

УДК 004.8:004.451

ББК 32.973.22:32.813/.817

НЕЧЕТКОЕ КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ КОМПОНЕНТНЫХ СТРУКТУР В СЛОЖНЫХ СЛАБОФОРМАЛИЗУЕМЫХ СИСТЕМАХ

Щербатов И.А.¹

*(Астраханский государственный технический
университет, Астрахань)*

Синтезирована методика нечеткого когнитивного моделирования процесса образования компонентных структур в сложных слабоформализуемых системах. Уточнены этапы построения нечеткой когнитивной карты применительно к рассматриваемому процессу. Предложены способы задания весов и оценки достоверности модели, построенной на основе нечеткой когнитивной карты. Приведен пример нечеткого когнитивного моделирования процесса образования компонентных структур на основе общности цели и типа неопределенности.

Ключевые слова: нечеткое когнитивное моделирование, компонентная структура, сложная слабоформализуемая система, достоверность нечеткой когнитивной модели, парные сравнения, неопределенность.

1. Введение

Когнитивное моделирование является универсальным инструментом решения задач управления слабоструктурированными (слабоформализуемыми) системами (ситуациями). Основные классы управленческих задач, для решения которых целесообразно использование когнитивного моделирования и клю-

¹ Иван Анатольевич Щербатов, кандидат технических наук, доцент
(sherbatov2004@mail.ru)

чевые направления его применения определены в работе [2]. В работе [41] введено понятие сложной слабоформализуемой многокомпонентной системы (МС). Структура МС определяется образованными в процессе функционирования компонентами. Компонентные структуры (КС) образуются для достижения единой глобальной цели и (или) на основании агрегирования элементов сложной системы по типу неопределенности [41]. Задача описания процесса образования компонентных структур в МС относится к классу слабоструктурированных и характеризуется следующими особенностями [15]:

- вариативность организационного взаимодействия компонент в МС [32]. Взаимодействие является не только иерархическим (по аналогии с [9]), но и имеет иную природу (коалиционную, групповую, конгрегационную [33]), что не позволяет раздельно рассматривать внутренние процессы в компонентах и механизмах образования компонентных структур;

- наличие неопределенностей и малоизученных механизмов образования структур, не поддающихся формализации и измерению (наличие качественных описаний) [42];

- недостижимость глобальной цели (из-за недостижимости, противоречивости или отсутствия возможности постановки одной/нескольких локальных целей) в случае образования некорректной организационной структуры [40];

- изменчивость процессов во времени.

Указанные особенности позволяют применить нечеткое когнитивное моделирование (НКМ) на основе нечетких когнитивных карт (НKK) для моделирования МС [34]. Для рассматриваемого процесса существенными являются две функции НKK: прогностическая (позволяет прогнозировать возможные варианты КС и причины, которые привели к их появлению) и стратегическая (создание более точного описания механизмов образования КС) [31].

Значительное число работ посвящено реализации НKK для различных классов систем: организационно-технических [16, 19]; социотехнических [4]; инженерных приложений для технических систем (анализ электрических схем, диагностика неисправностей, системы управления и пр.) [35]. Например, в робототехнике основными задачами, решаемыми с применением

НKK, являются навигация, обучение и прогнозирование [38]. При решении задач прогнозирования состояний и синтеза управляющих решений в сложных системах с применением НKK достигнуты существенные успехи.

Цель настоящей работы – моделирование процесса образования компонентных структур в MC на основе математического аппарата нечетких когнитивных карт.

2. Компонентная структура MC

В самом общем виде *компонентная структура* – это структура организационного процесса как совокупность временных, причинно-следственных и др. связей между его этапами [8]. В основном термин «организационная структура» применяется для организационных [10], организационно-технических, социально-технических [7] и информационных [11] систем.

Определение 1. *Компонентная структура* – совокупность компонент, образованная под воздействием механизмов формирования структурной организации и однородности информационных связей между компонентами на основе единства локальной цели и (или) типа неопределенности.

Существует два способа образования компонент – *на основе общей цели* (достижение цели, поставленной ЛПР) и *агрегирование по типу неопределенности* (устранение/уменьшение влияния неопределенности) [27].

Замечание 1. Образование компонент на основе типа неопределенности не может в полной мере рассматриваться как объединение компонент на основе единой цели «устранение/компенсация неопределенности».

Поясним сказанное примером. Пусть существует система, состоящая из 5 элементов $\{E\} = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$. Существует множество глобальных целей системы $\{I_G\} = \{I_{G_1}, I_{G_1}\}$, достижение которых обеспечивается достижением локальных целей $\{I_{Z_1}, I_{Z_2}\} \xrightarrow{K_1, K_2} I_{G_1}$ (где компонента K_1 образована элементами e_1, e_2, e_3 , а K_2 образована элементами e_4, e_5) и

$\{I_{z_3}, I_{z_4}\} \xrightarrow{K_3, K_4} I_{G_2}$ (где компонента K_3 образована элементами e_1, e_3 , а K_4 образована элементами e_2, e_4, e_5).

