

## СИНТЕЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МНОГОЦЕЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Атиенсия Вильягомес Х. М.<sup>1</sup>, Дивеев А. И.<sup>2</sup><sup>1</sup>ФГБОУ Российский университет дружбы народов, ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Российской академии наук, ул. Вавилова, 40, Москва, Россия, 119333

В работе рассматривается задача синтеза интеллектуальной системы многоцелевого управления. Для заданных математической модели объекта управления, цели управления, критерия качества, ограничения, 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. При решении основной задачи синтеза вместе с синтезирующими функциями для каждой подзадачи определяем функцию выбора, которая обеспечивает переключение управления от решения одной подзадачи к решению следующей подзадачи.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, сетевой оператор.

## THE SYNTHESIS OF INTELLIGENT MULTI-OBJECTIVE CONTROL SYSTEM

Atiencia Villagomez J. M.<sup>1</sup>, Diveev A. I.<sup>2</sup><sup>1</sup>Cybernetics and mechatronics department, Peoples' Friendship University of Russia, Ordjonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419<sup>2</sup>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 the control we search in the form of two different types multi-dimensional functions of the state-space coordinates. One function achieves the particular goal, and another function, logical, provides switching of the particular goals. To solve the synthesis problem of multi-objective control we use the network operator method. In solving the basic synthesis problem together with the function synthesis for each sub-problem we determine the choice function, which provides switching control from one sub-problem solving to the next sub-problem solving.

Ключевые слова: Intelligent control, network operator.

Рассмотрим задачу синтеза системы управления с несколькими целями управления.

Задана система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая модель объекта управления

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

где  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ ,  $\mathbf{u} \in U \subseteq \mathbf{R}^m$ ,  $U$  – ограниченное замкнутое множество,  $m \leq n$ .

Состояние объекта управления оцениваем по наблюдаемым координатам

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

где  $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^l$ ,  $l \leq n$ .

Для системы (1) заданы начальные условия

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0, \quad (3)$$

Задано множество целевых состояний

$$G = (\tilde{\mathbf{y}}^0, \dots, \tilde{\mathbf{y}}^d), \quad (4)$$

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

Задан критерий качества управления

$$J = \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \rightarrow \min, \quad (5)$$

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

Необходимо найти управление в форме

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

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

Цель управления (4) многозначна. Для перехода к задаче синтеза интеллектуальной системы управления необходимо обеспечить в системе возможность выбора. Для этой цели ослабим требования к попаданию объекта в каждую целевую точку, заменим требованием попадания в окрестность целевой точки.

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

где  $\varepsilon$  – малая положительная величина.

Тогда у нас появляется компромисс между точностью и скоростью достижения целевых точек. Для реализаций управления в данной задаче нам необходимо каждый раз решать задачу выбора между точным достижением текущей цели и переходом на другую цель. Очевидно, что при таком условии в системе управления помимо регулятора обратной связи, обеспечивающего достижение цели, необходимо иметь логический блок, осуществляющий переключение целей.

Уточним данную постановку задачи.

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

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

где  $k$  – номер текущей целевой точки.

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

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

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

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

$$v \left( \left\| \Delta \mathbf{y}^k \right\|, \left\| \Delta \mathbf{y}^{k+1} \right\| \right): \mathbf{R}_{\geq 0}^l \times \mathbf{R}_{\geq 0}^l \rightarrow \{0,1\}. \quad (10)$$

Функцию (10) также необходимо найти вместе с синтезирующей функцией (6). Функция (10) должна обеспечивать переключение целевых точек. Обе функции (6) и (10) должны обеспечивать минимум функционалу качества (5) функционалу точности

$$J_1 = \max_k \min_t \left\{ \left\| \mathbf{y}^k - \mathbf{r}(\mathbf{x}(t)) \right\| \right\} \rightarrow \min, \quad (11)$$

Время управления  $t_f$  определяем по достижению последней целевой точки

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

где  $\varepsilon$  – малая положительная величина.

Частный критерий (5) заменим суммарным критерием качества

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

Для построения предикатной функции используем функцию дискретизации и логическую функцию.

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

где  $g(z_1, z_2)$  – логическая функция,

$$g(z_1, z_2): \{0,1\} \times \{0,1\} \rightarrow \{0,1\}, \quad (15)$$

где  $z_1 = d \left( \left\| \Delta \mathbf{y}^k \right\| \right)$ ,  $z_2 = d \left( \left\| \Delta \mathbf{y}^{k+1} \right\| \right)$ ,  $d \left( \left\| \Delta \mathbf{y}^k \right\| \right)$  – функция дискретизации.

Задача заключается в том, чтобы найти управления в форме

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{v}), \quad (16)$$

где  $\mathbf{v}$  – целочисленный вектор, определяющий управления для решения частной задачи  $J$ . Управления (16) должно обеспечить достижения минимумов функционалов (11) и (13).

В общем случае, так как задача содержит два критерия (11) и (13), то ее решением будет множество Парето в пространстве функционалов  $\{J_1, J_2\}$ . Конкретное решение на множество Парето выбирает разработчик по результатам моделирования и исследования синтезированной системы управления.

