

АДАПТИВНО-НЕЧЕТКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ

*т.ф.ф.д (PhD). доц., Улугбек Олимович Хужаназаров,
старший преподаватель. Журабек Музаффарович Муродов
Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности
ассистент. Холбеков Умарали Зокир угли
Джизакский политехнический институт*

Аннотация. В статье рассмотрена математическая модель динамических объектов в пространстве состояния в условиях нечеткой исходной информации. Синтезирован адаптивно-нечеткий алгоритм управления технологическими объектами на основе динамической модели с робастными свойствами. Для придания свойства робастности алгоритму управления предложено использование дискретного алгоритма скоростного градиента в параметрической форме, что позволит обеспечить минимум сложности и учесть ограничения на управляющий сигнал и скорость его изменения. Предложенный алгоритм реализован для управления процессами в ректификационной установке, который позволил уменьшить переходного процесса на 20% и отклонение вектора переменных состояний из эталонного на 15%. Реализация предложенного алгоритма синтеза системы управления расширяет область применения систем управления в производственных условиях при наличии широкого спектра возмущений.

Ключевые слова: динамический объект, математическая модель, сигнал управления, нечеткая исходная информация, алгоритм устойчивости.

Abstract. The articles discuss a mathematical model of dynamic objects in state space under conditions of fuzzy initial information. An adaptive fuzzy algorithm for controlling technological objects is synthesized based on a dynamic model with robust properties. To impart robustness to the control algorithm, it is proposed to use a discrete speed gradient algorithm in parametric form, which will ensure a minimum of complexity and take into account restrictions on the control signal and the rate of its change. The proposed algorithm was implemented to control processes in a distillation unit, which allowed a reduction in the transient process by 20% and a deviation of the vector of variable states from the reference one by 15%. The implementation of the proposed control system synthesis algorithm expands the scope of application of control systems in production conditions in the presence of a wide range of disturbances.

Keywords: dynamic object, mathematical model, control signal, fuzzy initial information, stability algorithm.

Предложена математическая модель динамических объектов в пространстве состояния в условиях нечеткой исходной информации. Синтезирован адаптивно-нечеткий алгоритм управления технологическими объектами на основе динамической модели с робастными свойствами. Для придания свойства робастности алгоритму управления предложено использование дискретного алгоритма скоростного градиента в параметрической форме, что позволит обеспечить минимум сложности и учесть ограничения на управляющий сигнал и скорость его изменения. Предложенный алгоритм реализован для управления процессами в ректификационной установке, который позволил уменьшить переходного процесса на 20% и отклонение вектора переменных состояний из эталонного на 15%.

Современные технологические объекты представляют собой сложные слабоформализованные системы, функционирующие в условиях большой неопределенности, неполноты знаний и нечеткости описаний как самой системы, так действующих на нее возмущений. Для управления такими объектами недостаточно применения классических методов теории управления и, возникает необходимость разработки новых методов и подходов с привлечением достижений современных информационных технологий. Один из таких подходов, базирующийся на теории нечетких множеств и нечеткой логике, является основой создания интеллектуализированной системы управления технологическими объектами, функционирующими в условиях неопределенности информации.

В этом случае для повышения эффективности управления технологическими объектами с применением современных методов управления необходимо решить следующие задачи:

- оценка показателей качества неопределенности;
- снижение (или компенсация) априорной неопределенности знаний о процессе за счет использования оперативной информации от средств измерения и построения контура адаптации;
- формирование такого закона управления, который бы гарантировал устойчивость и заданные показатели точности и качества системы управления (СУ) в условиях некомпенсированной (апостериорной) неопределенности.

Один из возможных путей решения указанных задач представляет собой использование методов адаптивного, робастного и нечеткого управления [1].

Важным моментом при этом является построение математической модели для представления знаний о динамических объектах в условиях нечеткой информации, которая должна позволить определить показатели неопределенности, давать описание случайных процессов, инвариантно к их закону распределения.

