М.И. Дли
С.А. Михайлов
Т.В. Какатунова

Функциональные когнитивные карты для моделирования процессов энергосбережения на региональном уровне

Обоснована целесообразность использования когнитивных карт для моделирования процессов энергосбережения на уровне региона. Предложена новая разновидность нечетких когнитивных карт, учитывающая неопределенность системных характеристик. Разработана трехуровневая когнитивная карта, отражающая взаимосвязь элементов стратегий социально-экономического развития региона, энергетических стратегий региона и региональных стратегий энергосбережения.

Ключевые слова: нечеткая когнитивная карта, энергосбережение, моделирование

M.I.Dli
S.A.Mihajlov
T.V.Kakatunova

Functional cognitive cards for modelling of processes of power savings at regional level

The appropriateness of use of cognitive maps to simulate the processes of energy saving at the regional level. A new kind of fuzzy cognitive maps, taking into account the uncertainty of system performance. A three-level cognitive map showing the relationship of elements of strategies for social-economic development, energy policies in the region and regional strategies for energy conservation.

Keywords: fuzzy cognitive map, energy saving, simulation

Одним из условий устойчивого социально-экономического развития Российской Федерации является снижение энергоемкости отечествен-

ной экономики. В этой связи энергосбережение становится важнейшим фактором повышения энергоэффективности региональных хозяйственных образований, а также результативности реализации стратегий социально-экономического развития регионов.

Определение взаимного влияния показателей реализации стратегий социально-экономического развития региона, энергетических стратегий региона и региональных стратегий энергосбережения позволит обеспечить согласованность процессов их разработки, реализации и контроля выполнения. Учитывая сложный характер указанного влияния, для решения данной задачи целесообразно использовать аппарат когнитивного моделирования.

Когнитивные карты представляют собой разновидность математических моделей для описания сложной системы в виде множества концептов (узлов), отображающих ее системные факторы (переменные), и выявления причинно-следственных отношений (отношений влияния) между ними с учетом воздействия на эти факторы или изменения характера отношений.

Эффективность использования существующих методов построения и применение когнитивных карт в качестве моделей слабо сложных систем обусловлена: возможностями наглядного представления анализируемой системы, моделирования в условиях отсутствия статистической информации о состояниях системы, оценки эффективности управленческих решений.[1] Одним из направлений развития методов когнитивного моделирования является использование методов нечеткой логики.[2] В рамках данного подхода связи между концептами исследуемой системы представляются в виде термов нечетких множеств.

В тоже время предлагаемые процедуры когнитивного моделирования при использовании процедур нечеткой логики не учитывают некото-

[1] Борисов В. В., Бычков И. А., Федулов А. С. и др. Компьютерная поддержка сложных организационно-технических систем. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002.
[2] Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М: Изд-во «Физматлит», 2001

рые особенности процессов энергосбережения на региональном уровне. Во-первых, возникает необходимость определения системных показателей (консонанс, диссонанс, взаимное влияние и т.д.), которые рассчитываются в «традиционных» когнитивных картах. Во-вторых, связи между концептами изменяются во времени, при этом может поменяться не только значение, но и характер влияния.

Для учета первой особенности, исходя из результатов проведенного исследования для моделирования взаимосвязи результатов реализации стратегий энергосбережения на региональном уровне предлагается новая разновидность нечетких когнитивных карт, учитывающая неопределенность системных характеристик, отличающаяся от известных тем, что:

- отношения влияния между концептами представлены нечеткими множествами, при этом проблема учета отрицательного влияния концептов решается путем расширения базового множества для этих нечетких множеств на область отрицательных значений;
- для решения задачи аккумулирования влияния нескольких входных концептов на один выходной концепт, а также для определения опосредованного влияния концептов друг на друга используется интервальный метод с реализацией операций над интервалами α-уровней нечетких множеств (чисел), представляющих состояния концептов и отношения их влияния друг на друга;
- системные характеристики нечеткой когнитивной карты определяются на основе транзитивно замкнутой матрицы взаимовлияний, элементы которой представляют нечеткие множества, заданные на областях положительных и отрицательных значений базовых множеств; расчет системных показателей реализуется на основе интервального метода с использованием операций над интервалами α-уровней нечетких множеств; а сами системные показатели представляют собой модифицированные в результате преобразований нечеткие множества либо синглтоны (одноточечные нечеткие множества);

• в результате проводимого анализа учитывается неопределенность используемых системных характеристик.

