

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ

**А. В. Заграновская**

Санкт-Петербургский государственный экономический университет,  
Санкт-Петербург, Россия

Современные условия хозяйствования характеризуются высокой степенью неопределенности и сложности, что существенно ограничивает возможности применения количественных методов для анализа и прогнозирования экономической ситуации. В статье обобщается теоретический материал по когнитивному моделированию. Предложено осуществлять анализ сложных систем на основе приводимого в статье инструментария, что позволит целостно взглянуть на ситуацию за счет качественно-количественного, пространственно-временного описания рассматриваемой ситуации в условиях определенности, риска и неопределенности. Положенная в основу метода нечеткая причинная алгебра позволяет выявить прямые и косвенные связи между элементами системы, проанализировать поведение системы, найти ее предельное состояние, позволяющее спрогнозировать развитие ситуации в долгосрочном периоде. Также можно рассчитать основные характеристики системы, такие как плотность, сложность, степень иерархии. Автором дан системный анализ деятельности предприятия на основе нечеткой когнитивной карты, моделирующей сложившиеся условия хозяйствования в современной российской экономике и включающей факторы внутренней и внешней среды организации. Возможность включить в модель большое количество переменных, даже с нечеткими значениями, прямую и обратную связь с разной степенью точности, совместить точные и экспертные знания, легкость и скорость, с которой могут быть объединены разрозненные знания, построены когнитивные карты и получены нужные результаты, а также возможность сценарного прогнозирования и планирования делают нечеткие когнитивные карты важнейшим инструментом предварительного анализа сложных систем.

*Ключевые слова:* когнитивные карты, нечеткие когнитивные карты, моделирование, системный анализ, плотность когнитивной карты, меры центральности, мера сложности, индекс иерархии.

## SYSTEM ANALYSIS ON THE BASIS OF IMPRECISE COGNITIVE CARDS

**Anna V. Zagranovskaya**

Saint-Petersburg State University of Economics, Saint-Petersburg, Russia

The current conditions in business can be characterized as uncertain and complicated and it limits possibilities of using quantitative methods for analysis and forecast of the economic situation. The article summarizes theoretical material dealing with cognitive modeling. It is proposed to analyze complicated systems on the basis of tools shown in the article, which could provide an opportunity to get an integral view of the situation at the expense of quantitative-qualitative and space-time description of the situation in conditions of certainty, risk and uncertainty. Imprecise causal algebra, which forms the basis of the method, makes it possible to identify direct and indirect links between elements of the system, to analyze the system behavior, to find utmost standing allowing us to forecast the situation development in the long-term period. It is also feasible to calculate the principle characteristics of the system, such as density, complexity, the degree of hierarchy. The author gives a system analysis of the enterprise functioning on the basis of imprecise cognitive card, which models the current conditions of business in today's Russian economy, including factors of internal and external environment of the organization. The opportunity to include in the model plenty of variables, even with imprecise values, direct and indirect link with different degree of precision, to combine accurate and expert knowledge, simplicity and speed of combining uncoordinated knowledge, build cognitive cards and obtain needed results, as well as possibility of scenario forecasting and planning make imprecise cognitive cards an essential tool of preliminary analysis of complicated systems.

*Keywords:* cognitive cards, imprecise cognitive cards, modeling, system analysis, density of cognitive card, measure of centrality, hierarchy index.

### Когнитивные карты

Впервые когнитивные карты были предложены в 1970-х гг. известным американским социологом и политологом Робертом Аксельродом для моделирования принятия решений в социальных и политических системах [2].

Основное назначение причинно-следственных диаграмм (когнитивных карт) состоит в качественной характеристике структуры сложных систем за счет того, что они отражают взаимосвязи между элементами системы.

Когнитивные карты отображаются с помощью знаковых ориентированных графов, состоящих из вершин и дуг. Вершины соответствуют концептам (наиболее значимым событиям, факторам), дуги отражают причинно-следственные связи между концептами. Связи могут быть положительными, если тенденции в факторных и результативных признаках совпадают, отрицательными – в противном случае и нулевыми при отсутствии связей между концептами. Причинно-следственные связи когнитивной карты могут быть представлены в виде матрицы смежности (матрицы связи, причинной матрицы). На ее основе можно также рассчитать меру центральности концепта и получить информацию о прямых и косвенных причинно-следственных связях в карте.