Пусть $\exists I_5 : (K_5 \langle e_1, e_2, e_5 \rangle, K_6 \langle e_3, e_4 \rangle)$ - локальная цель «устранение/компенсация неопределенности». Обозначим знаком « $\equiv$ » идентичность структур компонент. В случаях если $(K_5 \equiv K_1)$ и $(K_6 \equiv K_2)$ или $(K_5 \equiv K_2)$ и $(K_6 \equiv K_1)$ образование компонент на основе типа неопределенности - это частный случай задачи образования компонент на основе общности цели, в противном случае нет.

Теоретико-множественное описание компонентной структуры в соответствии с введенным определением может быть представлено в форме:

$$(1) \quad KS = \{(K_1, K_2, \dots, K_h), P_{ij}(K_{ij}), I_z, Un_l, M_m(I_z, Un_l, P_{ij})\},$$

где KS - компонентная структура сложной системы; K_h - компонента; h - число компонент, образованное в системе для KS ; $P_{ij}(K_{ij})$ - связь между i -й и j -й компонентами; I_z - локальная цель, для достижения которой образована компонента; Un_l - тип неопределенности, для устранения (компенсации) которого образована компонентная структура; $M_m(I_z, Un_l, P_{ij})$ - механизм формирования КС.

3. Постановка задачи моделирования процесса образования компонентных структур

Класс МС характеризуется различными типами неопределенности [39]. Задача когнитивного моделирования таких систем - воспроизведение процесса функционирования на основе субъективных представлений (индивидуальных или коллективных) о причинно-следственных отношениях внутри системы. В общем виде задача построения и анализа когнитивных карт CM для рассматриваемого процесса связана с определением списка концептов K и выявления для них матрицы взаимных влияний W , т.о. $CM : \langle K, W \rangle$ [6].

Для формализованной постановки задачи процесса образования компонентных структур в МС введем следующие обозначения: $\{E\}$ - множество всех элементов системы; S - сложная слабоформализуемая многокомпонентная система; KS' - компонентная структура; I - глобальная цель системы; CM_I - НКК, формализующая процесс образования КС на основе единства глобальной цели; K - концепт НКК; W - матрица весов НКК; $CM_{U\eta_I}$ - НКК образованная на основе агрегирования по типу неопределенности.

Тогда задача построения НКК процесса образования компонент с использованием теоретико-множественного подхода может иметь несколько вариантов формулировок.

$$(2) \quad \text{Задача 1: } \forall \{E\} \subset S \exists KS': \xrightarrow{I} CM_I : \langle K, W \rangle,$$

Выражение (2) определяет построение нечеткой когнитивной карты CM_I для процесса образования КС KS' из множества элементов $\{E\}$ различных подсистем S на основе достижения единой цели I .

$$(3) \quad \text{Задача 2: } \forall \{E\} \subset S \exists K': \xrightarrow{U\eta_I} CM_{U\eta_I} : \langle K, W \rangle,$$

Выражение (3) определяет построение нечеткой когнитивной карты $CM_{U\eta_I}$ для процесса образования КС KS' из множества элементов $\{E\}$ различных подсистем S на основе функционирования элементов в условиях одного типа неопределенности $U\eta_I$.

$$(4) \quad \text{Задача 3: } \forall \{E\} \subset s_k \exists K': \xrightarrow{I} CM'_I : \langle K, W \rangle,$$

Выражение (4), являющееся частным случаем задачи в постановке (2) определяет построение когнитивной карты CM'_I для процесса образования КС KS' из множества элементов $\{E\}$ одной из подсистем s_k МС S на основе достижения единой цели I .

$$(5) \quad \text{Задача 4: } \forall \{E\} \subset s_k \exists K': \xrightarrow{U\eta_I} CM'_{U\eta_I} : \langle K, W \rangle,$$

Выражение (5), являющееся частным случаем задачи в постановке (3) определяет построение когнитивной карты $CM'_{U\eta_l}$ для процесса образования КС KS' из множества элементов $\{E\}$ одной из подсистем s_k МС S на основе функционирования элементов в условиях одного типа неопределенности $U\eta_l$.

Различия в МС обуславливаются наличием различных видов компонентных структур. Простейшей является структура типа «компонента - компонента». Особенности взаимодействия простейших КС могут быть распространены на любое число взаимодействующих компонент. Для решения задач нечеткого когнитивного моделирования в форме (2)-(5) синтезируем модифицированную методику построения НКК.

4. Методика нечеткого когнитивного моделирования образования компонентных структур

Реализация когнитивного подхода для моделирования процесса образования компонентных структур в МС осуществляется с применением методики (рис.1), представляющей собой набор взаимосвязанных этапов, определяющих выбор:

- квалифицированных экспертов (этап Э1);
- перечня концептов, обеспечивающих описание слабо-структурированного процесса образования КС (этап Э2);
- способа описания статики процесса образования КС, т.е. типа когнитивной карты (НКК [34], НКК на базе продукционных правил [29], НКК Силова [22] и пр.) (этап Э3);
- способа определения весов взаимного влияния концептов друг на друга (этап Э4);
- интегральных показателей влияния концептов на процесс образования КС и обратного влияния (этап Э5);
- критериев оценки достоверности НКМ (этап Э6);
- способа моделирования динамики процесса образования компонент с применением НКК (этап Э7).

