

СИНТЕЗ ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ МЕТОДОМ СЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА

Данг Т.Ф.¹, Дивеев А.И.², Казарян Д.Э.¹, Софронова Е.А.¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Российский университет дружбы народов, Москва, Россия (117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6), e-mail: dtp1271983@yahoo.com, kazaryan.david@gmail.com, sofronova_ea@mail.ru.

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Российской академии наук, Москва, Россия (119333, Москва, ул. Вавилова, 40), e-mail: aidiveev@mail.ru.

Рассматривается задача синтеза идентификационного управления мобильным роботом. На первом этапе решается задача идентификации математической модели мобильного робота методом сетевого оператора. При решении задачи идентификации использовались заданное управление в виде функции времени и состояния робота, полученные в результате эксперимента. Математическая модель ищется в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. На втором этапе решается задача синтеза системы управления для полученной модели робота также методом сетевого оператора. В задаче синтеза системы управления необходимо обеспечить движение робота по заданной траектории, отличной от экспериментальной. Приведен пример синтеза идентификационного управления мобильным роботом Lego NXT. Поиск оптимального решения в обеих задачах осуществляется генетическим алгоритмом, построенным на основе принципа вариаций базисного решения.

Ключевые слова: идентификация системы управления, синтез системы управления, метод сетевого оператора, генетический алгоритм.

IDENTIFICATION CONTROL SYNTHESIS FOR MOBILE ROBOT BY METHOD OF NETWORK OPERATOR

Dang T.P.,¹ Diveev A.I.², Kazaryan D.E.¹, Sofronova E.A.¹

¹Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia (117198, Moscow, Miklukho-Maklaya str., 6), e-mail: dtp1271983@yahoo.com, kazaryan.david@gmail.com, sofronova_ea@mail.ru.

²Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Moscow, Russia (119333, Moscow, Vavilov str., 40), e-mail: aidiveev@mail.ru.

A problem of identification control synthesis for mobile robot. Initially, we identify mathematical model of mobile robot in the form of ODE using method of network operator. We use given control as a time function and state of the object obtained from the experiment. When mathematical model is found we solve the problem control system synthesis also using method of network operator. Synthesized control system should guarantee movement of robot over the given trajectory which differs from the experimental one. An example of identification control synthesis for mobile robot Lego NXT is given. The search of the optimal solution in both problems was done by genetic algorithm based on the principle of basis solution variation.

Keywords: control systems identification, control systems synthesis, network operator method, genetic algorithm.

Введение

Задача идентификационного управления [1] возникает в условиях, когда математическая модель объекта управления неизвестна. Такие задачи встречаются при управлении сложными техническими объектами, в том числе при управлении мобильными роботами. Задача синтеза идентификационного управления состоит из двух задач: задачи идентификации математической модели объекта и задачи синтеза системы управления для полученной модели. Настоящая работа посвящена решению задачи синтеза идентификационного управления методом сетевого оператора [2-10].

Метод сетевого оператора позволяет получать математические выражения в форме целочисленной матрицы. В работе используем метод сетевого оператора для решения обеих задач. В решении задачи синтеза используем математическую модель, полученную при решении задачи идентификации.

В качестве практического примера метод синтеза идентификационного управления применяем для технического объекта, мобильного гусеничного робота Lego NXT.

1. Задача синтеза идентификационного управления

Задано множество экспериментальных данных:

$$G = ((t_i, \mathbf{u}(t_i), \mathbf{y}(t_i)): i = 1, M), \quad (1)$$

где $\mathbf{u}(t_i)$ – вектор входного управления в момент t_i , $\mathbf{x}(t_i)$ – вектор выходных переменных в момент t_i , M – число точек наблюдения, $\mathbf{u}(t_i) \in \mathcal{R}^m$, $\mathbf{y}(t_i) \in \mathcal{R}^l$.

Задана размерность n модели объекта управления.

Задана функция определения вектора наблюдения по вектору состояния объекта

$$\mathbf{y} = \mathbf{v}(\mathbf{x}), \quad (2)$$

где $\mathbf{v}(\mathbf{x}) : \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^l$.

Задано множество начальных условий для объекта

$$\mathbf{x}(0) \in X \subseteq \mathcal{R}^n. \quad (3)$$

Задана цель управления

$$\mathbf{y}(t_f) = \mathbf{y}^f, \quad (4)$$

где t_f – время окончания процесса управления определяется выполнением условия (4).

