

ЗАДАЧА СИНТЕЗА ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ И ЕЕ РЕШЕНИЕ МЕТОДОМ СЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА

Данг Т.Ф.¹, Дивеев А.И.², 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.

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.

Под идентификационным управлением понимается управление объектом, математическая модель которого неизвестна. Для реализации такого управления первоначально решается задача идентификации, а затем для полученной модели объекта решается задача синтеза управления. В результате решения задачи синтеза управления мы получаем многомерную функцию, которая описывает зависимость управления от состояния объекта. После реализации данной функции в блоке управления реального объекта он достигает цели управления с оптимальными значениями критериев качества. Для решения задачи идентификации и синтеза используем метод сетевого оператора, который с помощью эволюционных алгоритмов поиска находит структуру и параметры функций, описывающих модель и функциональную зависимость управления от состояния объекта. В работе приведен пример использования сетевого оператора для решения задачи синтеза идентификационного управления роботом манипулятором.

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

IDENTIFICATION CONTROL SYNTHESIS BY METHOD OF NETWORK OPERATOR

Dang T.F.¹, Diveev A.I.², Sofronova E.A.¹

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

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

The identification control is a control of an object which mathematical model is unknown. For such objects initially the problem of identification is solved, and then for the resulting model of object the problem of control synthesis is solved. As a result of control synthesis we obtain a multi-dimensional function that describes the dependence of control on the state of the object. After the implementation of this function in the control unit of the real object, it achieves the goal of control with optimal value of the quality criteria. To solve the problem of identification and synthesis we use the method of network operator, which with the help of evolutionary algorithms finds the structure and parameters of the functions describing the model and functional dependence of control from the object state. In this paper, an example of using a network operator to solve the problem of identification control synthesis by robot manipulator is given.

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

*55-летию Российского университета
дружбы народов посвящается*

Задача идентификационного управления [1] возникает в тех случаях, когда модель объекта управления неизвестна или очень сложна и математический вывод модели требует существенных затрат. Часто такая ситуация возникает при построении моделей многозвенных роботов, когда большое количество степеней свободы приводит к модели

большой размерности. В некоторых случаях задача управления не требует использования всех уравнений моделей объекта, достаточно ограничиться упрощенной моделью или выполнить декомпозицию системы уравнений.

В настоящей работе мы решаем задачу идентификационного управления численным методом сетевого оператора [2-7]. Метод позволяет находить с помощью эволюционного алгоритма структуры и параметры математических выражений в виде целочисленной матрицы. Первоначально мы применяем метод сетевого оператора для решения задачи идентификации, где в качестве критерия используем норму отклонения траектории объекта от экспериментальных данных. Эксперимент выполняем на реальном объекте, применяя управление близкое к требуемой задаче синтеза. На втором этапе решаем задачу синтеза системы оптимального управления также методом сетевого оператора. Используем другой сетевой оператор, другой размерности и с другими критериями качества. Полученный в результате синтеза сетевой оператор реализуем в блоке управления реального объекта и с помощью моделирования проверяем результаты решения задачи синтеза идентификационного управления.

1. Задача идентификации математической модели объекта управления

Заданы размерность n модели объекта управления и размерность m вектора управления.

Заданы экспериментальные данные в виде упорядоченного набора числовых данных

$$\Xi = ((\tilde{\mathbf{u}}(t_0), \tilde{\mathbf{x}}(t_0)), \dots, (\tilde{\mathbf{u}}(t_N), \tilde{\mathbf{x}}(t_N))), \quad (1)$$

где $\tilde{\mathbf{u}}(t_i) = [\tilde{u}_0(t_i) \dots \tilde{u}_m(t_i)]^T$, $i = \overline{0, N}$, $\tilde{\mathbf{x}}(t_i) = [\tilde{x}_0(t_i) \dots \tilde{x}_n(t_i)]^T$.

Необходимо найти модель в форме

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (2)$$

где $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = [f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \dots f_n(\mathbf{x}, \mathbf{u})]^T$ – искомые математические выражения.