Методика является итеративной, т.е. позволяет возвращаться к предыдущему этапу в случае необходимости. Например,

неудовлетворительные результаты, полученные на этапе Э6 могут потребовать перехода к этапу Э2 или Э4.

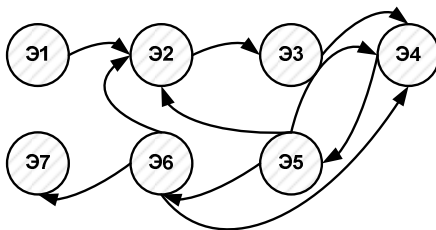


Рис. 1. Основные этапы НКМ процесса образования КС

Для нечеткого когнитивного моделирования процесса образования КС необходимо адаптировать приведенную выше общую методику в части:

- обосновать выбор типа НКК, наилучшим образом подходящей для решения поставленной задачи (этап Э3);
- обосновать выбор или модифицировать существующий способ определения весов взаимного влияния (этап Э4);
- обосновать выбор или модифицировать существующие критерии оценки достоверности НКМ (этап Э6).

Рассмотрим вопрос обоснования выбора типа НКК с точки зрения применимости для целей моделирования процесса образования компонентных структур с учетом специфика МС.

4.1. Выбор типа нечеткой когнитивной карты для целей моделирования

В соответствии с [27] отсутствует возможность строгого математического описания процесса образования компонентных структур в МС с применением регулярных методов. Поэтому концепты описываются вербально, также как и механизмы, обеспечивающие реализацию их взаимодействия. Формализация концептов совместно с их взаимосвязями (имеющих качественное описание, представленное значениями лингвистических переменных) осуществляется с применением теории нечетких множеств.

НKK как комбинация нейронных сетей и нечеткой логики были впервые представлены в работе [34]. Кроме того, интерес для рассматриваемого процесса образования КС представляют также нечеткие продукционные когнитивные карты (НПКК) [29]. В НПКК используются лингвистические нечеткие правила для описания связей между концептами. В работе [30] показаны достоинства и недостатки НKK и НПКК. В работе [24] предложены обобщенные НKK, существенно расширяющие возможности инструментария, предоставляемого аппаратом НKK, однако являющиеся значительно более сложными с вычислительной точки зрения, т.к. аккумулируют математический аппарат знаковых, НKK и НПКК. Кроме того, в [25] предложены когнитивные карты, развивающие возможности НKK за счет реляционного представления влияний между концептами. В ряде работ предложены также динамические когнитивные сети [36] и карты в базисе <истина, ложь, неопределенность> [43]. В [22] предложены НKK Силова В.Б., использующие казуальную алгебру специального вида.

На основе проведенного анализа литературных источников, с учетом достоинств и недостатков описанных выше НKK принято решение о выборе НKK Силова В.Б. в качестве аппарата решения задачи моделирования процесса образования компонентных структур.

4.2. Расчет весов взаимного влияния концептов

Для определения весов взаимного влияния концептов используются различные подходы. В самом простом случае используется тройка [16]: 1 – связь существует и она положительная, 0 – связь не существует, -1 - связь существует и она отрицательная. Подход, основанный на методе парных сравнений или методе множества уровня, описан в [17].

Кроме того, часто используются нечеткие классификаторы, формализованные нечеткими множествами: семиуровневый, когда терм-множество состоит из семи элементов [26] и девятиуровневый, образованный девятью элементами [4].

Для решения задачи получения элементов терм-множеств используются различные методы (на основе парных сравнений,

с использованием статистических данных, на основе экспертных оценок, параметрический подход, подход на основе интервальных оценок [5], метод с-кластеризации, метод «горной» кластеризации [23]) и шкалы (интервальные, линейные, нелинейные [14], шкалы Саати [21], «серые» шкалы [18] и пр.). Интервальные шкалы используются в большинстве систем НКМ [13].

В работе предлагается формализовать веса влияния концептов с помощью девятиуровневого классификатора вида:

$$(6) \quad x_k = \{BND, LMND, MND, SND, Z, SPD, HMPD, MPD, LPD\},$$

где B - большое, M - среднее, S - малое, L - ниже, H - выше, D - отклонение, в N - отрицательном, P - положительном направлении от Z - нулевого значения.

Для задания функций принадлежности (ФП) каждого термина могут быть использованы экспертные парные сравнения, либо типовая ФП, например, Гауссова [23]:

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

где c - центр нечеткого множества; σ - крутизна ФП.

Парные сравнения удобно представлять матрицей:

$$(8) \quad A = \begin{matrix} & \begin{matrix} u_1 & u_2 & \dots & u_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{matrix} & \left| \begin{matrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{matrix} \right| \end{matrix},$$

где a_{ij} - показывает преимущество элемента u_i над элементом u_j базового множества $U \in [x^{\min}, x^{\max}]$; $x^{\min}$, $x^{\max}$ - минимальное и максимальное допустимые значения параметра; $i, j = \overline{1, n}$.

