

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.5.01

МЕТОД СЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Данг Т.Ф.^{1*}, Дивеев А.И.^{2**}, Софронова Е.А.^{1***}

¹ *Российский университет дружбы народов,
РУДН, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198, Россия*

² *Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук,
ФИЦ ИУ РАН, ул. Вавилова, 44/2, Москва, 119333, Россия*

* *e-mail: dtp1271983@yahoo.com*

** *e-mail: aidiveev@mail.ru*

*** *e-mail: sofronova_ea@mail.ru*

Рассматривается задача синтеза идентификационного управления и его применение для мобильного робота LEGO Mindstorms NXT 2.0. Задача состоит из двух подзадач: идентификации математической модели объекта и синтеза системы управления для полученной модели. Для решения обеих задач использовался метод сетевого оператора, который позволяет с помощью эволюционного алгоритма находить структуру и параметры математического выражения, закодированного в форме целочисленной матрицы. При решении задачи идентификации были известны размерности векторов управления и состояния. Управление задавалось как функция времени, состояние робота фиксировалось в дискретные моменты. Математическую модель искали в виде правых частей системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В задаче синтеза системы управления необходимо найти управление идентифицированным объектом как функцию вектора состояния для обеспечения движения робота по заданной пространственной траектории, не совпадающей с траекторией для задачи идентификации.

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

Введение

Задача идентификационного управления [1] возникает в тех случаях, когда необходимо решить задачу синтеза системы управления для объекта, математическая модель которого полностью не известна.

Примерами возникновения такой задачи при управлении роботами могут быть: наличие объек-

та с очень сложной математической моделью; задачи, для которых нет необходимости использовать модель полностью или модель робота не известна полностью из-за внешних воздействий среды, а также в случае частичной потери функционирования.

В настоящей работе для решения задачи синтеза идентификационного управления используем чис-

ленный метод сетевого оператора [1–3]. Первоначально для решения задачи идентификации [4] задаем размерности вектора состояния идентифицируемой системы и вектора управления и находим правые части обыкновенных дифференциальных уравнений математической модели исследуемого объекта управления. При решении задачи идентификации учитываем экспериментальные данные, полученные на реальном объекте. Для выполнения эксперимента задаем функции управления во времени и сохраняем значения выходных переменных в дискретные моменты времени. Качество искомого решения оцениваем нормами отклонения решения идентифицированной системы от экспериментальных данных.

После решения задачи идентификации для полученной модели объекта решаем задачу синтеза управления [5]. Задаем новую пространственную траекторию в виде множества координат точек и находим методом сетевого оператора управление как функцию координат пространства состояний.

Метод сетевого оператора [2] относится к классу методов символьной регрессии. Метод ищет решение эволюционным алгоритмом в виде математического выражения, закодированного в форме целочисленной матрицы. При поиске решения эволюционный поисковый алгоритм использует принцип малых вариаций базисного решения. Принцип состоит в том, что исследователь задает одно базисное решение, а эволюционный алгоритм ищет оптимальное решение на множестве малых вариаций заданного базисного решения. Такой подход позволяет построить множество возможных решений, в котором большинство функций удовлетворяет условию достижения цели управления. Принцип малых вариаций сокращает область поиска, ограничиваясь окрестностью базисного решения. В процессе поиска алгоритм меняет базисное решение на наилучшее найденное к этому моменту решение. Каждое решение оцениваем заданным критерием качества управления и точностью достижения цели управления. Метод сетевого оператора показал свою эффективность при решении различных задач синтеза и идентификации [2].

При поиске оптимального решения используем генетический алгоритм [6]. Достоинство генетического алгоритма заключается в естественном отборе решений, что позволяет в процессе поиска отбрасывать наихудшие решения, а также в передаче свойств отобранных возможных решений новым возможным решениям. При решении обеих задач идентификации и синтеза используем генетический алгоритм многокритериальной оптимизации. Оценку решений осуществляем по рангу Па-

рето, который для каждого решения указывает, сколько возможных решений в искомом множестве решений лучше по критерию Парето, чем данное решение. Ранг Парето вычисляем из следующих соотношений:

$$\Lambda_i = \sum_{j=1}^N \lambda_j (J_k^i), \quad (1)$$

$$\text{где } \lambda_j (J_k^i) = \begin{cases} 1, & \text{если } J_k^j \leq J_k^i, k = 1, 2; \\ 0 & \text{— иначе;} \end{cases} \quad J_1^i, J_2^i \text{ —}$$

значения функционалов. Наихудшим решением является решение, которое имеет наибольшее расстояние до множества Парето.

На основании значений ранга Парето определяем вероятность выполнения генетической операции скрещивания

$$p_c = \max \left\{ \frac{1 + \gamma \Lambda_{i_1}}{1 + \Lambda_{i_1}}, \frac{1 + \gamma \Lambda_{i_2}}{1 + \Lambda_{i_2}} \right\}, \quad (2)$$

где γ — заданный параметр для скрещивания, $0 < \gamma < 1$.

Использование метода сетевого оператора для поиска математических моделей с помощью генетического алгоритма позволяет повысить эффективность и уменьшить время вычислений.