Задан критерий качества

$$J = \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{y}, \mathbf{u}) dt \rightarrow \min. \quad (5)$$

Необходимо найти решение в виде

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{r}), \quad (6)$$

где \mathbf{r} – вектор параметров для задачи синтеза, $\mathbf{r} \in \mathcal{R}^s$.

Для решения задачи первоначально находим математическую модель объекта управления в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{q}), \quad (7)$$

где \mathbf{q} – вектор искомых параметров, который вводится в правые части дифференциальных уравнений для расширения пространства поиска, $\mathbf{q} \in \mathfrak{R}^p$, размерность p определяется исследователем по сложности задачи и объекта,

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{q}) : \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R}^m \times \mathfrak{R}^p \rightarrow \mathfrak{R}^n .$$

Решение $\mathbf{x}(t)$ в точках t_i , $i = \overline{1, M}$, при $\mathbf{x}(0) = \tilde{\mathbf{x}}(t_0)$, должно совпадать с результатами эксперимента. Для оценки качества найденного решения используем следующие функционалы:

$$J_1 = \sum_{i=1}^M \sqrt{\sum_{j=1}^l (y_j(t_i) - \tilde{y}_j(t_i))^2} \rightarrow \min , \quad (8)$$

$$J_2 = \max_i \max_j |y_j(t_i) - \tilde{y}_j(t_i)| \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, M}, j = \overline{1, l}. \quad (9)$$

Для решения задачи идентификации (1), (2), (7)-(9) используем метод сетевого оператора [1-7]. В результате решения задачи идентификации получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений (7).

На втором этапе решаем задачу синтеза системы управления (3)-(6) для математической модели (7), полученной на первом этапе. При решении задачи также используем метод сетевого оператора. Подробно метод сетевого оператора описан в работах [2-10].

2. Практический пример

В качестве эксперимента было рассмотрено решение задачи синтеза идентификационного управления для робота LEGO NXT [11] (рис. 1).

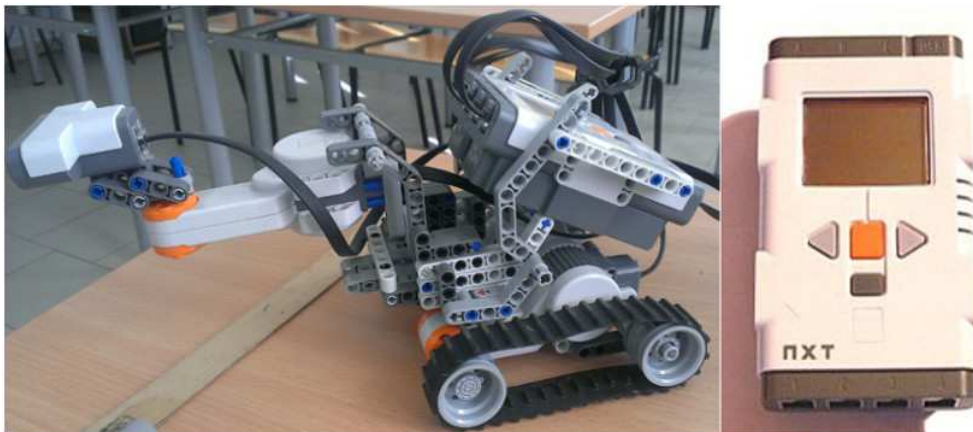


Рис.1. Робот LEGO NXT.

Робот имеет 4 колеса с радиусом $R=1$ см. Расстояния, пройденные колесами робота, рассчитываются по формулам

$$L_1 = R\varphi_1, L_2 = R\varphi_2,$$

где L_1, L_2 – расстояния, пройденные, соответственно, левой и правой парами колес, Φ_1, Φ_2 – углы вращения колес в радианах.

В эксперименте для получения исходных данных управление роботом осуществлялось с помощью функции времени

$$u_1 = [100 \sin(t)], \quad u_2 = [100 \cos(t)],$$

где $[a] = \begin{cases} \lfloor a \rfloor, & \text{если } \lfloor a \rfloor - a < 0.5 \\ \lceil a \rceil, & \text{иначе} \end{cases}$.

Было проведено несколько экспериментов по 21 точке. Вычислялись средние значения по всем экспериментам. Экспериментальные данные приведены в табл.1 .

