

НЕЧЕТКО – КОГНИТИВНЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВЫПЛАВКИ FESI

Введение. Функционирующие в настоящее время автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) обеспечивают непосредственное управление выплавкой ферросплавов, включая выдачу рекомендаций по соотношению сырьевых материалов в шихте. Однако на ход технологического процесса оказывает влияние большое число возмущений, которые в большинстве своем сегодня не могут быть измерены. С другой стороны не все контролируемые параметры могут вводиться в систему автоматически, из-за чего рекомендации по управлению шихтовым режимом не всегда соответствуют требованиям технологии [1].

На сегодняшний момент существует большое число методов идентификации параметров АСУ ТП и процессов, происходящих в них. При этом выбор тех или иных методов зависит от объема априорной информации, о поведении системы и степени ее сложности. С другой стороны, при исследовании сложных систем не представляется возможным построить достоверную математическую модель из-за большой неопределенности о взаимосвязях элементов системы. В этом случае представляет интерес другой подход, основывающийся на представлении системы в виде нечеткой когнитивной модели Fuzzy Cognitive Maps (FCM) или на русском нечеткой когнитивной карты (НКК).

Типы нечетких когнитивных карт. FCM являются результатом слияния двух научных направлений - нечеткой логики (“fuzzy logic”) и системной динамики (“system dynamics”). Созданная в 60-х годах профессором Лотфи Заде (Lotfi Zadeh) [2], нечеткая логика за время своего развития претерпела ряд существенных изменений и дополнений. Прежде всего, благодаря усилиям Бартоломея Коско (Bart Kosko) [3, 4] была исследована взаимосвязь нечеткой логики и теории нейронных сетей, доказана основополагающая FAT-теорема (Fuzzy Approximation Theorem), подтвердившая полноту нечеткой логики. И наконец, в 1986 г. увидели свет изобретенные Коско FCM - нечеткие когнитивные модели, для моделирования причинных взаимосвязей, выявленных между концептами некоторой области. Анализ когнитивной модели - карты позволяет быстро получить информацию о поведении системы, а в некоторых случаях провести численные эксперименты.

В отличие от простых когнитивных карт, FCM представляют собой нечеткий ориентированный граф с обратной связью, узлы которого являются нечеткими множествами. Направленные ребра графа не только отражают причинно-следственные связи между концептами, но и определяют степень влияния (вес) связываемых концептов. Таким образом,

FCM объединяет в себе свойства нечетких систем и нейронных сетей. Активное использование нечетких когнитивных моделей (карт) в качестве средства моделирования систем обусловлено возможностью наглядного представления анализируемой системы и легкостью интерпретации причинно-следственных связей между концептами.

В настоящее время математический аппарат анализа нечетких когнитивных карт хорошо развит и существует множество алгоритмов построения и функционирования таких моделей. Процесс формирования и использования FCM состоит из следующих шагов:

1. Определение списка концептов, характеризующих некоторые события, действия, величины и/или цели.
2. Определение степеней влияния между каждой парой концептов или задание функций принадлежности на каждом терме.
3. Построение когнитивной карты.
4. Анализ и интерпретация FCM.

Простые FCM, или традиционные когнитивные карты, содержат связи, которые могут принимать одно из трех значений из множества $\{-1, 0, 1\}$. Значение связи $+1$ между двумя концептами означает положительное влияние первого на второй, -1 – отрицательное влияние, а ноль говорит об отсутствии отношении причинности между концептами и на карте связь не обозначается. Такая простая разновидность когнитивных карт используются для качественной оценки влияния отдельных концептов на устойчивость всей системы.

Нечеткой когнитивной картой называется причинно-следственная сеть $G = (C, W)$, где C – множество концептов, W – множество связей между концептами $w(c_i, c_j) \in W \rightarrow [-1; 1]$. Это означает, что в FCM устанавливаются числовые значения степеней причинности связей, показывающей, как один концепт влияет на другой. При построении карты экспертам чаще всего предлагают воспользоваться следующей шкалой: влияет сильно ($+1.0$), влияет (0.5), не влияет (0.0), влияет отрицательно (-0.5) и влияет очень отрицательно (-1.0). В случае, когда значения весов причинно-следственных связей извлекаются из данных в процессе обучения, веса принимают произвольные нечеткие значения из множества $\{-1; 1\}$. На основе построенной нечеткой когнитивной карты формируются матрицы взаимовлияний концептов друг на друга, после чего исследуется поведение и устойчивость построенной карты. Рассчитываются системные показатели нечеткой карты – консонансы и диссонансы влияния концептов друг на друга, вычисление которых основано на сравнении контуров, образованных из концептов карты по критерию соответствия, баланса и силы влияния.

