на основе торфа // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 3 (23). С. 81–90.

CREATION OF AUDIO ALARM MODULES FOR CONVEYOR STATE MONITORING SUBSYSTEMS IN THE PEAT-BASED MIXTURE PRODUCTION

O.L. AKHREMCHIK, Dr. Sc., I.I. BASULEV, Senior Lecturer

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: axremchic@mail.ru

The results obtained in the course of development of sound signaling modules of control systems for production of peat-based mixtures are presented. The tasks solved in the course of monitoring, signaling and control of technological conveyors are highlighted. An example of the functional scheme of automation of the conveyor drive for peat feeding is given and its states are defined. A mathematical description of sound tones for the operator with the introduction of classes of states, signals and reactions to the signal is proposed. It is noted that the algorithm of signal formation includes the choice of signal type and parameters by production rules. The priority of the sound signal is considered as one of the parameters. It is emphasized that the correction of parameters is based on the estimation of the operator's reaction to the signal; the addition of variation to the basic frequency of sound leads to a change in the signal spectrum when estimating the reaction time and operator's errors.

Keywords: module, parameter, class, conveyor, beep, alarm, system, reaction, frequency.

Поступила в редакцию/received: 16.03.2024; после рецензирования/revised: 20.03.2024; принята/accepted: 26.03.2024

УДК 681.51

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ КОНЕЧНЫМ СОСТОЯНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В.В. БОРОВИК, магистр, И.А. ЕГЕРЕВА, канд. техн. наук,
П.М. СМИРНОВА, магистр

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Никитина, 22, e-mail: refhesx@mail.ru

Разработаны алгоритмы управления конечным состоянием нечеткой динамической системы. Для этого рассмотрена система управления, в которой пространство состояний системы представляет собой компактное метрическое пространство. Пространство управлений рассматриваемой системы также является компактным метрическим пространством. Для построения данных алгоритмов эволюция системы была описана как нечеткое отношение, представленное в произведении пространств управления и состояния системы. Данное отношение задано нечетким множеством с соответствующей ему функцией принадлежности. Согласно принципу оптимальности Беллмана произведен поиск элементов последовательности управления, позволяющих получить максимальную реализацию нечеткой цели.

Ключевые слова: нечеткий процесс, принятие решения, алгоритм, уравнение Беллмана.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-3-90-96

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время термин «нечеткость» часто применяется для описания технических, экономических и прочих процессов. Это связано с тем, что данная концепция позволяет легко и естественно работать с высококачественными данными, которые во многих случаях являются основным источником неопределенности [1–4]. Методы теории нечетких множеств изначально предназначались для работы в рамках логических методов принятия решений. В ходе последующего совершенствования данного направления они были объединены с методами динамического программирования, что позволило создать способы решения задач, поставленных в рамках работы с детерминированными и стохастическими системами, нечеткими целями и ограничениями. Для понимания последующего развития нечеткого динамического программирования обратимся к обзору [5], в рамках которого обсуждаются задачи управления детерминированными и стохастическими системами с нечетким конечным временем. Помимо этого, важно отметить, что параллельно с совершенствованием теории динамического и математического программирования нечеткие соотношения широко рассматривались в теории принятия решений с нечеткой исходной информацией.

В работе [6], например, исследовались предпочтения, основанные на нечетких отношениях, играющих важную роль в задачах принятия решений в промышленных системах выпечки, включая активные системы. В статьях [7–9] изучались детерминированные и стохастические системы с нечетким временем окончания и нечеткой целью системы, но об управлении конечным состоянием в них не говорится. В рамках источника [7] была рассмотрена данная задача и получено функциональное уравнение, однако его решение фактически не было изучено. В работах [7, 8, 10] был разобран вопрос построения решения уравнения Беллмана, но результаты не привели к получению окончательного алгоритма, пригодного для использования. Цель настоящей статьи заключается в том, чтобы создать работающий алгоритм для решения задачи управления конечным состоянием в динамической нечеткой системе, т.е. получить алгоритм, который можно применять на практике.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для начала следует отметить, что в приведенных выше работах [2, 8, 9] используется специальная форма нечетких отношений. Поскольку эта форма новая, опишем ее для дальнейшего понимания.

