

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ СЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА

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

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Российской академии наук, Москва, Россия (119333, Москва, ул. Вавилова, 40)

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Российский университет дружбы народов, Москва, Россия (117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6)

Рассматривается задача идентификации модели системы управления. Задача заключается в том, чтобы обеспечить поиск математической модели, которая соответствует заданным экспериментальным данным. Для решения задачи идентификации модели системы управления используется метод сетевого оператора. Сетевой оператор представляет собой структуру данных, которая предназначена для эффективного описания математических выражений. Поиск оптимального решения реализуется генетическим алгоритмом на основе принципа базисного решения. Базисное решение может задаваться на основании опыта исследователя. Выбор наилучшего базисного решения увеличивает эффективность алгоритма решения задачи идентификации. Выбор параметров генетического алгоритма также изменяет эффективность алгоритма. Приведен численный пример решения задачи идентификации для разных базисных решений и исследована зависимость влияния параметров генетического алгоритма на значения критериев качества.

Ключевые слова: идентификация системы управления, сетевой оператор, генетический алгоритм.

IMPROVING THE QUALITY OF THE PROBLEM OF IDENTIFICATION OF CONTROL SYSTEMS BY METHOD OF NETWORK OPERATOR

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

¹ Institution of Russian Academy of Sciences Dorochnyn Computing Centre of RAS, Moscow, Russia (119333, Moscow, Vavilov str., 40)

² Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia (117198, Moscow, Miklukho-Maklaya str., 6)

A problem of identification of control systems is considered. The optimal model is searched as a model that matches the given experimental data. To solve the problem of identification of control systems a new method of network operator is used. Network operator is a data structure that is designed to effectively describe mathematical expressions. Finding optimal solution is implemented using the principle of basic solution and genetic algorithm. Basic solution can be set using the experience of the researcher. Choosing the best basic solution increases the efficiency of the algorithm for solving the problem of identification. Choosing of parameters of the genetic algorithm also modifies the effectiveness for solving problem of identification. A numerical example of identification problem solution with different basis solutions is given. The influence of parameters of genetic algorithm on the values of quality criterion is presented.

Keywords: identification of control systems, network operator, genetic algorithm.

Введение

Одной из важнейших задач, решаемых в процессе исследования систем управления, является задача идентификации систем. При этом математическая модель может быть определена на основе экспериментальных данных. Наилучшая модель в смысле соответствия заданным экспериментальным данным выбирается из некоторого класса моделей. Для решения проблемы поиска математической модели используется метод сетевого оператора [1-5].

Метод сетевого оператора для поиска математических выражений использует базисное решение, которое может задаваться на основании опыта исследователя. Такой подход позволяет организовать поиск оптимального решения в окрестности базисного решения.

Метод сетевого оператора позволяет находить оптимальные математические выражения с помощью генетического алгоритма [7]. Генетический алгоритм, также как и нейронные сети, вероятностные методы, которые дополняют друг друга используются для решения задачи оптимизации. Генетический алгоритм использует механизм генетического наследования и естественного отбора. Основными параметрами алгоритма являются количество начальной популяции, число возможно скрещиваемых пар, число поколений, вероятность отбора, скрещивания и мутации. Выбор параметров изменяет эффективность алгоритма.

В настоящей работе проводится исследование выбора базисного решения и выбора параметров генетического алгоритма, чтобы метод сетевого оператора выполнялся эффективно.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу идентификации системы управления по заданному множеству экспериментальных данных.

Пусть задано множество экспериментальных данных:

$$G = (t_i, \tilde{u}(t_i), \tilde{x}(t_i)), i = 1, M),$$

где $\tilde{u}(t_i)$ - вектор входного управления в момент t_i , $\tilde{x}(t_i)$ - вектор выходных переменных в момент t_i , M – число точек наблюдения, $\tilde{u}(t_i) \in \mathfrak{R}^m$, $\tilde{x}(t_i) \in \mathfrak{R}^n$.

Необходимо найти модель в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

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

где $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{q})$ - искомая функция, \mathbf{q} - вектор искомых параметров.

Модель должна минимизировать функционалы:

$$J_1 = \sum_{i=1}^M \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j(t_i) - \tilde{x}_j(t_i))^2} \rightarrow \min ,$$

$$J_2 = \max_i \max_j |x_j(t_i) - \tilde{x}_j(t_i)| \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, M}, j = \overline{1, n}.$$

Для решения задачи используем метод сетевого оператора.

