

Методический аппарат когнитивного моделирования социально-экономической системы (университета)*

Цель исследования. Целью исследования является совершенствование методического аппарата когнитивного моделирования социально-экономических систем (СЭС) и прогнозирования показателей их функционирования и развития, обеспечивающего повышение точности и достоверности получаемых результатов. Существующие модели и методики не в полной мере обеспечивают необходимую точность и достоверность моделей, что требует развития математического аппарата когнитивного моделирования в части повышения качества разрабатываемых когнитивных моделей.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели использованы методы комплексного подхода к решению поставленной задачи, декомпозиции ее на взаимосвязанные этапы, описание содержания каждого этапа в их взаимосвязи и представление обобщенного варианта методики с учетом особенностей объекта исследования. Разработанный подход обеспечивает построение более точной и достоверной когнитивной модели. Показана эффективность разработанного методического аппарата.

Результаты. Проведен детальный анализ существующих критериев и подходов к решению задачи верификации когнитивных моделей, который показал отсутствие единой методики и ком-

плексного подхода в решении задач когнитивного моделирования СЭС на основе когнитивных карт. Разработана совокупность методик, реализующих этапы когнитивного моделирования: методика построения проблемного поля ситуации; методика синтеза когнитивной карты, ее структурно-целевого анализа и анализа системных характеристик, а также методика верификации когнитивной модели.

Заключение. Предложено комплексное решение задачи построения когнитивной модели анализа и прогнозирования деятельности университета, включающее совокупность этапов: этап построения проблемного поля ситуации; идентификации факторов и связей между ними; этапе построения когнитивной карты и ее верификации, а также этап анализа системных характеристик когнитивной модели, валидации когнитивной модели. Разработанный методический аппарат предназначен для получения адекватной модели, обеспечивающей более точные и достоверные результаты моделирования объекта исследования.

Ключевые слова: нечеткое когнитивное моделирование, сценарное прогнозирование, когнитивная карта, методический аппарат.

Andrey A. Mikryukov, Mikhail E. Mazurov

Plekhanov Russian University of Economic, Moscow, Russia

Methodological Apparatus of Cognitive Modeling of Socio-Economic System (University)

Purpose of the study. The aim of the study is to improve the methodological apparatus of cognitive modeling of socio-economic systems (SES) and predicting the indicators of their functioning and development, which ensures an increase in the accuracy and reliability of the results obtained. Existing models and methods do not fully provide the necessary accuracy and reliability of models that requires the development of the mathematical apparatus of cognitive modeling in terms of improving the quality of the developed cognitive models.

Materials and methods. To achieve this goal, methods of an integrated approach to solving the problem, decomposing it into interrelated stages, describing the content of each stage in their relationship and presenting a generalized version of the methodology, taking into account the characteristics of the object of study, were used. The developed approach provides creating a more accurate and reliable cognitive model. The effectiveness of the developed methodological apparatus is shown.

Results. A detailed analysis of the existing criteria and approaches to solving the problem of verification of cognitive models was carried

out, which showed the absence of a unified methodology and an integrated approach in solving problems of cognitive modeling of SES based on cognitive maps. A set of techniques that implement the stages of cognitive modeling has been developed. The results of a comparative analysis of the developed approach with the existing ones are presented.

Conclusion. A comprehensive solution to the problem of creating a cognitive model for analyzing and predicting the activities of a university is proposed, which includes a set of stages: the stage of creating the problem field of the situation; identification of factors and relationships between them; the stage of making a cognitive map and its verification, as well as the stage of analyzing the system characteristics of the cognitive model, validating the cognitive model. The developed methodological apparatus includes a set of techniques aimed at obtaining an adequate model that provides more accurate and reliable results of modeling the object of study.

Keywords: fuzzy cognitive modeling, scenario forecasting, cognitive map, methodological apparatus.

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова»

Введение

В статье рассмотрена задача совершенствования методического аппарата когнитивного моделирования, широко применяемого для моделирования плохо формализуемых и слабоструктурированных социально-экономических и социально-технических систем, к классу которых относятся высшие учебные заведения. К достоинствам когнитивных моделей относятся возможность выявления структуры каузальных связей между компонентами сложной слабоструктурированных систем, которые не поддаются количественному анализу традиционными методами, широкое использование опыта и знаний экспертов в конкретной предметной области, а также их наглядность.

Проведенный анализ источников [1–6] показал, что наиболее востребованным подходом к построению когнитивных моделей является аппарат нечеткого когнитивного моделирования (НКМ) и его разновидности, в том числе гибридные НКМ, объединяющие методы лингвистического, аналитического и статистического описания объекта исследования в сочетании с нейросетевыми, иерархическими, интервальными методами, генетическими алгоритмами и др. Качество когнитивной модели зависит от множества факторов, не всегда обеспечивается ее адекватность, а также выполнение требований по достоверности и точности, что в свою очередь отрицательно сказывается на результатах принятых решений.

В ходе разработки когнитивных моделей при построении и анализе проблемного поля ситуации, выявлении факторов, влияющих на развитие ситуации, формировании ее структуры, определении силы их влияния друг на друга и целевые факторы и др., широко

используется мнение экспертов, которое носит субъективный характер и требует верификации создаваемой модели для обеспечения необходимого качества моделирования.

Анализ существующих подходов к решению задач когнитивного моделирования показал отсутствие единого комплексного методического аппарата, что не всегда позволяет обеспечить адекватность когнитивной модели и выполнение требований по достоверности и точности результатов моделирования объекта исследования. С учетом сказанного, решаемая задача является актуальной.

В статье предложен методический аппарат когнитивного моделирования плохо формализуемых и слабоструктурированных систем, представляющий комплексное решение задачи на каждом этапе когнитивного моделирования на основе совокупности разработанных методик: методики построения проблемного поля ситуации; методики синтеза когнитивной карты, ее структурно-целевого анализа и анализа системных характеристик,

а также методики верификации когнитивной модели.

На основе проведенного анализа сформулированы и обоснованы требования к построению адекватных нечетких когнитивных моделей, реализующих расширенные возможности по анализу и моделированию объекта исследования.

1. Особенности математического аппарата когнитивного моделирования

На рис 1. представлен циклический процесс когнитивного моделирования, включающий совокупность этапов.

Укрупненно процесс когнитивного моделирования включает этапы: построения и анализа проблемного поля ситуации, на котором происходит формальное описание ситуации с привлечением экспертов, выявление факторов, влияющих на целевые показатели и определение их взаимосвязей, построения когнитивной карты ситуации и проведение ее анализа, исследования когнитивной модели путем получения прогноза развития ситуации или нахождения

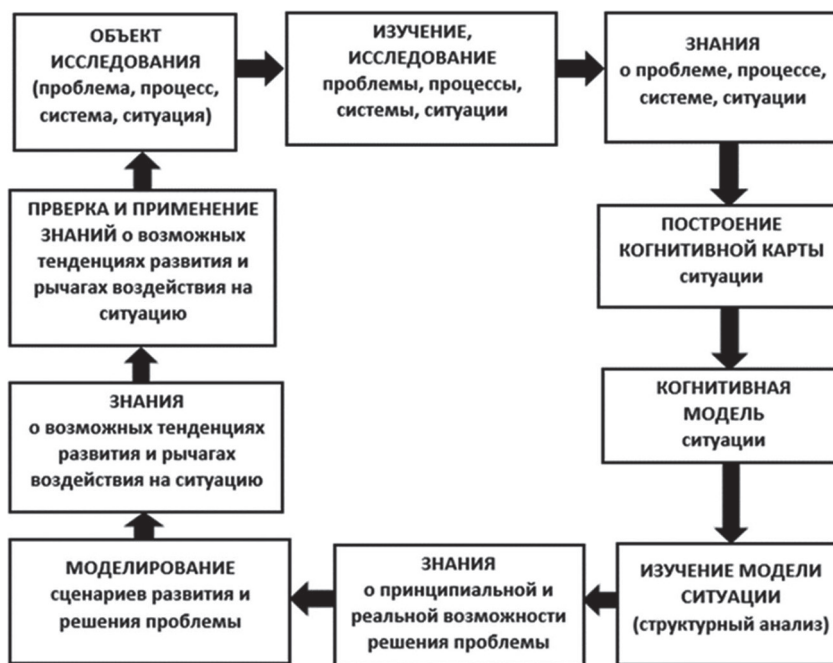


Рис. 1. Циклический процесс когнитивного моделирования [1]

Fig. 1. Cyclic process of cognitive modeling [1]

ния величины управляющего воздействия на выявленные факторы для получения ожидаемого результата.