Разновидностью когнитивных карт являются нечеткие когнитивные карты (Fuzzy Cognitive Maps – FCM), впервые предложенные Бартоломеем Коско в 1986 г. Они позволяют наилучшим образом отразить неопределенность, динамику состояний концептов и связей между ними [4; 6].

В FCM появляется дополнительная возможность моделирования сложных цепочек причинно-следственных связей через взвешенные причинно-следственные связи [5]. Модель FCM описывает поведение системы, а каждый концепт – факторную характеристику системы.

Нечеткая когнитивная карта представляет систему как сочетание понятий и различных отношений, которые существуют

между понятиями. FCM состоит из узлов ( $N_1, N_2, \dots, N_n$ ), которые являются важными элементами отображаемой системы, и направленных дуг ( $e_{ij}$ ), которые представляют собой причинно-следственные связи между двумя узлами ( $N_i, N_j$ ). Направленным дугам поставлены в соответствие нечеткие значения в интервале  $[-1, +1]$ , которые показывают силу влияния между факторами. Положительное значение указывает на положительную причинно-следственную связь между двумя факторами, отрицательное значение – на отрицательную причинно-следственную связь между двумя факторами, нулевое значение соответствует отсутствию связей между рассматриваемыми факторами [3].

С математической точки зрения нечеткие когнитивные карты определяются параметрами  $N, E, C, f$  [10]:

1.  $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$  – совокупность понятий (concepts), формирующих узлы графа.

2.  $E: (N_i, N_j) \rightarrow e_{ij}$  – функция, сопоставляющая значение  $e_{ij}$  паре понятий ( $N_i, N_j$ ), где  $e_{ij}$  – вес направленного ребра из  $N_i$  в  $N_j$ , если  $i \neq j$ , и  $e_{ij} = 0$ , если  $i = j$ . Другими словами,  $E(N \cdot N) = (e_{ij})$  – это матрица связи (connection matrix). Значения весов на основной диагонали матрицы равны нулю, так как изменения знаний о концепте не могут повлиять на сам концепт.

3.  $C: N_i \rightarrow C_i$  – функция, которая каждому концепту  $N_i$  ставит в соответствие последовательность его степеней активации (activation degrees) так, что для каждого  $t \in N, C_i(t) \in L$  – это степень активации концепта  $N_i$  в момент времени  $t$ .  $C(0) \in L^n$  представляет собой исходный вектор, содержащий начальные значения всех концептов.  $C(t) \in L^n$  – конечный вектор состояний концептов при определенной итерации  $L$ .

4.  $f: R \rightarrow L$  – функция преобразования (transformation function), которая устанавливает связь между  $C(t+1)$  и  $C(t)$  для всех  $t \geq 0$  так, что выполняется равенство

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, C_i(t+1) = f\left(\sum_{j \neq i}^n e_{ij} \cdot C_j(t)\right).$$

Функция преобразования используется для того, чтобы привести взвешенную сумму состояний концептов в определенный диапазон, который устанавливается на уровне  $[0; 1]$ .

В литературе можно встретить различные виды трансформационных функций: логистическая (sigmoid logistic), тангенс (sigmoid hyperbolic tangent), арктангенс (arctangent), линейная (linear), шаговая (step function), с отложенным шагом (the delayed step) [7]. Чаще всего в качестве трансформационной функции используют логистическую функцию вида

$$C_j(x) = \frac{1}{1 + \exp(-c \cdot x)}.$$

Моделирование с помощью нечетких когнитивных карт представляет собой комбинацию нечеткой логики и когнитивного моделирования. Это способ представить систему в условиях неопределенности и сложности, когда формальная логика не работает.

Рассмотрим более детально формальный механизм, лежащий в основе моделирования на основе нечетких когнитивных карт.

### Нечеткая причинная алгебра

В когнитивных картах можно выделить косвенный и общий причинный эффект [2]. Рассмотрим некоторый путь из концепта  $C_i$  в концепт  $C_j$ , например,  $C_i \rightarrow C_{k_1} \rightarrow \dots \rightarrow C_{k_n} \rightarrow C_j$ , который может быть определен упорядоченными индексами  $(i, k_1, \dots, k_n, j)$ . Тогда косвенный эффект влияния концепта  $C_i$  на концепт  $C_j$  – это результат действия  $C_i$  на  $C_j$  через путь  $(i, k_1, \dots, k_n, j)$ . Общий эффект влияния концепта  $C_i$  на концепт  $C_j$  – это все косвенные эффекты влияния  $C_i$  на  $C_j$ . Следовательно, если концепты  $C_i$  и  $C_j$  соединяет всего один путь, то общий эффект влияния концепта  $C_i$  на концепт  $C_j$  сводится к косвенному эффекту влияния  $C_i$  на  $C_j$  [4].

