УДК 519.618

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ СИНТЕЗА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Атиенсия Вильягомес Х.М.[1], Дивеев А.И.[2], Забудский Е.И.[3]

[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Российский университет дружбы народов», ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419*
[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук», ул. Вавилова, 40, Москва, Россия, 119333*
[3]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина», ул. Тимирязевская, д. 58, Москва, Россия, 127550*

Рассматривается многокритериальный генетический алгоритм для синтеза интеллектуальной системы управления методом сетевого оператора. Особенностью алгоритма является то, что он предназначен для одновременного нахождения двух сетевых операторов. Один сетевой оператор описывает алгебраическую многомерную функцию для функциональной системы управления. Другой сетевой оператор описывает многомерную логическую функцию для подсистемы логического выбора. Алгоритм использует принцип вариации базисного решения. Приведен список элементарных вариаций базисного решения. В алгоритм включен дополнительный вектор-индикатор, указывающий базисное решение, к которому необходимо применять определенную вариацию. Для отбора наилучших решений используется ранговый критерий. Результатом работы алгоритма является множество Парето, которое строится для решений, имеющих нулевые ранги. Приведен пример выполнения вариаций базисных решений.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, метод сетевого оператора, многокритериальный генетический алгоритм.

GENETIC ALGORITHM FOR THE SYNTHESIS OF INTELLIGENT CONTROL SYSTEM

Atiencia Villagomez J.M.[1], Diveev A.I.[2] Zabudsky E.I[3]

[1]*Cybernetics and mechatronics department, Peoples' Friendship University of Russia Ordjonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419*
[2]*Dorodnicyn Computer Center of Russian Academy of Sciences Vavilov str., 40, Moscow, Russia, 119333*
[3]*Moscow State Agro- Engineering University named after V.P. Goryachkin Timiryazyevskaya, str., 58, Moscow, Russia, 127550*

It is considered the multi-criteria genetic algorithm for the synthesis of intelligent control system by the network operator method. The feature of the algorithm is that it is designed for the simultaneous finding two network operators. One network operator describes a multi-dimensional algebraic function for functional control system. Another network operator describes a multi-dimensional logic function for the subsystem logical choice. The algorithm uses the variation principle of the basic solution. A list of elementary variations of the basic solution is given. The algorithm contains an additional vector indicator that shows the basic solution to which it is necessary to apply a certain variation. For the selection of the best solutions is used rank criterion. The result of the algorithm is a Pareto set, which is built for solutions with zero ranks. An example of the implementation of variations of the basic solutions is given.

Key words: Intelligent control system, network operator method, multi-criterion genetic algorithm.

Под интеллектуальными системами управления понимают системы, которые включают в контур управления вместе с подсистемами функционального управления подсистему логического управления, осуществляющую функцию логического выбора. В настоящей работе мы рассматриваем метод сетевого оператора [1–8], который используют для синтеза системы интеллектуального управления. Численный метод сетевого оператора позволяет с помощью генетического алгоритма найти структуру и параметры многомерной функции, представленной в форме целочисленной матрицы. Матрица сетевого оператора описывает граф сетевого оператора, который определяет аргументы и порядок выполнения вычислительных операций в многомерной функции.

Генетический алгоритм в методе сетевого оператора работает на множестве элементарных вариаций матрицы сетевого оператора [1; 2]. Особенность метода сетевого оператора для синтеза интеллектуальной системы управления заключается в том, что с помощью одного генетического алгоритм необходимо найти одновременно значение вектора параметров и две матрицы сетевого оператора. Первая матрица соответствует алгебраической многомерной функции, которая описывает функциональную подсистему управления. Вторая матрица соответствует логической функции, которая описывает подсистему управления логического выбора.

Решением задачи синтеза интеллектуальной системы управления является набор из трех элементов

$$\tilde{\mathrm{S}} = \left(\tilde{\mathbf{\Psi}}, \tilde{\mathbf{\Omega}}, \tilde{\mathbf{q}}\right), \qquad (1)$$

где $\tilde{\mathbf{\Psi}}$ – матрица функционального сетевого оператора размерностью $L \times L$, $\tilde{\mathbf{\Omega}}$ – матрица логического сетевого оператора размерностью $M \times M$, $\tilde{\mathbf{q}}$ – вектор параметров размерностью p.