Задачу (1) – (3), (7) – (16) называем задачей синтеза интеллектуальной системы управления. Для ее решения необходимо найти две многомерные синтезирующие функции  $\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{v})$  и  $\mathbf{v} = \mathbf{g}(\mathbf{d})$ .

Для решения задачи синтеза интеллектуальной системы управления используем метод сетевого оператора [1–7]. Для нахождения функции  $\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{v})$  используем обычный арифметический сетевой оператор, в котором в качестве конструктивных функций используем множество арифметических функций с одним или двумя аргументами. В методе сетевого оператора эти функции называются унарными или бинарными операциями. Для нахождения логической функции  $\mathbf{v} = \mathbf{g}(\mathbf{d})$  используем логический сетевой оператор, соответственно с унарными и бинарными логическими операциями.

В качестве примера рассмотрим следующую математическую модель

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

$$\dot{x}_2 = u,$$

где  $x_1, x_2$  – координаты на плоскости.

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

Траектория движения задана набором точек  $P = ((5, -1), (3, -1), (1, -1), (0, 0))$ .

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

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

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

где

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



На рис. 2,3 показаны результаты моделирования отобранной системы управления.

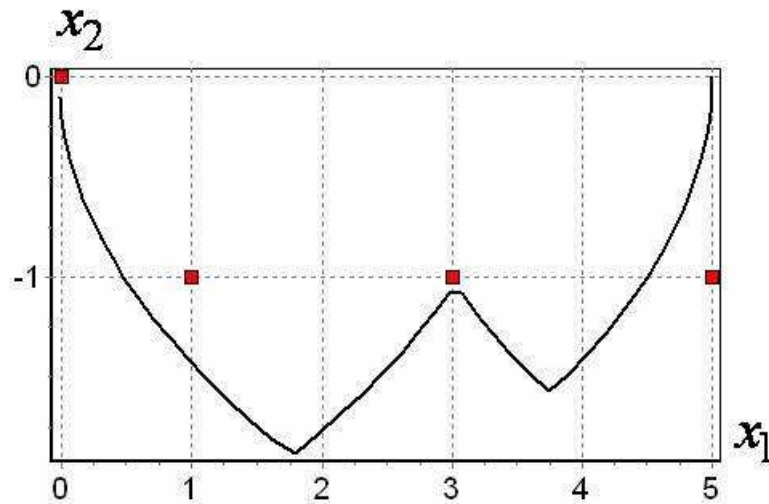


Рис. 2. Траектории на плоскости  $x_1, x_2$

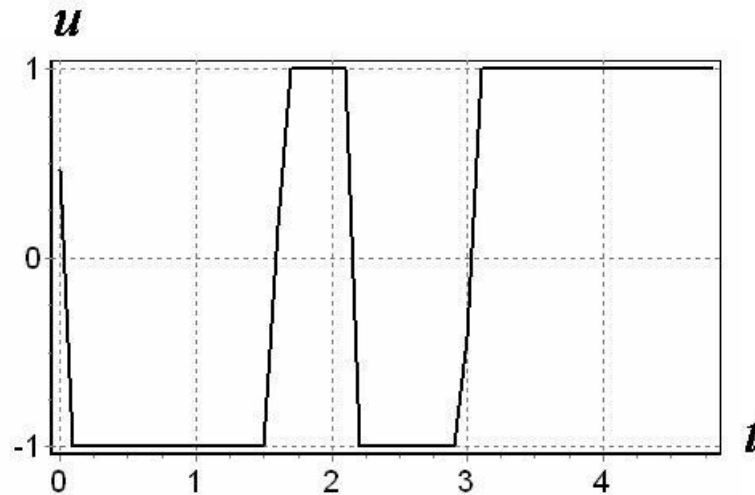


Рис. 3. Управление  $u$

Время движения по всей траектории составило 4.82 с. При оптимальном по быстродействию управлении, при точном прохождении всех точек время движения по траектории составило бы  $\tilde{t} = 2.39 + 2.82 + 2.82 + 1.44 = 8.47$  с.

### 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. Синтез адаптивной системы управления методом сетевого оператора // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем: Сб. статей. М.: ВЦ РАН, 2010. Вып. 12. С. 41-55.

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. 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 (информационные технологии и управление). 2008. № 4. С. 86 – 93.
7. Diveyev A. I., Sofronova E. A. Application of network operator method for synthesis of optimal structure and parameters of automatic control system// Proceedings of 17-th IFAC World Congress, Seoul, 2008, 05.07.2008 – 12.07.2008. P. 6106 – 6113.

#### **Рецензенты:**

Дикусар В. В., д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник отдела прикладных проблем оптимизации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Российской академии наук, г. Москва.

Забудский Е. И., д.т.н., профессор кафедры электроснабжение и электрические машины Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московского государственного агроинженерного университета им. В. П. Горячкина, г. Москва.

Антонов Александр Владимирович, д.т.н., профессор, декан факультета "Кибернетики", Обнинский институт атомной энергетики Национального исследовательского ядерного университета МИФИ Министерства образования и науки РФ, г. Обнинск.