Метод сетевого оператора

Метод сетевого оператора позволяет строить математические выражения в виде сетевых операторов. Сетевой оператор является ориентированным графом $G(V, C, X, Q, O_1, O_2)$, где $V = (1, \dots, L)$ - множество узлов, $C = ((i_1, j_1), \dots, (i_M, j_M))$ - множество дуг или множество

упорядоченных пар узлов, $i_r, j_r \in B$, $X = (x_1, \dots, x_n)$ - множество переменных, $Q = (q_1, \dots, q_l)$ - множество параметров, $O_1 = (\rho_1(z), \rho_2(z), \dots, \rho_w(z))$ - множество унарных операций, $O_2 = (\chi_0(z', z''), \chi_1(z', z''), \dots, \chi_{V-1}(z', z''))$ - множество бинарных операций. Каждый сетевой оператор соответствует определенному математическому выражению.

Для поиска оптимального математического выражения необходимо построить множество сетевых операторов $\Xi = G_i(B^i, C^i, X, Q, O_1, O_2)$. Для построения множества сетевых операторов Ξ используем базисное решение. Чтобы получить разные решения, необходимо изменять сетевой оператор на основе базисного решения с помощью вектора вариации. Сетевой оператор представляется в виде матрицы Ψ в памяти вычислительной машины. Вектор вариаций записывается как действие оператора на матрицу сетевого оператора

$$\tilde{\Psi} = w \circ \Psi,$$

где $\tilde{\Psi}$ - матрица сетевого оператора после вариации, w - вектор вариаций, Ψ - матрица сетевого оператора до вариации. Для каждого сетевого оператора получается матрица Ψ^i в результате вариации базисного сетевого оператора Ψ^0 .

Для решения задачи поиска оптимального математического выражения используем генетический алгоритм, чтобы генерировать различные математические выражения, выбирать и находить оптимальное решение на основе оценки его функции пригодности.

Эффективность решения задачи поиска оптимального математического выражения зависит от базисного решения, размерности матрицы Ψ , количества векторов вариаций и параметров генетического алгоритма. Рассмотрим вычислительный эксперимент, который показывает зависимость эффективности решения задачи от таких параметров.

Вычислительный эксперимент

Рассмотрим пример для идентификации объекта по экспериментальными данными, приведенным в таб.1. Исходные данные наблюдаются через интервал $\Delta t = 0,5$ с при управлении $u_1 = 0, u_2 = 0$. Порядок системы $n = 2$ и размерность управления $m = 2$.

3.1. Зависимость эффективности решения задачи от базисного решения

Используем метод сетевого оператора. Для решения используем множество унарных операций $O_1 = (\rho_1(z), \dots, \rho_4(z), \rho_{14}(z), \rho_{15}(z), \rho_{23}(z))$ и множество бинарных операций $O_2 = (\chi_0(z', z''), \chi_1(z', z''))$ [2, 3].

Таб.1. Экспериментальные данные

№	t	x_1	x_2
1	0	1	1

2	0.5	2.774	-0.8404
3	1	4.4404	0.5103
4	1.5	5.231	1.7317
5	2	5.2213	4.0431
6	2.5	4.3192	6.3385
7	3	2.1015	8.4114
8	3.5	0.1304	8.2186
9	4	-1.5168	6.112
10	4.5	-2.246	4.5662
11	5	-3.1217	3.4211
12	5.5	-2.3783	2.5578
13	6	-1.4898	1.8829
14	6.5	0.64027	1.3073
15	7	1.8865	0.0255
16	7.5	3.03	1.7591
17	8	3.3491	2.6049
18	8.5	3.2629	3.7258
19	9	2.7625	4.7845
20	9.5	1.1507	6.0282
21	10	0.1916	5.4513

Для решения задачи использовались следующие параметры генетического алгоритма: размерность популяции – 256, количество скрещиваемых пар в поколении – 64, количество поколений – 256, число поколений между эпохами – 10, длина структурной части хромосомы – 4, число постоянных параметров – 4, количество бит под целую часть параметра – 2, количество бит под дробную часть параметра – 6, вероятность мутации – 0,7, размерность матрицы сетевого оператора – 16.