Нахождение косвенного и общего эффекта связано с операциями умножения и сложения реальных чисел из предметной области. Аксельрод [2] показал, что косвенный эффект пути из  $C_i$  в  $C_j$  отрицатель-

ный, если число отрицательных причинных дуг в пути нечетное; эффект положительный, если число отрицательных причинных дуг в пути четное. Общий эффект влияния  $C_i$  на  $C_j$  отрицательный, если все косвенные эффекты влияния  $C_i$  на  $C_j$  отрицательные, положительный, если все они положительные, и неопределенный в противном случае. Следовательно, неопределенность может доминировать в этой схеме. Неопределенность может быть снята в результате использования весов. Если причинные дуги имеют положительные или отрицательные веса  $w_{ij}$ , тогда косвенный эффект влияния  $C_i$  на  $C_j$  на пути  $(i, k_1, \dots, k_n, j)$  есть произведение соответствующих весов  $(w_{ik_1} \cdot w_{k_1k_2} \cdot \dots \cdot w_{k_nj})$ , а общий эффект – это сумма произведений, найденная по всем путям, связывающим два рассматриваемых концепта. Эта схема убирает неопределенность и позволяет оценить взаимное влияние всех концептов друг на друга. Однако требование четкого определения состояний концептов усложняет познавательный процесс. Часто мы сталкиваемся с нечеткой информацией.

Нечеткая причинная алгебра, положенная в основу моделирования на основе нечетких когнитивных карт, позволяет в данной ситуации найти компромисс. В ней обрабатывается нечеткая входная информация с помощью точных методов, при этом получается нечеткая выходная информация.

В нечеткой когнитивной алгебре умножению ставится в соответствие операция минимум, а суммированию – максимум [4]. Пусть между концептами  $C_i$  и  $C_j$  существует  $m$  причинных путей:  $(i, k_1^1, \dots, k_n^1, j)$ ,  $1 \leq l \leq m$ . Обозначим через  $I_l(C_i, C_j)$  косвенный эффект влияния  $C_i$  на  $C_j$  через причинный путь  $l$ . С помощью  $T(C_i, C_j)$  обозначим общий эффект влияния  $C_i$  на  $C_j$  через все  $m$  причинных путей. Тогда их величины можно рассчитать с помощью следующих выражений:

$$I_l(C_i, C_j) = \min \{e(C_p, C_{p+1}) : (p, p+1) \in (i, k_1^1, \dots, k_n^1, j)\},$$

$$T(C_i, C_j) = \max_{1 \leq l \leq m} I_l(C_i, C_j),$$

где  $p$  и  $p + 1$  – смежные слева направо индексы пути.

Следовательно, косвенный эффект равен самой слабой причинной связи в сети, а общий эффект – самой сильной из самых слабых связей в сети. Например, пусть оценки связей в нечеткой когнитивной карте на рис. 1 задаются множеством  $P = \{отсутствует, \text{слабая}, \text{средняя}, \text{сильная}\}$ .

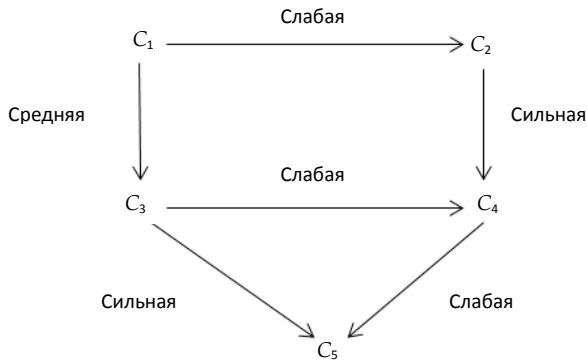


Рис. 1. Нечеткая когнитивная карта

Существуют три причинных пути из концепта  $C_1$  в концепт  $C_5$ : (1, 3, 5), (1, 3, 4, 5), (1, 2, 4, 5). Можно рассчитать три косвенных эффекта влияния  $C_1$  на  $C_5$ :

$$I_1(C_1, C_5) = \min \{e_{13}, e_{35}\} = \min \{\text{средняя}, \text{сильная}\} = \text{средняя};$$

$$I_2(C_1, C_5) = \text{слабая}; I_3(C_1, C_5) = \text{слабая}.$$

Тогда общий эффект влияния  $C_1$  на  $C_5$  равен:

$$T(C_i, C_j) = \max_{1 \leq l \leq 3} I_l(C_i, C_j) = \max \{\text{средняя}, \text{слабая}, \text{слабая}\} = \text{средняя}.$$

Следовательно,  $C_1$  влияет на  $C_5$  со средней силой.