Для поиска структур матриц используем подход, основанный на принципе вариаций базисного решения. Определим следующие малые вариации матрицы сетевого оператора [4]:

0 – замена ненулевого недиагонального элемента ненулевым элементом;

1 – замена нулевого недиагонального элемента ненулевым элементом;

2 – замена ненулевого недиагонального элемента нулевым элементом;

3 – замена диагонального элемента.

Все перечисленные вариации могут описываться вектором из четырех элементов

$$\mathbf{w} = \left[w_1 \;\; w_2 \;\; w_3 \;\; w_4\right]^T, \qquad (2)$$

где w_1 – номер вариации, w_2 – номер строки матрицы, w_3 – номер столбца матрицы, w_4 – номер унарной или бинарной операции.

Все операции выполняются только при выполнении определенных условий. Например, вариация 0 матрицы выполняется, если элемент матрицы в строке w_2 и в столбце w_3 не равен нулю. Если условия выполнения вариаций не соблюдаются, то матрица не меняется.

Согласно принципу базисного решения задаем базисные матрицы сетевых операторов

$$\mathbf{\Psi}^0 = \left[\psi_{i,j}\right],\ i, j = \overline{1, L}, \qquad (3)$$

$$\mathbf{\Omega}^0 = \left[\omega_{i,j}\right],\ i,j = \overline{1,M}. \quad (4)$$

Для вариаций матрицы используем набор векторов вариаций

$$\mathrm{W} = \left(\mathbf{w}^1, \ldots, \mathbf{w}^G\right), \quad (5)$$

где $\mathbf{w}^i = \left[w_1^i \ w_2^i \ w_3^i \ w_4^i\right]^T$.

В результате действия набора векторов вариаций на матрицу получаем новую матрицу либо логического, либо функционального сетевого оператора. Для того чтобы определить какую именно матрицу, логического или функционального сетевого оператора, следует подвергать вариациям, используем дополнительный вектор-индикатор

$$\boldsymbol{\mu} = [\mu_1 \ \ldots \ \mu_G]^T,\ \mu_i \in \{0,1\},\ i = \overline{1,G}. \quad (6)$$

Если значение компоненты вектора-индикатора равно нулю, $\mu_i = 0$, то вариации, описываемой вектором вариаций $\mathbf{w}^i$, подвергается матрица сетевого оператора $\mathbf{\Psi}$, если $\mu_i = 1$, то – матрица логического сетевого оператора $\mathbf{\Omega}$.

Новое возможное решение получаем из базисного $\left(\mathbf{\Psi}^0, \mathbf{\Omega}^0\right)$ с помощью множества векторов вариаций (6) на основании следующих соотношений:

$$\mathbf{A}^i = \mathbf{w}^i \circ \mathbf{A}^{i-1},\ i = \overline{1,G}, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{A}^{i-1} = \begin{cases} \Psi^{i-1}, & \text{если } \mu_i = 0 \\ \Omega^{i-1}, & \text{если } \mu_i = 1 \end{cases},\ \Psi^i = \begin{cases} \Psi^{i-1}, & \text{если } \mu_i = 1 \\ \mathbf{A}^i & \text{- иначе} \end{cases},\ \Omega^i = \begin{cases} \Omega^{i-1}, & \text{если } \mu_i = 0 \\ \mathbf{A}^i & \text{- иначе} \end{cases}.$$

Любое возможное решение описывается конечным множеством векторов вариаций и закодированным кодом Грея вектором параметров. В качестве базисного решения используем две матрицы сетевого оператора, поэтому при использовании множества векторов вариаций для построения нового решения необходимо определить одну из двух базисных матриц сетевого оператора. Для этой цели используем вектор-индикатор базисного решения.