В общем случае математическая модель динамического объекта может быть представлена в виде:

- нечеткое уравнение состояния

$$d\bar{x}/dt = \bar{A} \otimes \bar{x} \oplus \bar{B} \otimes u, \quad \mu_{\bar{s}}(s), \quad (1)$$

- нечеткое уравнение наблюдения

$$\bar{y} = \bar{C} \otimes \bar{x}, \quad (2)$$

- нечеткие начальные условия

$$\bar{x}_1(0) = \bar{D}_1, \quad \bar{x}_2(0) = \bar{D}_2, \dots, \bar{x}_n(0) = \bar{D}_n, \quad (3)$$

где \otimes, \oplus - нечеткие операции соответственно сложения и умножения; u - управляющий сигнал (скаляр), принимающий нечеткие значения; $\bar{x} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_n\}$ - вектор нечеткого состояния, $i=1, 2, \dots, n$; $\bar{y} = \{\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_\zeta, \dots, \bar{y}_l\}$ - вектор нечетких выходных переменных, $\zeta=1, 2, \dots, l$; $\mu_{\bar{s}}(s)$ - показатель нечеткого (изменяющегося) числа переменных состояния и представляющий вес s -го уравнения состояния;

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1^1 & \dots & \bar{A}_n^1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{A}_1^n & \dots & \bar{A}_n^n \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} \bar{B}^1 \\ \dots \\ \bar{B}^n \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} \bar{C}_1^1 & \dots & \bar{C}_n^1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{C}_1^l & \dots & \bar{C}_n^l \end{bmatrix} - \text{матрицы нечетких}$$

коэффициентов модели.

Некоторая i -я переменная вектора состояния как функция времени t может быть представлена нечетком отношением (НО) [3,4]: $\bar{x}_i(t) = \{t, x_i / \mu_{\bar{x}_i}(t, x_i)\}$, $i=1, 2, \dots, n$, а в фиксированный момент времени указанная переменная может быть выражена нечетким множеством (НМ): $\bar{x}_i = \{x_i / \mu_{\bar{x}_i}(x_i)\}$. Аналогичное описание имеет ζ -я выходная переменная:

$$\bar{y}_\zeta(t) = \{t, y_\zeta / \mu_{\bar{y}_\zeta}(t, y_\zeta)\}, \quad \zeta = 1, 2, \dots, l,$$

$$\bar{y}_\zeta = \{y_\zeta / \mu_{\bar{y}_\zeta}(y_\zeta)\},$$

где $\mu_{\bar{x}_i}, \mu_{\bar{y}_\zeta}$ - функции принадлежности (ФП); x_i, y_ζ - значения из универсальных множеств. Элементы матриц $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ заданы НМ:

$$\bar{A}_1 = \{A_1^1 / \mu_{A_1}^{-1}(A_1^1)\}, \dots, \bar{A}_n = \{A_n^n / \mu_{A_n}^{-n}(A_n^n)\},$$

$$\bar{B}^1 = \{B^1 / \mu_B^{-1}(B^1)\}, \dots, \bar{B}^n = \{B^n / \mu_B^{-n}(B^n)\},$$

$$\bar{C}_1^1 = \{C_1^1 / \mu_{C_1}^{-1}(C_1^1)\}, \dots, \bar{C}_n^l = \{C_n^l / \mu_{C_n}^{-l}(C_n^l)\}.$$

Начальные условия описаны НМ $\bar{D}_i = \{x_i / \mu_{D_i}^{-1}(x_i)\}$, а число переменных вектора состояния – НМ $\bar{S} = \{s / \mu_{\bar{S}}^{-1}(s)\}$, где $s=1, 2, \dots, n$ – порядковый номер переменной вектора состояния.

Функции принадлежности заданы аналитической зависимостью [2-3], например, для переменной \bar{x}_i :

$$\mu_{\bar{x}_i}(x_i) = \varphi(x, a_{\bar{x}_i}, b_{1\bar{x}_i}, b_{2\bar{x}_i}, v_{1\bar{x}_i}, v_{2\bar{x}_i}) =$$

$$= \left(\begin{aligned} & (b_{1\bar{x}_i}(a_{\bar{x}_i} - x))^{v_{1\bar{x}_i}} \frac{\text{sign}(b_{1\bar{x}_i}(a_{\bar{x}_i} - x)) + 1}{2} + \\ & + (b_{2\bar{x}_i}(a_{\bar{x}_i} - x))^{v_{2\bar{x}_i}} \frac{\text{sign}(b_{2\bar{x}_i}(a_{\bar{x}_i} - x)) + 1}{2} + 1 \end{aligned} \right)^{-1} \quad (4)$$

В формуле (4) коэффициент $a_{\bar{x}_i}$ представляет моду ФП, коэффициенты $b_{1\bar{x}_i}$ и $b_{2\bar{x}_i}$ задают ширину ФП, $v_{1\bar{x}_i}$ и $v_{2\bar{x}_i}$ – наклон ФП к оси x_i , т.е. контрастность. Коэффициенты $b_{1\bar{x}_i}$, $b_{2\bar{x}_i}$, $v_{1\bar{x}_i}$, $v_{2\bar{x}_i}$ позволяют образовывать любую форму ФП и могут выступать в качестве показателей неопределенности.