Рассмотрим основные этапы построения и использования предлагаемой разновидности нечеткой когнитивной карты.

Этап 1. Выделение перечня концептов (элементов исследуемой системы).

Согласованный список концептов предложенного варианта нечеткой когнитивной карты формируется в результате опроса и согласования мнений группы экспертов в соответствии с известными процедурами экспертного опроса и обработки результатов экспертного опроса.

Этап 2. Описание взаимного влияния концептов друг на друга.

Отношения влияния между концептами K_i и K_j нечеткой когнитивной карты данного типа представлены в виде нечетких множеств $\tilde{w}_{ij}$. При этом проблема учета отрицательного влияния концептов решается путем расширения базового множества для этих нечетких множеств на область отрицательных значений (рис. 1). Здесь нотация «$-\tilde{w}_{ij}$» обозначает нечеткое множество, заданное на области отрицательных D^{-}_{ij} значений базового множества D_{ij}.

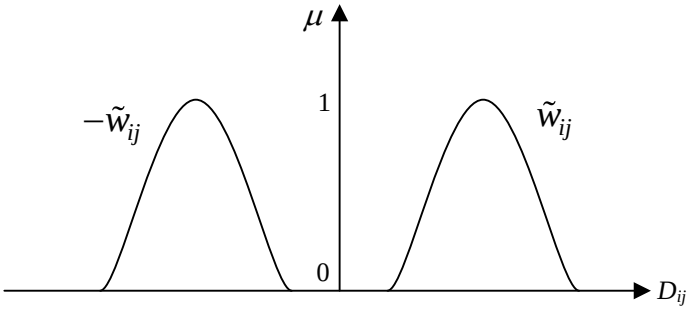

Рисунок 1 – Пример расширения базового множества для нечетких множеств на область отрицательных значений

Данные нечеткие множества рассматриваются как элементы нечеткой матрицы смежности для графа предложенной разновидности нечеткой когнитивной карты. Так как нечеткие множества, характеризующие влия-

ния концептов друг на друга могут быть заданы на области отрицательных значений базового множества, то проблема обработки отрицательных влияний решается за счет раздельной обработки нечетких множеств, заданных на областях положительных D^{+}_{ij} и отрицательных D^{-}_{ij} значений базового множества D_{ij}.

Нечеткие значения выходного концепта вычисляются на основе интервального метода с использованием операций над интервалами α-уровней нечетких множеств. Например, при использовании связки min передача непосредственного влияния концепта K_i на концепт K_j осуществляется следующим образом:

$$\tilde{K}_j = \min(\tilde{K}_i,\ \tilde{w}_{ij})\,. \qquad (1)$$

Этап 3. Определение влияния входных концептов на один выходной концепт.

Отдельные нечеткие влияния входных концептов, непосредственно воздействующие на выходной концепт объединяются на основе интервального метода с использованием операций суммирования и умножения над интервалами α-уровней соответствующих нечетких множеств:

$$\tilde{K}_j = \sum_{i=1}^{N}(\tilde{w}_{ij} \cdot \tilde{K}_i). \qquad (2)$$

Этап 4. Определение опосредованного влияния концептов.

Задача нахождения опосредованного влияния концепта K_i на концепт K_y заключается в определении совокупного причинного эффекта или «веса» того пути между этими концептами, который характеризуется максимальным совокупным значением влияния $\tilde{w}_{iy}$.