Формализация процесса когнитивного моделирования может быть представлена следующим образом. На основе когнитивной карты KF , отражающей функционирование системы F строится модель развития системы, учитывающая ее особенности на основе выявления проблемных ситуаций и обоснования управляющих воздействий для их разрешения. При этом задается целевой образ исследуемой системы, определяющий желательные изменения состояния системы

$$C = (XC \times (XC)), \quad (1)$$

где XC – множество целевых факторов; $R(XC)$ – вектор оценок динамики факторов, которые определяют желательные (необходимые) направления изменения целевых факторов [2].

В общем случае когнитивная модель может быть представлена в виде кортежа:

$$M_S = \langle K_F(X_{внеш} \cup X_{внутр}), A, f_{KF}; C(X^C R(X^C)); \{AS^p(H^p_c, H^p_u)\}, X(0); G(0) \rangle, \quad (2)$$

где: $K_F(X_{внеш} \cup X_{внутр})$ – когнитивная карта ситуации, включающая множество внешних и внутренних факторов, влияющих на целевые факторы объекта исследования; $A = [a_{ij}]$ – матрица $N \times N$, определяющая взаимовлияние факторов x_i и x_j ; f_{KF} – функция, задающая правило изменения значений факторов; $AS^p(H^p_c, H^p_u)$ – множество субъектов p , которые влияют на ситуацию, H_c – множество факторов, относящихся к области интересов субъекта; H_u – множество факторов, на которые субъект может оказывать воздействие, $X(0)$ – начальное состояние ситуации; $G(0)$ – вектор дополнительных внешних воздействий субъекта на факторы при моделировании изменения ситуаций.



Рис. 2. Разновидности когнитивных карт [3]

Fig. 2. Varieties of cognitive maps [3]

Когнитивные модели позволяют решать два класса задач: динамического анализа развития ситуации путем определения величины необходимых воздействий на внешние и внутренние факторы для достижения заданного состояния целевого фактора и прогнозирования ситуации путем определения состояния целевого фактора при существующих воздействиях на внешние и внутренние факторы.

В настоящее время для моделирования СЭС используются разновидности когнитивных карт. На рис. 2 представлены существующие способы формирования когнитивных карт [3].

Выбор нечеткой когнитивной карты обосновывается следующими причинами. Классические когнитивные карты не всегда обеспечивают построение адекватной и достоверной математической модели из-за высокого уровня неопределенности взаимодействия компонентов объекта исследования. Они являются линейными и не в полной мере учитывают динамические свойства реальных систем, которые могут быть существенно нелинейными и нестационарными.

Существуют следующие разновидности НКК [4–10]: реляционные НКК, интервально-значные НКК, серые НКК,

грубые НКК, интуитивистские НКК, продукционные НКК, динамические НКК.

Сила связей между концептами НКК задается с помощью нечеткой лингвистической шкалы, представляющей собой упорядоченное множество лингвистических значений (термов) оценок силы связи. Использование нечетких когнитивных карт обеспечивает удобную интерпретацию причинно-следственных связей между концептами. Все это в совокупности обеспечивает построение более адекватной модели объекта исследования.

Задача анализа применительно к моделям на основе нечетких когнитивных карт выглядит следующим образом:

Получение прогноза развития ситуации (прямая задача) [11]:

Пусть заданы: когнитивная карта $G(V, W)$, где V – множество вершин, отражающих факторы ситуации, W – матрица смежности, отражающая взаимосвязи факторов; множество $\{Z_1, \dots, Z_n\}$ шкал всех факторов ситуации; начальное состояние ситуации $X(0) = (x_1(0), \dots, x_n(0))$; начальный вектор приращений факторов ситуации $P(0) = (p_1(0), \dots, p_n(0))$.

Необходимо найти состояния ситуации $X(1), \dots, X(n)$ и векторы приращений $P(1), \dots, P(n)$ в последовательные дис-

кретные моменты времени $\{1, \dots, n\}$, где $n = \|I\|$ для того, чтобы влияние исходного возмущения могло достичь всех вершин.

Прогноз развития ситуации определяется на основе матричного соотношения:

$$P(t+1) = P(t) \circ W \quad (3)$$

где \circ – правило max-product:

$$p_i(t+1) = \max_{j \text{ mod}} (p_j(t)w_{ji}) \quad (4)$$

Приращение $p_i(t+1)$ представляет собой максимальную по модулю величину из $p_j(t)w_{ji}$, где максимум берется по всем факторам, входным для фактора v_i (для остальных факторов $w_{ji} = 0$).

При решении прямой задачи должны учитываться следующие существенные аспекты, связанные с нечеткой когнитивной картой:

- при анализе нечетких ситуаций интервалы времени также являются нечеткими, т.к. время реализации одного фактора на другой неизвестно и оценивается экспертно. Целевое состояние не вычисляется итеративно, а представляет собой обобщенную качественную оценку прогноза развития ситуации;

- в алгоритмах используются нечеткие матричные операции (композиции): max-product (сложение представляет собой взятие максимума, умножение – стандартно) или max – min (умножение представляет собой взятие максимума);

- при вычислении приращений и состояний ситуации вычисляются не только очередное значение приращения, но и степень уверенности (значение консонанса) его выбора (прогноза).

Задача нахождения величины управляющего воздействия (обратная задача):

В этом случае необходимо найти величину управляющего воздействия, которое обеспечит требуемое приращение

целевых факторов. Для определения степени влияния на целевые факторы применяется операция нечеткого транзитивного замыкания матрицы смежности W : $W' = \{w'_{ij} = (w_{ij}), (w_{ij})^2, \dots, (w_{ij})^n\}$, где элемент $(w_{ij})^k$ матрицы W' ($k = 1, 2, \dots, n$) вычисляется из соотношения: $(w_{ij})^k = (w_{ii}(w_{ij})^{k-1})$.

Операция транзитивно-го замыкания заключается в получении результатов влияния факторов друг на друга не только непосредственно, но и через промежуточные факторы. В этом случае задача формулируется следующим образом. Пусть задана матрица транзитивного замыкания W' , отражающая причинно-следственные связи между факторами, и целевой вектор требуемых приращений целевых факторов $\overline{P}_{\text{тр}} = (\overline{P}_1, \overline{P}_2, \dots, \overline{P}_n)$. Необходимо найти множество векторов входных воздействий $\Omega = \{U\}$, таких, что для всех $U \in \Omega$ обеспечивается выполнение равенства $UW' = \overline{P}_{\text{тр}}$.

Поскольку когнитивные модели создаются экспертами на основе построения и анализа проблемного поля ситуации, выявления факторов, влияющих на развитие ситуации, формирования ее структуры, определения силы их влияния друг на друга и целевые факторы и др., они носят субъективный характер и требуют их верификации для обеспечения требуемого качества моделирования.

На основе проведенного анализа сформулированы требования к построению адекватных нечетких когнитивных моделей, реализующих расширенные возможности по анализу и моделированию объекта исследования:

- необходимость реализации нечеткого подхода на всех этапах построения когнитивной модели (формализации силы связи между концептами, аккумуляции силы влияния нескольких концептов на

один концепт, формализации процесса обучения НКК, а также моделирования системной динамики);

- формализация концептов должна предусматривать возможность их представления в четком и нечетком виде;

- используемый механизм нечеткого влияния между концептами должен соответствовать нечеткому отображению нечеткого множества значений входного концепта на нечеткое множество значений выходного концепта;

- при построении когнитивной модели необходимо учитывать отрицательные веса влияния между концептами, а также аккумуляцию влияния разных знаков;

- процедура аккумуляции влияний входных концептов на выходные должна иметь аддитивный характер и не зависеть от порядка учета отдельных факторов, т.е. иметь свойства коммутативности и ассоциативности.

2. Структурно-целевой анализ и верификация когнитивной модели

Проблема верификации занимает отдельное самостоятельное место в решении задачи когнитивного моделирования, т.к. она напрямую влияет на результаты работы когнитивной модели и обеспечивает ее точность, адекватность и достоверность.