Вычислительный эксперимент

В качестве примера рассмотрена задача синтеза идентификационного управления роботом LEGO Mindstorms 2.0 NXT (рис. 1).

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

$$x_1 = R\varphi_1; \quad x_3 = R\varphi_2, \quad (3)$$

где x_1, x_3 — расстояния, пройденные соответственно левой и правой парами колес; φ_1, φ_2 — углы вращения колес в радианах.

Первоначально решаем задачу идентификации. Для получения исходных данных управление задаем в виде функций времени

$$u_1^* = [100 \operatorname{sgn}(t - 0,5)]; \quad u_2^* = [100 \operatorname{sgn}(t - 0,8)], \quad (4)$$

$$\text{где } [a] = \begin{cases} \lfloor a \rfloor, & \text{если } \|a\| - |a| < 0,5; \\ \lceil a \rceil & \text{— иначе.} \end{cases}$$

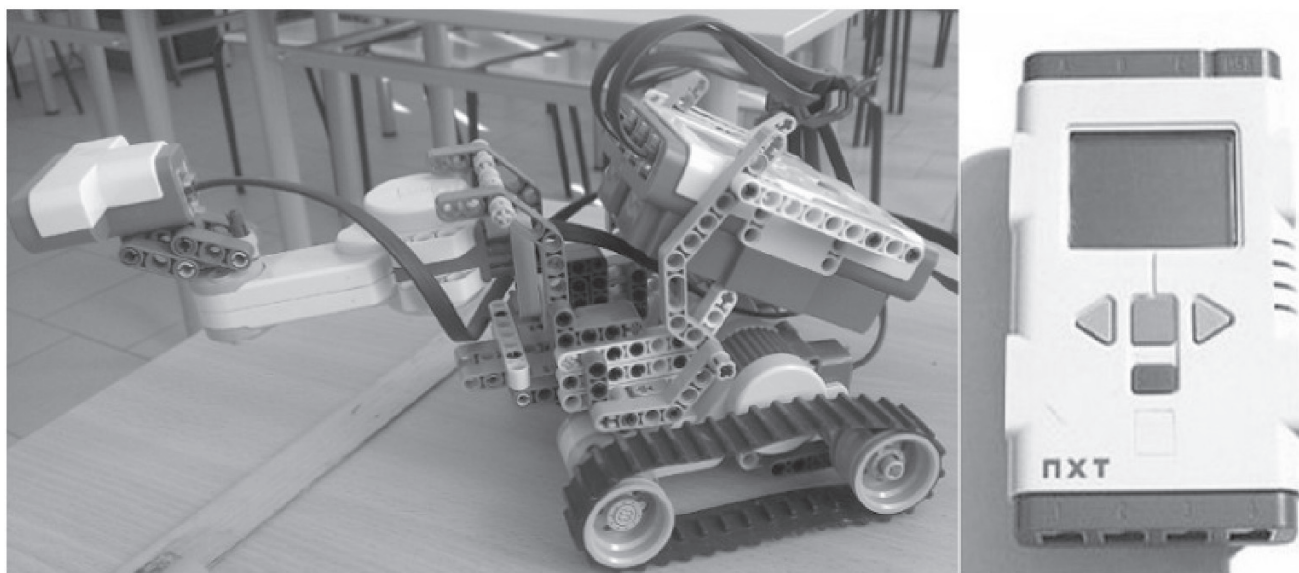


Рис. 1. Робот LEGO Mindstorms 2.0 NXT

Таблица 1

Считаем, что известны размерность модели объекта управления $n = 4$ и размерность вектора управления $m = 2$.

Необходимо найти модель в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \tag{5}$$

где $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = [f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \ f_2(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \ f_3(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \ f_4(\mathbf{x}, \mathbf{u})]^T$.

В качестве критериев оптимизации при решении задачи идентификации используем нормы отклонений выходных переменных модели от экспериментальных данных:

$$J_1 = \sqrt{\sum_{j=1}^{20} \left(\sum_{i \in \{1,3\}} \alpha_i (x_i(t_j) - \tilde{x}_i(t_j))^2 \right)} \rightarrow \min; \tag{6}$$

$$J_2 = \max_{\substack{i \in \{1,3\} \\ j \in \{0, \dots, 20\}}} |\alpha_i (x_i(t_j) - \tilde{x}_i(t_j))| \rightarrow \min, \tag{7}$$

где $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0)$ — решение системы уравнений

$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*(t))$ с начальными условиями

$\mathbf{x}^0 = \tilde{\mathbf{x}}(t_0)$, $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}^*(t_j)$ при $t \in [t_j, t_{j+1})$, $j = \overline{0, 20}$;

α_i — заданные весовые коэффициенты.

Было проведено 10 экспериментов по 21 точке.

В каждой точке найдены средние значения \tilde{x}_1 и \tilde{x}_3 по всем экспериментам. Экспериментальные данные приведены в табл. 1.

