

## УПРАВЛЕНИЕ ПОДЪЕМНЫМ КРАНОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ДИСПЕТЧЕРА

Асп. АЛАВИ САЙЕД ЭНАЯТОЛЛАХ,  
канд. техн. наук, доц. ПЕТРЕНКО Ю. Н.

*Белорусский национальный технический университет*

Крановые установки являются одними из самых распространенных во многих отраслях народного хозяйства. Производительность кранов часто определяет эффективность работы всего комплекса. Одна из проблем, возникающих при работе крана, – раскачивание груза при доставке его в заданные координаты. Существует несколько подходов для решения этой проблемы. Один из наиболее распространенных [1] методов заключается в релейном управлении (так называемый банг-банг). Эффективность управления зависит от начальных приближений и числа интервалов релейного управления. Вот почему важно найти новые методы управления, повышающие его эффективность, т. е. перемещение груза в заданные координаты без колебаний и за минимальное время.

Предлагается применение нечеткого логического диспетчера в системе, которая получила название «грубый диспетчер» [2]. Основой грубого диспетчера является теория грубого набора [2].

**Динамическая модель козлового подъемного крана с переменной длиной кабеля.** Для ее построения воспользуемся схемой, представленной на рис. 1.

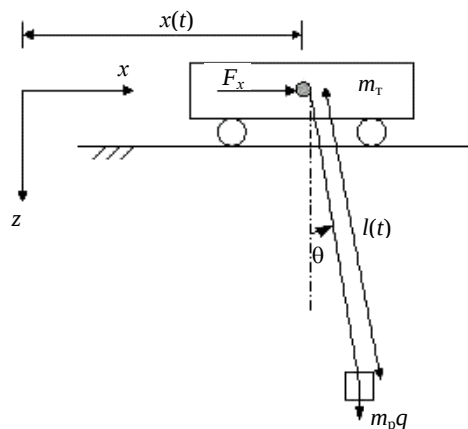


Рис. 1. Системы координат механизма подъемного крана

Подъемный кран состоит из вагонетки массой  $m_t$ , которая перемещается по рельсам. Вагонетка имеет барабан, поднимающий кабель длиной  $L(t)$  с полезным грузом  $m_p$ , приложенным к его концу. Работа крана в динамике при подъеме груза и с учетом ряда допущений описывается системой уравнений

$$[A] \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{l} \end{Bmatrix} + \{B\} = \{F\}, \quad (1)$$

где A, F и B матрицы:

$$[A] = \begin{bmatrix} m_p + m_r & m_p l \cos(\theta) & m_p \sin(\theta) \\ \cos(\theta) & l & 0 \\ m_p \sin(\theta) & 0 & m_p \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\{B\} = \begin{Bmatrix} 2m_p l \dot{\theta} \cos(\theta) - m_p l \dot{\theta}^2 \sin(\theta) \\ 2\dot{l} \dot{\theta} + g \sin(\theta) \\ -m_p l \dot{\theta}^2 \sin(\theta) - m_p g \cos(\theta) \end{Bmatrix}; \quad (3)$$

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} F_x \\ 0 \\ F_l \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

Управление краном заключается в формировании воздействий  $F_x$  в вагонетке и  $F_l$  по кабелю. Две силы  $F_x$  в вагонетке и  $F_l$  по кабелю управляют подъемным краном [1].

*Краткий обзор контроллеров.* Для управления системой (рис. 1) применяются два вида контроллеров. К первому из них относятся классические PID-контроллеры, применяемые в замкнутых системах, а также контроллеры банг-банг и банг-off-банг, применяемые как в замкнутых, так и в разомкнутых системах [1]. Ко второму виду отнесем большое многообразие контроллеров, использующих принципы искусственного интеллекта, такие как экспертные системы, нейронные цепи и нечеткую логику [3–6].

**Управление на основе нечеткой логики (Fuzzy Logic).** Одним из ключевых вопросов построения контроллера с использованием принципов нечеткой логики является выбор функций принадлежности. Воспользуемся рекомендациями [3], где предлагается использовать семь функций для описания каждого из двух входов и выхода контроллера: NB – отрицательный большой; NM – отрицательный средний; NS – отрицательный маленький; Z – нуль; PS – положительный маленький; PM – положительный средний; PB – положительный большой (N – negative; B – big; M – medium; S – small; Z – zero; P – positive). Правила контроллера представлены в табл. 1.