Пусть X, Y, Z – определенные множества. Предположим, что в пространстве $X \times Y$ установлено нечеткое отношение A с функцией принадлежности μA, а при задании $Y \times Z$ определено нечеткое отношение B с функцией принадлежности μB. Следовательно, композиция $A \circ B$ нечетких множеств A и B представляет собой нечеткое отношение в пространстве $X \times Z$ с функцией принадлежности:

$$\mu_{A \circ B}(x,z) = sup_{y \in Y}\, min\ \ [\mu_A(x,y), \mu_B(y,z)]. \tag{1}$$

Предположим, что в пространстве X определено нечеткое множество R с функцией принадлежности μR. Следовательно, нечеткое отношение μA индуцирует нечеткое множество $R \circ A$ в пространстве Y. В соответствии с выражением (1) функция принадлежности $\mu R \circ A$ для $R \circ A$ задается уравнением

$$\mu_{R\circ A}(y) = \sup_{x \in X} \min[\mu_R(x), \mu_A(x, y)].$$

Эти композиции нечетких отношений широко используются в теории нечетких множеств для построения правил композиционного вывода [1]. Для поведенческих исследований нечетких динамических систем мы будем применять дополнительное правило композиции нечетких множеств.

Предположим, что в $X \times X$ определена нечеткая связь S с функцией принадлежности μS. Далее представим, что в пространстве X задано множество G с функцией принадлежности μ_G. Таким образом, для композиции $S \circ G$ мы можем найти состав нечетких множеств S и G. Согласно выражению (1), функция принадлежности множества $\mu_{S\circ G}$ будет задаваться уравнением

$$\mu_{S\circ G}(x_1) = \sup_{x_2 \in X} \min \ [\mu_S(x_1, x_2), \mu_G(x_2)]. \qquad (2)$$

Легко заметить, что композиция $S \circ G$ позволяет определить степень принадлежности элемента из множества X к нечеткому множеству G с нечетким отношением S. Конкретно для каждого $x_1 \in X$ определяется степень принадлежности $\mu_{S\circ G}(x_1)$ для x_1 к нечеткому множеству G по уравнению (2).

Допустим, что начально состояние системы $x_0 \in X$, тогда результатом выбора управления $u_0 \in U$ будет переход системы в некоторое новое состояние x_1, которое до этого момента было неизвестно. Тем не менее мы знаем, что если взять x_0 и μ_0 с фиксированными значениями, то переменные x_0, u_0 и x_1 будут связаны нечетким отношением S с функцией принадлежности $\mu_S(x_0, u_0, x_1)$. Другими словами, при фиксированных значениях x_0 и μ_0 в момент времени $n = 0$ состояние системы x_1 можно определить с помощью функции принадлежности $\mu_S(x_0, u_0, x_1)$ к нечеткому множеству S. Таким образом в момент времени $n = 1$ мы уже можем наблюдать точное значение состояния системы x_1. Таким образом, если в какой-то момент времени n нам будет известно состояние системы x_n, то результатом выбора элемента управления системы u_n будет возможность оценить состояние системы x_{n+1} в момент $n + 1$ на основе нечеткого отношения с функцией принадлежности $\mu_S(x_n, u_n, x_{n+1})$.

Рассмотрим управление многошаговыми процессами. Эти процессы отличаются тем, что условия выполнения на каждом шаге не изменяются, кроме состояния самой системы, т.е. состояние системы и управление на каждом шаге имеют разные значения, но принадлежат каждый своему множеству. Как видно по рис. 1, на каждом шаге процесса система изменяется в зависимости от соответствующего шагу управления u_n, начальное состояние системы x_0 подвергается управлению u_0, и система переходит в состояние x_1 (и так до момента времени N). В рассматриваемом процессе время дискретно и на каждом отдельном шаге имеет свое значение.