Анализ источников, посвященных рассматриваемой проблематике, показал, что качество когнитивной модели обеспечивается путем решения следующих задач:

1. **Анализ достоверности (правдоподобности) когнитивной карты.** Нестрогий критерий правдоподобности структуры когнитивной карты представлен в работе [12]. Правдоподобной считается когнитивная карта, структура которой понятна пользователю и позволяет отразить реаль-

но существующие процессы. Такое представление с точки зрения психологии когнитивной карты носит название гештальт-образа (целостного представления предметной области на основе когнитивной модели). Формирование объективного гештальт-образа когнитивной карты достаточно сложная задача и напрямую связано с представлениями экспертов, которые носят субъективный характер.

2. **Анализ и выявление систематических ошибок разработчиков.** В работах [13, 14] рассмотрены следующие эвристические критерии оценки качества когнитивных карт, приводящие к ошибкам:

– **критерий достоверности НКК** (с учетом наличия факторов риска 1-го рода, связанных с экспертом, и рисков 2-го рода, связанных с «посредником» в передаче знаний и их последующей формализацией при описании проблемного поля ситуации:

– **критерий наличия нормальной формы для концепта K_i** означает, что он может быть естественно интерпретирован как концепт и как переменная, принимающая числовые и лингвистические значения на определенных шкалах. При выполнении этого критерия достигается ясность математической модели для конкретного фактора в виде математической модели;

– **критерий бесконтекстности понимания конструкций карты**, понятности связей в соответствии с семантикой, полноты влияния на концепт и соразмерности концептов по объему понятий. Бесконтекстность понимания конструкций карты (связей между факторами) подразумевает полное и однозначное понимание экспертом семантики этих связей без дополнительного контекста в рамках этой карты.

– **критерий соразмерности полноты влияний на фактор.** Критерий выполняется, если

не существует по мнению эксперта других факторов прямого влияния на фактор K_i ;

– **критерий соразмерности понятий факторов и нарушения транзитивности каузальных явлений.** Как известно, отношение R является транзитивным, если для любых троек A, B и C , таких, что пары (A, B) и (B, C) удовлетворяют ему, то и пара (A, C) также ему удовлетворяет, т.е. справедливо выражение [15]:

$$\forall a, b, c: aRb \wedge bRc \Rightarrow aRc \quad (5)$$

– **критерий взаимовлияния концептов НКК, консонанса и диссонанса (степень достоверности и недостоверности влияния).** С этой целью на основе исходной когнитивной матрицы, представляющей матрицу смежности графа когнитивной карты, рассчитывается **транзитивно замкнутая матрица** с помощью операции макстриангулярной композиции нечеткой каузальной алгебры, а также – характеристики НКК, анализ которых позволяет выделить из множества управляемых концептов группы способствующих и препятствующих концептов, с учетом степени их влияния на систему и достоверности (консонанса) этого влияния.

Для выявления опосредованного влияния концептов НКК друг на друга применяется операция транзитивного замыкания квадратной нечеткой матрицы весов концептов [16]:

$$\tilde{W} = W \cup W^2 \cup W^3 \cup \dots, \quad (6)$$

где степени нечетких матриц вычисляются на основе выполнения операции макстриангулярной композиции:

$$W^k = W^{k-1} \circ W^2 \quad (7)$$

Для выявления взаимовлияния концептов необходимо преобразовать исходную матрицу НКК с положительно-отрицательными нечеткими связями к нечеткой матрице положительных связей $R = \|r_{ij}\|_{2n \times 2n}$ размерностью $2n \times 2n$, элементы ко-

торой могут быть определены на основе матрицы $W = \|w_{ij}\|$, полученной на основе следующих правил:

если $w_{ij} > 0$, то элементы матрицы R определяются как:

$$r_{2i-1, 2j-1} = w_{ij}, r_{2i, 2j} = w_{ij}; \quad (8)$$

если $w_{ij} < 0$, то элементы матрицы R определяются как

$$r_{2i-1, 2j-1} = -w_{ij}, r_{2i, 2j} = -w_{ij}. \quad (9)$$

При этом остальные элементы матрицы имеют нулевые значения. Отношения взаимовлияния концептов определяются из результата транзитивного замыкания нечеткого отношения R :

$$\tilde{R} = \bigcup_{i=1}^n R^i = R \cup R^2 \cup \dots \cup R^n, \quad (10)$$

где n – число концептов.

На основе полученной матрицы \tilde{R} можно перейти к транзитивно замкнутой матрице V с элементами, представляющими пары (v_{ij}, \tilde{v}_{ij}) , где v_{ij} определяет силу положительного влияния i -го концепта на j -й, а \tilde{v}_{ij} силу отрицательного влияния в соответствии с выражениями:

$$v_{ij} = \max(r_{2i-1, 2j}, r_{2i, 2j}), \quad (11)$$

$$\tilde{v}_{ij} = -\max(r_{2i-1, 2j-1}, r_{2i, 2j-1}) \quad (12)$$

Элементы матрицы $V = \|v_{ij}, \tilde{v}_{ij}\|$ характеризуют динамику моделируемой системы и характеризуют степень достижения одной или нескольких целей моделирования.

На основе полученной матрицы рассчитываются основные системные и интегральные показатели НКК для анализа модели [16]:

- взаимный консонанс,
- взаимный диссонанс,
- степень положительного и отрицательного взаимовлияния концептов и целевого показателя системы (в нашем случае – рейтинг университета).

Консонанс влияния i -го концепта на j -й рассчитывается по формуле:

$$c_{ij} = \frac{|v_{ij} + \tilde{v}_{ij}|}{|v_{ij}| + |\tilde{v}_{ij}|} \quad (13)$$

Диссонанс определяется как нечёткое дополнение консонанса:

$$d_{ij} = 1 - c_{ij} \quad (14)$$

Величина воздействия i -го концепта на j -й определяется по формуле:

$$p_{ij} = \operatorname{sgn}(v_{ij} + \tilde{v}_{ij}) \max(|v_{ij}|, |\tilde{v}_{ij}|), \quad |v_{ij}| \neq |\tilde{v}_{ij}| \quad (15)$$

В качестве итогового влияния между концептами принимается максимальное по модулю значение величины влияния.

Консонанс влияния i -го концепта на систему:

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|v_{ij} + \tilde{v}_{ij}|}{|v_{ij}| + |\tilde{v}_{ij}|} \quad (16)$$

где c_{ij} — консонанс влияния i -го концепта на j -й.

Консонанс влияния системы на j -й концепт:

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ji} \quad (17)$$

Аналогичным образом рассчитывается диссонанс влияния i -го концепта на систему:

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (18)$$

Диссонанс влияния системы на j -й концепт

$$D = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ji} \quad (19)$$

Значения рассчитанных системных показателей могут быть сведены в таблицу и проанализированы с целью выбора наиболее предпочтительного сценария приращения наиболее значимых факторов (концептов) для получения желаемого результата.

Предложенный комплекс критериев достоверности построенной НКК основан на понятии когнитивной ясности, которая определяет простоту представления и понимания структуры НКК.

3. **Анализ уровня устойчивости** характеризуется близостью реального состояния объекта к состоянию равновесия [17]. Применительно к

взвешенным и ориентированным графовым моделям НКК под устойчивостью понимается **устойчивость по значению** и **устойчивость по возмущению системы** по мере ее эволюции. Выделяют понятие **структурной устойчивости**, которое по мнению авторов работы [18] является центральным показателем устойчивости НКК, под которой понимается выявление качественных изменений в траектории движения системы при изменениях ее структуры, т. е. рассматривается группа или класс исследуемых систем, близких к некоторой стандартной системе, поведение которой хорошо исследовано.

В работе [19] предложено устойчивость рассматривать с двух позиций: **абсолютная устойчивость** состояний концептов НКК и **относительная устойчивость** значений импульсов, воздействующих на эти концепты:

– концепт u_j взвешенного орграфа D абсолютно устойчив, если последовательность изменения ее состояний $\{v_j(t) : t = 0, 1, 2, \dots\}$ является ограниченной;

– концепт u_j взвешенного орграфа D импульсно устойчив, если последовательность изменения ее состояний $\{p_j(t) : t = 0, 1, 2, \dots\}$ является ограниченной;

– взвешенный орграф D является абсолютно (импульсно) устойчивым в автономном импульсном процессе, если этим свойством обладает каждый его концепт.

Однако, такой подход является достаточно громоздким и трудоемким поэтому на практике целесообразно определять **устойчивость НКК характером ее обратных связей** на основе анализа циклов отрицательной и положительной обратной связи [20]. В этом случае **условием устойчивости НКК** является наличие нечетного числа циклов отрицательной обратной связи, а условием неустойчивости — наличие

четного числа циклов положительной обратной связи.