Решение системы уравнений (2)

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

где $\mathbf{u}(t) = \tilde{\mathbf{u}}(t_j)$ при $t \in [t_j, t_{j+1})$, должно обеспечить минимум следующих критериев:

$$J_1 = \sqrt{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \alpha_i (x_i(t_j) - \tilde{x}_i(t_j))^2} \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$J_2 = \max_{i,j} |\alpha_i (x_i(t_j) - \tilde{x}_i(t_j))| \rightarrow \min, \quad (4)$$

где α_i – заданные весовые коэффициенты.

Данная задача относится к классу задач структурно-параметрической многокритериальной оптимизации. Решением задачи является множество Парето на пространстве критериев (3), (4).

2. Задача синтеза управления

Задана математическая модель объекта управления в виде (2). Задана область начальных условий

$$\mathbf{x}(t_0) \in X_0 \subset \mathbb{R}^n. \quad (5)$$

Заданы ограничения на управление

$$\mathbf{u} \in U \subset \mathbb{R}^m. \quad (6)$$

Заданы терминальные условия

$$\varphi_i(\mathbf{x}(t_f)) = 0, \quad i = \overline{1, l}. \quad (7)$$

Задан критерий качества, который показывает точность отклонения от траектории

$$J = \int_{t_0}^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \rightarrow \min. \quad (8)$$

Необходимо найти управление в виде

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}), \text{ где } \mathbf{h}(\mathbf{x}): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m.$$

Функция $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ обеспечивает удовлетворение ограничений на управление (6) и для любого решения дифференциального уравнения

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}))$$

с начальными условиями $\mathbf{x}(t_0) \in X_0 \subset \mathbb{R}^n$ достижение терминальных условий (7) и минимальное значение функционала (8).

Для решения задач идентификации математической модели объекта управления и синтеза управления в работе используем метод сетевого оператора.

3. Вычислительный эксперимент

В качестве вычислительного эксперимента было рассмотрено решение задачи синтеза идентификационного управления для одного эталонного объекта управления [12] (рис. 1).

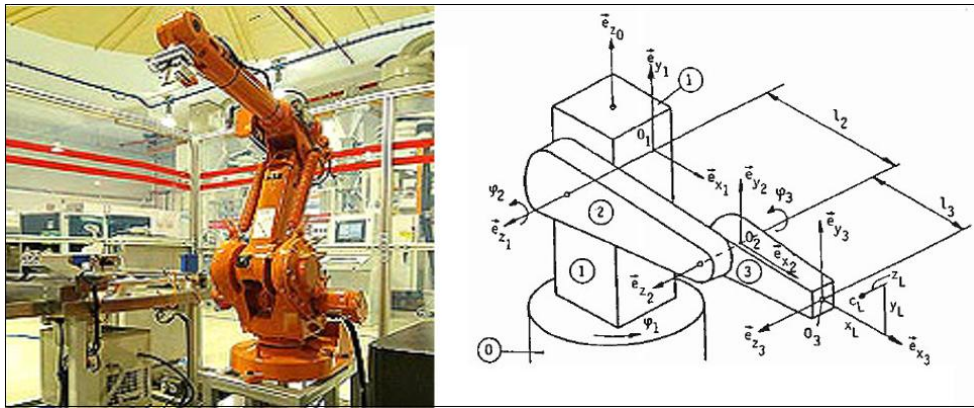


Рис. 1. Робот-манипулятор.

Математическая модель робота, изображенного на рис. 1 представлена в работе [12]. Мы предполагали, что не знаем эту модель, а располагаем самим техническим объектом, на котором можем проводить эксперименты. Нам известно, что вектором управления являются электромагнитные моменты u_i , которые действуют на ротор R_i двигателя. Компонентами вектора состояния являются углы вращения в местах соединения φ_i ($i = 1,2,3$).

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

$$u_1 = 0.35 \sin(t),$$

$$u_2 = 0.3(3-t),$$

$$u_3 = 0.15 \sin(t) + 0.3 \cos(t).$$

Был проведен ряд экспериментов и были получены значения переменных в 21-й точке. Экспериментальные данные приведены в табл. 1 .