Рассмотрим пример построения нового возможного решения из базисных решений. Пусть имеем следующие базисные матрицы сетевого оператора

$$\mathbf{\Psi}^0 = \begin{bmatrix} 0&0&0&0&1&0&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&1&0&0 \\ 0&0&0&0&0&1&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&1&0 \\ 0&0&0&0&0&1&1&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0 \end{bmatrix}, \ \mathbf{\Omega}^0 = \begin{bmatrix} 0&0&1&0&0&0&0&0 \\ 0&0&1&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&1&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&1&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0 \end{bmatrix}.$$

Пусть имеем следующее множество векторов вариаций

$$\mathrm{W} = \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 6 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 4 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 7 \\ 3 \end{bmatrix} \right).$$

Пусть также имеем следующий вектор-индикатор

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T .$$

Выполняем вариации согласно соотношению (11), получаем

$$\mu_1 = 0,\ \mathbf{\Omega}^1 = \mathbf{\Omega}^0,\ \mathbf{\Psi}^1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 6 \\ 2 \end{bmatrix} \circ \mathbf{\Psi}^0 = \begin{bmatrix} 0&0&0&0&1&0&0&0 \\ 0&0&0&0&1&2&0&0 \\ 0&0&0&0&0&1&0&0 \\ 0&0&0&0&0&1&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&1&0 \\ 0&0&0&0&0&1&1&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0 \end{bmatrix},$$

$$\mu_2 = 1,\ \mathbf{\Psi}^2 = \mathbf{\Psi}^1,\ \mathbf{\Omega}^2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 4 \\ 2 \end{bmatrix} \circ \mathbf{\Omega}^1 = \begin{bmatrix} 0&0&1&0&0&0&0&0 \\ 0&0&1&2&0&0&0&0 \\ 0&0&0&1&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&1&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0 \end{bmatrix},$$

$$\mu_3 = 1,\ \mathbf{\Psi}^3 = \mathbf{\Psi}^2,\ \mathbf{\Omega}^3 = \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} \circ \mathbf{\Omega}^2 = \begin{bmatrix} 0&0&1&0&0&0&0&0 \\ 0&0&1&2&0&0&0&0 \\ 0&0&2&1&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&1&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0 \end{bmatrix},$$

$$\mu_4 = 0,\ \mathbf{\Omega}^4 = \mathbf{\Omega}^3,\ \mathbf{\Psi}^4 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 6 \\ 2 \end{bmatrix} \circ \mathbf{\Psi}^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для поиска значение вектора параметров используем традиционное представление вектора параметров в коде Грея

$$\mathbf{z} = \left[z_1 \ \dots \ z_{p(c+d)} \right]^T,\ z_i \in \{0,1\},\ i = \overline{1.p(c+d)}, \tag{8}$$

где p – размерность вектора параметров, c – число бит под целую часть числа, d – число бит под дробную часть числа.

Вектор $\mathbf{z}$ (8) представляет собой закодированный в виде кода Грея вектор параметров $\mathbf{q} = \left[q_1 \ \dots \ q_p \right]^T$. Преобразование из кода Грея в значение вектора параметров выполняется с помощью следующих соотношений

$$\bar{z}_i = \begin{cases} z_i, \text{ если } i \bmod (c+d) = 1 \\ \bar{z}_{i-1} \oplus z_i - \text{иначе} \end{cases},\ i = \overline{1, p(c+d)}, \tag{9}$$

$$q_j = \sum_{i=1}^{c+d} 2^{c-j} \bar{z}_{i-(c+d)(j-1)},\ j = \overline{1, p}. \tag{10}$$

Рассмотрим подробнее генетический алгоритм многокритериальной оптимизации для решения задачи синтеза интеллектуальной системы управления.