Таблица 1

Поиск обычного нечеткого логического диспетчера  
для угла колебания подъемного крана при движениях

| $\theta \backslash d\theta/dt$ | NB | NM | NS        | Z        | PS        | PM | PB |
|--------------------------------|----|----|-----------|----------|-----------|----|----|
| NB                             | PB | PB | PM        | PM       | <u>PS</u> | PS | Z  |
| NM                             | PB | PM | PM        | PS       | <u>PS</u> | Z  | NS |
| NS                             | PM | PM | PS        | PS       | Z         | NS | NS |
| Z                              | PM | PS | PS        | <u>Z</u> | NS        | NS | NM |
| PS                             | PS | PS | Z         | NS       | NS        | NM | NM |
| PM                             | PS | Z  | <u>NS</u> | NS       | NM        | NM | NB |
| PB                             | Z  | NS | <u>NS</u> | NM       | NM        | NB | NB |

Входные величины описывают переменные, имеющие место при отклонении груза от вертикали. Выбрав Гауссову форму распределения (рис. 2а), можно получить вид поверхности управления. Как видно из рис. 2б, поверхность управления является плоской при двух значениях углов.

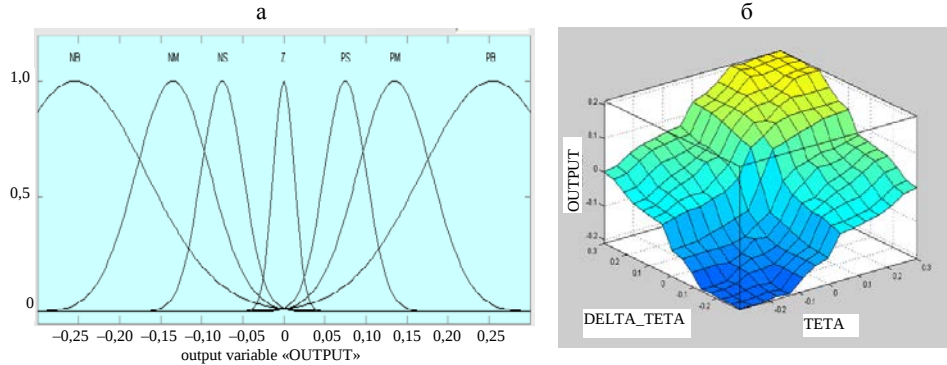


Рис. 2. а – функции принадлежности нечеткого логического диспетчера; б – типичная поверхность нечеткого логического контроллера ( $e$ -TETA и  $de/dt$ -DELTA TETA)

**Теория контроллера грубого набора (Rough Set Theory-RST) и грубый диспетчер.** Теория грубого набора разрабатывается относительно недавно [4]. В целом это математический инструмент, который позволяет представить математическую модель объекта управления с использованием искусственного интеллекта и экспертных оценок функционирования объекта.

Допустим,  $U$  есть универсальный набор, названный множеством, и, что  $R$  есть отношение эквивалентности из  $U$ . При этом пара  $S = (U, R)$  называется местом приближения. Тогда для любого ненулевого подмножества  $X$  из  $U$  получим:

$$A_L(X) = \{x \in U : [x]_R \subseteq X\}; \quad A^U(X) = \{x \in U : [x]_R \cap X \neq \emptyset\}. \quad (5)$$

Множества  $A = (A_L, A^U)$  являются соответственно названными нижним и верхним приближениями  $x$  в  $S$ ; где  $[X]_R$  обозначает класс эквивалентности отношения  $(R)$ , содержащий элемент  $x$ . Ниже приведены фундаментальные понятия теории грубого набора. Для любых двух грубых наборов в месте приближения  $S = (U, R)$  можно показать:  $A \cup B = (A_L \cup B_L, A^U \cup B^U)$ ;  $A \cap B = (A_L \cap B_L, A^U \cap B^U)$ ;  $A \subset B \Leftrightarrow A \cap B = A$ ;  $-A = (U - A^U, U - A_L)$ ;  $A - B = A \cap (-B) = (A_L - B^U, A^U - B_L)$ , где  $(-A)$  – естественная инверсия грубого набора  $A$ .

**Нечетко грубое множество.** Допустим, что  $(U, R)$  является местом приближения, и предположим  $X \subseteq U$ . В области разделения  $U/R$ , «грубый набор  $X$ », обозначаем через  $R(X) = (X_L, X^U)$ . Таким образом, в месте приближения  $(U, R)$  набор  $X$  определен двумя приближениями. Один от внутренней стороны, который называем более низким приближением  $X$ , и другой – от внешней стороны, который называем верхним приближением  $X$ .

Если набор  $X$  определен непосредственно, то в этом приближении нет никакой грубости. Иначе там существует некоторая грубость из-за грубой границы. Чтобы выразить в цифровой форме степень приближения набора, используются все классы эквивалентности  $R$ . Точность приближения  $X$  в  $S$  будет определяться выражением [7]  $\alpha_R(X) = E(R_L(X)) / E(R^U X)$ ,  $X \neq 0$ , где  $E$  – количество элементов в наборе. Поскольку мы можем видеть, если  $X$  в  $R$ -точное в  $A_R$ , тогда  $\alpha_R(X) = 1$ . Если  $X$  –  $R$ -грубое, приближенный в  $S$ , тогда  $0 \leq \alpha_R(X) < 1$ .