Таблица 1

Экспериментальные данные

	t	x_1 (рад)	x_2 (рад)	x_3 (рад)	u_1	u_2	u_3
1	0	0	0	0	-0.55	-0.0054	0.4
2	0.1	0	0	-0.032	-0.053	0.3674	0.001
3	0.2	0	-0.02	-0.1025	-0.0487	0.2768	-0.005
4	0.3	0	-0.049	-0.2505	-0.04175	0.2897	-0.001
5	0.4	-0.007	-0.084	-0.4111	-0.0303	-0.3294	-0.003
6	0.5	-0.01	-0.1463	-0.6418	-0.01882	-0.3209	-0.0045
7	0.6	-0.02	-0.2212	-0.8503	-0.0013	-0.3098	-0.6859
8	0.7	-0.04827	-0.35	-1.042	-0.473	-0.2998	-0.093
9	0.8	-0.07	-0.4684	-1.223	-0.455	-0.2912	-0.117
10	0.9	-0.1162	-0.6405	-1.319	-0.4288	-0.2818	0.6481
11	1	-0.1654	-0.7917	-1.323	-0.4064	-0.2715	0.6112
12	1.1	-0.2462	-0.9772	-1.247	-0.3819	-0.2632	0.5796
13	1.2	-0.3132	-1.093	-1.085	-0.3547	-0.2548	0.5433
14	1.3	-0.4399	-1.216	-0.8576	-0.3272	-0.2472	0.5066
15	1.4	-0.5139	-1.32	-0.5798	-0.2933	-0.2398	0.4614

16	1.5	-0.6424	-1.407	-0.2505	-0.2656	-0.233	0.4244
17	1.6	-0.7539	-1.452	0.007	-0.2337	0.3979	0.382
18	1.7	-0.8863	-1.463	0.2505	-0.2082	0.4029	0.348
19	1.8	-1.01	-1.431	0.3952	-0.1779	0.4077	0.3075
20	1.9	-1.177	-1.353	0.4444	-0.1507	0.4098	-0.5227
21	2	-1.288	-1.23	0.373	-0.1202	0.4119	-0.5635

При решении задачи идентификации методом сетевого оператора было выбрано следующее базисное решение

$$\dot{x}_1 = q_1 x_1 + q_2 x_2 + q_3 x_3 + u_1 + q_4,$$

$$\dot{x}_2 = q_1 x_1 + q_2 x_2 + q_3 x_3 + u_2 + q_5,$$

$$\dot{x}_3 = q_1 x_1 + q_2 x_2 + q_3 x_3 + u_3 + q_6.$$

Выбор данного базисного решения соответствует линейной модели объекта управления.

Базисные значения параметров: $q_i = 1, i = \overline{1, 6}$.

Параметры генетического алгоритма: размерность популяции – 256, количество скрещиваемых пар в поколении – 64, количество поколений – 256, число поколений между эпохами – 20, 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 – 24 x 24. Расчет проводился на программном комплексе NOP4C-I для идентификации систем управления методом сетевого оператора, разработанном на кафедре кибернетики и мехатроники РУДН [8]. Время расчета составляло 2,2 часа на ЭВМ с частотой процессора 2,2 ГГц, тип процессора Intel Core i5.

В результате была получена следующая матрица сетевого оператора:

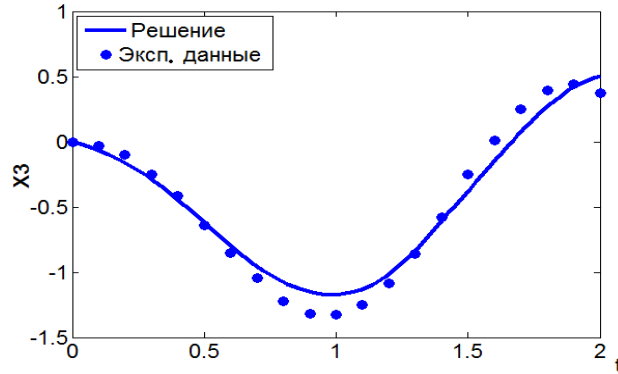


Рис. 4. Функция $x_3(t)$.

Как видно из графиков, решение, полученное в результате идентификации математической модели, достаточно хорошо соответствуют результатам экспериментов.

На втором этапе для проверки правильности решения задачи идентификации решаем задачу синтеза управления по полученной на этапе идентификации модели. Для решения задачи синтеза также применяем метод сетевого оператора.

В качестве цели управления задаем траекторию, которую необходимо пройти от точки к точке (см. рис. 5-7).