Первоначально задаем базисное решение (5), которое включает базисные матрицы сетевых операторов $\mathbf{\Psi}^0$, $\mathbf{\Omega}^0$ и базисный вектор параметров $\mathbf{q}^0$, который переводим в двоичный код Грея согласно соотношениям

$$z_j = \begin{cases} \bar{z}_j, \text{ если } j \bmod (c+d) = 1 \\ \bar{z}_j \oplus \bar{z}_{j-1} \text{ - иначе} \end{cases}, \qquad j = \overline{1, p(c+d)}, \tag{11}$$

где $\bar{\mathbf{z}}$ – двоичный код вектора параметров $\mathbf{q}$, $\bar{\mathbf{z}} = (\mathbf{q})_2$, $\bar{\mathbf{z}} = \left[\bar{z}_1 \ \dots \ \bar{z}_{p(c+d)} \right]^T$, $\mathbf{q} = \left[q_1 \ \dots \ q_p \right]^T$, $\bar{\mathbf{z}}^i$ – двоичный код компоненты q_i, $\bar{\mathbf{z}}^i = (q_i)_2$, $\bar{\mathbf{z}}^i = \left[z_{1+(c+d)(i-1)} \ \dots \ z_{(c+d)i} \right]^T$.

Создаем множество тождественных вариаций для базисного решения

$$\mathrm{W}^0 = \left(\mathbf{w}^{0,1}, \dots, \mathbf{w}^{0,G} \right),$$

где $\mathbf{w}^{0,i} = [0\ 0\ 0\ 0]^T$, $i = \overline{1,G}$.

По условию принимаем, что нулевой вектор вариаций не меняет матрицу сетевого оператора. Задаем нулевой вектор-индикатор $\boldsymbol{\mu}^0 = [\overbrace{0\ \ldots\ 0}^{G}]^T$.

В результате получаем код базисного решения

$$\mathrm{D}^0 = \left(\mathrm{W}^0, \boldsymbol{\mu}^0, \mathbf{z}^0\right), \tag{12}$$

где $\mathbf{z}^0$ – код Грея для вектора параметров $\mathbf{q}^0$, $\mathbf{z}^0 = \left(\mathbf{q}^0\right)_G$.

Генерируем множество кодов возможных решений

$$\mathrm{D}^i = \left(\mathrm{W}^i, \boldsymbol{\mu}^i, \mathbf{z}^i\right),\ i = \overline{1,H}, \tag{13}$$

где $\mathrm{W}^i = \left(\mathbf{w}^{i,1}, \ \ldots\ , \mathbf{w}^{i,G}\right)$, $\mathbf{w}^{i,j} = \left[w_1^{i,j}\ \ w_2^{i,j}\ \ w_3^{i,j}\ \ w_4^{i,j}\right]^T$, $\boldsymbol{\mu}^i = \left[\mu_1^i\ \ldots\ \mu_G^i\right]^T$, $\mu_j^i \in \{0,1\}$, $j = \overline{1,G}$, $\mathbf{z}^i = \left[z_1^i\ \ldots\ z_{p(c+d)}^i\right]^T$, $z_k^i \in \{0,1\}$, $k = \overline{1, p(c+d)}$.

Вычисляем для каждого возможного решения i (11) значения функционалов

$$\mathbf{J}^i = \left[J_1^i\ \ldots\ J_l^i\right]^T. \tag{14}$$

Затем вычисляем для каждого возможного решения i значение ранга

$$\Lambda^i = \sum_{k=0}^{H} \lambda_i(k),\ i = \overline{0,H}, \tag{15}$$

где

$$\lambda_i(k) = \begin{cases} 1, \text{ если } \mathbf{J}^k \le \mathbf{J}^i \\ 0 \text{ - иначе} \end{cases},\ i,k = \overline{0,H}, \tag{16}$$

$\mathbf{J}^k \le \mathbf{J}^i$, если $J_j^k \le J_j^k$ и $\exists J_r^k < J_r^i$, $1 \le r \le l$.

При выполнении операции для двух случайно отобранных возможных решений

$$\mathrm{D}^{i_1} = \left(\mathrm{W}^{i_1}, \boldsymbol{\mu}^{i_1}, \mathbf{z}^{i_1}\right),\ \mathrm{D}^{i_2} = \left(\mathrm{W}^{i_2}, \boldsymbol{\mu}^{i_2}, \mathbf{z}^{i_2}\right) \tag{17}$$

определяем вероятность скрещивания решений $i_1, i_2 \in \{1, \ldots, H\}$

$$P_c(i_1, i_2) = \max\left\{\frac{1+\gamma\boldsymbol{\Lambda}^{i_1}}{1+\boldsymbol{\Lambda}^{i_1}}, \frac{1+\gamma\boldsymbol{\Lambda}^{i_2}}{1+\boldsymbol{\Lambda}^{i_2}}\right\}, \tag{18}$$

где γ – заданный параметр для вероятности скрещивания, $\gamma \in (0,1)$.