Таб. 1. Экспериментальные данные

№	t, с	$\tilde{x}_1, \text{см}$	$\tilde{x}_2, \text{см}$	u_1	u_2
1	0	0	0	0	100

Таб. 1. (продолжение)

№	t, с	$\tilde{x}_1, \text{см}$	$\tilde{x}_2, \text{см}$	u_1	u_2
2	0.1	0	0.8430	10	100
3	0.2	0.1134	2.1590	20	98
4	0.3	0.5288	3.5692	30	96
5	0.4	1.2235	5.0004	39	92
6	0.5	2.0385	6.4542	48	88
7	0.6	2.9164	7.9011	56	83
8	0.7	3.8956	9.3532	64	76
9	0.8	4.9690	10.7809	72	70
10	0.9	6.1453	12.1597	78	62
11	1	7.4316	13.4931	84	54
12	1.1	8.8191	14.7952	89	45
13	1.2	10.2416	16.0919	93	36
14	1.3	11.6815	17.3486	96	27
15	1.4	13.1092	18.5424	99	17
16	1.5	14.5351	19.6297	100	7
17	1.6	15.9593	19.9509	100	-3
18	1.7	17.3695	19.6158	99	-13
19	1.8	18.7867	19.2178	97	-23
20	1.9	20.1917	18.6785	95	-32
21	2	21.5845	17.9769	91	-42

При решении задачи идентификации было выбрано следующее базисное решение

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m}(q_1 x_1 + q_2 x_2 + q_3 y_1 + q_4 y_2 + q_5 u_1 + q_6 u_2),$$

$$\dot{y}_1 = y_2,$$

$$\dot{y}_2 = \frac{1}{m}(q_1 x_1 + q_2 x_2 + q_3 y_1 + q_4 y_2 + q_5 u_1 + q_6 u_2).$$

Базисные значения параметров: $q_i = 1$, $i = \overline{1,6}$, $m = 1.5 \text{ кг}$. В результате была получена следующая матрица сетевого оператора:

$$\Psi_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 3 & 3 & 0 & 0 & 3 & 15 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 15 & 1 & 14 & 0 & 0 & 14 & 0 & 14 & 0 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 15 & 0 & 15 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 1 & 0 & 3 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 3 & 0 & 2 & 3 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 1 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

В матрице сетевого оператора номера унарных и бинарных операций соответствуют функциям, приведенным в приложениях [2]. В результате из матрицы сетевого оператора получаем следующее решение:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (10)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{b}{m}, \quad (11)$$

$$\dot{y}_1 = y_2, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_2 = & \frac{1}{m}(\operatorname{sgn}(b)\sqrt{|b|} + 2\operatorname{sgn}(a)\sqrt{|a|} + q_6 u_2 - 3\sqrt[3]{q_4} q_3 y_1 + 2q_1 q_2 \sqrt[3]{q_4} \operatorname{sgn}(u_2)\sqrt{|u_2|} x_1^2 x_2 + \sqrt[3]{q_6} + \\ & + q_5 + u_1 + 3q_4^3 - 3x_1 - q_4 y_2 x_1 + \operatorname{sgn}(u_2)\sqrt{|u_2|} q_1 x_1^2 + 2\sqrt[3]{u_2} + \operatorname{sgn}(q_6 u_2)\sqrt{|q_6 u_2|} + \sqrt[3]{q_5} - y_1), \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} a = & q_6 u_2 - \sqrt[3]{q_4} q_3 y_1 + 2q_1 q_2 \sqrt[3]{q_4} \operatorname{sgn}(u_2)\sqrt{|u_2|} x_1^2 x_2 + \sqrt[3]{q_6} + q_5 + u_1 + q_4^3 - x_1 - \\ & - q_4 y_2 x_1 + \left(\sqrt[3]{q_4} q_3 y_1\right)^2 + \operatorname{sgn}(u_2)\sqrt{|u_2|} q_1 x_1^2, \end{aligned}$$

$$b = a + \left(\sqrt[3]{q_4} q_3 y_1\right)^2 + \sqrt[3]{y_1} + \sqrt[3]{x_1},$$

$$q_1 = 0.109375, \quad q_2 = 0.015625, \quad q_3 = 0.234375, \quad q_4 = 1.984375, \quad q_5 = 0, \quad q_6 = 0.609375,$$

$$u_1 = [100 \sin(t)], \quad u_2 = [100 \cos(t)].$$

Параметры генетического алгоритма: размерность популяции – 256, количество скрещиваемых пар в поколении – 64, количество поколений – 256, число поколений между эпохами – 30, длина структурной части хромосомы – 8, число постоянных параметров – 6, количество бит под целую часть параметра – 2, количество бит под дробную часть параметра – 6, вероятность мутации – 0,7, шаг интегрирования – 0.001, размерность матрицы сетевого оператора – 22 x 22. Расчет проводился на программном комплексе NOP4C-I для идентификации систем управления методом сетевого оператора, разработанном на кафедре кибернетики и мехатроники РУДН [7]. Время расчета составляло 2,2 часа на ЭВМ с частотой процессора 2,2 ГГц, тип процессора Intel Core i5.