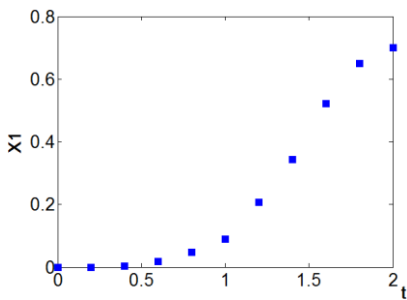


Рис.5. Заданная траектория угла $x_1(t)$.

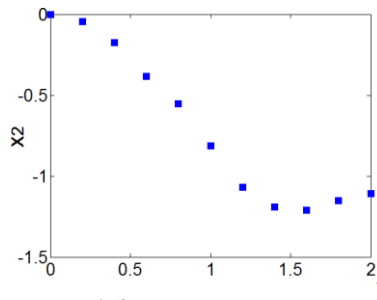


Рис.6. Заданная траектория угла $x_2(t)$.

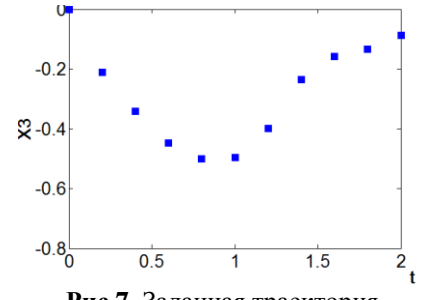


Рис.7. Заданная траектория угла $x_3(t)$.

Критериями качества управления считаем нормы отклонения от заданной траектории, аналогичные соотношениям (3), (4).

Выбираем базисное решение в виде:

$$u_i = \begin{cases} u_i^-, & \text{если } \tilde{u}_i \leq u_i^- \\ u_i^+, & \text{если } \tilde{u}_i \geq u_i^+, \quad i = 1, 2, 3, \\ \tilde{u}_i, & \text{иначе} \end{cases}$$

где

$$\tilde{u}_1 = q_1 \dot{x}_1 + q_2 \dot{x}_2 + q_3 \dot{x}_3,$$

$$\tilde{u}_2 = q_1 \dot{x}_1 + q_2 \dot{x}_2 + q_3 \dot{x}_3,$$

$$\tilde{u}_3 = q_1 \dot{x}_1 + q_2 \dot{x}_2 + q_3 \dot{x}_3.$$

Базисные значения параметров: $q_i' = 1, i = \overline{1,3}$.

Ограничения на управление имели следующие значения $u_i^- = -2, u_i^+ = 2, i = 1,2,3$.

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 NOR4C-S для идентификации систем управления методом сетевого оператора, разработанном на кафедре кибернетики и мехатроники РУДН [9]. Время расчета составляло 2 часа на ЭВМ с частотой процессора 2,2 ГГц, тип процессора Intel Core i5.

В результате была получена следующая матрица сетевого оператора:

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

Данная матрица соответствует следующим математическим выражениям:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1 &= q_2'^3 + \sin(q_2' \sin(x_2)) + (q_2' \sin(x_2))^6, \\ \tilde{u}_2 &= q_2'^3 + \cos(x_3) - (q_2' \sin(x_2))^2 - \text{sign}(q_2' \sin(x_2)) \sqrt{|q_2' \sin(x_2)|} + q_3' \sin(x_3) - \\ &\quad - \sin\left((q_2' \sin(x_2))^2\right) + \left(q_2'^3 + \sin(q_2' \sin(x_2)) + (q_2' \sin(x_2))^6\right)^2, \\ \tilde{u}_3 &= -x_2 + q_2' \sin(x_2) - (q_2' \sin(x_2))^3. \end{aligned}$$

где $q_1' = 0.000000, q_2' = 0.234375, q_3' = 2.109375$.

Графики управления представлены на рис. 8-10.

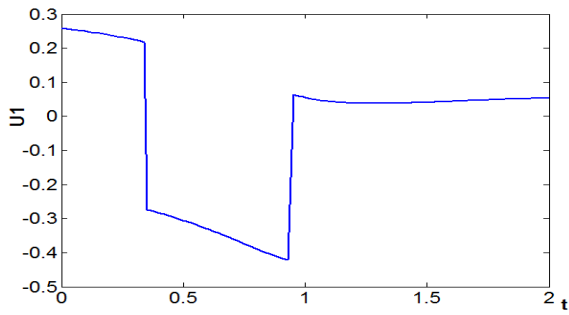


Рис.8. Функция $u_1(t)$.