Величины a_{ij} определяются по девятибалльной шкале Саати [21]. Матрица парных сравнений A является диагональной и обратно симметричной. Для получения значений ФП необходимо вычислить собственный вектор матрицы A из системы уравнений:

$$(9) \quad \begin{cases} A \cdot \Omega = \lambda_{\max} \cdot \Omega \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1 \end{cases},$$

где $\lambda_{\max}$ - максимальное собственное значение матрицы A .

Тогда ФП будет определяться координатами собственного вектора Ω , т.е. $\mu(u_i) = w_i, i = \overline{1, n}$.

Найденные таким образом ФП будут являться субнормальными нечеткими множествами (т.е. нечеткое множество, высота которого не равна единице), для их нормализации необходимо все степени принадлежности разделить на максимальное значение $\mu(u_i)^{\max}$.

$$(10) \quad \mu(u_i)' = \frac{\mu(u_i)}{\sup(\mu(u_i))},$$

При этом выражение $\lambda_{\max} - n = \delta$ является мерой несогласованности парных сравнений экспертов. Чем больше величина δ , тем больше расходятся мнения экспертов.

4.3. Достоверность и устойчивость НКК

Для построенной когнитивной карты необходимо оценить ее достоверность и провести верификацию, т.е. сравнить результат, полученный с помощью НКК и реальное состояние системы при одинаковых исходных данных. Построение НКК осуществляется на основе экспертных знаний о предметной области. Поэтому существует риск искажения реальной системы при ее модельном представлении экспертными методами из-за субъективного характера знаний эксперта предметной области и ошибок когнитолога при формализации этих знаний с помощью выбранного математического аппарата. Необходимость учета слабых сторон формальных моделей на основе НКК, обусловленных человеческим фактором (оказывающим существенное влияние на этапе первичной формализации экспертных знаний), привело к появлению различных субъектно-формальных методов решения данного класса задач. Поэтому крайне важной является задача оценки достоверности НКМ.

В работе [1] выделены следующие критерии достоверности НКК (применительно к защите от некоторых факторов риска 1-го рода, связанных с субъектом знаний и рисков 2-го рода, связанных с «посредником» в передаче знаний).

В соответствии с [1] критерий наличия нормальной формы $K^c(K_1)$ для концепта K_1 означает, что он *может быть естественно интерпретирован* (понят) IU и как *концепт* и как *переменная, принимающая значения на определенной шкале* ZS , т.е. критерий описывается двойкой $K^c(K_1): \langle IU, ZS \rangle$. Модифицируем критерий, добавив *фактор, характеризующий наличие эксперта (экспертов)* EX , способного формализовать понятие концепта как переменную, значения которой определены на некоторой шкале, т.е. $K^c(K_1): \langle IU, ZS, EX \rangle$. Введем бинарное значение $k_i^{IU}, k_i^{ZS}, k_i^{EX}$ наличия каждой из составляющих $\langle IU, ZS, EX \rangle$, принимающих значение 0 в случае если составляющая отсутствует и 1, если она присутствует (n - общее число концептов):

$$(11) \quad k^c = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i^{IU} + k_i^{ZS} + k_i^{EX})}{3n},$$

Если $k^c = 1$, то НКК удовлетворяет критерию наличия нормальной формы, в противном случае нет.

Проверка НКК по критериям *бесконтекстности понимания конструкций карты, понятности связи по шаблону* $K^b(b_0, Sh)$ (где b_0 - связь в НКК, а Sh - шаблон в соответствии с семантикой модели), *полноты влияний на концепт* $K^{sc}(p, B(p))$ и *соизмерности концептов по объемам понятий* $K^s(B, A)$ производится в соответствии со схемой, предложенной в [1].

Не менее важным этапом анализа НКК является проверка ее устойчивости, которая проводится после оценки достоверности. Например, необходимость анализа устойчивости НКК показана в [12, 28], т.к. данная проверка обеспечивает поиск решений,

направленных на структурные изменения карты. Для анализа устойчивости когнитивных карт существует метод на основе представления карты в виде обобщенной знаковой «розы», позволяющей установить связь между устойчивостью и структурой [20].

Для анализа структурной устойчивости НКК представляется целесообразным определять число циклов отрицательной и положительной обратной связи в соответствии с подходом, предложенным в [28].

Условие устойчивости НКК – наличие нечетного числа циклов отрицательной обратной связи, а *условие неустойчивости НКК* – наличие четного числа циклов положительной обратной связи.

4.4. Построение нечеткой когнитивной карты

Для построения НКК привлекаются эксперты в рассматриваемой предметной области [31, 37]. С учетом сформулированных постановок задач в форме (2)-(5), а также процедур работы с экспертами и источниками знаний (текстологических и пр.) [3, 26] необходимо определить перечень концептов рассматриваемой предметной области. В соответствии с определениями, данными в [41], построенная нечеткая когнитивная карта должна отражать оба возможных способа образования КС.

Построим НКК для решения задачи №1 в форме (2). На основании вышеизложенного определен следующий перечень концептов процесса образования компонентных структур в МС:

$$(12) \quad K = \{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8\},$$

где K_1 - возможность достижения глобальной цели; K_2 - образование компоненты; K_3 - возможность достижения локальной цели; K_4 - возможность устранения неопределенности; K_5 - устойчивость КС; K_6 - степень достижимости всех локальных целей; K_7 - возможность образования компоненты; K_8 - компонента не образована; K_9 - возможность не достижения локально цели; K_{10} - невозможность устранения неопределенности.