Результаты моделирования полученной модели системы управления представлены на рис. 5 - 7. Кружками отмечены экспериментальные данные из таблицы 1.

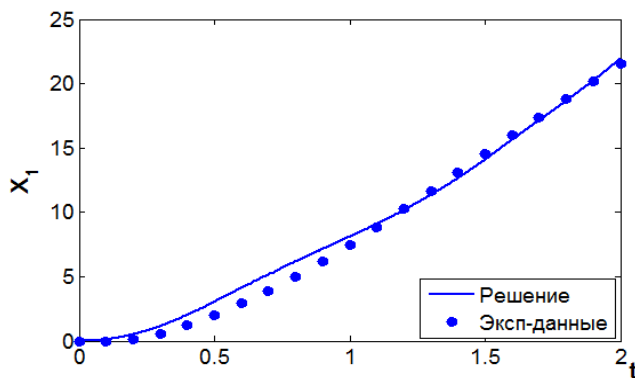


Рис. 5. График функции $x_1(t)$.

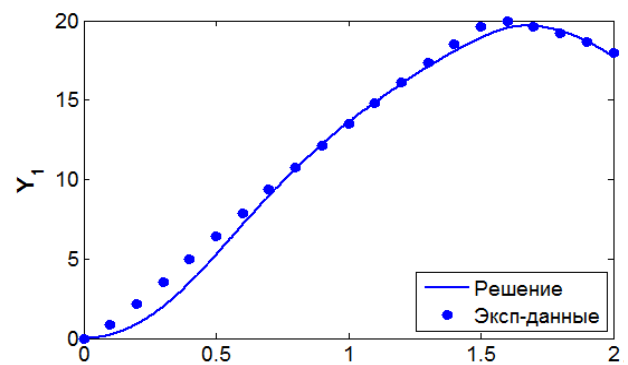


Рис. 6 График функции $y_1(t)$.

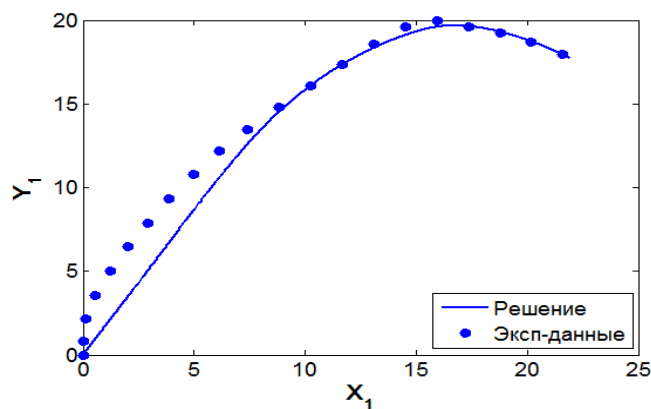


Рис. 7. График фазовой траектории $y_1(x_1)$.

Как видно из графиков, решения, полученные в результате идентификации модели, соответствуют исходным данным.

На втором этапе осуществляем синтез системы управления мобильным роботом Lego NXT с учетом полученной на этапе идентификации модели. Для решения задачи синтеза также применяем метод сетевого оператора.

При синтезе рассматривалась следующая задача. Задана траектория движения робота в виде упорядоченного множества N точек

$$P = \left((t_0, x_1^0, x_2^0), (t_1, x_1^1, x_2^1), \dots, (t_{N-1}, x_1^{N-1}, x_2^{N-1}) \right). \quad (14)$$

Для модели (10)-(13) необходимо найти управление в форме

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}), \quad (15)$$

которое минимизирует отклонение траектории робота от заданной траектории (14) по значениям критериев (8)-(9) при начальных условиях $x_1(t_0) = \hat{x}_1^0$, $x_2(t_0) = \hat{x}_2^0$. Управление ограничено значениями $u_i(\mathbf{x}) \in [-500; 500], i = \overline{1, 2}$.