Коэффициент, характеризующий неуверенность в принадлежности элемента к набору относительно охваченных сообщений:  $\mu_R(X) = E([x]_R \cap X) / E(X)$ , что можно использовать в синтезе грубого диспетчера (рис. 3б).

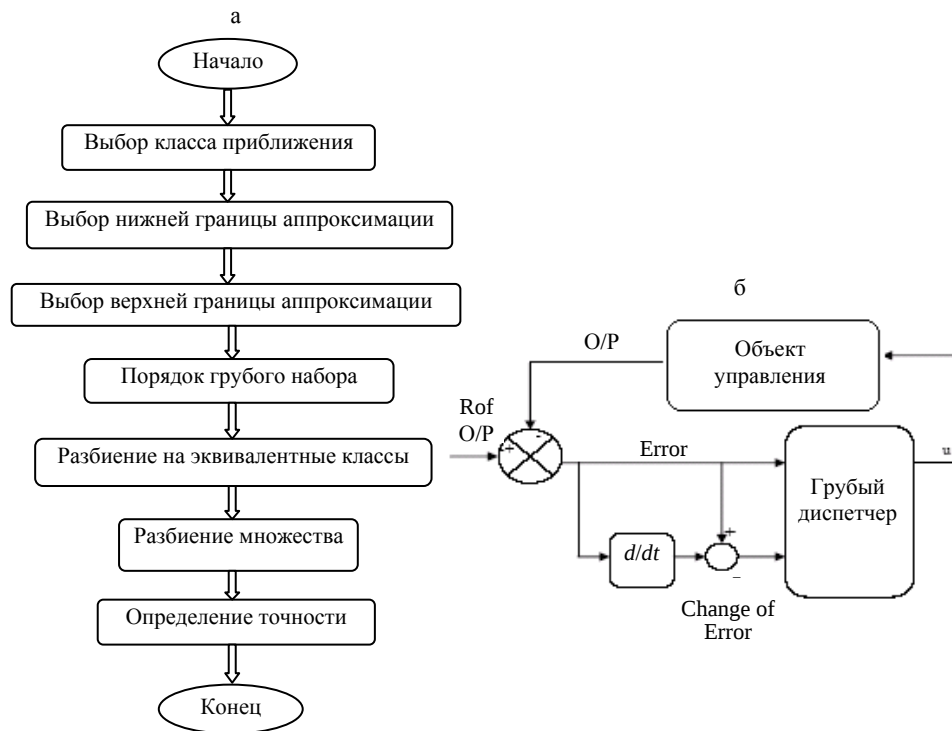


Рис. 3. а – алгоритм проектирования грубого диспетчера;  
б – блок-схема грубого диспетчера

**Грубый диспетчер.** Главные неудобства нечеткого логического диспетчера  $s$  – потребность приобретения и предварительной обработки знания человеческого оператора о процессе, которым управляют, последовательных об основаниях правил поиска и отнимающих много времени дефазификационных методах. Для упрощения только 49 правил, как показано в табл. 1, были созданы с помощью обычной нечеткой логики, а также разработаны для угла колебания подъемного крана при движении. Для грубого диспетчера сконструируем новую таблицу решения, где признаки

$\left(e, \frac{de}{dt}\right)$  условия соответствовали бы признаку решения  $U$ . В новой таблице неиспользуемое отношение относительно условия и признаков решения исключено (3-я и 5-я строки табл. 1).

Очевидно, что разлагаемое отношение делит все ряды таблицы решения на классы эквивалентности. Меры точности были вычислены. Так,  $U = \{49 \text{ действий}\}$  и верхний грубый набор  $R^U = \{49\}$ , в то время как классы эквивалентности следующие: в табл. 1 можно видеть число каждого элемента, которое равно  $E(R^U X)$  в каждом ряду.  $NB = \{3\}$ ,  $NM = \{7\}$ ,  $NS = \{11\}$ ,  $Z = \{7\}$ ,  $PS = \{11\}$ ,  $PM = \{7\}$ ,  $PB = \{3\}$ . Для каждой строки (ряда) имеем:

$$\alpha_R(X1) = \alpha_R(NB) = \frac{E(R_L(NB))}{E(R^U(NB))} = 1/3; \quad \alpha_R(X2) = \alpha_R(NM) = 1/7;$$

$$\alpha_R(X3) = \alpha_R(NS) = 0/11; \quad \alpha_R(X4) = \alpha_R(Z) = 1/7; \quad \alpha_R(X5) = \alpha_R(PS) = 0/11;$$

$$\alpha_R(X6) = \alpha_R(PM) = 1/7; \quad \alpha_R(X7) = \alpha_R(PB) = 1/7,$$

где  $E(R_L(X_i))$  – сумма числа элементов, одинаковых в столбце и строке. В табл. 1 эти элементы выделены подчеркиванием.