Выделенное множество концептов позволяет построить НКК рассматриваемого процесса (рис. 2, положительные связи показаны сплошными линиями, а отрицательные пунктирными).

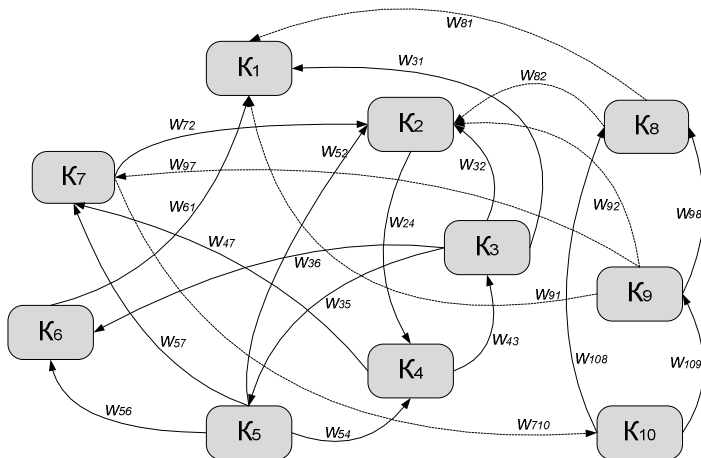


Рис. 2. Нечеткая когнитивная карта процесса образования КС

Определение отношений между концептами происходит на основе экспертного опроса, что позволяет рассчитать веса w_{ij} связей между каждой парой концептов в соответствии с зависимостями (8-11). Тогда нечеткая когнитивная матрица взаимовлияний будет иметь вид $W = \|w_{ij}\|_{n \times n}$, где n - число концептов.

Для реализации НКК введена каузальная алгебра [22], использующая операции Т-норм, S-норм, макстриангулярную композицию, операцию *max* и замыкание.

Для получения значений взаимовлияния концептов необходимо получить нечеткую матрицу положительных обратных связей $R = \|r_{ij}\|_{2n \times 2n}$, а после этого формируется транзитивно замкнутая когнитивная матрица взаимовлияний $V = \|(v_{ij}, \bar{v}_{ij})\|$ по специальному правилу преобразования, позволяющая определить согласованные отношения взаимовлияния концептов [6]:

$$(13) \quad \begin{cases} r_{2i-1,2j-1} = w_{ij}, r_{2i,2j} = w_{ij} \text{ при } w_{ij} > 0, \\ r_{2i-1,2j-1} = -w_{ij}, r_{2i,2j} = -w_{ij} \text{ при } w_{ij} < 0, \\ r_{2i-1,2j-1} = 0, r_{2i,2j} = 0 \text{ при } w_{ij} = 0 \end{cases}$$

$$(14) \quad \begin{cases} v_{ij} = \max(r_{2i-1,2j-1}, r_{2i,2j}) \\ \bar{v}_{ij} = -\max(r_{2i-1,2j}, r_{2i,2j-1}) \end{cases}$$

Для определения влияния концептов друг на друга, а также интегральных показателей используем консонанс и диссонанс влияния одного концепта на другой, а также консонанс и диссонанс влияния процесса образования компонентных структур на концепты. Проиллюстрируем методику на расчетном примере.

5. Расчетный пример

На основе аналитического обзора систем и сред когнитивного моделирования, приведенного в [13] принято решение о разработке собственного программного решения для НКМ. Полученная карта в разработанной программной среде «НеМо» показана на рис. 3.

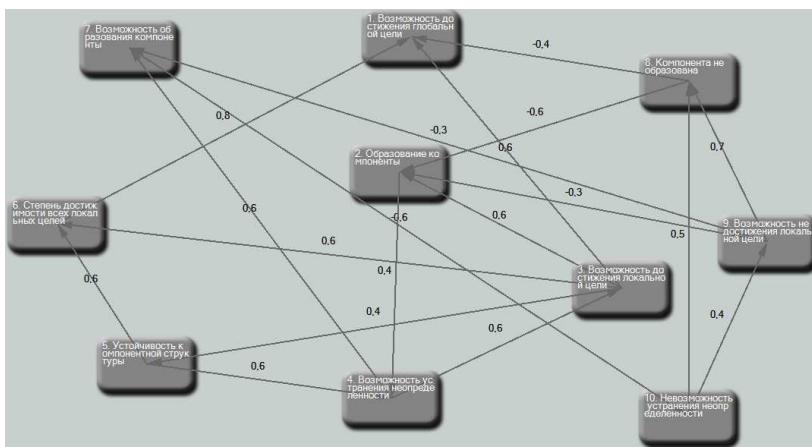


Рис. 3. Нечеткая когнитивная карта в среде «НеМо»

Для определения достоверности построенной НКК (рис.3) воспользуемся описанными выше критериями. Оценка НКК по критерию K^c представлена в таблице 1. Т.к. значение критерия $k^c = 1$, то НКК удовлетворяет требованию достоверности по данному критерию.