Определим l-й путь между рассматриваемыми концептами K_i и K_y нечеткой когнитивной карты следующим образом: $K_i \xrightarrow{l} K_y$: $P_l = (i,\ z_1^l,\ z_2^l,\ ...,\ z_n^l,\ y)$, $l = 1, \ldots, m$, где m – возможное число путей между концептами K_i и K_y. Тогда влияние $\tilde{w}_{iy}$ концепта K_i на концепт K_y определится в соответствии с выражением:

$$\tilde{w}_{iy} = \sum_{l=1}^{m} \left(\bigotimes_{p \in P_l} \tilde{w}_{p,p+1} \right). \quad (3)$$

Для определения опосредованного влияния всех концептов карты друг на друга используется операция транзитивного замыкания квадратной нечеткой матрицы взаимовлияний, элементы которой представляют нечеткие множества:

$$\widehat{W} = W \vee W^2 \vee W^3 \vee \ldots, \quad (4)$$

где степени нечетких матриц вычисляются на основе операции макси-триангулярной композиции над интервалами α-уровней соответствующих нечетких множеств влияний:

$$W^k = W^{k-1} \circ W. \quad (5)$$

Этап 5. Определение системных характеристик нечеткой когнитивной карты.

Для определения взаимовлияния концептов от исходной нечеткой когнитивной карты с положительными и отрицательными влияниями, представленными нечеткими множествами $\tilde{w}_{ij}$, заданными на областях положительных D^{+}_{ij} и отрицательных D^{-}_{ij} значений базового множества D_{ij}, соответственно, переходим к нечеткой матрице положительных связей R размером $2n \times 2n$, элементы которой определяются из матрицы $W = \left\| \tilde{w}_{ij} \right\|_{n \times n}$ путем замены:

$$\begin{gathered} \text{если } \tilde{w}_{ij} \in D^{+}_{ij}, \text{ то } \tilde{r}_{2i-1,2j-1} = \tilde{w}_{ij}, \ \tilde{r}_{2i,2j} = \tilde{w}_{ij}, \\ \text{если } \tilde{w}_{ij} \in D^{-}_{ij}, \text{ то } \tilde{r}_{2i-1,2j} = -\tilde{w}_{ij}, \ \tilde{r}_{2i,2j-1} = -\tilde{w}_{ij}. \end{gathered} \quad (6)$$

Остальные элементы принимают нулевые значения.

В случае амбивалентности исходной когнитивной карты положительно-отрицательная пара влияния преобразуется по аналогичному алгоритму, только вместо нулей на диагоналях ставятся определенные значения. Если необходимо, то при учете мнений нескольких экспертов результирующие связи в исходной карте получаются усреднением отдельно

положительных и отрицательных связей по оценкам всех экспертов с учетом значимости каждого эксперта. Кроме того, для снижения диссонанса при формировании отношений взаимовлияния концептов в исходной карте могут быть использованы проверенные психометрические меры, на которых основаны свертки в моделях предпочтений. [1]

Согласованные отношения взаимовлияния концептов определяются в результате транзитивного замыкания матрицы R:

$$\hat{R} = R \vee R^2 \vee R^3 \vee \ldots . \qquad (7)$$

Представим полученный результат в виде матрицы, состоящей из положительно-отрицательных пар элементов $(v_{ij},\ \bar{v}_{ij})$, образованных по правилу:

$$\begin{aligned} v_{ij} &= \max\,(\tilde{r}_{2i-1,\,2j-1},\ \tilde{r}_{2i,\,2j}), \\ \bar{v}_{ij} &= -\max\,(\tilde{r}_{2i-1,\,2j},\ \tilde{r}_{2i,\,2j-1}). \end{aligned} \qquad (8)$$

Здесь знак «–» во втором выражении означает, что $\bar{v}_{ij}$, задано на области отрицательных D^{-}_{ij} значений базового множества D_{ij}.

