УДК 519.618, 62.50

СИНТЕЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МНОГОЦЕЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ СЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА*

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

[1]Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

[2]Вычислительный центр им. А.А. Дородницына
Российской академии наук
ул. Вавилова, 40, Москва, Россия, 119333

Рассматривается задача синтеза интеллектуальной системы многоцелевого управления. В задаче необходимо найти управление, которое обеспечивает достижение нескольких целей и минимизирует значение критерия качества. Цели управления заданы в виде точек пространства состояний, которые необходимо достичь в процессе управления. Особенностью задачи является то, что управление ищем в виде двух многомерных разнотипных функций координат пространства состояний. Одна функция обеспечивает достижение объектом частной цели, а другая функция, логическая, обеспечивает переключение частных целей. Для решения задачи синтеза многоцелевого управления используется метод сетевого оператора.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, метод сетевого оператора.

Рассмотрим задачу синтеза системы управления с несколькими целями управления.

Задана модель объекта управления

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \tag{1}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{r}(\mathbf{x}), \tag{2}$$

где $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{u} \in \mathrm{U} \subseteq \mathbf{R}^m$, $m \le n$, $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^l$, $l \le n$, U — ограниченное замкнутое множество.

Для системы (1) заданы начальные условия

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0. \tag{3}$$

Задано множество целевых состояний

$$\mathrm{G} = \left(\tilde{\mathbf{y}}^0, \ldots, \tilde{\mathbf{y}}^d\right), \tag{4}$$

причем $\mathbf{r}\left(\mathbf{x}^0\right) = \tilde{\mathbf{y}}^0$.

Задан критерий качества управления

$$J = \int_0^{t_f} f_0\left(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)\right) dt \to \min, \tag{5}$$

где t_f — время управления, которое ограничено, $t_f < t^+$, но не задано.

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-08-00008-а и № 13-08-00523-а.

Необходимо найти управление в форме

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

которое обеспечивает достижение последовательно всех целевых точек (4) и минимизирует функционал (5).

Для перехода к задаче синтеза интеллектуальной системы управления необходимо обеспечить в системе возможность выбора. Для этой цели заменим требование попадания объекта в каждую целевую точку (4) попаданием в окрестность целевой точки.

$$\left|G_i^j\left(\tilde{y}^j\right)\right| \le \varepsilon \quad i = \overline{1, l_j}, \;\; j = \overline{0, d-1}, \tag{7}$$

где ε — малая положительная величина.

В результате получаем компромисс между точностью и скоростью достижения целевых точек. Для реализации управления необходимо каждый раз решать задачу выбора между точным достижением текущей цели и определением момента перехода на другую цель. Очевидно, что в системе управления помимо регулятора обратной связи, обеспечивающего достижение к текущей цели, необходимо иметь логический блок, осуществляющий переключение целей. Для решения задачи используем метод сетевого оператора [1—5; 7], который позволяет численно находить математические выражения в виде целочисленных матриц. Используем два сетевых оператора, функциональный и логический [2].

Управление (6) представим в виде функции, зависящей от расстояния до цели

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}\left(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{y}}^k - \mathbf{r}(\mathbf{x})\right), \tag{8}$$

где k — номер текущей целевой точки.

В любой момент времени t_i номер текущей целевой точки определяем с помощью логической функции

$$k(t_i) = k(t_{i-1}) + \mathbf{v}\left(\left\|\Delta\tilde{\mathbf{y}}^k\right\|, \left\|\Delta\tilde{\mathbf{y}}^{k+1}\right\|\right), \quad k = \overline{0, d-1}, \tag{9}$$

где $\left\|\Delta\tilde{\mathbf{y}}^k\right\| = \left\|\tilde{\mathbf{y}}^k - \mathbf{r}(\mathbf{x}(t_i))\right\|$, $\left\|\Delta\tilde{\mathbf{y}}^{k+1}\right\| = \left\|\tilde{\mathbf{y}}^{k+1} - \mathbf{r}(\mathbf{x}(t_i))\right\|$, $v\left(\Delta\mathbf{y}^k, \Delta\mathbf{y}^{k+1}\right)$ — предикатная функция, $k(t_i) = k(t_{i-1}) + \mathbf{v}\left(\left\|\tilde{\mathbf{y}}^k - \mathbf{r}(\mathbf{x}(t_i))\right\|, \left\|\tilde{\mathbf{y}}^{k+1} - \mathbf{r}(\mathbf{x}(t_i))\right\|\right)$

$$v\left(\left\|\Delta\mathbf{y}^k\right\|, \left\|\Delta\mathbf{y}^{k+1}\right\|\right): \; \mathbf{R}^l_{\ge 0} \times \mathbf{R}^l_{\ge 0} \to \{0, 1\}. \tag{10}$$

При синтезе управления вместе с синтезирующей функцией (6) необходимо найти и функцию (10) для переключение целевых точек. Обе функции (6) и (10) должны обеспечивать минимум функционалов качества (5) и точности

$$J_1 = \max_k \min_t \left\{ \left\| y^k - \mathbf{r}(\mathbf{x}(t)) \right\| \right\} \to \min. \tag{11}$$

Время управления t_f определяем по последней целевой точки

$$t_f = t, \text{ если } \left\| y^d - \mathbf{r}\left(\mathbf{x}(t)\right) \right\| \le \varepsilon, \tag{12}$$

где ε — малая положительная величина.