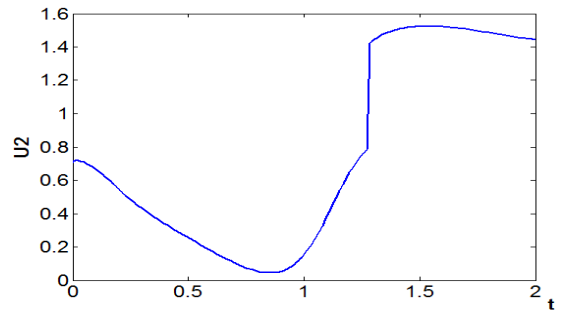


Рис.9 Функция $u_2(t)$.

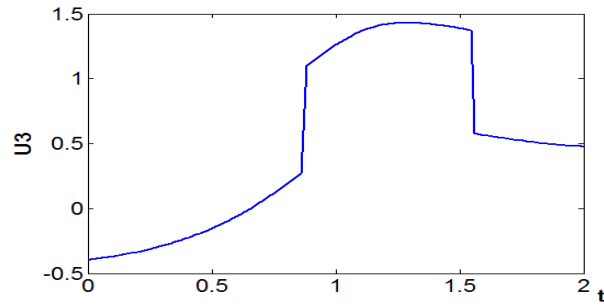


Рис.10. Функция $u_3(t)$.

На рис. 11-13 приведены результаты моделирования полученной системы управления.

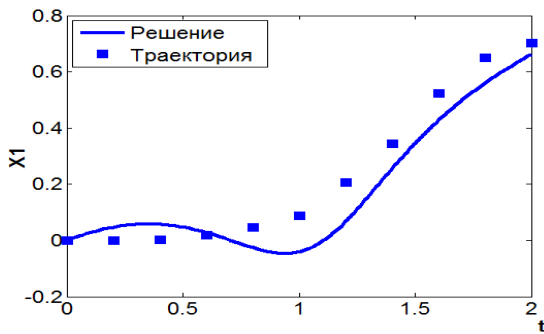


Рис.11. Функция $x_1(t)$.

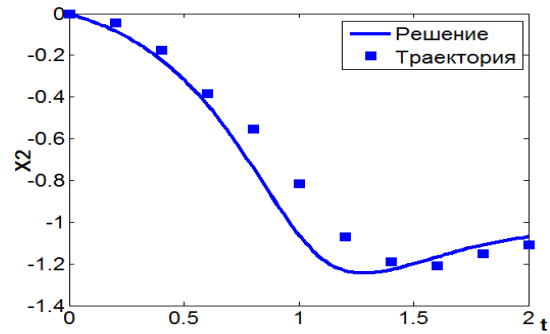


Рис.12. Функция $x_2(t)$.

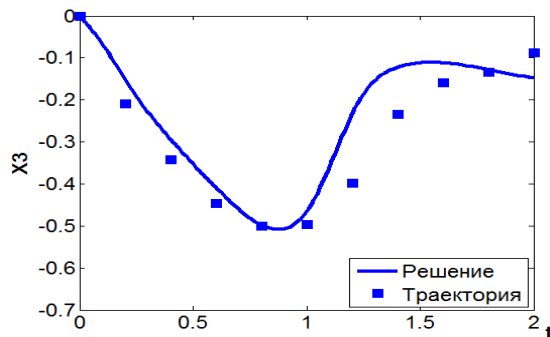


Рис.13. Функция $x_3(t)$.

Для сравнения на рис. 11-13 приведены траектории движения робота, полученные с помощью идентифицированной и реальной моделей. Как видно из графиков, полученная при

идентификации математическая модель позволяет синтезировать систему управления роботом, которая обеспечивает движение реального объекта по заданной траектории.