В первом случае выбираем базисное решение в виде:

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

$$\dot{x}_2 = q_1 x_1 + q_2 x_2 + u_2 + q_4.$$

Базисные значения параметров: $q_i = 1, i = 1, 2, 3, 4$. В результате было получено следующее первое решение

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 14 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Полученная матрица сетевого оператора соответствует следующему выражению:

$$\dot{x}_1 = q_1^2 q_2^2 q_4^2 x_1 - q_2 x_2 + q_3 + u_1,$$

$$\dot{x}_2 = q_2 (2q_1^2 q_2^2 q_4^2 x_1 - q_2 x_2 + u_2 + q_4^3),$$

где $q_1 = 0.984375$, $q_2 = 0.937500$, $q_3 = 1.984375$, $q_4 = 0.984375$. Графики значений полученного выражения приведен на рис. 1 и рис. 2.

Во втором случае выбираем базисное решение в виде:

$$\dot{x}_1 = q_1 x_1 + q_2 x_2 + q_1 x_1^2 + u_1 + q_3$$

$$\dot{x}_2 = q_1 x_1 + q_2 x_2 + u_2 + q_4.$$

Базисные значения параметров $q_i = 1, i = 1, 2, 3, 4$. В результате было получено второе решение:

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Полученная матрица сетевого оператора соответствует следующим выражениям :

$$\dot{x}_1 = u_1 + q_3 + q_1 - q_2 x_2 + q_1 x_1^2$$

$$\dot{x}_2 = -u_1 - q_3 - q_1 x_1^2 + x_1 - u_2 + q_4$$

где $q_1 = 0.015625$, $q_2 = 0.984375$, $q_3 = 3.906250$, $q_4 = 3.5$. Графики значений полученного выражения приведены на рис. 1 и рис. 2.

• В третьем случае выбираем базисное решение в виде:

$$\dot{x}_1 = q_1 x_1 + q_2 x_2 + q_1 x_1^2 + u_1 + q_3$$

$$\dot{x}_2 = q_1 x_1 + q_2 x_2 + q_2 x_2^2 + u_2 + q_4$$

Базисные значения параметров $q_i = 1, i = 1, 2, 3, 4$. В результате было получено третье решение :

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Полученная матрица сетевого оператора соответствует следующим выражениям:

$$\dot{x}_1 = \text{sign}(u_2 + q_4 + q_1x_1 - q_2x_2)\sqrt{|u_2 + q_4 + q_1x_1 - q_2x_2|},$$

$$\dot{x}_2 = -\text{sign}(u_2 + q_4 + q_1x_1 - q_2x_2)\sqrt{|u_2 + q_4 + q_1x_1 - q_2x_2|} + \sqrt[3]{(u_2 + q_4 + q_1x_1 - q_2x_2) + x_1},$$

где $q_1 = 0, q_2 = 1.234375, q_3 = 0.015625, q_4 = 3.984375$. Графики значений полученного выражения приведены на рис. 1 и рис. 2.

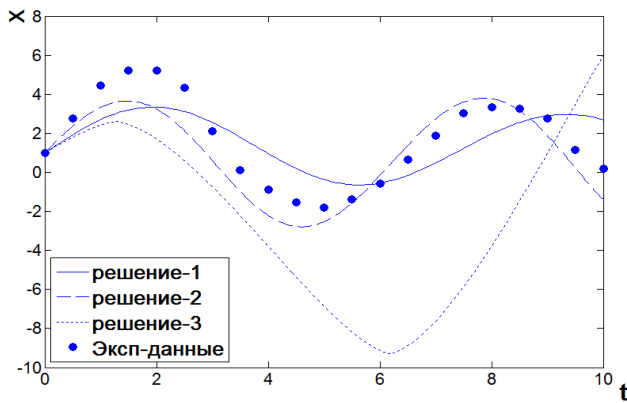


Рис.1. График функции $x_1(t)$.

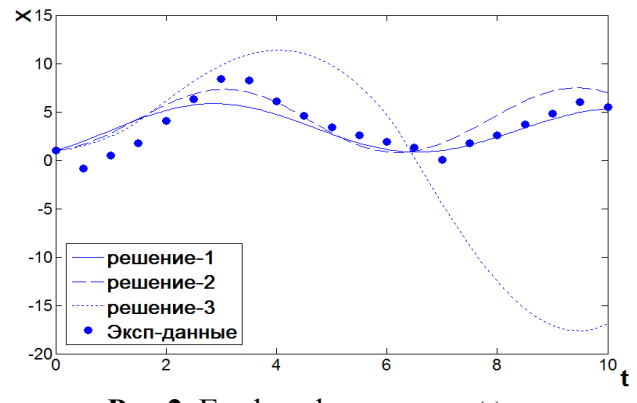


Рис.2. График функции $x_2(t)$.

Из рисунков видно, что второе базисное решение обеспечивает получение наилучшей аппроксимации экспериментальных данных. Наихудшую аппроксимацию дает решение, полученное на основе третьего базисного решения при одинаковом количестве итераций.