В общем виде в качестве  $I$  может выступать любая  $T$ -норма, а в качестве  $T$  –  $S$ -норма, моделирующие соответственно связки «И» и «ИЛИ» в нечеткой логике. Чаще всего в качестве  $T$ -нормы принимается либо оператор MIN, либо PROD (произведение составляющих), а в качестве  $S$ -нормы – оператор MAX [1].

Доказано, что для любых  $x$  и  $y$ , а также оператора  $t(x, y)$ , выступающего в качестве  $T$ -нормы, отличной от MIN, и оператора  $s(x, y)$ , выступающего в качестве  $S$ -нормы, отличной от MAX, выполняется следующее неравенство [4]:

$$t(x, y) \leq \min(x, y) \leq \max(x, y) \leq s(x, y).$$

Рассмотрим пример. Заменяем лингвистические переменные на рис. 1 соответствующими нечеткими оценками на основе пятибалльной шкалы (табл. 1).

Таблица 1  
Перевод качественных оценок в нечеткие количественные оценки

Нечеткие количественные оценки	Лингвистические оценки (какой силы отношение?)
5/5 = 1,0	Абсолютно сильное
4/5 = 0,8	Сильное
3/5 = 0,6	Умеренно сильное
2/5 = 0,4	Слабое
1/5 = 0,2	Абсолютно слабое
0,0	Отсутствует

Тогда причинная матрица примет вид табл. 2.

Таблица 2  
Причинная матрица нечеткой когнитивной карты, изображенной на рис. 1

$i/j$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
$C_1$	0	0,4	0,6	0	0
$C_2$	0	0	0	0,8	0
$C_3$	0	0	0	0,4	0,8
$C_4$	0	0	0	0	0,4
$C_5$	0	0	0	0	0

Найдем косвенные и полные эффекты для всех путей нечеткой когнитивной карты. В качестве  $T$ -нормы примем PROD (произведение составляющих), а в качестве  $S$ -нормы – оператор MAX. Например, для первого концепта

$$T(C_1, C_1) = 0; T(C_1, C_2) = 0,4; T(C_1, C_3) = 0,6;$$

$$T(C_1, C_4) = \max \{e_{13} \cdot e_{34}, e_{12} \cdot e_{24}\} = \max \{0,24; 0,32\} = 0,32;$$

$$T(C_1, C_5) = \max \{e_{13} \cdot e_{35}; e_{13} \cdot e_{34} \cdot e_{45}; e_{12} \cdot e_{24} \cdot e_{45}\} = \max \{0,48; 0,096; 0,128\} = 0,48.$$

Матрица полных эффектов нечеткой когнитивной карты, изображенной на рис. 1, представлена в табл. 3.

Таблица 3  
Матрица полных эффектов нечеткой когнитивной карты, изображенной на рис. 1

$i/j$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
$C_1$	0	0,4	0,6	0,32	0,48
$C_2$	0	0	0	0,8	0,32
$C_3$	0	0	0	0,4	0,8
$C_4$	0	0	0	0	0,4
$C_5$	0	0	0	0	0

Если сравнить табл. 2 и 3, то можно увидеть, что благодаря наличию причинных связей при отсутствии прямого воздействия концепт  $C_1$  хоть слабо, но косвенно влияет на концепты  $C_4$  и  $C_5$ , а концепт  $C_2$  слабо косвенно влияет на  $C_5$ .

### Анализ поведения систем

Анализ поведения систем лучше всего проводить по матрице смежности, в которой присутствуют всего три значения: 0 – в случае отсутствия связи между концептами, 1 – при наличии положительной связи, -1 – при наличии отрицательной связи.