Экспериментальные данные

№	t, c	$\tilde{x}_1, cм$	$\tilde{x}_3, cм$	u_1^*	u_2^*
1	0	0	0	-100	-100
2	0,1	-0,90408	-0,88837	-100	-100
3	0,2	-2,41902	-2,43822	-100	-100
4	0,3	-4,07359	-4,11374	-100	-100
5	0,4	-5,77703	-5,83638	-100	-100
6	0,5	-6,75093	-7,56076	0	-100
7	0,6	-6,1994	-9,20137	100	-100
8	0,7	-4,98989	-10,8035	100	-100
9	0,8	-3,63377	-11,6396	100	0
10	0,9	-2,2218	-10,992	100	100
11	1	-0,68591	-9,67959	100	100
12	1,1	0,954695	-8,20479	100	100
13	1,2	2,624975	-6,67413	100	100
14	1,3	4,310963	-5,00734	100	100
15	1,4	5,986479	-3,24107	100	100
16	1,5	7,693411	-1,44687	100	100
17	1,6	9,409069	0,34732	100	100
18	1,7	11,11774	2,13977	100	100
19	1,8	12,81595	3,9235	100	100
20	1,9	14,52986	5,707226	100	100
21	2	16,2525	7,501425	100	100

Траектория движения робота по экспериментальным данным изображена на рис. 2, где по осям абсцисс и ординат отмечены расстояния, пройденные левой и правой парой колес робота.

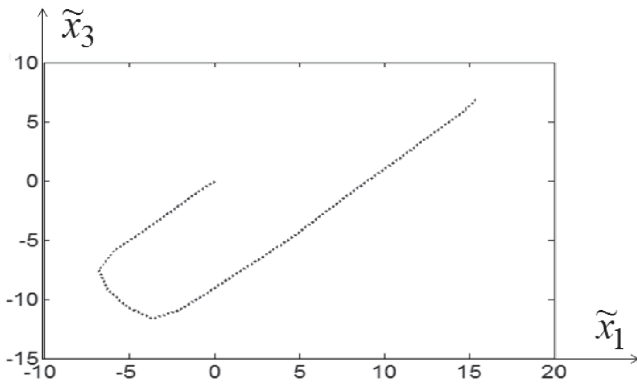


Рис. 2. Траектория движения робота по экспериментальным данным

В качестве базисного решения для простоты была выбрана тривиальная линейная функция от всех компонент векторов состояния и управления. Поскольку искомое решение будет модифицировано в процессе поиска, то для идентификации можно использовать любую функцию, которая содержит все необходимые аргументы. Специальное базисное решение следует устанавливать в тех случаях, когда ожидается получение сложного искомого решения.

При решении задачи идентификации было выбрано следующее базисное решение:

$$\dot{x}_1 = x_2; \tag{8}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m}(q_1x_1 + q_2x_2 + q_3x_3 + q_4x_4 + q_5u_1 + q_6u_2); \tag{9}$$

$$\dot{x}_3 = x_4; \tag{10}$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{m}(q_1x_1 + q_2x_2 + q_3x_3 + q_4x_4 + q_5u_1 + q_6u_2). \tag{11}$$

Базисные значения параметров:

$$q_i = 1, i = \overline{1,6}, m = 1,5 \text{ кг.}$$

Поиск структуры и параметров $q_i, i = \overline{1,6}$, математических выражений в форме сетевого оператора выполняли генетическим алгоритмом со следующими параметрами: 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 × 22. Расчет проводился на разработанном на кафедре кибернетики и мехатроники РУДН программном комплексе NOP4C-I для идентификации систем управления методом сетевого оператора [7]. Время расчета составляло 2,5 часа на ПК с частотой процессора 2,2 ГГц, тип процессора Intel Core i5.

На рис. 3 и в табл. 2 приведено полученное в результате вычислений множество Парето.

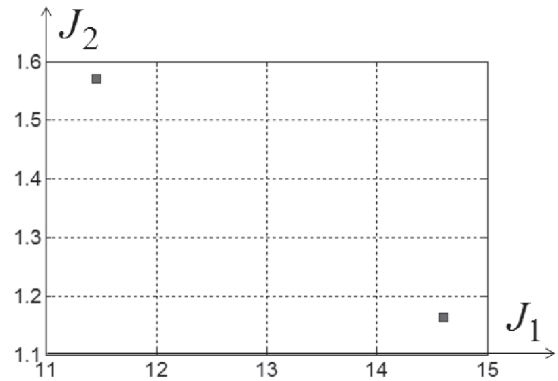


Рис. 3. Множество Парето для задачи идентификации

Таблица 2

Множество Парето

№ решения	J_1	J_2
1	14,60769598	1,16302170
2	11,46511497	1,56993270

Выбираем на множестве Парето решение № 1. Данному решению соответствует матрица сетевого оператора:

$$\Psi_i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 23 & 23 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 11 & 0 & 11 & 0 & 11 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 4 & 11 & 0 & 11 & 0 & 11 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 23 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 11 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 14 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 23 & 0 & 11 & 0 & 11 & 0 & 11 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 11 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

В матрице сетевого оператора номера унарных и бинарных операций соответствуют функциям, приведенным в [2]. Раскрывая матрицу сетевого оператора, получаем идентифицируемую модель объекта управления:

$$\dot{x}_1 = x_2; \tag{12}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{b(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{m}; \tag{13}$$

$$\dot{x}_3 = x_4; \tag{14}$$

$$\dot{x}_4 = \frac{c(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{m}. \tag{15}$$