Отечественными исследователями описан новый тип когнитивных карт – обобщенные нечеткие когнитивные карты [5]. Они представляют собой нечеткую причинно-следственную сеть вида $G = (E, W)$, где $E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$ – множество концептов, $W = \{w(e_i, e_j)\}$ – множество связей

между ними. Каждый концепт $e_i, i = 1, \dots, P$ характеризуется термомножеством лингвистической переменной

$$T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_{m_j}^i\} \quad (1)$$

где m_j – число типовых состояний концепта. Для описания каждого термина T_k^i строится термножество с функцией принадлежности $\mu_{T_k^i}(x)$. Связи между типовыми состояниями каждой пары концептов задаются нечеткими переменными, описываемыми соответствующими нечеткими множествами.

Разновидность обобщенной нечеткой когнитивной карты определяется выбранной формой функций принадлежности (треугольная, трапециидальная, гауссова и др.), способом нечеткого логического вывода (по Мамдами, Цукамото, Ларсену), процедуры дефазификации и некоторыми другими параметрами и свойствами. В последующих разделах излагается один из разработанных подходов к построению обобщенных нечетких когнитивных карт и его применение к моделированию процесса выплавки FeSi.

Построение обобщенной нечеткой когнитивной карты. Предлагается один из подходов к построению обобщенной нечеткой когнитивной карты, в которой выделяются входные и выходные переменные, а связи описываются нечеткими правилами. Во множестве концептов C нечеткой причинно-следственной сети $G = (C, W)$ выделяется множество входных воздействий $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, множество выходных воздействий $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ и промежуточные концепты $E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$. $W = \{w(c_i, c_j)\}$ – множество связей между концептами, $W \in [0; 1]$. Эти связи выражают степень взаимовлияния одного концепта на другой и могут принимать только положительные значения. В простом случае можно ограничиться бинарными связями: $w(c_i, c_j) = 1$ – связь существует и $w(c_i, c_j) = 0$ при ее отсутствии. Каждой такой связи $w(c_i, c_j)$ ставится в соответствие нечеткое правило $r(c_i, c_j)$ с терминами T_i и T_j согласно выражению (1). Каждому правилу соответствуют функции принадлежности условия и следствия.

Правила, содержащие одинаковые следствия и относящиеся к одному и тому же взаимодействию, объединяются в одно с помощью логического суммирования. При этом количественный результат взаимодействия между элементами определяется на основе нечеткого вывода. Для определенности дальнейших рассуждений выберем в качестве механизма нечеткого вывода способ Мамдами, а для приведения к четкости воспользуемся центроидным методом [5]. Представим нечеткое правило вывода следующим образом

если x это A , то y это B

называется нечеткой импликацией $A \rightarrow B$, если A и B – лингвистические значения, идентифицированные нечетким способом через соответствующие функции принадлежности для переменных.

Часть “ x это A ” называется условием (предпосылкой), а “ y это B ” – след-

ствием (заключением).

В общем случае для N -мерного вектора x нечеткое правило записывается в виде:

если x_1 это A_1 и x_2 это A_2 и \dots и x_N это A_N , то y это $B, A_1, A_2, \dots, A_N, B$ обозначают величины соответствующих коэффициентов принадлежности

$$\mu_A(x_i), i = 1, 2, \dots, N, \mu_B(y).$$

Для определения результирующего уровня активации применяется оператор логического умножения для отдельных составляющих условия в правиле:

$$\mu_A^j(x) = \min_i(\mu_A(x_i)). \tag{2}$$

Агрегированная по всем правилам функция принадлежности определяется логическим суммированием

$$\mu_B(y) = \max_{j=1, N}(\mu_A^j(x)\mu_B^j(y)), \tag{3}$$

а точечная оценка результата концепта вычисляется относительно центра области:

$$y_c = \frac{\int \mu_B(y)ydy}{\int \mu_B(y)dy}. \tag{4}$$

При наличии матрицы взаимовлияний концептов друг на друга с нечеткими числами формула (3) примет вид

$$\mu_B^i(y) = \max_{j=1, N}(\mu_A^j(x \cdot w(c_i, c_j))\mu_B^j(y)).$$

Функционирование такой обобщенной НКК в направлении от входа к выходу определяется зависимостью $Y = F(X, W)$, где X – входные воздействия моделируемой системы, включая и внешние возмущающие факторы. При наличии обратной связи в системе функциональная зависимость принимает рекуррентный вид

$$Y(t) = F[X(t-1), Y(t-1), W], \tag{5}$$

где t – время развития системы.

Построенная нечеткая когнитивная карта, функционирующая по алгоритму (2-5), позволяет исследовать поведение системы при варьировании величин компонент вектора X и матрицы связей W .

В качестве примера рассмотрим моделирование процесса выплавки ферросилиция (FeSi).

Моделирование процесса выплавки FeSi. Процесс выплавки FeSi – это сложный технологический процесс, представляемая кортежем

$$\langle D(t), S(t), Y(t), E(t), t \rangle, \tag{6}$$

в котором учитываются следующие параметры: D – организационные действия руководства, требования со стороны инвесторов и т. д.; S – факторы внешней среды; Y – выходные показатели развития процесса; E – множество концептов, связывающих входные и выходные переменные; t – время. Ставится задача эффективного управления данной системой и исследования ее поведения во времени.

Система (6) характеризуется большой неопределенностью элементов, входящих в нее (человеческий и др. факторы), и для моделирования развития такой системы не представляется возможным получить ее точное математическое описание. Поэтому представим модель процесса выплавки FeSi в виде обобщенной нечеткой когнитивной карты (рисунок 1).

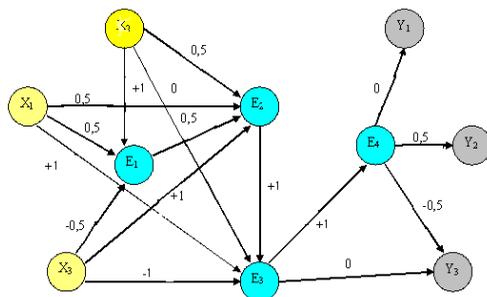


Рис. 1 – Модель процесса выплавки FeSi в виде нечеткой когнитивной карты

Введем входные переменные:

- X_1 – баланс печи недостаточен;
- X_2 – баланс печи меньше избытка;
- X_3 – баланс печи избыточен.

Выделим концепты:

- E_1 – качество продукции;
- E_2 – управление производством;
- E_3 – объем производства;
- E_4 – рентабельность предприятия.

Определим выходные переменные:

- Y_1 – недостаточное содержание кокса в печи;
- Y_2 – повышенное содержание кокса в печи;
- Y_3 – в печи преобладает состояние “зашлакованности”.

Построенная нечеткая когнитивная карта, моделирующая поведение процесса выплавки FeSi, охватывает его основные действующие элементы:

- показатели входных характеристик (концепты X_1, \dots, X_3);
- действия предприятий (концепты E_1, E_2);
- характеристики, определяемые деятельностью предприятий – объем производства E_3 и рентабельность E_4 .
- показатели развития процесса выплавки FeSi (выходные переменные Y_1, \dots, Y_3).

Система (6) функционирует в виде нечеткой сети по алгоритмам (2-5), где t – время развития системы.

С помощью построенной нечеткой когнитивной карты с заданными нечеткими правилами и весовыми связями между концептами исследуем влияние на процесс выплавки FeSi, условий внешней среды – погодных факторов и уровня тарифов на энергоносители. Это влияние определяется тремя правилами: $r(x_1, y_1)$, $r(x_2, y_2)$, $r(x_3, y_3)$, с соответствующими им функциями принадлежности на каждом терме (рисунок 2).