Продолжим рассмотрение нечеткой когнитивной карты, изображенной на рис. 1. Соответствующая матрица смежности со связями между концептами, удовлетворяющими условию  $e_{ij} \in \{-1, 0, 1\}$ , представлена в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Матрица связей в когнитивной карте, изображенной на рис. 1

$i/j$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
$C_1$	0	1	1	0	0
$C_2$	0	0	0	1	0
$C_3$	0	0	0	1	1
$C_4$	0	0	0	0	1
$C_5$	0	0	0	0	0

Поведение нечеткой когнитивной карты зависит от первоначального состояния концептов, от нелинейной структуры концептов, а также структуры причинной матрицы когнитивной карты. Простая нечеткая когнитивная карта с двумя возможными состояниями концептов (0 или 1) сходится либо к одному состоянию (a fixed-point attractor), либо к предельному циклу повторяющихся бинарных векторов (a limit cycle of repeating bit vectors), причем векторы могут повторяться либо через одинаковое, либо через разное количество шагов [7].

Каждое последующее состояние системы  $C(t + 1)$  определяется следующим образом:

$$C(t + 1) = \begin{cases} 1, & \text{если } C(t) \cdot E > 0; \\ 0, & \text{если } C(t) \cdot E \leq 0. \end{cases}$$

Проанализируем поведение рассматриваемой нечеткой когнитивной карты, зада-

ваемой матрицей связей в табл. 4. Пусть первоначальное воздействие оказывается на все концепты системы. Тогда можно увидеть, что уже с четвертого шага устанавливается стабильное состояние с нулевыми значениями концептов (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Поведение системы, моделируемой нечеткой когнитивной картой на рис. 1 и матрицей связей в табл. 4

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
$C(0)$	1	1	1	1	1
$C(0) \cdot E$	0	1	1	2	2
$C(1)$	0	1	1	1	1
$C(1) \cdot E$	0	0	0	2	2
$C(2)$	0	0	0	1	1
$C(2) \cdot E$	0	0	0	0	1
$C(3)$	0	0	0	0	1
$C(3) \cdot E$	0	0	0	0	0
$C(4)$	0	0	0	0	0
$C(4) \cdot E$	0	0	0	0	0
$C(5)$	0	0	0	0	0
$C(5) \cdot E$	0	0	0	0	0
$C(6)$	0	0	0	0	0

### Моделирование на основе нечеткой когнитивной карты

Моделирование на основе нечеткой когнитивной карты осуществляется следующим образом:

1. Задается матрица связей между концептами, элементы которой принимают значения в интервале  $[-1; 1]$  с нулевыми значениями на главной диагонали.

2. Задается исходное состояние концептов в виде вектора значений в интервале  $[0; 1]$ , описывающего силу первоначального воздействия на концепты.

3. Находится состояние концептов на следующем шаге путем матричного умножения предыдущего состояния концептов на матрицу связей (причинную матрицу) и применения трансформационной функции к полученным результатам, которая позволяет получить значения, лежащие в интервале  $[0; 1]$ . Данная процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто стабильное состояние концептов.

Моделирование на основе нечеткой когнитивной карты можно осуществить с помощью инструмента FCMapper, осно-

ванного на электронных таблицах Excel. Данная программа позволяет рассчитать все значимые индексы (входящая, исходящая, общая центральность, плотность), число концептов, связей между ними, определить тип факторов (отправитель, получатель, обычный), рассчитать их количество и тем самым дать общую характеристику сети. Также можно провести имитационный анализ поведения конкретной системы, увидеть тенденции ее развития. FCMapper создает файл, который с помощью специальных программ для анализа сетей, на-

пример Pajek, позволяет получить визуализацию нечеткой когнитивной карты.

Рассмотрим пример анализа экономической ситуации на основе нечеткой когнитивной карты, построенной с помощью Wolfram Mathematica (рис. 2). Из рисунка видно, что в качестве концептов нечеткой когнитивной карты выбраны факторы внутренней и внешней среды предприятия. Это позволяет целостно взглянуть на сложившуюся экономическую ситуацию, провести ее системный анализ, спрогнозировать дальнейшее развитие, принять правильные управленческие решения.