Параметр γ определяет нижнюю границу для вероятности скрещивания, $P_c(i_1, i_2) \ge \gamma$. Максимальное значение ранга не может превосходить величину, равную количеству H возможных решений, поэтому при больших рангах $\boldsymbol{\Lambda}^{i_1} \approx H$ и $\boldsymbol{\Lambda}^{i_2} \approx H$, $P_c(i_1, i_2) \approx \gamma$. Если $\boldsymbol{\Lambda}^{i_1} = 0$ или $\boldsymbol{\Lambda}^{i_2} = 0$, то вероятность скрещивания равна единице $P_c(i_1, i_2) = 1$.

Вычисляем случайную величину $\xi \in (0,1)$ с помощью генератора случайных чисел. Если $\xi \geq P_c(i_1, i_2)$, то возможные решения (16) D^{i_1} и D^{i_2} скрещиваем.

При скрещивании выбираем случайно две точки скрещивания

$$k_s \in \{1, \ldots, G\},\ k_p \in \{1, \ldots, p(c+d)\}. \tag{19}$$

Строим четыре новых возможных решения

$$\mathrm{D}^{H+1} = \left(\mathrm{W}^{H+1}, \boldsymbol{\mu}^{H+1}, \mathbf{z}^{H+1}\right), \tag{20}$$

$$\mathrm{D}^{H+2} = \left(\mathrm{W}^{H+2}, \boldsymbol{\mu}^{H+2}, \mathbf{z}^{H+2}\right), \tag{21}$$

$$\mathrm{D}^{H+3} = \left(\mathrm{W}^{H+3}, \boldsymbol{\mu}^{H+3}, \mathbf{z}^{H+3}\right), \tag{22}$$

$$\mathrm{D}^{H+4} = \left(\mathrm{W}^{H+4}, \boldsymbol{\mu}^{H+4}, \mathbf{z}^{H+4}\right), \tag{23}$$

где

$$\mathrm{W}^{H+1} = \mathrm{W}^{i_1},\ \boldsymbol{\mu}^{H+1} = \boldsymbol{\mu}^{i_1},\ \mathbf{z}^{H+1} = \begin{bmatrix} z_1^{i_1} & \ldots & z_{k_p}^{i_1} & z_{k_p+1}^{i_2} & \ldots & z_{p(c+d)}^{i_2} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathrm{W}^{H+2} = \mathrm{W}^{i_2},\ \boldsymbol{\mu}^{H+2} = \boldsymbol{\mu}^{i_2},\ \mathbf{z}^{H+2} = \begin{bmatrix} z_1^{i_2} & \ldots & z_{k_p}^{i_2} & z_{k_p+1}^{i_1} & \ldots & z_{p(c+d)}^{i_1} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathrm{W}^{H+3} = \left(\mathbf{w}^{i_1,1}\ \ldots\ \mathbf{w}^{i_1,k_s}\ \ \mathbf{w}^{i_2,k_s+1}\ \ldots\ \mathbf{w}^{i_2,G}\right),$$

$$\boldsymbol{\mu}^{H+3} = \begin{bmatrix} \mu_1^{i_1} & \ldots & \mu_{k_s}^{i_1} & \mu_{k_s+1}^{i_2} & \ldots & \mu_G^{i_2} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{z}^{H+3} = \begin{bmatrix} z_1^{i_1} & \ldots & z_{k_p}^{i_1} & z_{k_p+1}^{i_2} & \ldots & z_{p(c+d)}^{i_2} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathrm{W}^{H+4} = \left(\mathbf{w}^{i_2,1}\ \ldots\ \mathbf{w}^{i_2,k_s}\ \ \mathbf{w}^{i_1,k_s+1}\ \ldots\ \mathbf{w}^{i_1,G}\right),$$

$$\boldsymbol{\mu}^{H+4} = \begin{bmatrix} \mu_1^{i_2} & \ldots & \mu_{k_s}^{i_2} & \mu_{k_s+1}^{i_1} & \ldots & \mu_G^{i_1} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{z}^{H+4} = \begin{bmatrix} z_1^{i_2} & \ldots & z_{k_p}^{i_2} & z_{k_p+1}^{i_1} & \ldots & z_{p(c+d)}^{i_1} \end{bmatrix}^T.$$