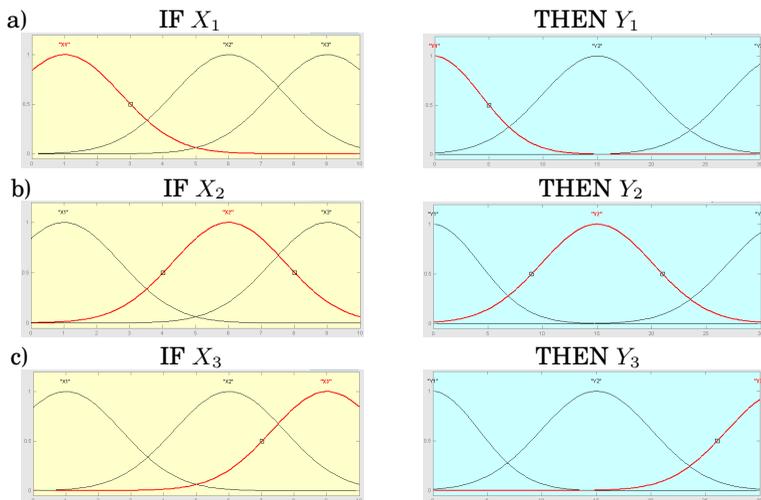


Рис. 2 – Функции принадлежности для правил, описывающих влияние: а – Если баланс печи недостаточен, то содержание кокса в печи недостаточное; б – Если баланс печи меньше избыточного, то содержание кокса в печи повышенное; с – Если баланс печи избыточен, то в печи преобладает состояние “зашлакованности”.

В качестве функции принадлежности правил была выбрана функция гауссовского типа, получившая широкое распространение в нечетких сетях. Она описывается формулой

$$\mu(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (7)$$

и оперирует двумя параметрами: σ и c . Параметр c обозначает центр нечеткого множества, а параметр σ отвечает за крутизну функции.

Рисунок 2 дает ответ на вопрос, как изменится поведение системы в зависимости от выделенных нами концептов.

Построение функций принадлежности вида (7) может вестись двумя способами. В первом случае эксперты устанавливают меры условия и

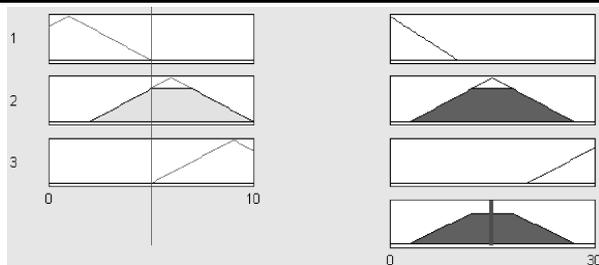


Рис. 3 – Результат работы правил (по 10 - балльной шкале баланс печи равен 5, а по 30 – балльной шкале содержание кокса в печи равно 15)

следствия, а также формулируют правила в виде нечетких высказываний. Как известно, данный подход имеет существенный недостаток, заключающийся в субъективности мнений экспертов. Поэтому перспективным направлением является разработка алгоритмов и методов обучения обобщенных нечетких когнитивных карт на экспериментальных данных. Кроме того, экспертный и адаптивный подходы можно комбинировать, например, когда только часть правил задается экспертами.

Вывод. Предложенный нечетко-когнитивный подход к построению имитационных моделей сложных систем позволяет, реализовать эффективное управление такими системами без построения точной математической модели представления FCM процесса выплавки FeSi достаточно корректно представляет углеродный баланс в печи, что подтверждает результат работы построенной FCM FeSi на рисунке 2. Наглядность нечетких когнитивных карт, возможности проведения численного моделирования, а также комбинирование экспертного и адаптивного подходов для построения правил делают обобщенные нечеткие когнитивные карты удобным средством описания систем.

Литература

1. Михалев А.И., Зубов В.Л., Лысый Д.А. Идентификатор состояния АСУ ТП выплавки FeSi // Системні технології. Зб. наук. праць. – Вип. 3(11) 2000. – С. 80-94.
2. Zadeh, Lotfi. Fuzzy Sets / Information and Control, 8(3), June 1965, pp.338-53.
3. Kosko, Bart. Fuzzy thinking / Hyperion, 1993. 5. Kosko, Bart. Neural Networks and Fuzzy Systems / Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
4. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps // International Journal of Man-Machine Studies, 1986. – Vol. 1. – P. 65-75.
5. Компьютерная поддержка сложных организационно-технических систем / В.В. Борисов, И.А. Бычков, А.В. Дементьев, А.П. Соловьев, А.С. Федулов – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 154 с.