Здесь $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$; $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2]^T$;

$$b(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|} - x_2 + q_2 - q_2^3 + \cos(x_4) + \cos(q_4) + \left(\operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|x_2q_2}\right)^3 +$$

$$+ \operatorname{sgn}(x_4q_4(q_5 - q_5^3))\sqrt{|x_4q_4(q_5 - q_5^3)|} + a + \cos(d);$$

$$c(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \cos(x_1) + \cos(q_5) - \operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|x_2q_2} + \cos(\sqrt{q_1}x_3q_3) + \operatorname{sgn}(u_2q_6)\sqrt{|u_2q_6|} + d + \operatorname{sgn}(b(\mathbf{x}, \mathbf{u}))\sqrt{|b(\mathbf{x}, \mathbf{u})|},$$

где

$$a = \cos(x_4) + \operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|}q_1 \cos(x_4)q_6^2 + \operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|x_2q_2} + \sqrt{q_1}x_3q_3 + x_4q_4(q_5 - q_5^3) + u_1q_5 + u_2q_6;$$

$$d = q_2 - q_2^3 + \operatorname{sgn}(x_4)\sqrt{|x_4|} + \cos(q_6) + \operatorname{sgn}(x_1) \times \sqrt{|x_1|}q_1 \cos(x_4)q_6^2 + \operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|x_2q_2} + \sqrt{q_1}x_3q_3 - \left(\operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|x_2q_2}\right)^3 + x_4q_4(q_5 - q_5^3) + u_1q_5 + u_2q_6;$$

$$q_1 = 0,0469; \ q_2 = 3,984; \ q_3 = 3,984; \ q_4 = 3,75;$$

$$q_5 = 2,25; \ q_6 = 3,984.$$

Результаты моделирования полученной модели объекта представлены на рис. 4–6. Кружками от-

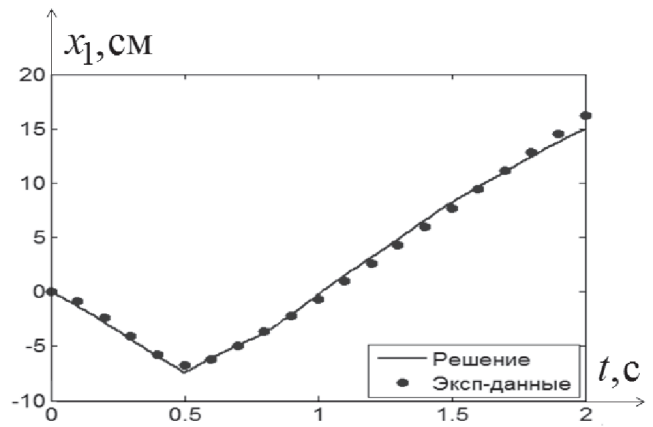


Рис. 4. Функция $x_1(t)$

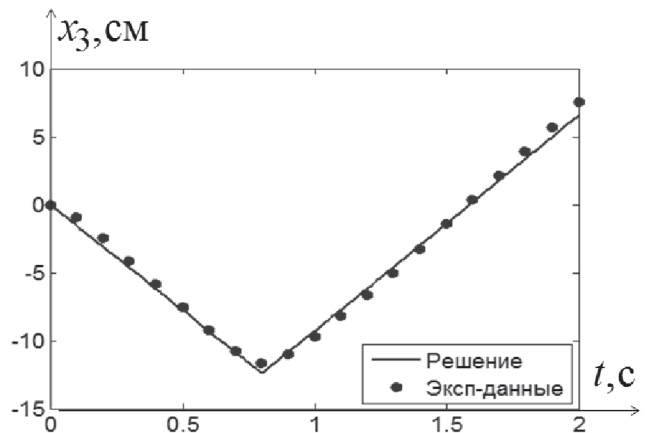


Рис. 5. Функция $x_3(t)$

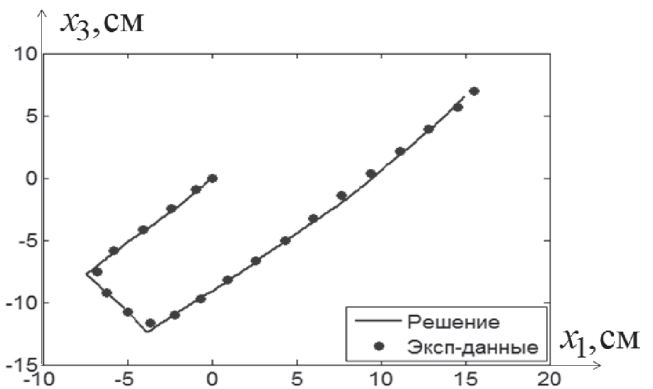


Рис. 6. График фазовой траектории $x_3(x_1)$

мечены экспериментальные данные из табл. 1, а сплошной линией — полученное в результате идентификации решение.

Как видно из графиков, решение, полученное в результате идентификации модели, качественно соответствует исходным данным. Максимальная величина отклонения составляет $J_2 = 1,163$.

На втором этапе осуществляем синтез системы управления мобильным роботом LEGO Mindstorms 2.0 NXT с учетом полученной на этапе идентифи-

кации модели (12)—(15). Для решения задачи синтеза также применяем метод сетевого оператора.