4. **Анализ применения метода «как-объяснений» прогноза развития ситуации** [21], суть которого заключается в описании последовательности процесса получения прогнозных значений факторов в виде цепочки сработавших в вершинах (концептах) когнитивной карты правил и определении приращений всех факторов, включенных в объясняющую цепочку, что обеспечивает понимание процессов в когнитивной карте. Для нахождения объясняющих цепочек применяются алгоритмы поиска путей в графе, алгоритмы поиска кратчайшего пути Дейкстры и др.

5. **Анализ интерпретируемости НКК.** Под интерпретируемостью когнитивной модели понимают прозрачность ее функционирования и способность отражать поведение моделируемой системы [22]. Указанный показатель необходим для анализа НКК с большим количеством концептов и связей между ними, что существенно затрудняет их восприятие и понимание. В работе [23] показано, что интерпретируемость рассматривается в двух аспектах: выборе **адекватных и понятных средств моделирования** и выборе **адекватных и понятных оценок экспертов**.

Важной задачей при анализе сценариев моделирования НКК для конкретного объекта исследования и обеспечения их достоверности является использование критериев сравнительного анализа на основе различных метрик. В работе [24] обосновано применение следующих метрик:

- на основе анализа контента;
- на основе анализа показателей структурной сложности;
- на основе анализа динамики поведения НКК.

Указанные метрики позволяют оценить характер изменения состояния НКК во времени.

К мерам по повышению интерпретируемости можно отнести использование **системных характеристик** построенной когнитивной модели, которые представлены в п. 6.

6. Анализ системных характеристик когнитивной модели.

Анализ НКК выполнен на основе ряда **ключевых характеристик (показателей) $P_1 - P_7$** , позволяющих определить насколько разработанная модель отражает когнитивные аспекты (процессы анализа, восприятия, мышления, познания, объяснения и понимания объекта исследования и его функционирования), в том числе аспекты сценарного прогнозирования его развития в условиях воздействующих факторов и внешней среды [25]:

6.1. **Плотность P_1** (коэффициент кластеризации) D отражающий степень связности НКК:

$$D = \frac{C}{N(N-1)}, \quad (20)$$

где C – общее число связей в НКК;

N – общее число переменных в НКК.

Высокий уровень плотности характеризует наличие достаточно большого количества каузальных связей между концептами.

6.2. **Тип переменных P_2** (передатчики, приемники, обычные переменные) отражает соотношение переменных между собой и обеспечивает восприятие и понимание структуры НКК. Типы переменных выявляются с помощью показателей исходящей (od_i) и входящей (id_i) центральности. Различие между типами переменных заключается в следующем: переменные-передатчики характеризуются положительной исходящей центральностью (od_i) и нулевой входящей центральностью (id_i). Переменные-приемники имеют положительную входящую центральность (id_i) и нулевую исходящую центральность

(od_i). Обычные переменные характеризуются ненулевой исходящей (od_i) и входящей центральностью (id_i).

6.3. **Исходящая центральность od_i , (P_3)**. Сумма по строке в матрице смежности НКК. Показатель означает суммарную силу связей, выходящих из рассматриваемого концепта.

$$od_i = \sum_{k=1}^N a_{ik}, \quad (21)$$

где a_{ik} – сила связей, выходящих из i -го концепта; N – число связей.

6.4. **Входящая центральность id_i , (P_4)**. Сумма по столбцу в матрице смежности НКК. Показатель означает суммарную силу связей, входящих в рассматриваемый концепт.

$$id_i = \sum_{k=1}^N a_{ki}, \quad (22)$$

где a_{ik} – сила связей, входящих в i -й концепт; N – число связей.

6.5. **Общая центральность переменной td_i , (P_5)**, представляющая собой сумму входящей и исходящей центральности:

$$td_i = od_i + id_i. \quad (23)$$

Общая центральность иллюстрирует совокупные связи концепта K_i с другими концептами и их силу, т. е. какие связи вносят наибольший вклад.

6.6. **Соотношение числа переменных – приемников и переменных – передатчиков (R/T), P_6** . Показатель позволяет оценить сложность НКК по соотношению количества переменных – приемников и переменных – передатчиков.

6.7. **Индекс иерархии h , (P_7)**

$$h = \frac{12 - \delta_{od}^2}{N^2 - 1}, \quad (24)$$

где

$$\delta_{od}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (od_i - \mu_{od})^2}{N}, \quad \mu_{od} = \frac{\sum_{i=1}^N od_i}{N}. \quad (25)$$

В случае, когда $h = 1$, исследуемая система является **полностью иерархической**, когда $h = 0$ – **полностью демократической**. Демократические системы вследствие высокого уровня интеграции и связности являются более адаптивными к изменениям внешней среды.

3. Анализ возможности обучения когнитивной карты

Важное место в решении задач обеспечения качества и адекватности КК имеет возможность обучения КК, которое заключается в корректировке силы взаимосвязей между концептами или их параметрической настройке. Применение алгоритмов обучения позволяет улучшить системные когнитивной карты, степень ее адекватности исследуемому объекту, что обеспечивает получение более достоверного и точного решения.

В связи со структурным подобием нейросетей и НКК возможно использование результатов теории обучения искусственных нейросетей для решения задачи обучения НКК. В качестве обучающей выборки возможно использование исторических данных по изменению концептов НКК. Обучение НКК заключается в решении задачи обновления каузальных связей путем их более точной настройки. В работах [26,27] предложен подход на основе дифференциального правила Хебба. В работе [28] предложен подход к обучению НКК методом обучения без учителя. В работе [29] используется алгоритм, основанный на эволюционных вычислениях, где стратегии эволюции используются для определения конфигурации исследуемой системы. В работах [30,31] рассмотрена гибридная когнитивная карта, состоящая из комбинации нечеткой когнитивной карты и нейро-нечеткой сети.

4. Обобщенная методика оценки и управления качеством моделей СЭС (университета)

Проведенный анализ позволил разработать и обосновать обобщенную методику обеспечения качества когнитивной модели и оценки ее показателей на всех этапах ее построения. По результатам анализа разработана общая концептуальная схема методики, включающая совокупность частных методик, реализуемых на различных этапах моделирования (рис. 3).

Выделены следующие ключевые этапы, входящие в концептуальную схему когнитивного моделирования:

1. Идентификации факторов, их взаимосвязей и построения проблемного поля ситуации.

2. Синтеза когнитивной карты и ее структурно-целевого анализа.

3. Верификации когнитивной модели.

На 1-м этапе разработана **частная методика построения проблемного поля ситуации**. На этом этапе решается задача извлечения и структуризации знаний о ситуации, выполняется сбор статистической и экспертной информации, идентификация факторов, влияющих на целевые показатели и др. От качества формирования проблемного поля ситуации зависит адекватность полученной модели. При решении задачи выявления применяется SWOT-анализ, который предполагает глубокий анализ объекта исследования, обеспечивает максимально объективную его оценку с точки зрения сильных (положительных) сторон и слабых (отрицательных) сторон внешней и внутренней среды, а также возможностей и угроз.

При построении проблемного поля ситуации для структуризации знаний использован

объектно-структурный подход [32], согласно которому анализ и представление знаний осуществляется в нескольких аспектах (стратах): стратегическом, организационном, концептуальном, функциональном, пространственном, временном, каузальном и экономическом.

Несмотря на универсальность подхода на основе SWOT-анализа, он обладает рядом следующих недостатков [2]:

– в результате проведенного ситуационного анализа разработчик получает статические характеристики, которые, в отличие от динамических характеристик ситуации, не позволяют получить объективную картину объекта исследования;

– типовая процедура SWOT-анализа учитывает влияние внешней среды на объект исследования, но не учитывает возможность влияния самого объекта на среду, опосредованное влияние объекта самого на себя через внешнюю среду, а также взаимодействие между факторами внешней среды (возможностями и угрозами) в интересах развития;

– полученная SWOT-матрица, включающая множество разнородных факторов, не позволяет однозначно оценить природу из взаимосвязей, а также наиболее значимые факторы с учетом их корреляции.

В связи с этим предложено использовать для выявления таких связей подход на основе методов корреляционно – регрессионного анализа, а для определения наиболее значимых факторов – метод факторного анализа. В работе [33] представлено решение задачи идентификации латентных факторов, влияющих на целевые показатели деятельности университета, на основе разработанного подхода.