Элементы матрицы $V = \left\|(v_{ij},\ \bar{v}_{ij})\right\|$ могут использоваться для определения системных показателей.

На основе этой матрицы определяются представленные ниже системные показатели предложенной разновидности нечеткой когнитивной карты, по которым определяется взаимный консонанс, диссонанс, положительное и отрицательное влияние концептов друг на друга и на систему в целом и другие системные и интегральные показатели, используемые для исследования свойств анализируемой системы. Отметим, что общий вид формул для расчета практически совпадают с используемыми в рамках традиционного подхода.[2] Однако расчет системных показателей реализуется на основе интервального метода с использованием операций сложения, умножения и деления интервалов α-уровней нечетких множеств, а са-

[1] Козелецкий Ю. Психологическая теория решений. – М.: Прогресс, 1979.
[2] Силов В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. – М.:ИНПРО-РЕС, 1995 г.

ми системные показатели представляют собой модифицированные в результате преобразований нечеткие множества либо синглтоны (одноточечные нечеткие множества).

Этап 6. Анализ системных характеристик нечеткой когнитивной карты.

По результатам рассчитанных характеристик предложенной когнитивной карты осуществляется анализ, при этом учитывается неопределенность используемых системных характеристик.

Для учета второй особенности (изменение во времени связей между концептами) при анализе динамики построеннной модели предлагается использовать следующие модифицированные выражения:

$$K_j(t+1) = K_j(t) + \sum_{i=1}^{N} sign(\Delta K_i(t))\tilde{w}_{ij}\Delta K_i(t), \qquad (9)$$

и

$$K_j(t+1) = K_j(t) + \sum_{i=1}^{N} \tilde{w}_{ij}(\Delta K_i(t), t)\Delta K_i(t) \qquad (10)$$

где t, $t+1$ – дискретные моменты времени; *sign* – функция знака.

Выражение (9) используется для описания связей, характер которых изменяется во времени. Например, инвестиции в энергосбережение на начальном этапе приводят к снижению показателей экономической эффективности предприятия (влияние на показатели рентабельности отрицательное), а затем, в случае успешной реализации инвестиционного проекта, влияние становится положительным. К возникновению связей данного типа приводит также учет сезонного фактора.

Выражение (10) учитывает более сложные типы связей, величина и характер которых зависит от значений выходного концепта. Указанная зависимость может быть описана некоторой функцией. Например, связь влияния величины инвестиций в определенную отрасль региональной экономики на поступление в региональный бюджет может быть описана функцией вида, приведенного на рисунке 2.

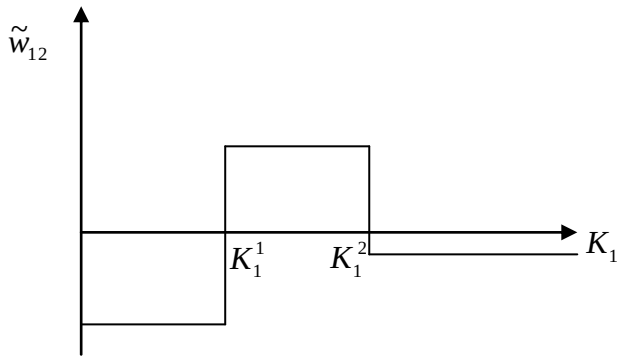

Рисунок 2 - Зависимость связей между концептами «объем инвестиций» и «поступления в бюджет»

Данный вид функции связан с тем, что на начальном участке до определенного уровня инвестиций K_1^1 связь между рассматриваемыми концептами отрицательна, т.к. снижается прибыль предприятий. На третьем участке (от K_1^2) чрезмерные инвестиции могут привести к росту предложения товаров и услуг и, соответственно, росту конкуренции, снижению цен, прибыли, что, в свою очередь, вызовет снижение доходов бюджета.