Для многостадийных процессов ситуация складывается немного иначе. На каждой стадии процесса условия не связаны с предыдущими, т.е. для них справедливо $x_i \in X_i, u_i \in U_i$.

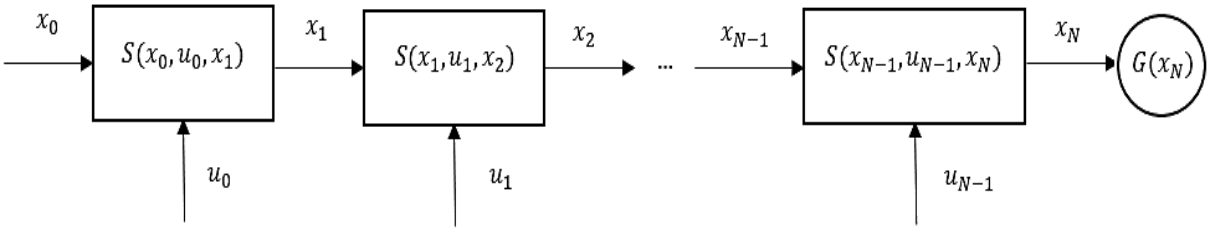

Рис. 1. Общая схема многошагового процесса

Как видно из рис. 2, протекание многошаговых и многостадийных процессов на самой схеме процесса практически не сказывается.

Для дальнейшей работы обратимся к принципу оптимальности Беллмана. Данный принцип является важным инструментом в теории оптимального управления, а именно помогает решать сложные задачи управления, разбивая их на более мелкие и простые подзадачи. Суть принципа оптимальности Беллмана заключается в следующем. Если у нас есть задача оптимального управления, которую необходимо решить, то мы можем разбить ее на ряд последовательных этапов. Каждый этап будет представлять собой отдельную задачу оптимального управления, которая зависит от результатов предыдущего этапа.

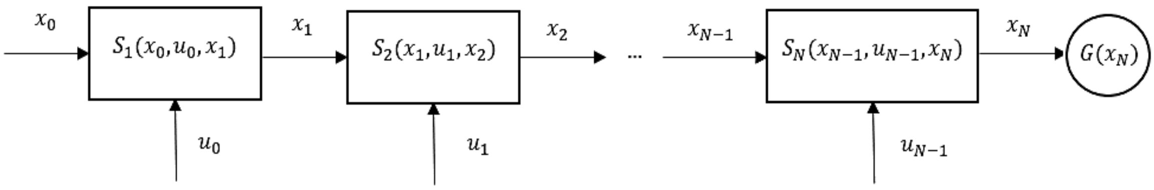

Рис. 2. Общая схема многостадийного процесса

Названный подход позволяет значительно упростить решение сложных задач, так как мы ищем не одно глобальное решение, а локальные для каждого этапа. Более того, благодаря принципу оптимальности Беллмана можно использовать информацию, полученную на предыдущих этапах, для улучшения решений на этапах последующих.

Важно отметить, что применение принципа оптимальности Беллмана требует тщательного планирования и анализа каждой стадии задачи. Смысл функционального уравнения Беллмана для нашей задачи состоит в том, что можно всегда найти значение элемента управления системы u через обратную связь от времени t и состояния системы x.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА

Рассматриваемая система является системой с определенным конечным состоянием, т.е. системой, где нам известно N – конечное время системы. Как было сказано выше, с каждым совершенным шагом n эволюции системы, т.е. выбором оптимального значения управления u_n, мы сможем определить состояние системы x_{n+1} на основе нечеткого отношения с функцией принадлежности $\mu_S(x_n, u_n, x_{n+1})$. Тогда нашей целью будет поиск последовательности управлений $u_0, u_1, \dots, u_{N-1}$ из пространства множества U, минимизирующих степень принадлежности x состояний к нечеткому множеству G, с нечеткими отношениями с функциями принадлежности

$$\mu_S(x_0, u_0, x_1), \mu_S(x_1, u_1, x_2), \dots, \mu_S(x_{N-1}, u_{N-1}, x_N).$$

Решением поставленной задачи будет поиск элементов последовательности управления, обеспечивающих максимальную степень принадлежности состояния системы x к нечеткому множеству G. При этом эволюция состояния системы описывается составом нечетких множеств S и G.