Критерий (5) заменим суммой частных критериев

$$J_2 = \sum_{j=0}^{k-1} \left(\int_0^{t_j} f_{0,j}\left(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)\right) dt \right) \to \min. \tag{13}$$

Построим предикатную функцию (10), выполним дискретизацию значений ее аргументов

$$v\left(\left\| \Delta \mathbf{y}^k \right\|, \left\| \Delta \mathbf{y}^{k+1} \right\| \right) = g\left(z_1, z_2\right), \tag{14}$$

где $g\left(z_1, z_2\right)$ — логическая функция,

$$g\left(z_1, z_2\right):\ \{0,1\} \times \{0,1\} \to \{0,1\}, \tag{15}$$

где $z_1 = d\left(\left\| \Delta \mathbf{y}^k \right\| \right)$, $z_2 = d\left(\left\| \Delta \mathbf{y}^{k+1} \right\| \right)$, $d\left(\left\| \Delta y^k \right\| \right)$ — функция дискретизации, например, в виде $d(A) = 1$, если $A > C$, где $d(A) = \begin{cases} 1, & \text{если } A > C \\ 0 & \text{— иначе} \end{cases}$, где C — константа, величина которой зависит от конкретной задачи.

Теперь задача заключается в том, чтобы найти управления в форме

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}\left(\mathbf{x}, \mathbf{v}\right), \tag{16}$$

где **v** — целочисленный вектор, определяющий управления для решения частной задачи *j*.

Управления (16) должно обеспечить достижения минимумов функционалов (11) и (13).

В качестве примера рассмотрим следующую математическую модель:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = u,$$

где x_1, x_2 — координаты на плоскости.

На управление наложены ограничения $-1 < u < +1$.

Траектория движения задана набором точек $P = \left(\begin{bmatrix} x_1^j & x_2^j \end{bmatrix}^T : j = \overline{1,k} \right)$.

$$P = \left(\begin{bmatrix} 2 & 0 \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} -1 & -1 \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} -2 & 0 \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}^T \right).$$

Необходимо найти управление, чтобы минимизировать две целевые функции объекта. Первый функционал определяет точность движения по траектории, а второй — время прохождения траектории.

$$J_1 = \sum_{j=1}^{4} \min_t \left\{ \sqrt{\left(x_1(t) - x_1^j\right)^2 + \left(x_2(t) - x_2^j\right)^2} \right\} + \sum_{j=1}^{4} k(j) \to \min,$$

$$J_2 = t_f + \sum_{j=1}^{4} k(j) \to \min,$$

где $t_f = \begin{cases} t, & \text{если } \sqrt{\sum_{\alpha}\left(x_\alpha(t) - x_\alpha^j\right)^2} < \varepsilon \\ t^+, & \text{иначе} \end{cases}, \ \alpha = 1,\ 2,$

$$k(j) = \begin{cases} 0, & \text{если } \min_t \left\{ \sqrt{\left(x_1(t) - x_1^j\right)^2 + \left(x_2(t) - x_2^j\right)^2} \right\} < 0{,}05, \\ 2 \text{ — иначе.} \end{cases}$$

Задачей логического управления заключалась в обеспечении переключения точек траектории

$$j = j + v(\mathbf{y}),$$

где $\mathbf{y} = [y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4]^T$,

$$y_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } \left|x_1^j - x_1(t)\right| \le \Delta \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \qquad y_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } \left|x_2^j - x_2(t)\right| \le \Delta \\ 0, & \text{иначе} \end{cases},$$

$$y_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(x_1^j - x_1(t)\right)\dot{x}_1(t) > 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \qquad y_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(x_2^j - x_2(t)\right)\dot{x}_2(t) > 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}.$$

Начальные значения для моделирования были $x_1(0) = 1,\ x_2(0) = 1$.

Полученные матрицы арифметического и логического сетевых операторов имеют вид

$$\mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 6 & 0 & 18 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 5 & 0 & 4 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}$$

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

Конкретные виды функций, соответствующие унарным и бинарным операциям, указанным в полученных матрицах сетевых операторов соответствуют таблице, приведенной в приложении к работе [1].

На рис. 1, 2 показаны результаты моделирования.