Заданная траектория огибает препятствие и приведена на рис. 8.

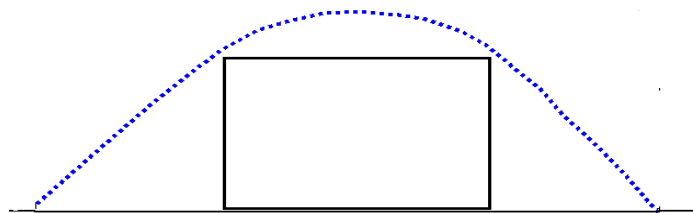


Рис. 8. Заданная траектория

Выбираем базисное решение в виде:

$$u_1 = q'_1 x_1 + q'_2 x_2,$$

$$u_2 = q'_3 y_1 + q'_4 y_2,$$

где $q'_i = 1$, $i = \overline{1, 4}$.

При решении использовали следующие параметры генетического алгоритма: размерность популяции – 256, количество скрещиваемых пар в поколении – 64, количество поколений – 256, число поколений между эпохами – 30, длина структурной части хромосомы – 8, число постоянных параметров – 6, количество бит под целую часть параметра – 4, количество бит под дробную часть параметра – 4, вероятность мутации – 0,7, шаг интегрирования – 0.001, размерность матрицы сетевого оператора – 16x16. Расчет проводился на программном комплексе NOP4C-S для идентификации систем управления методом сетевого оператора, разработанном на кафедре кибернетики и мехатроники РУДН [8]. Время расчета составляло 2 часа на ЭВМ с частотой процессора 2,2 ГГц, тип процессора Intel Core i5.

В результате было получена следующая матрица сетевого оператора:

$$\Psi_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 14 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 12 & 14 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 0 & 1 & 0 & 2 & 2 & 11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 0 & 1 & 0 & 6 & 23 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 15 & 3 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 3 & 14 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 3 & 11 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 3 & 15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Данная матрица соответствует следующему математическому выражению:

$$u_1 = q_1'^3 + q_2'^3 - \cos(y_1) + \sqrt{q_3'} + q_4'^3 + \cos(q_2'x_2) + \sqrt[3]{q_4'y_2} + y_1 + e^{q_3'} + \sqrt[3]{y_2} + q_1'x_1 \sin(y_1) \sin(q_3') \sqrt{q_4'},$$

$$u_2 = -x_1 + \sin(q_4') + \sqrt[3]{-q_3'x_1y_1} - \sin(q_2') + y_1^2 + q_3' - q_3'^3 - 2y_2 - q_4' - 2q_2'x_2 - q_3'x_1y_1 - q_4'y_2.$$

где $q_1' = 3.984375$, $q_2' = 3.984375$, $q_3' = 2.109375$, $q_4' = 3.984375$.

На рис.9 – 12 приведены результаты моделирования полученной системы управления.

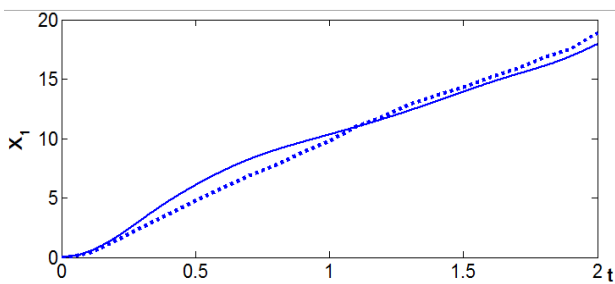


Рис. 9. График функции $x_1(t)$.

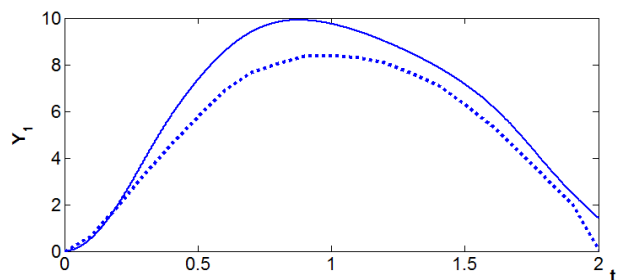


Рис. 10. График функции $y_1(t)$.