Выражения (9) и (10) могут быть представлены в обобщенном виде:

$$K_j(t+1) = K_j(t) \oplus \sum_{i=1}^{N} \tilde{w}_{ij}(\Delta K_i(t), t) \otimes \Delta K_i(t),$$

где $\oplus$ и $\otimes$ операции идентифицированной аддитивной и мультипликативной свертки соответственно.

Рассмотрим трехуровневую когнитивную карту, отражающую взаимосвязь элементов стратегий социально-экономического развития региона, энергетических стратегий региона и региональных стратегий энергосбережения (концепты a_i, $в_j$, c_l соответственно), приведенную на рисунке 3. На рисунке для удобства восприятия показан только характер связей; пунктирными стрелками приведены связи, описываемые при помощи выражений (9) и (10).

На рисунке 3 введены следующие обозначения.

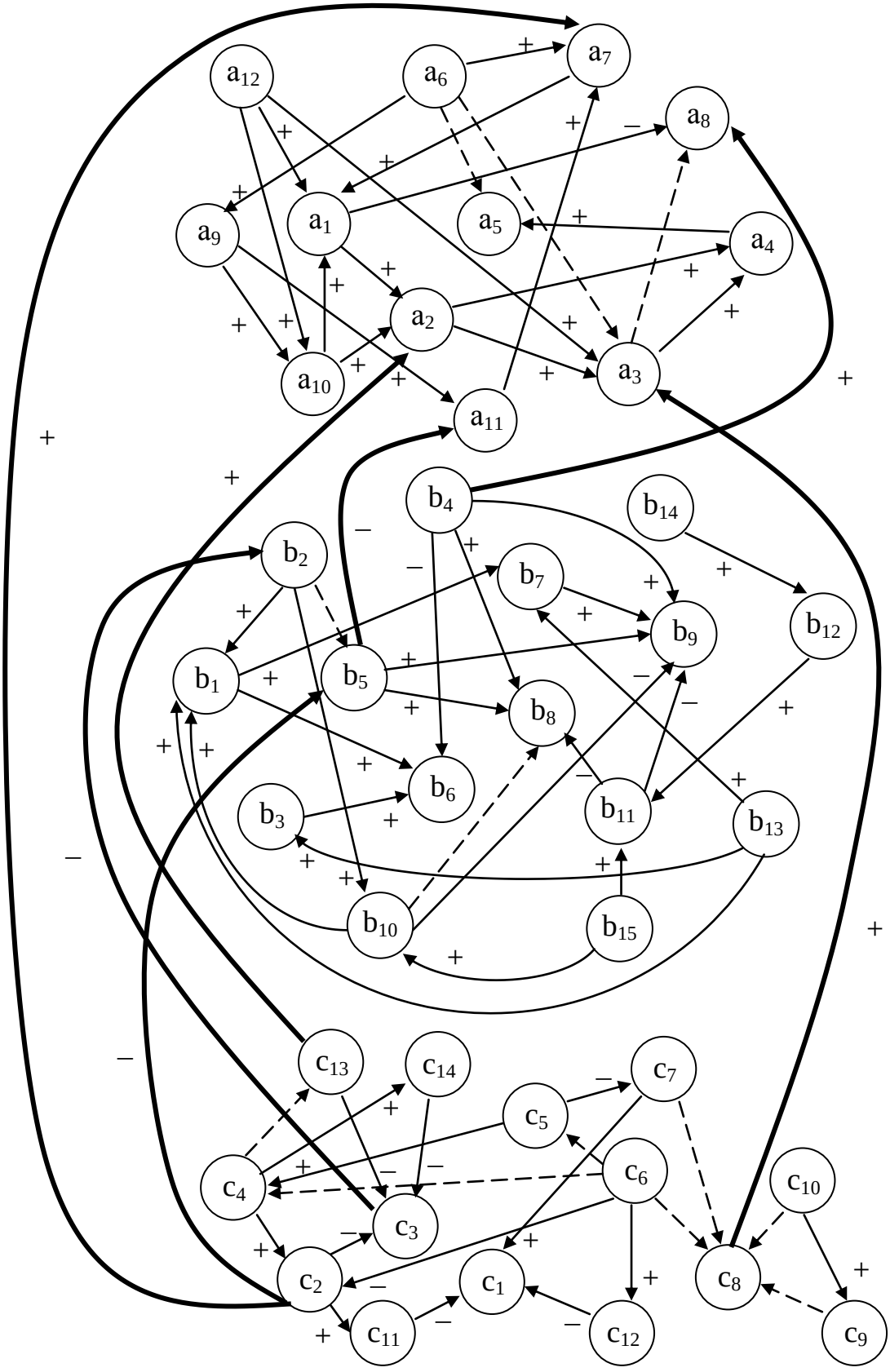

Рисунок 3 – Трехуровневая когнитивная модель для управления энергосбережением в регионе

Карта социально-экономического развития региона: a_1 – объем регионального промышленного производства; a_2 – объем ВРП; a_3 – поступление в бюджет; a_4 – уровень занятости; a_5 – уровень доходов населения; a_6 – затраты на образование; a_7 – уровень конкурентоспособности регионального продукта; a_8 – показатели состояния внешней природной среды; a_9 – уровень инновационной активности; a_{10} – объем инвестиций; a_{11} – рентабельность продукции/услуг; a_{12} – уровень налогов.

Карта энергетической стратегии: b_1 – объем генерации энергоресурсов (ЭР); b_2 – объем внутреннего потребления ЭР; b_3 – объем перетоков ЭР; b_4 – затраты на защиту окружающей среды; b_5 – потери ЭР; b_6 – влияние использования ЭР на экологию; b_7 – занятость при производстве ЭР; b_8 – затраты на производство ЭР; b_9 – затраты на передачу ЭР; b_{10} – инвестиции в энергосистему; b_{11} – инновации в энергетике; b_{12} – уровень подготовки кадров в энергосистеме; b_{13} – спрос на энергию в смежных регионах; b_{14} – затраты на подготовку специалистов; b_{15} – меры стимулирования инвестиций.