3.2. Зависимость эффективности решения задачи от параметров генетического алгоритма

Для поиска решения используем следующие параметры генетического алгоритма: размерность популяции – 256, количество скрещиваемых пар в поколении – 64, количество поколений – 256, число постоянных параметров – 4, количество бит под целую часть параметра – 2, количество бит под дробную часть параметра – 6, вероятность мутации – 0,7, размерность матрицы сетевого оператора – 16.

Время одного расчета составляло от 2 до 6 часов на ЭВМ с частотой 2,2 ГГц и процессором Intel Core i5. Расчет проводился на программном комплексе NOP4C-I для

идентификации систем управления методом сетевого оператора, разработанном на кафедре кибернетики и мехатроники РУДН [6].

Используем базисное решение в виде:

$$\dot{x}_1 = q_1x_1 + q_2x_2 + q_1x_1^2 + u_1 + q_3$$

$$\dot{x}_2 = q_1x_1 + q_2x_2 + u_2 + q_4.$$

Исследуем зависимость значения функционала качества от числа поколений между эпохами и количеством векторов вариаций в одном возможном решении. Результаты эксперимента приведены в Табл. 2. Графики зависимостей J_2 от количества векторов вариаций для разного числа поколений между эпохами приведены на рис.3 - 6.

Результаты эксперимента показывают, что при увеличении количества векторов вариаций величина функционала уменьшается приблизительно линейно. Это говорит о том, что выбранные базисное решение и количественные параметры генетического алгоритма не позволили нам приблизиться к предполагаемому минимальному значению функционала.

Таблица 2. Параметры генетического алгоритма

№	Количество векторов вариаций	Число поколений в одной эпохе	Значения функционала $\min J_2$
1	4	10	2.53871161
2	4	15	2.22144046
3	4	20	2.21971697
4	4	25	2.21971907
5	8	10	2.22230944
6	8	15	2.22230944
7	8	20	1.97522437
8	8	25	1.97522437
9	16	10	2.21913853
10	16	15	2.19377933
15	16	20	2.11669991
16	16	25	2.11669991
17	20	10	1.98081998
18	20	15	1.97522437
19	20	20	1.84972096
20	20	25	1.81996136
21	24	10	1.83983297
22	24	15	1.83552774
23	24	20	1.81745909
24	24	25	1.81745909

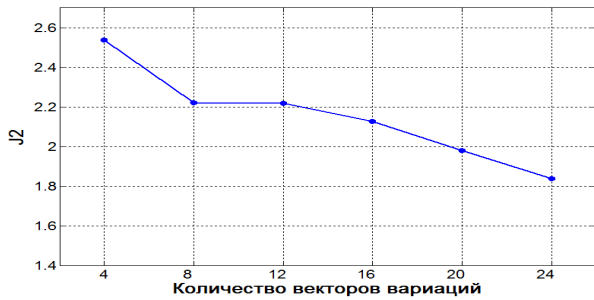


Рис.3. Зависимость J_2 от количества векторов вариаций с числом поколений в одной эпохе 10.

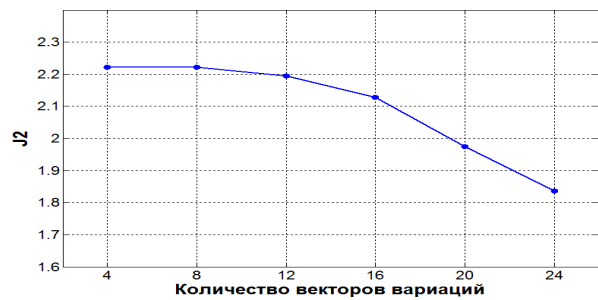


Рис.4. Зависимость J_2 от количества векторов вариаций с числом поколений в одной эпохе 15.



Рис.5. Зависимость J_2 от количества векторов вариаций с числом поколений в одной эпохе 20.

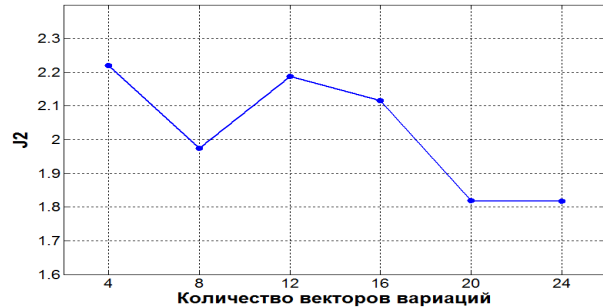


Рис.6. Зависимость J_2 от количества векторов вариаций с числом поколений в одной эпохе 25.