Согласно статье [1], функциональное уравнение будет иметь вид

$$\mu_{N+1}(\mathrm{c}) = \max_x \max_u \min \ \{\mu_s(\mathrm{c}, u, x), \mu_N(x)\}, \tag{3}$$

где

$$\mu_1(\mathrm{c}) = \mu_G(\mathrm{c}).$$

В классической теории динамического программирования существует один общий алгоритм решения детерминированного либо стохастического уравнения Беллмана. Для данной формы задачи этот алгоритм является единственным, поэтому мы модернизируем его.

Как обычно, будем считать переменной c, зафиксируем конечное число значений этой переменной, а именно $\alpha_1, \alpha_2, \ \dots \ , \alpha_k$. Тогда в соответствии с выражением (3) можно определить значения

$$\mu_1(\alpha_1), \mu_2(\alpha_2), \dots, \mu_k(\alpha_k).$$

Полученные данные запишем в таблицу.

Данные по состоянию и управлению системой

x	$\mu_1(c)$	$\mu_2(c)$	$u_2^*(c)$	...	$\mu_N(c)$	$u_N^*(c)$
α_1	$\mu_1(\alpha_1)$	$\mu_2(\alpha_1)$	$u_2^*(\alpha_1)$	...	$\mu_N(\alpha_1)$	$u_N^*(\alpha_1)$
α_2	$\mu_1(\alpha_2)$	$\mu_2(\alpha_2)$	$u_2^*(\alpha_2)$	...	$\mu_N(\alpha_2)$	$u_N^*(\alpha_2)$
...	...	...	...		...	...
α_k	$\mu_1(\alpha_k)$	$\mu_2(\alpha_k)$	$u_2^*(\alpha_k)$	...	$\mu_N(\alpha_k)$	$u_N^*(\alpha_k)$

Согласно выражению (1), для N = 1 имеем

$$\mu_2(\mathrm{c}) = \max_{u_2} \max_x \min \ \{\mu_s(\mathrm{c}, u, x), \mu_1(x)\}.$$

Тогда для $\mathrm{c} = \ \alpha_1, \alpha_2, \alpha_k$ получаем следующие значения:

$$\mu_1(\alpha_1), \mu_1(\alpha_2), \dots, \mu_1(\alpha_k) \quad \text{и} \quad u_1(\alpha_1), u_1(\alpha_2), \dots, u_1(\alpha_k).$$

Табличные данные позволяют выбрать оптимальный набор значений управления для выбранного нами конкретного значения c из множества K альтернатив.

Для N = 2 имеем

$$\mu_3(\mathrm{c}) = \max_{u_3} \max_x \min\{\mu_s(\mathrm{c}, u, x), \mu_2(x)\}.$$

Здесь есть только конечное число значений $\mu_2(x)$, поэтому для преодоления проклятия размерностей на значениях

$$\mu_2(\alpha_1), \mu_2(\alpha_2), \dots, \mu_2(\alpha_k)$$

каким-либо методом аппроксимации строим функцию $u_2(x)$, определенную для всех $x \in X$. Для дальнейшего удобства по значениям

$$u_2(\alpha_1), u_2(\alpha_2), \dots, u_2(\alpha_k)$$

строим функцию $u(x)$, определенную для всех $x \in X$. Процесс аппроксимации может быть очень сложным в зависимости от свойств переменной x и множества X. В связи с этим рассмотрим упрощенный алгоритм, в котором примем следующие данные:

$$c = \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k ;$$

$$x = \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k;$$

$$u = u_1, u_2, \dots, u_k.$$

В результате получим функции:

$$\mu_1(x), \mu_2(x), \dots, \mu_N(x);$$

$$u_1(x), u_2(x), \dots, u_N(x).$$

Функции, представленные выше, имеют значения на всем указанном множестве иксов и на протяжении всего временного ряда. Задача решена. Таким образом, в работе были получены не только значения максимальной реализации нечеткой цели в виде функции $\mu(c)$, но и информация об управлении, представленная в виде обратной связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе был проанализирован вопрос управления конечным состоянием детерминированных динамических систем, а также кратко описаны работы, в которых рассматривались такие системы, но не приводился алгоритм решения задачи управления конечным состоянием самой системы. Результатом стала разработка алгоритма, дающего возможность решить задачу управления конечным состоянием, в форме, которую можно применять на практике. Для этого было использовано функциональное уравнение системы, рассмотрена новая специальная форма нечетких отношений, применена оценка значений системы на каждом шаге и аппроксимированы функции $\mu_2(x)$ и $u_2(x)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I // *Information Sciences*. 1975. V. 8. № 3. P. 199–249.

2. Dzyuba S.M., Paluch B.V., Egereva I.A. On the optimal control of fuzzy multistage processes. URL: https://www.researchgate.net/publication/321582688_Methodological_support_of_optimal_control_of_fuzzy_multistage_processes

3. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М.: Наука. 1965. 458 с.

4. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. М.: Наука. 1969. 118 с.

5. Kacprzyk J., Esogbue A.O. Fuzzy dynamic programming: Main developments and applications // *Fuzzy Sets and Systems*. 1996. V. 81. № 1. P. 31–45.

6. Liu B. A survey of entropy of fuzzy variables // *Journal of Uncertain Systems*. 2007. V. 1. № 1. P. 4–13.

7. Палюх Б.В., Ветров А.Н., Егерева И.А. Архитектура интеллектуальной системы оптимального управления эволюцией многостадийных процессов в нечеткой динамической среде // *Программные продукты и системы*. 2017. Т. 30. № 4. С. 619–624.

8. Палюх Б.В., Егерева И.А. Многошаговая система поиска альтернатив в информационном каталоге // *Программные продукты и системы*. 2013. № 3. С. 291–295.

9. Control of the final state of fuzzy dynamical systems / A.N. Sotnikov [et al.] // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019. V. 40. № 5. P. 599–605.

10. Беллман Р., Заде Л. Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир. 1976. 215 с.

Для цитирования: Боровик В.В., Егерева И.А., Смирнова П.М. Построение алгоритма управления конечным состоянием нечеткой динамической системы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 3 (23). С. 90–96.

CONSTRUCTION OF AN ALGORITHM FOR CONTROLLING THE FINAL STATE OF A FUZZY DYNAMICAL SYSTEM

V.V. BOROVIK, magister, I.A. EGEREVA, Cand. Sc., P.M. SMIRNOVA, magister

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: refhesx@mail.ru

Algorithms for finite state control of a fuzzy dynamic system are developed. For this purpose, a control system in which the state space of the system is a compact metric space is considered. The control space of the considered system is also a compact metric space. To construct these algorithms, the evolution of the system has been described as a fuzzy relation represented in the product of the control and state spaces of the system. This relation is given by a fuzzy set with its corresponding membership function. In accordance with the Bellman optimality principle, a search for the elements of the control sequence that allow to obtain the maximum realization of the fuzzy objective has been performed.

Keywords: fuzzy process, decision making, algorithm, Bellman equation.

Поступила в редакцию/received: 08.05.2024; после рецензирования/revised: 13.05.2024; принята/accepted: 20.05.2024

УДК 681.51

АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ НА ПРЕДПРИЯТИИ

В.В. БОРОВИК, магистр, Д.А. КОКОВКИН, асп., П.М. СМИРНОВА, магистр

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: kokovkin93@mail.ru

Рассмотрено совершенствование процесса приобретения товаров, которое ведет к снижению производственных расходов, а также к увеличению прибыли промышленного предприятия. В ходе анализа данных создан алгоритм, определяющий идеальное количество товара. Подчеркнуто, что этот алгоритм значительно улучшит