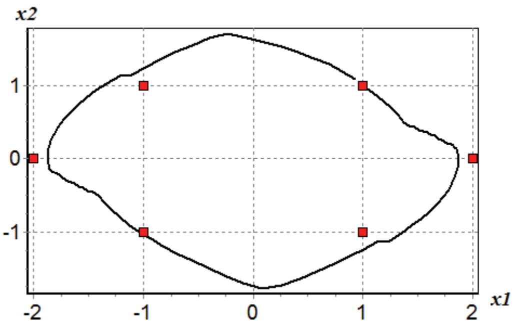

Рис. 1. Траектория движения на плоскости x_1, x_2

Рис. 2. Управление u

Время движения по всей траектории составило 9,80 с. При оптимальном по быстродействию управлении, при точном прохождении всех точек, время движения по траектории, рассчитанное по формуле из работы [6]:

$$T(x_0)=\begin{cases} x_2^j+2\sqrt{x_1^j+\left(x_2^j\right)^2/2}, & \text{если } \left[x_1(t)\quad x_2(t)\right]^T \text{ не ниже } AB \\ -x_2^j+2\sqrt{-x_1^j+\left(x_2^j\right)^2/2}, & \text{если } \left[x_1(t)\quad x_2(t)\right]^T \text{ не выше } AB \end{cases},$$

где AB — линия переключения, составило бы $\tilde{t}$ = 1,4495 + 3,4495 + 2,8284 + 1,4495 + + 3,4495 + 2,8284 = 15,4548 с.

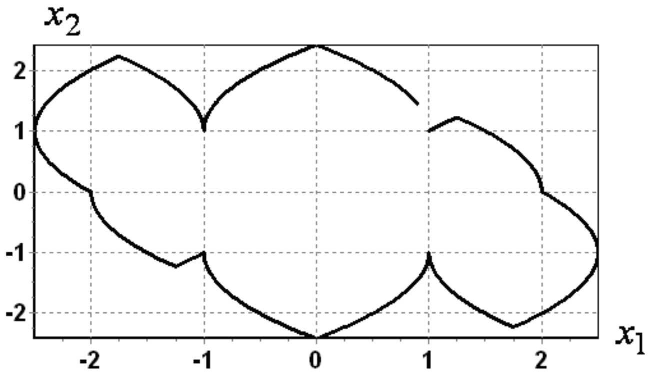

Рис. 3. Оптимальная по быстродействию траектория

На рис. 3 приведена оптимальная по быстродействию траектория движения объекта.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Дивеев А.И., Софронова Е.А.* Метод сетевого оператора и его применение в задачах управления. — М.: Изд-во РУДН, 2012. [*Diveev A.I., Sofronova E.A.* Metod setevogo operatora i yego primeneniye v zadachakh upravleniya. — M.: Izd-vo RUDN, 2012.]

[2] *Дивеев А.И., Софронова Е.А.* Идентификация системы логического вывода методом сетевого оператора // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2010. — № 4. — С. 51—58. [*Diveev A.I., Sofronova E.A.* Identifikatsiya sistemy logicheskogo vyvoda metodom setevogo operatora // Vestnik RUDN. Seriya «Inzhenernyye issledovaniya». — 2010. — № 4. — S. 51—58.]

[3] *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. [*Diveev A.I., Severtsev N.A.* Metod setevogo operatora dlya sinteza sistemy upravleniya spuskom kosmicheskogo apparata pri neopredelennykh nachalnykh usloviyakh // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. — 2009. — № 3. — S. 85—91.]

[4] *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. [*Diveev A.I., Severtsev N.A., Sofronova E.A.* Sintez sistemy upravleniya meteorologicheskoy raketoy metodom geneticheskogo programmirovaniya // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. — 2008. — № 5. — S. 104—108.]

[5] *Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю.* Многокритериальный структурно-параметрический синтез системы управления спуском космического аппарата на основе метода сетевого оператора // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2008. — № 4. — С. 86—93. [*Diveyev A.I., Shmalko Ye.Yu.* Mnogokriterialnyy strukturno-parametricheskiy sintez sistemy upravleniya spuskom kosmicheskogo apparata na osnove metoda setevogo operatora // Vestnik RUDN. Seriya «Inzhenernyye issledovaniya». — 2008. — № 4. — S. 86—93.]

[6] *Болтянский В.Г.* Математические методы оптимального управления. — М.: Изд-во «Науки», 1969. [*Boltyanskiy V.G.* Matematicheskiye metody optimalnogo upravleniya. — M.: Izd-vo «Nauki», 1969.]

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

THE SYNTHESIS OF INTELLIGENT MULTI-OBJECTIVE CONTROL SYSTEM

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

[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

This paper presents the synthesis problem of intelligent multi-objective control system. For given mathematical model of control object, control objectives, performance criterion, constraints, it is necessary to search a control that achieves several objectives and minimizes the value of the performance criterion. Control objectives are defined as points of the state-space to be achieved in the control process. The feature of the problem is that we search for the control in the form of two different types of multi-dimensional functions of the state-space coordinates. One function achieves a particular goal, and another function, logical, provides switching between the particular goals. To solve the synthesis problem of multi-objective control we use the network operator method.

Key words: Intelligent control, network operator.