Выполняем возмущение каждого из решений. Данное возмущение обеспечивает случайный сдвиг решения относительно локального минимума и в генетическом алгоритме называется операцией мутации. Для выполнения операции мутации задаем в качестве исходных параметров алгоритма вероятность мутации

$$p_m \in (0,1). \tag{24}$$

Генерируем с помощью генератора случайных чисел случайную величину $\xi \in (0,1)$. Если величина $\xi \le p_m$, то выполняем операцию мутации.

Для выполнения операции мутации генерируем два случайных целых числа

$$m_s \in \{1, \ldots, G\}, \tag{25}$$

$$m_p \in \{1, \ldots, p(c+d)\}, \tag{26}$$

Число m_s определяет номер изменяемого элемента в структурной части возможного решения, а число m_p определяет номер изменяемого бита в параметрической части возможного решения.

Если условие выполнения мутации $\xi \le p_m$ удовлетворяется для одного из новых решений $\mathrm{D}^{H+i} = \left(\mathrm{W}^{H+i}, \boldsymbol{\mu}^{H+i}, \mathbf{z}^{H+i}\right)$, $1 \le i \le 4$, то в нем генерируем новый вектор вариаций $\mathbf{w}^{H+i,m_s}$, соответствующую компоненту $\mu_{m_s}^{H+i} \in \{0,1\}$ вектора-индикатора и компоненту $z_{m_p}^{H+i} \in \{0,1\}$ кода Грея вектора параметров.

После выполнения операции мутации для каждого нового возможного решения вычисляем значения функционалов

$$\mathrm{F}^{H+i} = \left[J_1^{H+i} \;\ldots\; J_l^{H+i}\right]^T, \quad i = \overline{1,4}. \tag{27}$$

Находим возможное решение с самым большим значением ранга $\mathrm{D}^{i_+} = \left(\mathrm{W}^{i_+}, \boldsymbol{\mu}^{i_+}, \mathbf{z}^{i_+}\right)$,

$$\boldsymbol{\Lambda}^{i_+} = \max\left\{\boldsymbol{\Lambda}^i : i = \overline{1,H}\right\}. \tag{28}$$

Вычисляем ранг для первого нового решения

$$\boldsymbol{\Lambda}^{H+1} = \sum_{j=0}^{H} \lambda_{H+1}(j),\ i = \overline{0,H}, \tag{29}$$

где

$$\lambda_{H+1}(j)=\begin{cases}1, \text{ если } \mathbf{J}^{j} \le \mathbf{J}^{H+1} \\ 0 \text{ - иначе}\end{cases}, \; j=\overline{0,H}.$$

Если ранг первого нового решения меньше, чем наибольший ранг во множестве возможных решений, $\boldsymbol{\Lambda}^{H+1} < \boldsymbol{\Lambda}^{i_+}$ то заменяем возможное решение с наибольшим рангом на первое новое возможное решение

$$\mathrm{D}^{i_+} = \mathrm{D}^{H+1}: \; \mathrm{W}^{i_+} = \mathrm{W}^{H+1}, \; \boldsymbol{\mu}^{i_+} = \boldsymbol{\mu}^{H+1}, \; \mathbf{z}^{i_+} = \mathbf{z}^{H+1}, \; \mathbf{J}^{i_+} = \mathbf{J}^{H+1},. \tag{30}$$