В условиях достаточно большого количества факторов, приводящего к усложнению модели, необходимо снижать

МЕТОДИКА КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ УНИВЕРСИТЕТА



Рис. 3. Методика когнитивного моделирования
Fig. 3. Cognitive modeling technique

ее размерность за счет редукции факторного пространства путем выделения релевантных факторов на основе методов факторного анализа.

Разработанная методика включает следующие шаги:

Шаг 1. Проведение анализа внешних и внутренних факторов, влияющих на целевые показатели и сведение их в две группы: внешние и внутренние. Декомпозиция внешних и внутренних факторов на совокупность частных (единичных) факторов и их структурирование. Проведение глубокой диагностики объекта исследования на основе SWOT-анализа:

- а) Формирование списка сильных и слабых сторон;
- б) Формирование списка рисков (опасностей) и возможностей;
- в) Выявление связей между различными элементами списков;
- г) Регистрация результатов анализа в табличной форме.

Шаг 2. Структуризация знаний экспертов с использованием проблемного поля знаний, построение и выявление на основе метода экспертных оценок совокупности единичных факторов, оценка степени их влияния на целевые показатели.

Шаг 3. Выявление статистической связи (корреляции) и определение силы связи между базовыми показателями объекта исследования и главным показателем на основе методов корреляционно-регрессионного анализа.

Процедуры корреляционного анализа:

- а) Построение матрицы корреляции базовых показателей объекта исследования и главного показателя.
- б) Расчет коэффициентов попарной корреляции базовых показателей и главного показателя с использованием критерия Пирсона.
- в) Оценка тесноты связей коэффициентов корреляции.
- г) Расчет коэффициентов детерминации (мера изменчиво-

сти главного показателя от изменения базового показателя).

Результатом корреляционно-регрессионного анализа является определение степени влияния базовых показателей на главный показатель объекта исследования и тесноты их взаимосвязей.

Шаг 4. Применение метода главных компонент с целью редукции большого числа связанных между собой (зависимых, коррелирующих) переменных, так как большое количество переменных существенно затрудняет анализ и интерпретацию полученных результатов.

Процедуры факторного анализа:

- а) построение корреляционной матрицы системы переменных путем расчета коэффициентов линейной корреляции Пирсона.
- б) Построение факторной модели как линейной комбинации общих факторов F_1, F_2, \dots, F_n и частного фактора U_i :

$$x_i = \sum_{k=0}^n a_{ik} F_k + U_i \quad (26)$$

где x_i – переменная, $i = 1, m$, (m – количество переменных); n – количество факторов; $n < m$, a_{ik} – факторная нагрузка (коэффициент корреляции между исходными; F_k – общий фактор, $k = 1, n$; U_i – частный фактор.

в) Вычисление главных компонент (определение собственных векторов и собственных значений $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$ корреляционной матрицы исходных данных) при условии $|\alpha_{ij}| > 0,7$.

г) Сокращение размерности пространства $Y = (y_1, y_2, \dots, y_k)$ посредством отсека неинформативных переменных с использованием критерия Кайзера, в соответствии с которым считается, что те факторы, у которых этот показатель меньше 1, 0, не вносят значительного вклада в объяснение результата.

д) Интерпретация полученных результатов на основе Варимакс-метода.

е) Извлечение факторов и расчет факторных нагрузок, являющихся основным предметом интерпретации на основе метода компонентного анализа (метод главных компонент) главных факторов и максимального правдоподобия.

Результатом применения математического аппарата факторного анализа явилось снижение размерности числа используемых переменных за счет их объяснения меньшим числом факторов и группирование, а также структурирование полученных данных.

Принято считать, что при обоснованном факторном решении выбирают столько факторов, чтобы они в сумме объясняли не менее 70–75% дисперсии. В отдельных случаях этот показатель может достигать 85–90%. Матрица факторных нагрузок иллюстрирует силу связи переменной с фактором. Чем выше факторная нагрузка по абсолютной величине, тем выше сила связи.

Т.о. разработанная методика позволила выявить наиболее значимые факторы, оказывающие наибольшее влияние на целевые показатели.

К отличительным особенностям разработанной методики относятся: возможность выявления силы связей между факторами на основе методов статистического анализа, а также возможность выявления наиболее значимых факторов, их группирование и снижение размерности когнитивной модели.

На 2-м этапе разработана **частная методика синтеза адекватной когнитивной модели и ее структурно-целевого анализа** с учетом требований по достоверности и точности. Анализ существующих подходов, обеспечивающих повышение качества синтезируемой когнитивной модели, позволил выделить следующие ключевые задачи с учетом их реализуемости:

– **Анализ и выявление систематических ошибок разработчиков**, на основе которого рассчитываются основные системные и интегральные показатели НКК для анализа разработанной модели: *взаимный консонанс, взаимный диссонанс, степень положительного и отрицательного взаимовлияния концептов и целевого показателя системы; оценка уровня структурной устойчивости, определяемой характером ее обратных связей.*

– **Анализ системных характеристик когнитивной модели** (плотность, тип переменных, центральность (исходящая, входящая, общая), соотношение числа переменных – приемников и переменных – передатчиков, индекс иерархии).

С учетом рассмотренных ключевых задач разработана методика синтеза адекватной когнитивной модели и обеспечения ее интерпретируемости, включающая следующие шаги:

Шаг 1. Построение исходной когнитивной матрицы W , представляющей матрицу смежности графа когнитивной карты.

Шаг 2. Применение операции транзитивного замыкания квадратной нечеткой матрицы весов концептов: $\tilde{W} = W \cup W^2 \cup W^3 \dots$, где степени нечетких матриц вычисляются на основе выполнения операции макстриангулярной композиции: $W^k = W^{k-1} \circ W$.

Шаг 3. Преобразование исходной матрицы НКК с положительно-отрицательными нечеткими связями к нечеткой матрице положительных связей $R = \|r_{ij}\|_{2n \times 2n}$ размерностью $2n \times 2n$, элементы которой определяются на основе матрицы $W = \|w_{ij}\|$, полученной на в соответствии с правилами: если $w_{ij} > 0$, то элементы матрицы R определяются по формуле: $r_{2i-1, 2j-1} = w_{ij}$, $r_{2i, 2j} = w_{ij}$; если $w_{ij} < 0$, то – по формуле $r_{2i-1, 2j-1} = -w_{ij}$, $r_{2i, 2j} = -w_{ij}$.

Шаг 4. Определение отношения взаимовлияния

концептов на основе результатов транзитивного замыкания нечеткого отношения R : $\tilde{R} = \bigcup_{i=1}^n R^i = R \cup R^2 \cup \dots \cup R^n$, где n – число концептов.

Шаг 5. Переход к транзитивно замкнутой матрице V с элементами, представляющими пары (v_{ij}, \tilde{v}_{ij}) , где v_{ij} – сила положительного влияния i -го концепта на j -й, $v_{ij} = \max(r_{2i-1, 2j}, r_{2i, 2j})$; а \tilde{v}_{ij} – сила отрицательного влияния $\tilde{v}_{ij} = -\max(r_{2i-1, 2j}, r_{2i, 2j-1})$. Элементы матрицы $V = \|v_{ij}, \tilde{v}_{ij}\|$ характеризуют динамику моделируемой системы и степень достижения целей моделирования.

Шаг 6. Расчет основных системных и интегральных показателей НКК для анализа модели в соответствии с формулами (13)–(19). Полученные значения сводятся в таблицу, на основе которой может быть выбран предпочтительный сценарий приращения наиболее значимых факторов.

Шаг 7. Анализ уровня структурной устойчивости на основе анализа циклов отрицательной и положительной обратной связи. **Условием устойчивости НКК** является наличие нечетного числа циклов отрицательной обратной связи, а условием неустойчивости – наличие четного числа циклов положительной обратной связи. При невыполнении условия устойчивости – переход к этапу 1, корректировка когнитивной карты (идентификация факторов и выявление силы связей) [20].

Шаг 8. Включает процедуры расчета и анализ следующих системных характеристик когнитивной модели P_1 – P_7 в соответствии с формулами (20)–(25):

Полученные в результате реализации методики результаты позволяют проанализировать свойства разработанной модели и оценить ее адекватность.

Задавая требуемые значения соответствующих показате-

телей, можно корректировать полученную модель, обеспечивая приближение свойств разработанной модели к динамическим свойствам реальной системы.

На основе проведенного анализа и выявления систематических ошибок разработчиков когнитивной карты, а также анализа системных характеристик когнитивной модели синтезирована адекватная когнитивная модель, отражающая динамические характеристики реального объекта исследования.