При синтезе рассматривалась следующая задача. Задана траектория движения робота в виде

$$x_i = \hat{x}_i(t), \quad i = 1, \dots, 4. \quad (16)$$

Для модели (12)—(15) необходимо найти управление в форме

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}), \quad (17)$$

где $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = [h_1(\mathbf{x}) \ h_2(\mathbf{x})]^T$.

Заданы ограничения на управление

$$u_i \in [-100; 100], \quad i = 1, 2.$$

Решение $\mathbf{x} = \mathbf{s}(\mathbf{x}^0, t)$ системы дифференциальных уравнений

$$\dot{x}_1 = x_2; \quad (18)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{b(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}))}{m}; \quad (19)$$

$$\dot{x}_3 = x_4; \quad (20)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{c(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}))}{m} \quad (21)$$

для

$h_i(\mathbf{x}) \in [-100; 100], \quad i = 1, 2,$ и $x_i^0 = \hat{x}_i(0), \quad i = 1, \dots, 4,$ должно оптимизировать значения функционалов

$$J_1 = \int_0^{t_f} \sqrt{\sum_{i=1}^4 (x_i(t) - \hat{x}_i(t))^2} dt \rightarrow \min; \quad (22)$$

$$J_2 = \max_{t \in [0, t_f]} \max_{i \in \{1, \dots, 4\}} \{|x_i(t) - \hat{x}_i(t)| : i = 1, \dots, 4\} \rightarrow \min. \quad (23)$$

Задана траектория в виде набора непрерывных функций времени:

$$\hat{x}_1(t) = 35 \sin\left(\frac{2t}{5}\right); \quad (24)$$

$$\hat{x}_2(t) = 14 \cos\left(\frac{2t}{5}\right); \quad (25)$$

$$\hat{x}_3(t) = 10 \sin\left(\frac{\pi t}{2}\right); \quad (26)$$

$$\hat{x}_4(t) = 5\pi \cos\left(\frac{\pi t}{2}\right). \quad (27)$$

Графики функций (24)—(27) приведены на рис. 7—10 соответственно.

Базисное решение выбирали из требований простоты реализации:

$$u_1 = q'_1 x_1 + q'_2 x_2; \quad (28)$$

$$u_2 = q'_3 x_3 + q'_4 x_4, \quad (29)$$

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

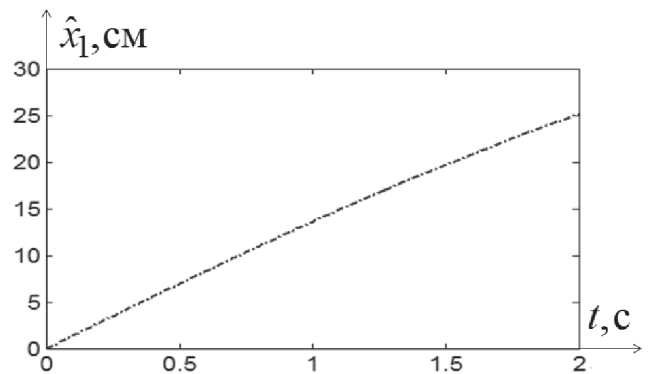


Рис. 7. Функция $\hat{x}_1(t)$

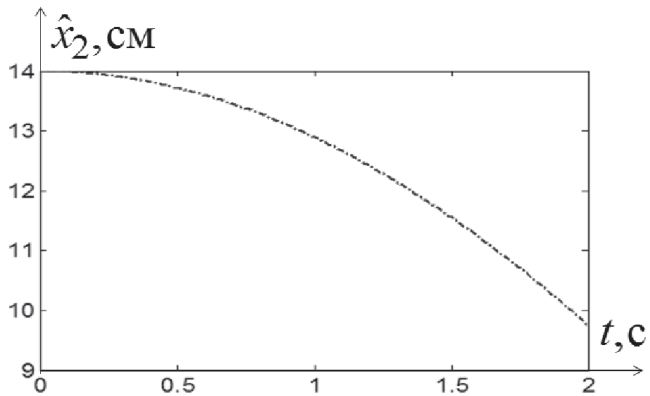


Рис. 8. Функция $\hat{x}_2(t)$

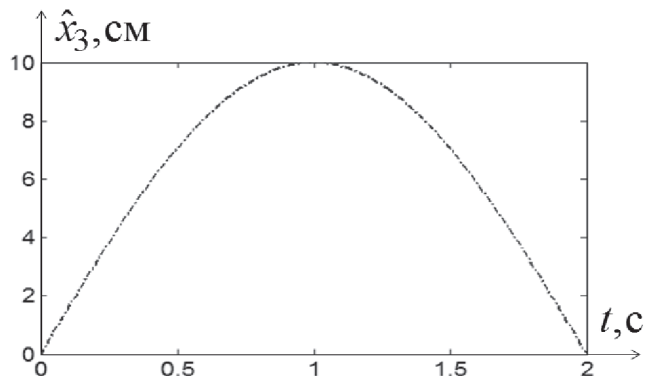


Рис. 9. Функция $\hat{x}_3(t)$

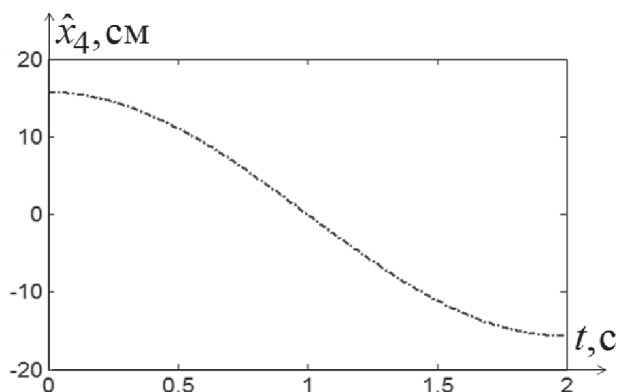


Рис. 10. Функция $\hat{x}_4(t)$

При решении задачи синтеза 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 — 16×16 . Расчет проводился на программном комплексе NOP4C-S для синтеза систем управления методом сетевого оператора [8]. Время расчета составляло 2 часа на ЭВМ с частотой процессора 2,2 ГГц, тип процессора Intel Core i5.

На множестве Парето получена одна точка со значениями критериев $J_1 = 0,7283$, $J_2 = 0,6299$. Данному решению соответствует матрица сетевого оператора

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

Матрица сетевого оператора соответствует математическому выражению:

$$y_1 = -q'_1 - x_4 q_4 + \left((x_1 q_1) \cos(q_4) + x_4 q_4 - (x_4 q_4)^3 \right)^3; \quad (30)$$

$$y_2 = \cos(x_2 q_2) + \operatorname{sgn}(x_3) \sqrt{|x_3|} q_3 \cos(x_1 q_1 \cos(q_4)) + x_4 q_4 - (x_4 q_4)^3, \quad (31)$$

где $q'_1 = 0,2343$; $q'_2 = 1,9843$; $q'_3 = 1,9843$; $q'_4 = 0,0468$.

С учетом ограничений на управление получаем следующее решение задачи синтеза:

$$u_i = \begin{cases} \operatorname{sgn}(u_i) 100, & \text{если } |u_i| \geq 100; \\ y_i, & \text{если } |u_i| < 100; \end{cases} \quad i = 1, 2. \quad (32)$$

Графики изменения управления представлены на рис. 11–12.

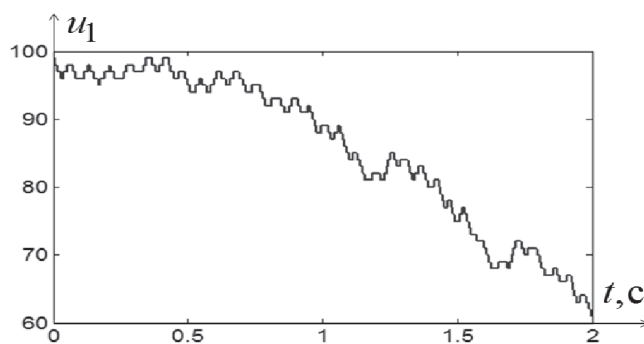


Рис. 11. Функция $u_1(t)$

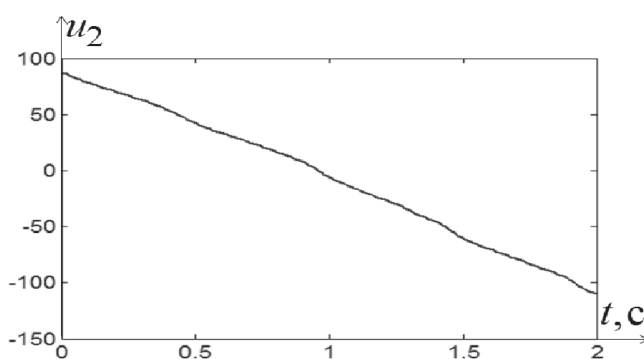


Рис. 12. Функция $u_2(t)$

На рис. 13–16 приведены результаты моделирования полученной системы управления. На рисунках штрихпунктирной линией обозначены заданные траектории, а сплошной линией — полученное решение.

Как видно из графиков, полученная при идентификации математическая модель позволяет син-