Рассмотрим решение задачи синтеза системы управления для разных начальных значений. Задаем для системы (9)-(11) множество начальных значений

$$X_0 = \{x^{0,1}, \dots, x^{0,M}\}. \quad (12)$$

Задаем траекторию (см. рис. 5-7). В качестве критериев отбора оптимальных решений используем суммы значений критериев, вычисленных для каждого начального состояния.

$$J_1 = \sum_{k=1}^M \left(\sqrt{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \alpha_i (x_i(t_j) - \tilde{x}_i(t_j))^2} \right)_{x^{0,k}} \rightarrow \min, \quad (13)$$

$$J_2 = \sum_{k=1}^M \left(\max_{i,j} |\alpha_i (x_i(t_j) - \tilde{x}_i(t_j))| \right)_{x^{0,k}} \rightarrow \min. \quad (14)$$

В результате синтеза системы управления методом сетевого оператора была получена следующая матрица сетевого оператора:

$$\Psi_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 11 & 0 & 12 & 0 & 0 & 4 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 11 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 12 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 23 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Данная матрица соответствует следующим математическим выражениям

$$\tilde{u}_1 = \left(\cos(q_1') x_2 q_2' \cos(q_3') \right)^2 - \sin(\sin(q_1') + \sin(x_1) + q_1'),$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}_2 = & q_1' + \cos(x_3 q_3') + \sin(\cos(x_3) \sin(\cos(q_1') x_2 q_2' \cos(q_3'))) + \left(\cos(q_1') x_2 q_2' \cos(q_3') \right)^2 - \\ & - \sin(\sin(q_1') + \sin(x_1) + q_1') - \left(\left(\cos(q_1') x_2 q_2' \cos(q_3') \right)^2 - \sin(\sin(q_1') + \sin(x_1) + q_1') \right)^3, \end{aligned}$$

$$\tilde{u}_3 = \sqrt{q_1'} + \left(\left(\cos(q_1') x_2 q_2' \cos(q_3') \right)^2 - \sin(\sin(q_1') + \sin(x_1) + q_1') \right)^3 + \sin\left(\sqrt{q_1'} + \cos(q_1') x_2 q_2' \cos(q_3') \right),$$

$$q_1' = 0.015625, \quad q_2' = 0.734375, \quad q_3' = 2.484375.$$

Графики изменения управления представлены на рис. 14-16.

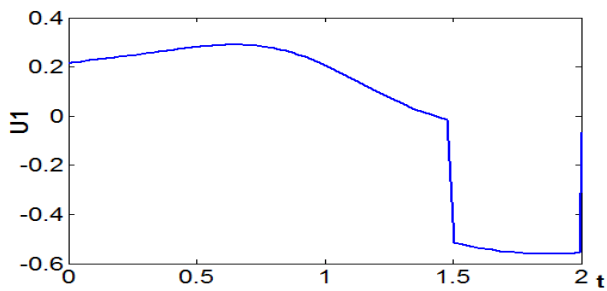


Рис.14. Функция $u_1(t)$.

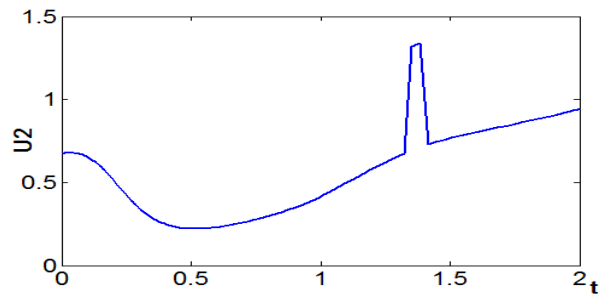


Рис.15 Функция $u_2(t)$.

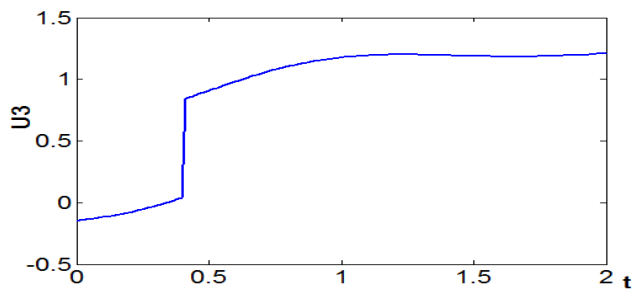


Рис.16. Функция $u_3(t)$.

На рис. 17-19 приведены результаты моделирования полученной системы управления с разными начальными значениями. Красный цвет соответствует результатам моделирования с начальными значениями $\mathbf{x}^{0,1} = [-0,1 \ -0,1 \ -0,1]^T$, зеленый цвет – $\mathbf{x}^{0,2} = [0,1 \ 0,1 \ 0,1]^T$, синий цвет – $\mathbf{x}^{0,3} = [0 \ 0 \ 0]^T$.