Таблица 1.

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}
k_i^{IU}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
k_i^{ZS}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
k_i^{EX}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
k^c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Для проверки по критерию бесконтекстности понимания конструкций карты разработаем шаблоны для однотипного перевода связей между факторами:

- **шаблон А** (положительное влияние):
 $\langle P \rangle_i \xrightarrow{+} \langle P \rangle_j$: усиление $\langle P \rangle_i$ приводит к усилению $\langle P \rangle_j$, а ослабление $\langle P \rangle_i$ приводит к ослаблению $\langle P \rangle_j$;
- **шаблон Б** (отрицательное влияние):
 $\langle P \rangle_i \xrightarrow{-} \langle P \rangle_j$: усиление $\langle P \rangle_i$ приводит к ослаблению $\langle P \rangle_j$, а ослабление $\langle P \rangle_i$ приводит к усилению $\langle P \rangle_j$.

Проверка НКК по шаблонам показывает, что все связи между концептами прочитываются, имеют понятный математический смысл и могут быть формализованы. Карта является достоверной по критериям полноты влияния на концепт и соразмерности концептов по объемам знаний, а значит, необходимость в коррекции карты отсутствует.

Формализуем веса связей с применением подхода, описанного выше. Связь описывается ФП на базовом множестве шкалы $[-1;1]$ классификатором в форме (6). Выбранная шкала взаимо-

влияний концептов $[-1;1]$ может быть вербально представлена следующим образом: -1 – сильное отрицательное влияние; 0 – влияние отсутствует; 1 – сильное положительное влияние; промежуточные значения в интервале $(-1;0)$ характеризуют ослабление степени отрицательного влияния; промежуточные значения в интервале $(0;1)$ характеризуют увеличение степени положительного влияния.

Построим ФП в форме (7) для весов взаимного влияния матрицы $W = \|w_{ij}\|_{n \times n}$ (рис.4-а) на основе опроса экспертов и с учетом описанных особенностей (таблица 2).

Таблица 2.

	<i>BND</i>	<i>LMND</i>	<i>MND</i>	<i>SND</i>	<i>Z</i>	<i>SPD</i>	<i>HMPD</i>	<i>MPD</i>	<i>LPD</i>
<i>c</i>	-1	-0.7	-0.5	-0.3	0	0.3	0.5	0.7	1
σ	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

Определим структурную устойчивость НКК на основании методики, изложенной в [28]. Число циклов положительной обратной связи равно трем ($K_4 \rightarrow K_3 \rightarrow K_2$, $K_4 \rightarrow K_7 \rightarrow K_2$, $K_5 \rightarrow K_4 \rightarrow K_3$) и является нечетным, число циклов отрицательной обратной связи равно единице ($K_9 \rightarrow K_{10} \rightarrow K_7$) и также является нечетным, что обеспечивает устойчивость НКК.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0
3	0,6	0,6	0	0	0,4	0,6	0	0	0	0
4	0	0	0,6	0	0	0	0,6	0	0	0
5	0	0	0	0,6	0	0,6	0	0	0	0
6	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,6
8	-0,4	-0,6	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	-0,3	0	0	0	0	-0,3	0,7	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,4	0

а) матрица взаимных влияний;

	Влияние системы на концепт	Влияние концепта на систему
1	0,162	0
2	0,013	0,113
3	0,12	0,293
4	0,129	0,212
5	0,077	0,235
6	0,152	0,08
7	0,1	-0,047
8	0,05	-0,151
9	-0,009	-0,043
10	-0,115	-0,014

б) интегральные показатели;

Рис. 4. Результаты расчетов в среде «НеМо»

Консонанс влияния концепта на процесс образования КС равен единице для всех концептов, кроме концептов K_1 (значение 0) и K_6 (значение 0,1), что показывает высокий уровень доверия полученному значению. В соответствии с рис.4-б наибольшее положительное влияние на процесс образования компонентных структур оказывают возможность достижения локальной цели, устойчивость компонентной структуры и возможность устранения неопределенности. Наибольшее отрицательное влияние оказывает невозможность образования компоненты. Это означает, что построенная НКК достоверно описывает процесс образования компонентных структур.

На основании анализа достоверности и устойчивости НКК, а также рассчитанных интегральных показателей можно сделать вывод о применимости построенной в расчетном примере нечеткой когнитивной карты для целей моделирования процесса образования компонентных структур.

6. Выводы

Проведен анализ процесса образования компонентных структур в МС. Показано, что факторы, оказывающие влияние на рассматриваемый процесс могут быть формализованы с применением качественных методов. Обосновано применение математического аппарата нечетких когнитивных карт для целей моделирования процесса образования КС. Сформулирована постановка задачи построения НКК в виде четырех типовых форм. Модифицирована методика построения НКК применительно к процессу образования компонентных структур: осуществлен выбор карт Силова В.Б., выбрана Гауссова функция принадлежности для формализации девятиуровневого классификатора, описывающего связи между концептами, а также предложен модифицированный критерий наличия нормальной формы для оценки достоверности НКК. Проверена достоверность и устойчивость построенной нечеткой когнитивной карты. Рассмотренный расчетный пример, реализующий модифицированную методику НКМ процесса образования КС, позволяет утверждать о применимости данного подхода к рассматриваемому процессу.