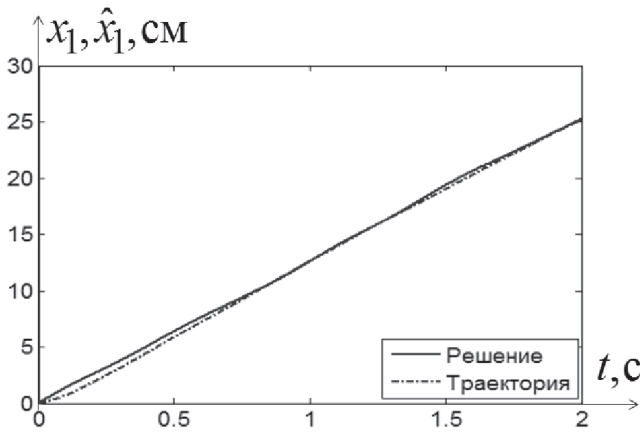


Рис. 13. Функция $\hat{x}_1(t)$ и $x_1(t)$

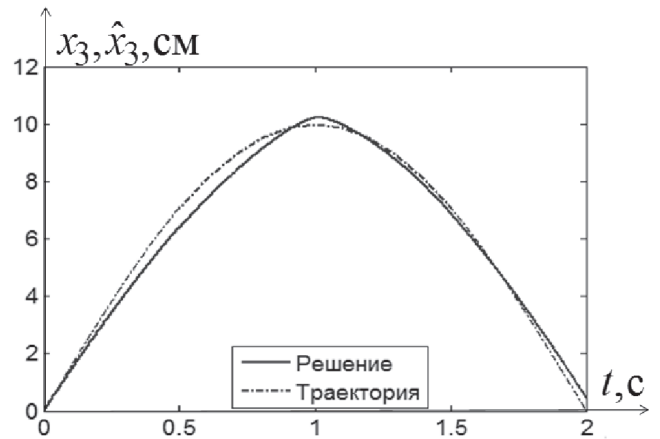


Рис. 15. Функция $\hat{x}_3(t)$ и $x_3(t)$

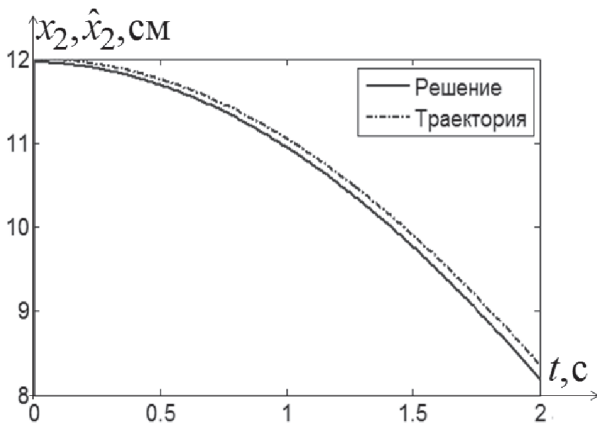


Рис. 14. Функция $\hat{x}_2(t)$ и $x_2(t)$

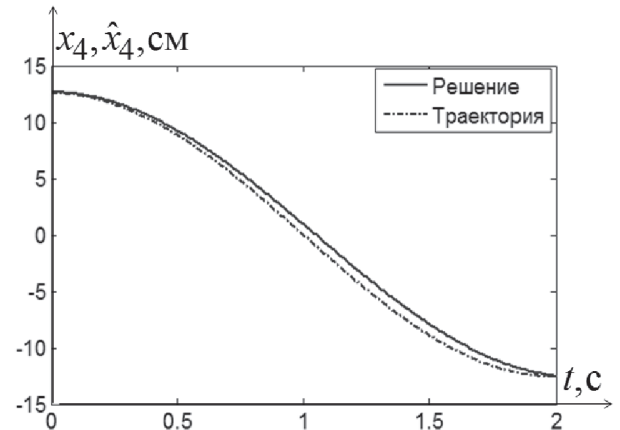


Рис. 16. Функция $\hat{x}_4(t)$ и $x_4(t)$

тезировать систему управления роботом LEGO Mindstorms 2.0 NXT, которая обеспечивает качественное движение по заданной траектории (7)–(10). Функционалы (13), (14) имели следующие значения: $J_1 = 0,7283$, $J_2 = 0,62991$.

С целью проверки решения задачи синтеза идентификационного управления полученный закон управления (30)–(32) был реализован на процессоре робота LEGO Mindstorms NXT 2.0. Резуль-

таты натуральных экспериментов приведены на рис. 17 и 18. Там же приведены заданные траектории и траектории движения идентифицированной модели (12)–(15). Все три траектории движения имеют одинаковый характер. Максимальная погрешность траектории, полученной на реальном объекте, по координате x_1 за 2 с составила 11%.

В результате применения метода сетевого оператора была решена задача синтеза идентификаци-