Пересчитываем ранги всех возможных решений по формуле (17) и находим возможное решение $\mathrm{D}^{i_+} = \left(\mathrm{W}^{i_+}, \boldsymbol{\mu}^{i_+}, \mathbf{z}^{i_+}\right)$ с наибольшим рангом (29). Вычисляем ранг второго нового возможного решения

$$\boldsymbol{\Lambda}^{H+2} = \sum_{j=0}^{H} \lambda_{H+2}(j), \; i=\overline{0,H}, \tag{31}$$

где

$$\lambda_{H+2}(j)=\begin{cases}1, \text{ если } \mathbf{J}^{j} \le \mathbf{J}^{H+2} \\ 0 \text{ - иначе}\end{cases}, \; j=\overline{0,H}.$$

Если ранг первого нового решения меньше, чем наибольший ранг во множестве возможных решений, $\boldsymbol{\Lambda}^{H+2} < \boldsymbol{\Lambda}^{i_+}$ то заменяем возможное решение с наибольшим рангом на первое новое возможное решение

$$\mathrm{D}^{i_+} = \mathrm{D}^{H+2}: \; \mathrm{W}^{i_+} = \mathrm{W}^{H+2}, \; \boldsymbol{\mu}^{i_+} = \boldsymbol{\mu}^{H+2}, \; \mathbf{z}^{i_+} = \mathbf{z}^{H+2}, \; \mathbf{J}^{i_+} = \mathbf{J}^{H+2}. \tag{32}$$

Повторяем те же действия для третьего и четвертого новых возможных решений $\mathrm{D}^{H+3} = \left(\mathrm{W}^{H+3}, \boldsymbol{\mu}^{H+3}, \mathbf{z}^{H+3}\right)$, $\mathrm{D}^{H+4} = \left(\mathrm{W}^{H+4}, \boldsymbol{\mu}^{H+4}, \mathbf{z}^{H+4}\right)$.

После выполнения конечного числа операций отбора пар возможных решений для скрещивания завершаем вычисления.

Решением рассматриваемой задачи является множество Парето,

$$\boldsymbol{\Pi} = \left\{\mathrm{D}^{j_1}, \ldots, \mathrm{D}^{j_P}\right\}. \tag{33}$$

Множество Парето составляют решения с нулевыми рангами

$$\boldsymbol{\Lambda}^{j_i} = 0, \; i=\overline{1,P}. \tag{34}$$

Список литературы

1. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Метод сетевого оператора и его применение в задачах управления. – М. : Изд-во РУДН, 2012. – 182 с.

2. Дивеев А.И. Метод сетевого оператора. – М. : Изд-во ВЦ РАН, 2010. – 178 с.

3. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Идентификация системы логического вывода методом сетевого оператора // Вестник РУДН. Серия Инженерные исследования. – 2010. – № 4. – С. 51-58.

4. Дивеев А.И., Северцев Н.А. Метод сетевого оператора для синтеза системы управления спуском космического аппарата при неопределенных начальных условиях // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009. – № 3. – С. 85-91.

5. Дивеев А.И., Северцев Н.А., Софронова Е.А. Синтез системы управления метеорологической ракетой методом генетического программирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 5. – С. 104-108.

6. Атиенсия Вильягомес Х.М., Дивеев А.И. Синтез интеллектуальной системы многоцелевого управления // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – URL: http://www.science-education.ru/106-7723.

7. Diveev A.I., Sofronova E.A. The Network Operator Method for Search of the Most Suitable Mathematical Equation. Chapter in the book Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications / Edited by Shangce Gao. Intech. Printed 2012. February, Croatia. P. 19-42.

8. Atiencia Villagomez J.M, Diveev A.I, Sofronova E.A. The Network Operator Method for Synthesis of Intelligent Control System // Proceedings of the 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) 18-20 July 2012, Singapore ISBN: 978-1-4577-2119-9/12/$26.00©2012 IEEE, P. 169-174.

Рецензенты:

Юрков Николай Кондратьевич д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры ФГОУ ВПО «Пензенский государственный университет», г. Пенза.

Никульчев Евгений Витальевич д.т.н., профессор, IT-директор по информационным технологиям ООО МАИК «Наука/Интерпериодика», г. Москва.

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой проектирования и технологии радиоаппаратуры, Новгородский государственный университет, г. Великий Новгород.