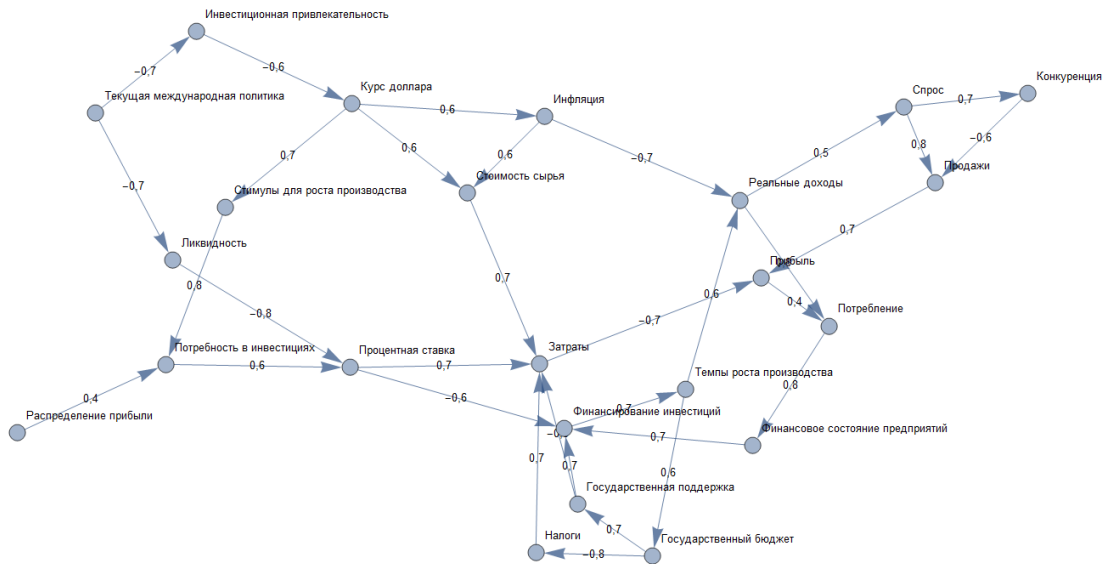


Рис. 2. Когнитивная карта экономической ситуации

**Общие характеристики системы в когнитивном моделировании**

Когнитивные карты являются моделями сложных систем, поскольку они состоят из большого числа переменных с прямыми и обратными связями. Они воспроизводят поведение систем, которое не сводится к сумме составляющих. Линейная алгебра и инструменты теории графов позволяют провести анализ когнитивных карт.

Сравнительный анализ когнитивных карт заинтересованных сторон позволит выявить различные точки зрения на ситуацию и тем самым получить целостное видение происходящих событий.

Анализ когнитивных карт проводится с помощью следующих показателей [8]:

1. Плотность (коэффициент кластеризации) нечеткой когнитивной карты ( $D$ ) – это коэффициент, показывающий степень связности карты:

$$D = \frac{C}{N(N - 1)},$$

где  $C$  – общее число связей в когнитивной карте;

$N$  – общее число переменных в когнитивной карте.

Высокая плотность карты свидетельствует о наличии большого количества причинных связей между переменными. Чем больше в карте взаимосвязей, тем больше имеется возможностей для изменения ситуации.

В нашем примере  $C = 33$ ,  $N = 23$ ,  $D = 0,06$ , что свидетельствует о не очень высокой плотности когнитивной карты.

2. *Тип переменных* показывает поведение переменных по отношению друг к другу. Кроме того, количество различных типов переменных в когнитивной карте облегчает понимание структуры карты. Различают три типа переменных: передатчики, приемники и обычные переменные. Эти переменные можно выявить с помощью показателей исходящей ( $od_i$ ) и входящей центральности ( $id_i$ ).

Переменные-передатчики имеют положительную исходящую центральность ( $od_i$ ) и нулевую входящую центральность ( $id_i$ ). Переменные-приемники имеют положительную входящую центральность ( $id_i$ ) и нулевую исходящую центральность ( $od_i$ ). Обычные переменные имеют ненулевые исходящую ( $od_i$ ) и входящую центральность ( $id_i$ ). В нашем примере наблюдаются 2 передатчика, 0 приемников и 21 обычная переменная.

2.1. *Исходящая центральность* представляет собой сумму по строке в матрице смежности нечеткой когнитивной карты. Она показывает совокупную силу связей ( $a_{ij}$ ), выходящих из рассматриваемой переменной:

$$od_i = \sum_{k=1}^N a_{ik},$$

где  $N$  – общее число переменных.

В нашем примере наибольшее влияние на другие концепты когнитивной карты оказывают курс доллара ( $od_i = 1,9$ ), спрос на готовую продукцию ( $od_i = 1,5$ ) и размер государственного бюджета ( $od_i = 1,5$ ).