Заданы показатели качества системы управления (время переходного процесса, перерегулирование, ошибка слежения и т.п.) в форме функций полезности:

$$\bar{Q}_k^3 = \{Q_k^3 / \mu_{Q_k}^3(Q_k^3)\}, k = 1, 2, \dots, K,$$

$$\mu_{Q_k}^3(Q_k^3) = \varphi(Q_k^3, a^3_{\bar{x}_i}, b^3_{1\bar{x}_i}, b^3_{2\bar{x}_i}, v^3_{1\bar{x}_i}, v^3_{2\bar{x}_i}), \quad (5)$$

где K – число показателей качества системы управления.

Определена эталонная модель на основе заданных показателей качества управления:

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m u_m, \quad (6)$$

где u_m – задающее воздействие системы; $x_m(t)$ – вектор эталонных состояний.

Заданы ограничения на переменные вектора состояния и ограничения на управление;

$$g_1(\bar{x}, u, \gamma, t) < x_{1\max}, g_2(\bar{x}, u, \gamma, t) < x_{2\min}, \dots,$$

$$g_{2n-1}(\bar{x}, u, \gamma, t) < x_{n\max}, g_{2n}(\bar{x}, u, \gamma, t) < x_{n\min}, \dots,$$

$$g_{m-1}(\bar{x}, u, \gamma, t) < u_{\max}, g_m(\bar{x}, u, \gamma, t) < u_{\min}. \quad (7)$$

Пусть в качестве цели управления выбрана минимизация среднего отклонения переменных вектора состояния реального поведения объекта управления от эталона [4-5].

Необходимо синтезировать системы управления и осуществить настройку регулятора так, чтобы все сигналы в системы управления были ограничены, т.е. $|x(t)| < x_{дон}$, $|u(t)| < u_{дон}$, а переходные процессы в системе удовлетворяли заданным показателям качества (5).

Для определения показателя качества системы управления используются как временные характеристики объекта управления $a_{x_i}^-(t)$, $a_{y_i}^-(t)$, так и параметры нечеткости $b_{1x_i}^-(t)$, $b_{2x_i}^-(t)$, $b_{1y_k}^-(t)$, $b_{2y_k}^-(t)$, определяемые по ширине функции принадлежности.

С целью снижения нечеткости данных об объекте и улучшения показателей качества управления максимизируются значения $b_{1x_i}^-(t)$, $b_{2x_i}^-(t)$, $b_{1y_k}^-(t)$, $b_{2y_k}^-(t)$.

Для придания свойства робастности алгоритма управления предложено использование дискретного алгоритма скоростного градиента в параметрической форме, что позволит обеспечить минимум сложности и учесть ограничения на управляющий сигнал и скорость его изменения [5, 6].

При этом сигнал управления формируется на основе нечеткого множества значений переменных состояния возможный при вариации поведения объекта.

Благодаря тому, что модель объекта представляет собой усредняющий складывающий фильтр, синтез закона управления на основе нечеткой модели дополнительно усиливает робастность алгоритма скоростного градиента, сохраняя ограниченность фазовых траекторий в определенной области в условиях некомпенсированной неопределенности значений об объекте.

С целью улучшения качества и точности формирования переходных процессов в системы управления реализован алгоритм принятия решений по выбору компромиссного управляющего сигнала управления путем его встраивания в алгоритмы управления.

Модифицированный закон управления имеет вид:

$$u = k_u(t) \cdot u_m(t) + \sum_{i=1}^n k_x^\Sigma(t) \cdot x_i^\Sigma(t), \quad (8)$$

$$k_{x1}^\Sigma[t+1] = k_{x1}^\Sigma[k](1 - h\gamma_3) + h(\gamma_5 - \gamma_4)\delta \cdot [t]x_1^\Sigma[t] - h\gamma_5\delta \cdot [t+1]x_1^\Sigma[t+1], \quad (9)$$

$$k_{xn}^\Sigma[t+1] = k_{xn}^\Sigma[k](1 - h\gamma_3) + h(\gamma_5 - \gamma_4)\delta \cdot [t]x_n^\Sigma[t] - h\gamma_5\delta \cdot [t+1]x_n^\Sigma[t+1], \quad (10)$$

$$k_u[t+1] = k_u[k](1 - h\gamma_1) + h(\gamma_6 - \gamma_2)\delta \cdot [t]u_m[t] - h\gamma_6\delta \cdot [t+1]u_m[t+1], \quad (11)$$

где $t = mh$, $h > 0$ – шаг дискретизации, $m = 0, 1, 2, \dots, m$; $\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6\}$ – параметры адаптивного регулятора; $e_i^\Sigma = \int_{x_i} (x_i - x_{im})\mu_{e_i}^-(e_i)dx_i$ – рассогласование