909

ами

эпох равном 20.

Матрица сетевого оператора для данного решения имеет вид:

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

и соответствует математическим выражениям:

$$\dot{x}_1 = \text{sign}(q_2) \sqrt{|q_2|} (q_1 q_4^2 x_1^2 - q_2 x_2 + x_1 + \sqrt[3]{q_1} + u_2^2 + q_3 + u_1 - x_2)$$

$$\dot{x}_2 = -\text{sign}(q_2) \sqrt{|q_2|} (q_1 q_4^2 x_1^2 - q_2 x_2 + x_1 + \sqrt[3]{q_1} + u_2^2 + q_3 + u_1 - x_2) + q_4 - q_2 x_2 + x_1 + \sqrt[3]{q_1} - 2q_2,$$

где $q_1 = 0, q_2 = 0.984375, q_3 = 3.875, q_4 = 3.984375$. Графики значений полученного выражения приведены на рис. 7 и рис. 8.

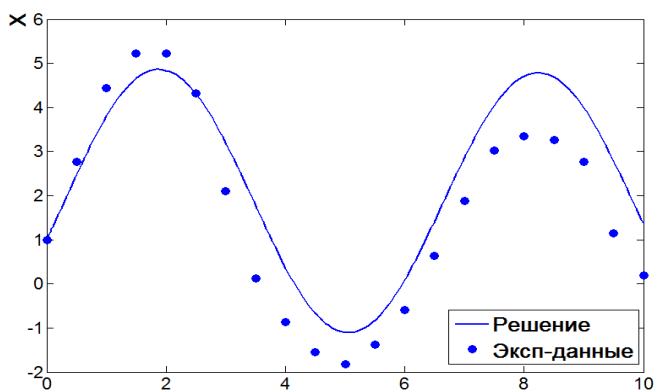


Рис.7. График функции $x_1(t)$.

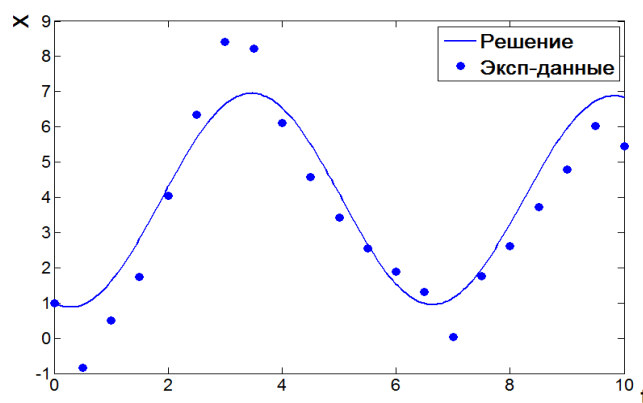


Рис.8 График функции $x_2(t)$.

На рис. 7. и 8 приведены графики моделирования выбранного решения. Как видно из графиков модель достаточно соответствует заданным экспериментальным данным. Показано, что с использованием количества векторов вариаций равного 24 и числа поколений между сменами эпох равного 20, результат решения поставленной задачи получается более эффективным.

Заключение

Результаты экспериментов показали, что одним из главных этапов метода сетевого оператора является выбор базисного решения. Влияние количественных характеристик генетического алгоритма в методе сетевого оператора на его скорость сходимости принципиально не отличается от других эволюционных алгоритмов.

Работа выполнена по теме гранта РФФИ №13-08-00523-а «Исследование и разработка численного метода идентификации моделей интеллектуальных систем управления»

Список литературы

1. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Метод сетевого оператора и его применение а задачах управления. М.: РУДН, 2012. 182 с.
2. 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.
3. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Идентификация интеллектуальной системы управления методом логического сетевого оператора // Труды IX Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '12 Москва 30 янв. -02 февр. 2012. ИПУ РАН. С. 630–636

4. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Метод генетического программирования для идентификации систем управления // Труды VIII международной конференции Идентификация систем и задач управления SICPRO'09 Москва 26-30 января 2009 г, С. 529-545.
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., 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.
7. Koza, John R. Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection.//A Bradford book, The MIT Press, London, 1992.606p

Рецензенты:

Дикусар В.В., д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник ФГБУН Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, г. Москва.

Никульчев Е.В., д.т.н., профессор, проректор по научной работе НОУ ВПО Московский технологический институт «ВТУ», г. Москва.