2.2. *Входящая центральность* представляет собой сумму по столбцу в матрице смежности нечеткой когнитивной карты. Она показывает совокупную силу связей ( $a_{ij}$ ), входящих в рассматриваемую переменную:

$$id_i = \sum_{k=1}^N a_{ki}.$$

В нашем примере наибольшему влиянию других концептов когнитивной карты подвержены затраты предприятия

( $id_i = 2,4$ ), возможность финансирования инвестиций ( $id_i = 2,0$ ), прибыль ( $id_i = 1,4$ ), объем продаж предприятия ( $id_i = 1,4$ ) и действующая в экономике процентная ставка ( $id_i = 1,4$ ).

2.3. *Общая центральность* переменной ( $td_i$ ) есть сумма входящей и исходящей центральности:

$$c_i = td_i = od_i + id_i.$$

Вклад переменной в когнитивную карту можно понять, вычислив ее центральность, которая показывает, как переменная связана с другими переменными и какова совокупная сила этих связей. В нечетких когнитивных картах переменная может быть более центральной, даже если она имеет меньше связей, если связи имеют больший вес. В нашем примере наибольший вклад в когнитивную карту вносят следующие концепты: затраты предприятия ( $td_i = 3,1$ ), действующая в экономике процентная ставка ( $td_i = 2,7$ ) и возможность финансирования инвестиций ( $td_i = 2,7$ ).

3. *Соотношение числа переменных-приемников и переменных-передатчиков (R/T)*. Когнитивные карты можно сравнить с точки зрения их сложности по соотношению количества переменных-приемников и переменных-передатчиков ( $R/T$ ). Сложные карты имеют большое значение данного коэффициента, поскольку в них предполагается больше полезных результатов, вырабатываемых и используемых в системе, и меньше контролируемых воздействий на окружающую среду, чем в простых картах.

В нашем примере  $R/T = 0/2 = 0$ , что говорит о низкой сложности системы. В карте преобладают обычные переменные, т. е. сочетающие в себе функции приемников и передатчиков. Всего наблюдается 21 обычная переменная из 23 концептов.

4. Еще одной структурной мерой когнитивной карты является *индекс иерархии (h)*:

$$h = \frac{12 \cdot \sigma_{od}^2}{N^2 - 1},$$

где  $\sigma_{od}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (od_i - \mu_{od})^2}{N}$ ,  $\mu_{od} = \frac{\sum_{i=1}^N od_i}{N}$ .

При  $h = 1$  система является полностью иерархической, при  $h = 0$  – полностью демократической. Демократические системы более адаптивные к изменениям внешней среды из-за высокого уровня их интеграции и связности. В нашем примере  $h = 0,00351$ , что свидетельствует о высокой демократичности рассматриваемой системы.

### Заключение

Нечеткие когнитивные карты представляют собой способ отображения реальных динамических систем в форме, которая соответствует человеческому восприятию таких процессов. Это главная причина их широкого применения в различных сферах жизнедеятельности [8].

*Основные достоинства нечетких когнитивных карт:*

1. Возможность включить в модель обратную связь.
2. Возможность включить в модель много переменных, даже с нечеткими значениями.
3. Возможность моделировать отношения между переменными, которые неизвестны точно, но могут быть описаны в таких категориях, как «немного», «много».
4. Возможность моделировать системы, где объем точной информации ограничен, но доступны экспертные знания.
5. Легкость и скорость построения когнитивных карт и получения нужных результатов.
6. Легкость и скорость объединения разрозненных знаний.
7. Легкость и скорость моделирования ситуации и получения результатов применения той или иной политики.

*Основные недостатки нечетких когнитивных карт:*

1. В них закодированы знания интервьюируемых, их заблуждения и предвзятости. Данный недостаток может быть частично преодолен путем объединения большого количества когнитивных карт в силу действия закона больших чисел.

2. Хотя анализ «что – если» может быть проведен с помощью нечетких когнитивных карт, причины явлений не могут быть выявлены. Данный недостаток можно частично преодолеть путем изучения причинной матрицы, с помощью которой можно проследить причинно-следственные связи между переменными.

3. С их помощью не могут быть получены реальные оценки параметров или проведены статистические тесты.

4. Нечеткие когнитивные карты не могут моделировать поведение системы во времени в реальных значениях параметров – в моделировании применяются и получаются только относительные оценки.

5. Они не могут иметь дело с конъюнктивными утверждениями, которые выражаются союзом «И».