Карта стратегии энергосбережения: c_1 – потенциал ресурсосбережения; c_2 – степень реализации потенциала энергосбережения; c_3 – уровень энергоемкости продукции/услуг; c_4 – скорость диффузии и трансфера инноваций в энергосбережении; c_5 – затраты на обучение персонала в области энергосбережения; c_6 – инвестиции в энергосберегающие мероприятия в промышленности; c_7 – инвестиции на энергосбережение в энергетике; c_8 – дополнительные поступления в бюджет региона, связанные с энергосбережением; c_9 – инновации в энергосбережение в промышленности; c_{10} – инвестиции в инновационную инфраструктуру; c_{11} – доля энергосберегающей продукции в общем объеме производства; c_{12} – доля энергосберегающего оборудования и технологий; c_{13} – объем сэкономленной энергии в промышленных кластерах; c_{14} – объем сэкономленной энергии в ЖКХ.

Описывая связи при помощи предложенных выражений, можно определить степень комплексного влияния управляемых концептов на це-

левые концепты (в том числе в динамике), а также другие системные показатели.

В ряде случаев функция, характеризующая зависимость связи между концептами от значений концептов, имеет вид, схожий с описанием поведения реле. Например, затраты на обучение персонала методам энергосбережения обеспечит постоянное положительное влияние на показатели эффективности предприятия только после определенного уровня этих затрат.

Отметим, что использование изменяющихся связей между концептами когнитивной карты позволит расширить область применения аппарата когнитивного моделирования на системы управления энергосбережением, обеспечивая повышение обоснованности решений по повышению энергоэффективности региональных социально-экономических систем.