В качестве дальнейшего направления исследований можно указать детализацию НКМ процесса образования компонентных структур, синтез специальных критериев оценки достоверности и проверки устойчивости, а также реализацию моделирования динамики в разработанном программном продукте «НеМо».

Литература

1. АБРАМОВА Н.А., КОВРИГА С.В. *Некоторые критерии достоверности моделей на основе когнитивных карт* // Проблемы управления – 2008. - № 6. – С. 23-33.
2. АДДЕЕВА З.К., КОВРИГА С.В., МАКАРЕНКО Д.И., МАКСИМОВ В.И. *Когнитивный подход в управлении* // Проблемы управления – 2007. - № 3. – С. 2-8.
3. АДДЕЕВА З.К., КОВРИГА С.В. *Эвристический метод концептуальной структуризации знаний при формализации слабоструктурированных ситуаций на основе когнитивных карт* // Управление большими системами. Выпуск 31. М.: ИПУ РАН, 2010. С.6-34.
4. АЖМУХАМЕДОВ И.М. *Синтез управляющих решений в слабо структурированных плохо формализуемых социотехнических системах* // Управление большими системами. Выпуск 42. М.: ИПУ РАН, 2013. С.29-54.
5. БОРИСОВ А.Н., КРУМБЕРГ О.А., ФЕДОРОВ И.П. *Принятие решений на основе нечетких моделей: примеры использования*. Рига: Зинатне. 1990. 184 с.
6. БОРИСОВ В.В., КРУГЛОВ В.В., ФЕДУЛОВ А.С. *Нечеткие модели и сети*. – 2-е изд., стереотип. - М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 284 с.
7. ГИТМАН М.Б., СТОЛБОВ В.Ю., ГИЛЯЗОВ Р.Л. *Управление социально-техническими системами с учетом нечетких предпочтений*. – М.: ЛЕНАНД, 2011. – 272 с.
8. ГУБКО М.В., КОРГИН Н.А., НОВИКОВ Д.А. *Классификация моделей анализа и синтеза организационных структур* // Управление большими системами. 2004. № 6. С. 5-21.
9. ГУБКО М.В. *Математические модели оптимизации иерархических структур*. – М.: ЛЕНАНД, 2006. – 264 с.

10. ГУБКО М.В. *Математические модели формирования рациональных организационных иерархий* // *АиТ*. 2008. № 9. С. 114-139.
11. КЛЕВЦОВ С.И. *Особенности описания поведения организационной структуры в среде интегральной инструментальной платформы* // *Известия Южного Федерального Университета. Технические науки*. 2002. Т.25. № 2. С. 255-261.
12. КУЛИНИЧ А.А. *Когнитивные карты в поддержке принятия решений* / Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'11». Научное издание в 4-х томах. – М.: Физматлит, 2011.-Т. 1. – 598 с.
13. КУЛИНИЧ А.А. *Компьютерные системы анализа ситуаций и поддержки принятия решений на основе когнитивных карт: подходы и методы* // *Проблемы управления*. –2011. – №4. С. 31-45.
14. ЛАРИЧЕВ О.И. *Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: Учебник*. Изд. второе, перераб. и доп. – М.: Логос, 2003. - 392 с.
15. МАКСИМОВ В.И., КОРНОУШЕНКО Е.К. *Аналитические основы применения когнитивного подхода при решении слабоструктурированных задач* // *Труды ИПУ РАН*. - М., 1999. – Т. 2. – С.95-10
16. ПАКЛИН Н.Б. *Нечетко-когнитивный подход к управлению динамическими системами* // *Искусственный интеллект*.- 2003.- №4.-С. 342-348.
17. ПОДВЕСОВСКИЙ А.Г., ЛАГЕРЕВ Д.Г., КОРОСТЕЛЕВ Д.А. *Применение нечетких когнитивных моделей для формирования множества альтернатив в задачах принятия решений* // *Вестник Брянского государственного технического университета*. - 2009. - №4 (24). - С. 77-84.
18. ПОСПЕЛОВ Д.С. *«Серые» и/или «черно-белые» шкалы* // *Прикладная эргономика. Специальный выпуск «Рефлексивные процессы»*. – 1994. – №1. – С. 15–21.
19. ПЫЛЬКИН А.Н., КРОШИЛИН А.В., КРОШИЛИНА С.В. *Методология когнитивного анализа в вопросах автоматизации управления материальными потоками* //

Информатика и системы управления.- 2012.- №2(32).-С. 138-149.