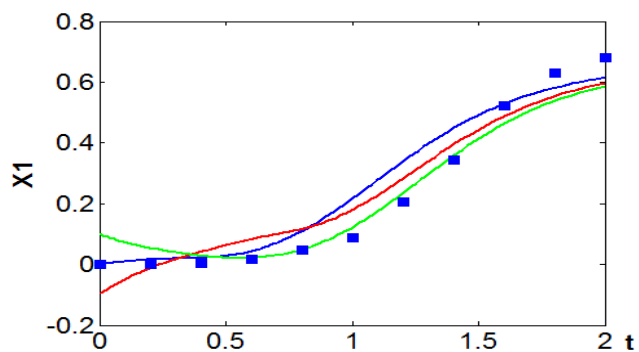


Рис.17. Функции $x_1(t)$

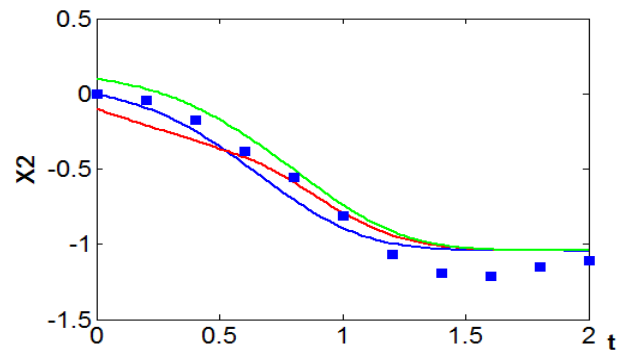


Рис.18. Функции $x_2(t)$

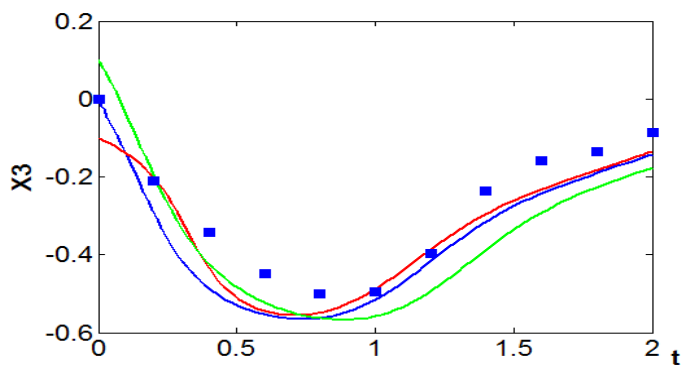


Рис.19. Функции $x_3(t)$

Как видно из графиков, полученная при идентификации математическая модель позволяет синтезировать систему управления роботом-манипулятором, которая обеспечивает движение реального объекта по заданной траектории при различных начальных значениях.

Заключение

В результате применения метода сетевого оператора была решена задача синтеза идентификационного управления. Результаты вычислительных экспериментов с эталонной моделью робота показали удовлетворительное качество решения задач идентификации и синтеза системы управления.

Работа выполнена по темам 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., Федун Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физико-математическая литература, 2000. – 352 с.
2. Данг Т.Ф., Дивеев А.И., Казарян Д.Э., Софронова Е.А. Синтез идентификационного управления мобильным роботом методом сетевого оператора // Современные проблемы науки и образования. – 2013. - № 2; URL: <http://www.science-education.ru/116-12860> (дата обращения: 10.09.2014).
3. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Метод сетевого оператора и его применение в задачах управления. – М.: РУДН, 2012. – 182 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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).
7. Дивеев А.И. Численный метод сетевого оператора для синтеза системы управления с неопределенными начальными значениями// Известия РАН ТИСУ. – 2012. - № 2. – С. 63-78.

8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Edward J. Davision, Chairman, Benchmark problems for control system design // International Federation of Automatic Control – 1990. URL: http://rockinrobotchallenge.eu/Benchmarking_Robotics.pdf (дата обращения: 14.10.2014).

Рецензенты:

Никульчев Е.В., д.т.н., профессор, Негосударственное образовательное учреждение ВПО, Московский технологический институт, г. Москва.

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