На 3-м этапе (верификации когнитивной модели) предложено использование критериального подхода, включающего решение задачи уменьшения или блокировки рисков снижения достоверности (возможности полагаться (доверять) результатам когнитивного моделирования) и точности получаемых результатов (степени отклонения результатов моделирования от реальных значений показателей объекта исследования) [34].

Проведенный анализ показал, что показатели достоверности в предметной области когнитивного моделирования очень тесно связаны с человеческим фактором, влияющим на значения экспертных оценок при решении задач на всех этапах когнитивного моделирования, начиная от ранних этапов формализации при построении проблемного поля ситуации, параметрической идентификации когнитивной карты, проведения ее структурно-целевого анализа и решения прямой или обратной задачи.

Критериальный подход предполагает наличие открытой системы частных критериев достоверности и точности, обеспечивающих снижение величины рисков получения некорректной оценки достоверности и точности разработанной когнитивной модели.

При использовании экспертных оценок в ходе постро-

ения нечеткой когнитивной модели выделяются следующие типы рисков [35]:

– риски некорректной формализации предметной области при построении проблемного поля ситуации;

– риски ложного определения причинно-следственных связей между факторами (ложная транзитивность), связанные с некорректным определением степени общности между факторами;

– риск некорректной математической интерпретации смысла взаимосвязей между факторами, что приводит к ошибочной оценке ее величины;

– риски некорректного принятия допущений, приводящих к получению грубых оценок.

Повышение достоверности и точности НКК обеспечивается путем реализации следующих подходов:

– обучение когнитивной модели, обеспечивающее объективную параметрическую идентификацию НКК;

– применение метода «как-объяснения» НКК, обеспечивающего построение цепочки объяснения процесса получения результата когнитивного моделирования.

В качестве системы частных показателей обосновано использование показателей, которые носят качественный характер, их измерение осуществляется с привязкой к балльной шкале и указанием порогового значения каждого показателя).

Разработанная частная методика верификации включает следующие шаги:

Шаг 1. Оценка показателя достоверности формализации НКК (выявление факторов риска 1-го рода: (факторы, влияющие на корректное описание реальных свойства объекта исследования, ограничения на применение средств формализации и др.) и факторы риска 2-го рода (факторы, связанные

с ограничением по применению того или иного метода анализа и оценки объекта исследования и др.). Показатель выполняется при наличии рисков ниже заданного порога, иначе – пересмотр формального представления НКК;

Шаг 2. Оценка показателя наличия нормальной формы для концепта K_i (нормальная форма – естественно интерпретируемая математическая модель, описывающая концепт K_i в виде числовых и лингвистических оценок). Показатель выполняется при наличии нормальной формы концепта K_i , иначе – пересмотр его формального описания;

Шаг 3. Оценка показателя бесконтекстности понимания конструкций карты выполняется при полном и однозначном понимании экспертом семантики связей между факторами без дополнительного контекста в рамках этой карты, иначе – пересмотр формального поля ситуации.

Шаг 4. Оценка показателя соразмерности полноты влияний на фактор (выполняется, если не существует по мнению эксперта других факторов прямого влияния на фактор K_i , иначе – пересмотр взаимосвязей между факторами и степени их влияния).

Шаг 5. Оценка показателя соразмерности понятий факторов и нарушения транзитивности каузальных явлений (выполняется при справедливости равенства $\forall a, b, c: aRb \wedge bRc \Rightarrow aRc$ (отношение R транзитивно, если для любых троек A, B и C , таких, что пары (A, B) и (B, C) удовлетворяют ему, то и пара (A, C) также ему удовлетворяет), иначе – пересмотр взаимосвязей между факторами и степени их влияния).

Шаг 6. Оценка взаимовлияния концептов НКК, консонанса и диссонанса.

Анализ результатов, полученных на шаге 6 методики синтеза адекватной когнитивной модели и ее структурно-це-

левого анализа (выполняется, если полученные результаты обеспечивают когнитивную ясность, то есть не противоречат реальному объекту исследования, иначе – корректировка когнитивной карты).

Шаг 7. Анализ результатов применения метода «как-объяснений» прогноза развития ситуации (выполняется, если построенные поясняющие цепочки обеспечивают понимание процессов в разработанной когнитивной карте, иначе – корректировка когнитивной карты).

Шаг 8. Анализ интерпретируемости НКК (выбор адекватных и понятных средств моделирования и выбор адекватных и понятных оценок экспертов)

(выполняется, если выбраны адекватные и понятные средства моделирования и оценки экспертов, иначе – пересмотр выбранных средств моделирования и оценок экспертов).

Использование разработанной методики позволяет получить результат верификации когнитивной модели и приступить к этапу сценарного моделирования, включающем следующую последовательность подэтапов:

1. Задание горизонта прогнозирования и исходных значений факторов.

2. Задание начальных импульсных воздействий, отражающих количественные изменения внутренних и/или внешних факторов модели процесса, а также количественный результат управленческих воздействий на некоторые факторы.

3. Проведение расчетов динамики факторов и получение тенденций изменения факторов модели.

4. Содержательная интерпретация результатов моделирования.

5. Представление полученных результатов в графическом и табличном виде.

6. Анализ тенденций изменения факторов процесса;

7. Проведение анализа устойчивости развития процесса (ситуации) в каждом сценарии на основе графической информации.

8. Сравнительный анализ сценариев развития процесса и определение наиболее эффективного, в соответствии с выбранным критерием.

5. Сравнительный анализ разработанной методики с существующими

В ходе исследований был проведен сравнительный анализ результатов моделирования на основе существующих подходов и разработанной методики для различных типов когнитивной модели (на основе классической НКК, серой НКК и ансамбля серых НКК), результаты которого представлены в табл. 1.

К особенностям серых НКК относится возможность представления силы связей между концептами с помощью специальных конструкций в виде интервальных оценок. В этом случае существенно снижается погрешность в оценке силы связей между концептами, которая носит выраженный субъективный характер и не сводится к некоторой усредненной точечной числовой величине, а представляется в виде интервальных значений. Подход на основе ансамбля серых НКК, в котором реализовано несколько вариантов формализации знаний и опыта экспертов, а также метода взвешенного голосования, позволяет получить более точный результат по сравнению с единичной НКК.

В качестве показателя достоверности использовался критерий уменьшения рисков снижения достоверности как возможности полагаться (доверять) результатам когнитивного моделирования на основе экспертных оценок.

Таблица 1 (Table 1)

Сравнительная оценка результатов сценарного прогнозирования на основе существующих подходов и разработанной методики

Comparative evaluation of the results of scenario forecasting based on existing approaches and developed methodology

№ п/п	Тип когнитивной модели	Оценка показателя достоверности в %		Средняя ошибка прогнозирования в %	
		Существующий подход	Предлагаемый методический аппарат	Существующий подход	Предлагаемый методический аппарат
1.	НКК	17,3	12,4	14,1	11,2
2.	Серая НКК	14,6	11,8	11,7	9,8
3.	Ансамбль серых НКК	10,4	9,3	8,2	6,4

В качестве показателя точности получаемых результатов, как степени отклонения результатов моделирования от реальных значений показателей объекта исследования, использовалось тестирование на ретроспективном периоде 2014–2021 гг. на основе имеющихся статистических данных по измеримым факторам модели. Общая корректность модели на этом этапе подтвердилась степенью близости рассчитанных на модели темпов прироста целевых факторов к действительным темпам их прироста. Предлагаемый методический аппарат подтвердил свою эффективность по сравнению с существующими подходами.

Заключение

Разработан методический подход к решению задачи оценки и управления качеством моделей социально-экономической системы (университета). Проведен детальный анализ существующих критериев и подходов к решению задачи верификации когнитивных моделей, который показал отсутствие единой методики и комплексного подхода в решении задач когнитивного моделирования СЭС на основе когнитивных карт.

Новизна предлагаемого подхода заключается в раз-

работке методического подхода к оценке и управлению качеством моделей, отличающегося комплексным решением поставленной задачи на каждом этапе когнитивного моделирования с помощью совокупности методик: методики построения проблемного поля ситуации; методики синтеза когнитивной карты, ее структурно-целевого анализа и анализа системных характеристик, а также методики верификации когнитивной модели.

На основе проведенного анализа сформулированы и обоснованы требования к построению адекватных нечетких когнитивных моделей, реализующих расширенные возможности по анализу и моделированию объекта исследования.