20. РОБЕРТС Ф.С. *Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам*. Наука, 1986. – 497 с.
21. СААТИ Т.Л. *Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети*. Пер. с англ. / Науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. Изд. 3-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 360 с.
22. СИЛОВ В.Б. *Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке* / В.Б. Силов. – М.: ИНПРО-РЕС, 1995. – 228 с.
23. УСКОВ А.А., КУЗЬМИН А.В. *Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика*. – М.: Горячая Линия - Телеком, 2004. – 143 с.
24. ФЕДУЛОВ А.С., БОРИСОВ В.В. *Обобщенные нечеткие когнитивные карты* // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2004. – № 4. – С. 3–21.
25. ФЕДУЛОВ А.С. *Нечеткие реляционные когнитивные карты* // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2005. – № 1. – С. 120–133.
26. ЩЕРБАТОВ И.А., ПРОТАЛИНСКИЙ О.М. *Система поддержки принятия решений для операторов слабоформализуемых ТП* // Автоматизация в промышленности.-2009.- №7.-С. 41-45.
27. ЩЕРБАТОВ И.А., ПРОТАЛИНСКИЙ О.М. *Сложные слабоформализуемые многокомпонентные технические системы* // Управление большими системами: сборник трудов. 2013. № 45. С. 30-46.
28. ЯМАЛОВ И. *Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций*. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2007. – 288 с.
29. CARVALHO, J.P. AND TOMÉ J.A.B., *Rule Based Fuzzy Cognitive Maps – Fuzzy Causal Relations*, Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation: Evolutionary Computation & Fuzzy Logic for Intelligent

Control, Knowledge Acquisition & Information Retrieval, edited by M. Mohammadian, IOS Press, 1999.

30. CARVALHO, J.P., TOME, J.A.B. *Rule based fuzzy cognitive maps and fuzzy cognitive maps-a comparative study*. Fuzzy Information Processing Society, 1999. NAFIPS. 18th International Conference of the North American. pp. 115-119.
31. GLYKAS G., *Fuzzy Cognitive Maps: Theory, Methodologies, Tools and Applications*, Springer Verlag, July 2010, 200 p.
32. HORLING, B., LESSER, V. *A survey of multi-agent organizational paradigms*. Knowl. Eng. Rev. 19, 2005. pp. 281–316.
33. ISERN D., SANCHEZ D., MORENO A. *Organizational structures supported by agent-oriented methodologies* // The Journal of Systems and Software 84 (2011). pp. 169–184.
34. KOSKO B., *Fuzzy cognitive maps*, International Journal of Man-Machine Studies, 1986, vol. 24, no. 1, pp. 65-75.
35. KOULOURIOTIS D.E., DIAKOULAKIS I.E., EMIRIS D.M., ANTONIDAKIS E.N., KALIAKATSOS I.A. *Efficiently Modeling and Controlling Complex Dynamic Systems Using Evolutionary Fuzzy Cognitive Maps* // International Journal of Computational Cognition, 2003, Volume 1, №2, pp. 41-65.
36. MIAO, Y., AND Z. LIU, *Dynamical Cognitive Network as an extension of Fuzzy Cognitive Map* in Proc. Int. Conf. Tools Artificial Intelligence, Chicago, IL, November 1999.
37. OZESMI U., OZESMI S.L. *Ecological models based on people's knowledge: a multi-step fuzzy cognitive mapping approach* // Ecological Modelling, 2004, Volume 176, pp. 43-64.
38. PAPAGEORGIOU E.I. *Review study on Fuzzy Cognitive Maps and their applications during the last decade* // 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, June 27-30, 2011, Taipei, Taiwan, pp. 828-835.
39. PROTALINSKII I.O., SHCHERBATOV I.A., SHISHKIN N.D. *Optimal Strategy Synthesis for a Group of Mobile Robots with Variable Structure* // World Applied Sciences Journal 24 (Information Technologies in Modern Industry, Education & Society): 2013. p. 268-275.

40. SCOTT A. DELOACH, MATTHEW MILLER *A Goal Model for Adaptive Complex Systems*. International Journal of Computational Intelligence: Theory and Practice. Volume 5, no. 2, 2010. 20 p.
41. SHCHERBATOV I.A., PROTALINSKII O.M., ESAULENKO V.N., *Analysis and Modelling of Complex Engineering Systems Based on the Component Approach* // World Applied Sciences Journal 24 (Information Technologies in Modern Industry, Education & Society): 268-275, 2013.
42. THUNNISSEN, D., *Uncertainty classification for the design and development of complex systems*, Proceedings of the 3rd Annual Predictive Methods Conference, Veros Software, Santa Ana, CA, June, 2003. pp. 1-16.
43. VASANTA KANDASAMY W.B., SMARANDACHE F. *Fuzzy Cognitive Maps and Neutrosophic Cognitive Maps*. – Xiquan, 2003. – 211 p.

FUZZY COGNITIVE MODELLING OF COMPONENT STRUCTURES IN COMPLEX POORLY FORMALIZED SYSTEMS

Ivan Shcherbatov, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Cand.Sc., assistant professor (sherbatov2004@mail.ru).

Abstract: The method of fuzzy cognitive modeling of the formation of component structures in complex poorly formalized systems is synthesized. Specified stages of construction of fuzzy cognitive maps applied to the process under consideration. Suggested a way to specify weights and assess the validity of the model based on fuzzy cognitive map. Shows the example of the fuzzy cognitive of the formation of component structures on the basis of common goals and the type of uncertainty.

Keywords: fuzzy cognitive modeling, component structure, complex poorly formalized system, the reliability of fuzzy cognitive model, paired comparisons, uncertainty.