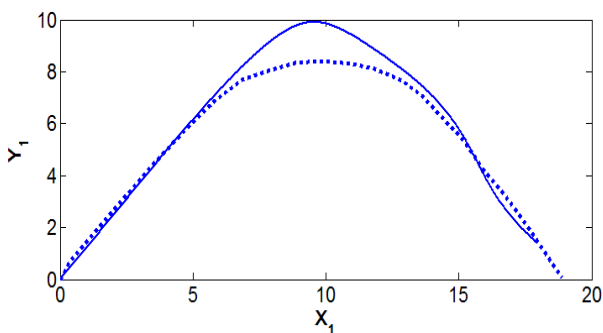


Рис. 11. График фазовой траектории $y_1(x_1)$.

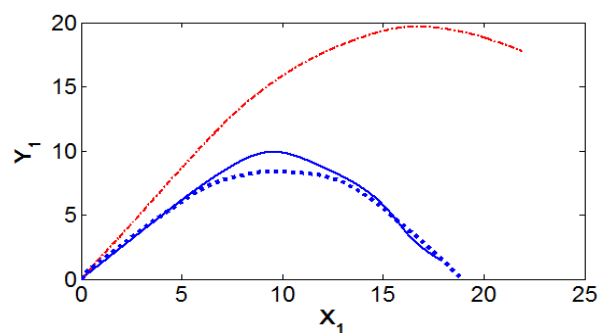


Рис. 12. Графики траекторий: для задачи идентификации (штрихпунктирная линия), заданная для синтеза (точки), синтезированная (сплошная линия).

Для сравнения на рис. 12 приведена траектория движения робота, использованная при решении задачи идентификации. Как видно из графиков, полученная при идентификации

математическая модель позволяет синтезировать систему управления роботом LEGO NXT, которая обеспечивает качественное движение по заданной траектории.

3. Заключение

В результате применения метода сетевого оператора была решена задача синтеза идентификационного управления мобильным роботом LEGO NXT. Результаты экспериментов показали удовлетворительное качество решения задач идентификации и синтеза управления.

Работа выполнена по теме грантов РФФИ №13-08-00523-а «Исследование и разработка численного метода идентификации моделей интеллектуальных систем управления», № 14-08-00008-а «Исследование методов синтеза систем управления в условиях неопределенности».

Список литературы

1. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунев Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами — М.: Физико-математическая литература, 2000. — 352 с.
2. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Метод сетевого оператора и его применение в задачах управления. – М.: РУДН, 2012. – 182 с.
3. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Метод сетевого оператора для идентификации систем управления // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия инженерные исследования (информационные технологии и управление). – 2008. - № 4. – С. 78-85.
4. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Метод генетического программирования с сетевым оператором для идентификации систем управления // Вестник Донского государственного технического университета. – 2010. – Т. 10. - №5 – С. 623-632.
5. Дивеев А.И., Данг Т.Ф., Софронова Е.А. Повышение качества решения задачи идентификации модели системы управления методом сетевого оператора // Современные проблемы науки и образования. – 2013. - № 6; URL: <http://www.science-education.ru/113-11192> (дата обращения: 19.12.2013).
6. Дивеев А.И. Численный метод сетевого оператора для синтеза системы управления с неопределенными начальными значениями// Известия РАН ТИСУ. – 2012. - № 2. – С. 63-78.
7. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Идентификация систем управления методом сетевого оператора. №2009615302. // Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. – М. ФГУ ФИПС, 2009. - №4 (69) (II ч.). – С. 404.

8. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Многокритериальный структурно-параметрический синтез систем управления методом сетевого оператора. №200913966. // Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. – М. ФГУ ФИПС, 2009. - №4 (69) (I ч.). – С.104.
9. Diveev A.I., Sofronova E.A. The Network Operator Method for Search of the Most Suitable Mathematical Equation // Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications – InTech, 2012 – Ch.2. – PP. 17-42.
10. Diveev A.I., Sofronova E.A. Numerical method of network operator for multiobjective synthesis of optimal control system // VII IEEE International Conference on Control and Automation, (ICCA'09), Christchurch, New Zealand, December 9-11, 2009. – P. 701-708.
11. Lego Mindstorms Руководство пользователя // Lego Group – URL: http://www.mindstorms.ru/img/file/8547_Mindstorms.pdf (дата обращения: 01.12.2013).

Рецензенты:

Забудский Е.И., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Московский агроинженерный университет им. В.П. Горячкина», г. Москва.

Юрков Н.К., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», г. Пенза.