между переменными вектора состояния и эталонными переменными состояниями; $\mu_{ei}^{-}(e^i) = (e_i, a_{ei}^{-}, b_{1ei}^{-}, b_{2ei}^{-}, v_{1ei}^{-}, v_{2ei}^{-})$ - ФП ошибки, φ – аналитический вид функции принадлежности в форме (4), $a_{ei}^{-} = a_{xi}^{-} - x_{im}$, $v_{1ei}^{-} = v_{1xi}^{-}$, $v_{2ei}^{-} = v_{2xi}^{-}$, $b_{1ei}^{-} = b_{1xi}^{-}$, $b_{2ei}^{-} = b_{2xi}^{-}$, $x_i^{\Sigma} = \int_{X_i} x_i dx_i$ - интегрированная переменная вектора состояния;

$\delta \cdot [t] = \sum_{i=1}^n k_i \cdot e_i^{\Sigma}$, h_i – коэффициенты, полученные из коэффициентов матрицы и решении уравнения Ляпунова и матрицы эталонной модели B_M .

Задачу определения параметров адаптивного регулятора $\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6\}$, когда показатели качества системы управления (5) и поведения объекта управления (1), (2), (3) заданы в нечеткой форме, можно свести и классической четкой задаче поиска экстремума целевой функции при наличии ограничений (7).

Для этого предложен обобщенный критерий, который, во-первых, объединяет показатели качества системы управления, во-вторых, реализует дефаззификацию нечетких значений показателя качества системы управления :

$$I(\gamma) = K - \sum_{k=1}^K \frac{\mu_{Q_k}^{\int} \wedge \mu_{Q_k}^{\int}}{\mu_{Q_k}^{\int}} \rightarrow \min, \quad (12)$$

где $\mu_{Q_k}^{\int} = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_{Q_k}^{-}(Q_k) \cdot dQ_k$ - энергия НМ $\bar{Q}_k = \{Q_k / \mu_{Q_k}^{-}(Q_k)\}$, выражающего прогнозируемое на основе нечеткой модели значение k -го показателя качества системы управления; $\mu_{Q_k}^{\int} = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_{Q_k}^{\int}(Q_k) \cdot dQ_k$ - энергия НМ, выражающего функцию полезности.

Исследование эффективности предложенного подхода при работе нечеткой адаптивной системы проведены при управлении температурой и уровнем в ректификационной установке [6].

Получены следующие результаты:

1. оперативное формирование управляющих сигналов способствует сокращению времени переходного процесса на 20%,
2. среднее отклонение вектора переменных состояния реального процесса от эталонного уменьшено на 15% по сравнению с показателями известных адаптивных систем управления.

Реализация предложенного алгоритма синтеза системы управления расширяет область применения систем управления в производственных условиях при наличии широкого спектра возмущений.

Список литературы:

1. Khalmatov D.A., Yunusova S.T., Atajanov M.D., Huzanazarov U.O. Formalization of the cotton drying process based on heat and mass transfer equations // ИУМ Engineering Journal, <https://doi.org/10.31436/iiumej.v21i2.1456> Vol. 21, No. 2, 2020 – pp.256-265.
2. Xalmatov D. A., Alimova G.R., Mirzaaxmedova X.B., Xujanazarov U.O. Information-algorithmic support of decision-making in problems of primary processing of cotton-raw processes // Chemical technology control and management “Journal of Korea multimedia society” Korea, Seoul 2018 №4-5 – pp.173-178.
3. Халматов Д.А., Мирзаахмедова Х.Б., Хўжаназаров У.О., Алимова Г.Р. Нейронные сети как новый подход к управлению технологическим оборудованием // «Тенденции развития легкой промышленности Республики Узбекистан: проблемы, анализ и решения». Сборник материалов международной научной конференции. Ташкент 2020 – С.131-139.
4. Siddikov I.H., Kamolov N.Z., Xalmatov D.A., Xujanazarov U.O. Automatic control process for drying a cotton on the basis of fuzzy logic // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology Vol. 6, Issue 10 , October 2019 – pp.11093-11096
5. Игамбердыев Х.З., Юсупбеков А.Н., Зарипов О.О. Регулярные методы оценивания и управления динамическими объектами в условиях неопределенности. Ташкент.: Изд-во ТашГТУ, 2012. -320с.
6. Siddikov I.H. Synthesis of Neuro-Fuzzy controller for dynamic objects under conditions of uncertainty // The Advanced Science Journal.USA, Volume 2014 Issue 2. pp.33-37