Отличительными особенностями применения разработанного методического аппарата является то, что он позволяет:

- на основе применения методов корреляционно-регрессионного и факторного анализа выявить релевантные факторы и их структурировать, а также снизить размерность когнитивной модели;

- на основе структурно-целевого анализа и выявления систематических ошибок разработчиков когнитивной карты, а также анализа системных характеристик когнитивной карты синтезировать адек-

ватную когнитивную модель, отражающую динамические характеристики реального объекта исследования;

– на основе критериального подхода, включающего открытую систему частных критериев и показателей достоверности и точности, позволяющих снизить величину рисков получения некорректной оценки достоверности и точности разработанной когнитивной модели за счет влияния субъективных факторов, провести ее верификацию, состоящую из

совокупности упорядоченных процедур, обеспечивающих повышение качества моделирования и получение объективных результатов.

Среди возможных направлений дальнейших исследований наибольший интерес представляют:

– обоснование и формализация требований к методам экспертной идентификации параметров когнитивной модели с целью снижения рисков, связанных с ошибками экспертов и разработчиков, а

также методам ее обучения;

– разработка и обоснование формализованных подходов к выявлению латентных факторов, влияющих на целевые показатели объекта исследования;

– разработка и обоснование формализованных методов валидации построенной и верифицированной когнитивной модели применительно к функционированию объекта исследования при определенных ограничениях и наборах исходных данных.

Литература

1. Авдеева З.К., Коврига С.В., Макаренко Д.И., Максимов В.И. Когнитивный подход в управлении // Проблемы управления. 2007. № 3. С. 2–8.
2. Авдеева З. К., Коврига С. В. Подход к постановке задач управления на когнитивной модели ситуации для стратегического мониторинга // Управление большими системами. 2016. № 5. С. 120–146.
3. Пылькин А.Н., Крошилин А.В., Крошилина С.В. Проектирование систем поддержки принятия решений для оценки состояния здоровья пациентов в условиях неопределенности // Информатика и системы управления. 2010. № 4(26). С. 82–94.
4. Федулов А.С. Нечеткие реляционные когнитивные карты // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 1. С. 120–132.
5. Hajek P., Prochazka O. Interval-Valued Fuzzy Cognitive Maps for Supporting Business Decisions // In Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Vancouver, BC, Canada. 2016. С. 531–536.
6. Salmeron J.L. Modelling Grey Uncertainty with Fuzzy Grey Cognitive Maps // Expert Systems with Applications. 2010. Т. 37. № 12. С. 7581–7588.
7. Espinosa M.L., Depaire B., Vanhoof K. Fuzzy Cognitive Maps with Rough Concepts // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI'2013). Paphos, Greece. 2013. С. 527–536.
8. Papageorgiou E.I., Iakovidis D.K. Intuitionistic Fuzzy Cognitive Maps // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. 2013. Т. 21. № 2. С. 342–354.
9. Carvalho J.P., Tome J.A.V. Rule Based Fuzzy Cognitive Maps: Fuzzy Causal Relations. In: Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation: Evolutionary Computation & Fuzzy Logic for Intelligent Control, Knowledge Acquisition & Information Retrieval / Edited by M. Mohammadian, IOS Press. 1999.
10. Miao Y., Liu Z.-Q., Siew Ch.Y. Dynamical Cognitive Network – an Extension of Fuzzy Cognitive Map // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. 2001. Т. 9. № 5. С. 760–770.
11. Кузенцов О.П. Когнитивное моделирование слабо структурированных ситуаций [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://posp.raai.org/data/posp2005/Kuznetsov/kuznetsov.html> (Дата обращения: 20.10.2021).
12. Eden C. Cognitive mapping // European Journal of Operational Research. 1988. № 36. С. 1–13.
13. Абрамова Н.А., Коврига С.В. Некоторые критерии достоверности моделей на основе когнитивных карт // Проблемы управления. 2008. № 6. С. 23–33.
14. Абрамова Н.А., Коврига С.В. О рисках, связанных с ошибками экспертов и аналитиков // Проблемы управления. 2006. № 6. С. 60–67.
15. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps // International Journal of Man-Machine Studies. 1986. Т. 24. С. 65–75.
16. Силов В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. М.: ИНПРО–РЕС, 1995.
17. Кизим Н.А., Хаустова В.Е. Особенности проверки моделей на основе когнитивных карт на устойчивость и достоверность. В кн. Современные подходы к моделированию сложных социально-экономических систем. Харьков: ФЛП Александрова К. М.; ИД «ИНЖЭК», 2011. 280 с.
18. Горелова Г.В., Захарова Е.Н., Гинис Л.А. Когнитивный анализ и моделирование устойчивого развития социально-экономических систем. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет, 2005. 288 с.
19. Корнеев В.В., Ганеев А.Ф., Васютин С.В., Райх В.В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. М.: Издательство политики, 2001. 496 с.
20. Борисов В.В., Бычков И.А., Дементьев А.В., Соловьев А.П., Федулов А.С. Ком-

пьютерная поддержка сложных организационно-технических систем. М.: Горячая линия – Телеком, 2002. 154 с.

21. Поспелов Д.А. Десять «горячих точек» в исследованиях по искусственному интеллекту // Интеллектуальные системы (МГУ). 1996. Т. 1. № 1(4). С. 47–56.

22. Леденёва Т.М., Моисеев С.А. Формализация свойств интерпретируемых лингвистических шкал и термов нечетких моделей // Прикладная информатика. 2012. № 4(40). С. 126–132.

23. Vallido A., Martin-Guerrero J.D., Lisboa P.J.G. Making machine learning models interpretable // Proc. of European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning (25-27 April 2012, Bruges) Belgium: Bruges. 2012. С. 163–172.

24. Yoon B.S., Jetter A.J. Comparative analysis for Fuzzy Cognitive Mapping // Proc. of 2016 Portland Intern. Conf. on Management of Engineering and Technology (PICMET). 2016. С. 1897–190.

25. Özesmi U., Özesmi S. L. Ecological Models Based on People’s Knowledge: a Multi-Step Fuzzy Cognitive Mapping Approach // Ecological Modelling. 2004. № 176. С. 43–64.

26. Kosko B. Fuzzy Engineering. New Jersey: Prentice-Hall. 1997.

27. Aguilar J. Adaptive random fuzzy cognitive maps // Ibero-American Conference on Artificial Intelligence. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. С. 402–410.

28. Kosko B. Neural networks and fuzzy systems: A dynamical systems approach to machine intelligence. 1992. 290 p.

29. Koulouriotis D.E., Diakoulakis I.E., Emiris D.M. Learning fuzzy cognitive maps using evolution strategies: a novel schema for modeling

and simulating high-level behavior // Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 01TH8546). 2001. Т. 1. С. 364–371.

30. Аверкин А.Н., Ярушев С.А., Павлов В.Ю. Когнитивные гибридные системы поддержки принятия решений и прогнозирования // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30. № 4. С. 632–642. DOI: 10.15827/0236-235X.030.4.632-642.

31. Ефремова Н.А., Аверкин А.Н., Ярушев С.А. Гибридные нечеткие когнитивные карты в задачах принятия решений и прогнозирования // Программные продукты, системы и алгоритмы. 2017. № 4. С. 1–9.

32. Кулинич А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления. 2010. № 3. С. 2–16.

33. Mikryukov A., Mazurov M. The Task of Improving the University Ranking Based on the Statistical Analysis Methods. In: Hu Z., Petoukhov S., He M. (eds) Advances in Artificial Systems for Medicine and Education IV. AIMEE 2020 // Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2021. Т. 1315. DOI: 10.1007/978-3-030-67133-4_6.

34. Коврига С.В., Телицына Т.А. О методе верификации когнитивных карт, основанном на частных критериях достоверности // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 (Москва, 16-19 июня). 2014. С. 4132–4143.

35. Гамазов И. Н., Терехов В. И. Анализ задач, возникающих при создании нечетких когнитивных карт [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-zadach-voznikayuschih-pri-sozdanii-nechetkih-kognitivnyh-kart>. (Дата обращения: 20.02.2022).

References

1. Avdeyeva Z.K, Kovriga S.V., Makarenko D.I., Maksimov V.I. Cognitive approach in management. Problemy upravleniya = Problems of management. 2007; 3: 2–8. (In Russ.)