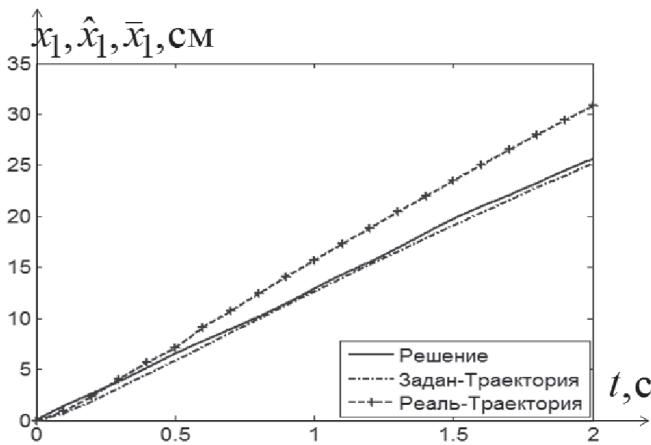


Рис. 17. Функция $\hat{x}_1(t)$, $x_1(t)$ и $\bar{x}_1(t)$

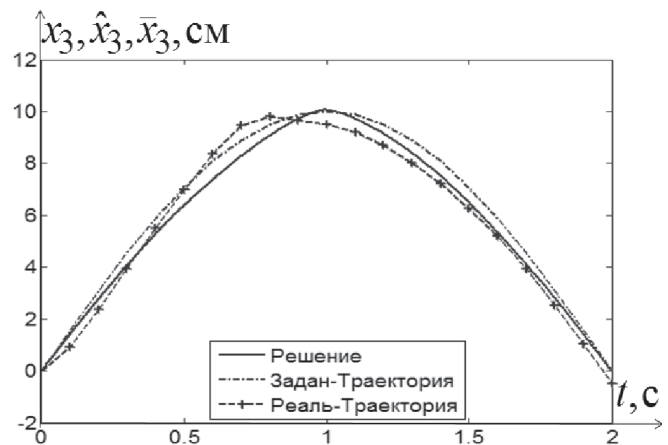


Рис. 18. Функция $\hat{x}_3(t)$, $x_3(t)$ и $\bar{x}_3(t)$

онного управления мобильным роботом LEGO NXT. Результаты экспериментов показали удовлетворительное качество решения задач идентификации и синтеза управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-0523-а).

Библиографический список

1. Данг Т.Ф., Дивеев А.И., Софронова Е.А. Задача синтеза идентификационного управления и ее решение методом сетевого оператора // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6; URL: <http://www.science-education.ru/120-15517> (дата обращения: 20.02.2015).
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., 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).
4. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов. — М.: Энергия, 1979. — 240 с.
5. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. — М.: Высшая школа, 2003. — 615 с.
6. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. — М.: Физматлит, 2006. — 320 с.
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.

NETWORK OPERATOR METHOD TO SOLVE THE PROBLEM OF IDENTIFICATION CONTROL SYNTHESIS FOR MOBILE ROBOT

Dang T.P.^{1*}, Diveev A.I.^{2**}, Sofronova E.A.^{1***}

¹ Peoples' Friendship University of Russia,
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia

² Federal Research Center «Computer Science and Control»
of Russian Academy of Sciences,
44/2, Vavilova str., Moscow, 119333, Russia

* e-mail: dtp1271983@yahoo.com

** e-mail: aidiveev@mail.ru

*** e-mail: sofronova_ea@mail.ru

Abstract

The paper considers a problem of identification control synthesis for mobile robot. The problem emerges in cases when it is necessary to solve the problem of the control system synthesis for an object, which mathematical model is completely unknown. Examples for the occurrence of such a problem while robot guidance may be presented as follows: the presence of an object described by a highly complex mathematical model; problems for which the use of the model in full is not necessary, or mathematical model of the robot is not known completely due to external, environment, as well as in case of partial loss of functioning.

In this paper, we use a numerical method of the network operator to solve the problem of identification control synthesis for mobile robot. This method allows determining the structure and parameters of mathematical expressions in the form of integer matrices using evolutionary algorithms. The main advantage of this principle consists in using small variations of the basic solution. The principle lies in the fact that the researcher defines one basic solution, and the evolutionary algorithm searches for the optimal solution on the given set of basic solution variations. This approach allows building a set of possible solutions, where the majority of the functions satisfy the condition

of the control goal. The principle of small variations reduces as well the searching range, limited to the vicinity of the basic solution. In the process of searching, basic solution is periodically substituted by the best current solution. The network operator method was effectively used to solve various problems of synthesis and identification.

The problem of identification control system synthesis consists of two tasks: identification of mathematical model of a controlled object and a control system synthesis for the obtained model. Initially, we apply the network operator method to solve the problem identification, in which, the quality criterion is a trajectory deviation from the experimental data. The experiments were performed on the real object, using the control, close to the required for control system synthesis problem. At the second stage, we solve the control system synthesis problem by the network operator method as well. We use another network operator of different dimensionality and with different quality criteria. We realize the network operator obtained as consequence of synthesis in the control unit of the real object and verify the results of identification control problem solution.

The results of conducted experiments displayed satisfactory quality of identification and control synthesis problem solution

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

References

1. Dang T.F., Diveev A.I., Sofronova E.A. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 6, available at: <http://www.science-education.ru/120-15517> (accessed 20.02.2015).
2. Diveev A.I., Sofronova E.A. *Metod setevogo operatora i ego primeneniye v zadachakh upravleniya* (Network operator method and its application for control problems), Moscow, RUDN, 2012, 182 p.
3. Diveev A.I., Dang T.F., Sofronova E.A. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 6, available at: <http://www.science-education.ru/113-11192> (accessed 19.12.2013).
4. Deich A.M. *Metody identifikatsii dinamicheskikh ob'ektov* (Methods of dynamic objects identification), Moscow, Energiya, 1979, 240 p.
5. Afanas'ev V.N., Kolmanovskii V.B., Nosov V.R. *Matematicheskaya teoriya konstruirovaniya sistem upravleniya* (Mathematical theory of control systems design), Moscow, Vysshayashkola, 2003, 615 p.
6. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M. *Geneticheskie algoritmy* (Genetic algorithms), Moscow, FIZMATLIT, 2006, 320 p.
7. Diveev A.I., Sofronova E.A. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programm dlya EVM2009615302*, 24.09.2009.
8. Diveev A.I., Sofronova E.A. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programm dlya EVM200913966*, 27.07.2009.