6. В них не могут быть закодированы условные утверждения типа «если, то».

В перспективе возможно использование нечетких когнитивных карт в моделировании сценариев развития экономической ситуации. Все сказанное определяет актуальность и целесообразность анализа сложных экономических систем на основе нечетких когнитивных карт в современных условиях хозяйствования.

### Список литературы

1. *Вокучева Т. А.* Вычисление матрицы взаимовлияния когнитивной карты // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2012. – Вып. 3 (11). – С. 123–129.
2. *Axelrod R.* Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites. – Princeton, NJ : Princeton University Press, 1976.
3. *Chrysafiadi K., Virvou M.* A Knowledge Representation Approach Using Fuzzy Cognitive Maps for Better Navigation Support in an Adaptive Learning System // SpringerPlus. – 2013. – Issue 2:81. – P. 1–13.
4. *Kosko B.* Fuzzy Cognitive Maps // International Journal of Man-Machine Studies. – 1986. – Vol. 24. – P. 65–75.



5. Kosko B. Fuzzy Engineering. – Upper Saddle River, NJ : Prentice-Hall, 1997.
6. Kosko B. Neural Networks and Fuzzy Systems. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 1992.
7. Osoba O. A., Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps of Public Support for Insurgency and Terrorism // Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology. – 2017. – Vol. 14 (1). – P. 17–32.
8. Özesmi U., Özesmi S. L. Ecological Models Based on People’s Knowledge: a Multi-Step Fuzzy Cognitive Mapping Approach // Ecological Modelling. – 2004. – N 176. – P. 43–64.
9. Papageorgiou E. Review Study on Fuzzy Cognitive Maps and their Applications during the Last Decade // Paper Presented at the IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Taipei. – Taiwan, 2011.
10. Stach W., Kurgan L., Pedrycz W., Reformat M. Genetic Learning of Fuzzy Cognitive Maps // Fuzzy Set Syst. – 2005. – Issue 153. – P. 371–401.

#### References

1. Vokueva T. A. Vychislenie matricy vzaimovliyaniya kognitivnoy karty [The Calculation of the Matrix Interference of the Cognitive Maps]. *Izvestiya Komi nauchnogo centra UrO RAN* [Proceedings of the Komi Science Center, Urals branch of RAS], 2012, Issue 3 (11), pp. 123–129. (In Russ.).
2. Axelrod R. Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites. Princeton, NJ, Princeton University Press, 1976.
3. Chrysafiadi K., Virvou M. A Knowledge Representation Approach Using Fuzzy Cognitive Maps for Better Navigation Support in an Adaptive Learning System. *SpringerPlus*, 2013, Issue 2:81, pp. 1–13.
4. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1986, Vol. 24, pp. 65–75.
5. Kosko B. Fuzzy Engineering. Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, 1997.
6. Kosko B. Neural Networks and Fuzzy Systems. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 1992.
7. Osoba O. A., Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps of Public Support for Insurgency and Terrorism. *Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, 2017, Vol. 14 (1), pp. 17–32.
8. Özesmi U., Özesmi S. L. Ecological Models Based on People’s Knowledge: a Multi-Step Fuzzy Cognitive Mapping Approach. *Ecological Modelling*, 2004, No. 176, pp. 43–64.
9. Papageorgiou E. Review Study on Fuzzy Cognitive Maps and their Applications during the Last Decade. *Paper Presented at the IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Taipei*. Taiwan, 2011.
10. Stach W., Kurgan L., Pedrycz W., Reformat M. Genetic Learning of Fuzzy Cognitive Maps. *Fuzzy Set Syst*, 2005, Issue 153, pp. 371–401.

#### Сведения об авторе

##### Анна Васильевна Заграновская

кандидат экономических наук, доцент  
кафедры прикладной математики  
и экономико-математических методов СПбГЭУ.  
Адрес: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный экономический университет»,  
191023, Санкт-Петербург, ул. Садовая, д. 21.  
E-mail: zagranet@rambler.ru

#### Information about the author

##### Anna V. Zagranovskaya

PhD, Assistant Professor of the Department  
for Applied Mathematics and Economic-  
Mathematical Methods of the SPSUE.  
Address: Saint-Petersburg State University  
of Economics, 21 Sadovaya str.,  
Saint-Petersburg, 191023, Russian Federation.  
E-mail: zagranet@rambler.ru