2. Avdeyeva Z. K., Kovriga S. V. Approach to the formulation of control problems on the cognitive model of the situation for strategic monitoring. Upravleniye bol'shimi sistemami = Management of large systems. 2016; 5: 120-146. (In Russ.)

3. Pyl'kin A.N., Kroshilin A.V., Kroshilina S.V. Designing decision support systems for assessing the health status of patients under uncertainty. Informatika i sistemy upravleniya = Informatics and control systems. 2010; 4(26): 82-94. (In Russ.)

4. Fedulov A.S. Fuzzy relational cognitive maps. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems. 2005; 1: 120–132. (In Russ.)

5. Hajec P., Prochazka O. Interval-Valued Fuzzy Cognitive Maps for Supporting Business

Decisions. In Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Vancouver, BC, Canada. 2016: 531–536.

6. Salmeron J.L. Modelling Grey Uncertainty with Fuzzy Grey Cognitive Maps. Expert Systems with Applications. 2010; 37; 12: 7581–7588.

7. Espinosa M.L., Depaire B., Vanhoof K. Fuzzy Cognitive Maps with Rough Concepts. Proc. of the 9th Intern. Conf. on Artificial Intelligence Applications and Innovations (IAI'2013). Paphos, Greece. 2013: 527–536.

8. Papageorgiou E.I., Iakovidis D.K. Intuitionistic Fuzzy Cognitive Maps. IEEE Trans. on Fuzzy Systems. 2013; 21; 2: 342 - 354.

9. Carvalho J.P., Tome J.A.B. Rule Based Fuzzy Cognitive Maps: Fuzzy Causal Relations. In: Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation: Evolutionary Computation & Fuzzy Logic for Intelligent Control, Knowledge Acquisition & Information Retrieval / Ed. by M. Mohammadian, IOS Press. 1999.

10. Miao Y., Liu Z.-Q., Siew Ch.Y. Dynamical Cognitive Network – an Extension of Fuzzy Cognitive Map. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*. 2001; 9; 5: 760–770.
11. Kuznetsov O.P. Kognitivnoye modelirovaniye slabo strukturirovannykh situatsiy = Cognitive modeling of weakly structured situations [Internet]. Available from: <http://posp.raai.org/data/posp2005/Kuznetsov/kuznetsov.html> (cited 20.10.2021). (In Russ.)
12. Eden C. Cognitive mapping. *European Journal of Operational Research*. 1988. 36: 1–13.
13. Abramova N.A., Kovriga S.V. Some criteria for the reliability of models based on cognitive maps. *Problemy upravleniya = Control sciences*. 2008; 6: 23–33. (In Russ.)
14. Abramova N.A., Kovriga S.V. On the risks associated with the mistakes of experts and analysts. *Problemy upravleniya = Control sciences*. 2006; 6: 60–67. (In Russ.)
15. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1986; 24: 65–75.
16. Silov V.B. Prinyatiye strategicheskikh resheniy v nechetykoy obstanovke = Making strategic decisions in a fuzzy environment. Moscow: INPRO–RES; 1995. (In Russ.)
17. Kizim N.A., Khaustova V.Ye. Osobennosti proverki modeley na osnove kognitivnykh kart na ustoychivost' i dostovernost'. V kn. *Sovremennyye podkhody k modelirovaniyu slozhnykh sotsial'no-ekonomicheskikh system = Features of checking models based on cognitive maps for stability and reliability*. In book. *Modern approaches to modeling complex socio-economic systems*. Kharkiv: FLP Aleksandrova K. M.; Publishing House «INZHEK»; 2011. 280 p. (In Russ.)
18. Gorelova G.V., Zakharova Ye.N., Ginis L.A. Kognitivnyy analiz i modelirovaniye ustoychivogo razvitiya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem = Cognitive analysis and modeling of sustainable development of socio-economic systems. Rostov-on-Don: Rostov State University; 2005. 288 p. (In Russ.)
19. Korneyev V.V., Ganeyev A.F., Vasyutin S.V., Raykh V.V. Bazy dannykh. *Intellektual'naya obrabotka informatsii = Databases. Intelligent information processing*. Moscow: I Politics Publishing House; 2001. 496 p. (In Russ.)
20. Borisov V.V., Bychkov I.A., Dement'yev A.V., Solov'yev A.P., Fedulov A.S. Komp'yuternaya podderzhka slozhnykh organizatsionno-tekhnicheskikh system = Computer support for complex organizational and technical systems. Moscow: Hotline – Telecom; 2002. 154 p. (In Russ.)
21. Pospelov D.A. Ten «hot spots» in artificial intelligence research. *Intellektual'nyye sistemy (MGU) = Intelligent Systems (MSU)*. 1996; 1; 1(4): 47–56. (In Russ.)
22. Ledenëva T.M., Moiseyev S.A. Formalization of properties of interpreted linguistic scales and terms of fuzzy models. *Prikladnaya informatika = Applied Informatics*. 2012; 4(40): 126–132. (In Russ.)
23. Vallido A., Martin-Guerrero J.D., Lisboa P.J.G. Making machine learning models interpretable. *Proc. of European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning (25-27 April 2012, Bruges) Belgium: Bruges*. 2012: 163–172.
24. Yoon B.S., Jetter A.J. Comparative analysis for Fuzzy Cognitive Mapping. *Proc. of 2016 Portland Intern. Conf. on Management of Engineering and Technology (PICMET)*. 2016: 1897–190.
25. Özesmi U., Özesmi S. L. Ecological Models Based on People's Knowledge: a Multi-Step Fuzzy Cognitive Mapping Approach. *Ecological Modelling*. 2004; 176: 43–64.
26. Kosko B. *Fuzzy Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall. 1997.
27. Aguilar J. Adaptive random fuzzy cognitive maps. *Ibero-American Conference on Artificial Intelligence*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002: 402–410.
28. Kosko B. *Neural networks and fuzzy systems: A dynamical systems approach to machine intelligence*. 1992. 290 p.
29. Koulouriotis D.E., Diakoulakis I.E., Emiris D.M. Learning fuzzy cognitive maps using evolution strategies: a novel schema for modeling and simulating high-level behavior. *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)*. 2001; 1: 364–371.
30. Averkin A.N., Yarushev S.A., Pavlov V.Yu. Cognitive hybrid systems for decision support and forecasting. *Programmnyye produkty i sistemy = Software Products and Systems*. 2017; 30; 4: 632–642. DOI: 10.15827/0236-235X.030.4.632-642. (In Russ.)
31. Yefremova, N.A., Averkin, A. N., Yarushev, S.A. Hybrid Fuzzy Cognitive Maps in Decision-Making and Forecasting. *Programmnyye produkty, sistemy i algoritmy = Software Products, Systems and Algorithms*. 2017; 4: 1–9. (In Russ.)
32. Kulinich A. Computer systems for modeling cognitive maps: approaches and methods. *Problemy upravleniya = Control Sciences*. 2010; 3: 2–16. (In Russ.)
33. Mikryukov A., Mazurov M. The Task of Improving the University Ranking Based on the Statistical Analysis Methods. In: Hu Z., Petoukhov S., He M. (eds) *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education IV. AIMEE 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham. 2021: 1315. DOI: 10.1007/978-3-030-67133-4_6.
34. Kovriga S.V., Telitsyna T.A. On the method of verification of cognitive maps based on particular reliability criteria. *XII Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU-2014 = XII All-*

Russian Conference on Management Problems VSPU-2014 (Moscow, June 16-19). 2014: 4132–4143. (In Russ.)

35. Gamazov I. N., Terekhov V. I. Analiz zadach, vznikayushchikh pri sozdanii nechetkikh

kognitivnykh kart = Analysis of tasks arising when creating fuzzy cognitive maps [Internet]. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-zadach-voznikayushchih-pri-sozdanii-nechetkikh-kognitivnykh-kart>. (cited 20.02.2022). (In Russ.)

Сведения об авторах

Андрей Александрович Микрюков

К.т.н., доцент

Российский экономический университет

им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия

Эл. почта: mikrukov.aa@rea.ru

Михаил Ефимович Мазуров

Д.ф.-м.н., профессор

Российский экономический университет

им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия

Эл. почта: Mazurov37@mail.ru

Information about the authors

Andrey A. Mikryukov

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor

Plekhanov Russian University of Economics,

Moscow, Russia

E-mail: Mikrukov.aa@rea.ru

Mikhail E. Mazurov

Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor

Plekhanov Russian University of Economics,

Moscow, Russia

E-mail: Mazurov37@mail.ru