Поэтому количество правил уменьшается и теперь равно 25 (табл. 2). Место входа разделено на три части (два входа  $e, \frac{de}{dt}$  и один выход).

Место грубого диспетчера в системе управления приведено на рис. 3а.

**Моделирование.** Для подтверждения эффективности предлагаемого подхода реализован численный эксперимент; приняты  $L = 10$  м,  $X = 10$  м,  $m = 20$  кг и  $L = 20$  м,  $X = 10$  м,  $m = 20$  кг; нормализованное время  $\bar{t}$ , где  $\bar{t} = t / (2\pi / \sqrt{g/l})$ ;  $t$  – время перемещения груза в заданную позицию.

Таблица 2

Таблица поиска грубого диспетчера

| $\begin{matrix} de/dt \\ e \end{matrix}$ | PL             | PS             | Z              | NS             | NL             |
|------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| NL                                       | $\alpha_R(X4)$ | $\alpha_R(X3)$ | $\alpha_R(X2)$ | $\alpha_R(X1)$ | $\alpha_R(X7)$ |
| NS                                       | $\alpha_R(X5)$ | $\alpha_R(X4)$ | $\alpha_R(X3)$ | $\alpha_R(X2)$ | $\alpha_R(X1)$ |
| Z                                        | $\alpha_R(X6)$ | $\alpha_R(X5)$ | $\alpha_R(X4)$ | $\alpha_R(X3)$ | $\alpha_R(X2)$ |
| PS                                       | $\alpha_R(X7)$ | $\alpha_R(X6)$ | $\alpha_R(X5)$ | $\alpha_R(X4)$ | $\alpha_R(X3)$ |
| PL                                       | $\alpha_R(X1)$ | $\alpha_R(X7)$ | $\alpha_R(X6)$ | $\alpha_R(X5)$ | $\alpha_R(X4)$ |

В табл. 3 приведены сравнительные показатели управления при использовании нечетких и грубых диспетчеров (ISE – интегральная квадратичная ошибка, IAE – интегральная абсолютная ошибка);

$$X = l \sin \theta(t); \quad ISE = \sum (X)^2 = \sum (l \sin \theta(t))^2; \quad IAE = \sum |X| = \sum |l \sin \theta(t)|.$$

Таблица 3

## Результаты моделирования

|       | ISE  | IAE  | TIME |
|-------|------|------|------|
| ROUGH | 2,3  | 3,1  | 8    |
| FUZZY | 3,56 | 3,98 | 11   |

По приведенным критериям, а также по времени регулирования грубый контроллер имеет преимущество перед контроллером на основе нечеткой логики, что говорит о перспективности его применения для определенного класса систем.

## ВЫВОДЫ

1. Проанализированы характеристики контроллера управления подъемным краном, построенного на основе принципов нечеткой логики.
2. Предложена процедура проектирования логического контроллера на основе принципов нечеткой логики и теории грубого набора.
3. Сравнительные характеристики, полученные в результате цифрового моделирования, показывают преимущества контроллера грубого набора по ряду параметров динамического процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кабанов, С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях / С. А. Кабанов. – СПб., 1997.
2. Pawlak, Z. // Rough Set and Fuzzy Sets and Systems. – 1985. – № 17. – P. 72–79.
3. Dogan, Coker. Fuzzy Rough Sets are Intuitionistic L-Fuzzy Sets / Coker Dogan // Fuzzy Sets and Systems. – 1998. – Vol. 96. – P. 170–175.
4. Lin, T. Y. Rough Set Theory in Very Large Databases / T. Y. Lin // Symposium on Modeling, Analysis and Simulation. – 1996. – Vol. 2. – P. 9–12.
5. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А. В. Леоненков. – СПб., 2003.
6. Опейко, О. Ф. Микропроцессорные средства в автоматизированном электроприводе / О. Ф. Опейко, Ю. Н. Петренко. – Минск: Амалфея, 2008. – 340 с.
7. Kankana, B. Fuzziness in Rough Set / C. Kankana, B. Ranjit // Fuzzy Sets and Systems. – 2000. – Vol. 110. – P. 15–22.

Представлена кафедрой электропривода  
и автоматизации промышленных установок  
и технологических комплексов

Поступила 22.02.2008