia
Ordjonikidze str., 3, Moscow, Russia, 117923

It is considered a problem of two-tiered inverted pendulum stabilization. Pareto-region for two functional is found by using network operator and parallel realization of genetic algorithm. Every point of that region gives a solution — state vector feedback control function. It is presented simulation results for one point of Pareto-region.

Key words: parallel genetic algorithm, multiobjective optimization, network operator.