

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ И ПЛОХО ФОРМАЛИЗУЕМЫХ СИСТЕМ

SUBSTANTIATION OF THE USE OF MATHEMATICAL APPARATUS OF COGNITIVE MODELING FOR SOLVING PROBLEMS OF ANALYSIS OF FUNCTIONING AND FORECASTING BEHAVIOR OF POORLY STRUCTURED AND POORLY FORMALIZED SYSTEMS

D. Suzdalsky

Summary. The article argues for the use of cognitive modeling, which is an effective tool for analyzing and modeling complex systems that are difficult to structure and quantify. Such systems, known as poorly structured and poorly formalized (SPF systems), are characterized by the lack of clear quantitative relationships between their elements. This is especially evident in socio-economic systems (SES), where a person acts not only as a controlled element, but also as an active subsystem with its own goals and interests, which may contradict the overall goals of the system. A review of existing sources revealed that SPF systems differ in that their behavior and processes cannot be adequately described using quantitative indicators and mathematical models, which significantly complicates their analysis and forecasting. It is emphasized that the most appropriate way to assess the state of the SPF system is to use the mathematical apparatus of cognitive modeling. The modeling technique is presented with a detailed description of the mathematical apparatus.

Keywords: cognitive modeling, poorly structured and poorly formalized systems, SPF systems, socio-economic systems, SES.

Суздальский Дмитрий Андреевич

аспирант,

Российский Экономический Университет, г. Москва

ya.jummer@yandex.ru

Аннотация. В статье аргументируется применение когнитивного моделирования, которое представляет собой эффективный инструмент для анализа и моделирования сложных систем, которые трудно поддаются структуризации и количественной оценке. Такие системы, известные как слабоструктурированные и плохо формализуемые (СПФ-системы), характеризуются отсутствием четких количественных взаимосвязей между их элементами. Особенно ярко это проявляется в социально-экономических системах (СЭС), где человек выступает не только как управляемый элемент, но и как активная подсистема со своими целями и интересами, которые могут противоречить общим целям системы.

Проведенный обзор существующих источников выявил, что СПФ-системы отличаются тем, что их поведение и процессы невозможно адекватно описать с помощью количественных показателей и математических моделей, что существенно усложняет их анализ и прогнозирование.

Подчеркивается, что наиболее подходящим способом оценки состояния СПФ-системы является применение математического аппарата когнитивного моделирования. Приведена методика моделирования с подробным описанием математического аппарата.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, слабоструктурированные и плохо формализуемые системы, СПФ-системы, социально-экономические системы, СЭС.

Введение

В течение последних трех десятилетий в сфере нечетких когнитивных карт (НKK) произошел значительный прогресс в развитии математического инструментария для когнитивного моделирования. Эти карты стали важной составляющей области мягких вычислений, поскольку они демонстрируют высокую эффективность при решении широкого спектра задач, включая поддержку принятия решений, управление сложными системами и прогнозирование различных процессов. Ключевым преимуществом таких моделей является их

способность работать с большим количеством переменных, включая те, что имеют нечеткие, неопределенные значения, что существенно расширяет возможности их практического применения.

Широкое применение методов когнитивного моделирования обусловлено возможностями его математического аппарата, который и процессах позволяет:

- оценивать ситуацию и анализировать на основе когнитивной карты взаимовлияния действующих факторов, определяющих возможные сценарии развития ситуации;

- b) выявлять тенденции развития ситуаций и реальные намерения их участников;
- c) разрабатывать стратегию использования тенденций развития ситуации;
- d) определять возможные механизмы взаимодействия участников ситуации для достижения ее целенаправленного развития;
- e) выработать и обосновать направления управления ситуацией;
- f) определить возможные варианты развития ситуации с учетом последствий принятия важнейших решений и сравнить их.

В общем случае, когнитивная карта представляет собой схематичное, упрощенное описание картины мира индивида, точнее, — ее фрагмента, относящегося к данной проблемной ситуации.

Когнитивные карты и методы когнитивного моделирования

Когнитивные карты и методы когнитивного моделирования активно применяются для изучения и моделирования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем (СПФ-систем). В таких системах практически отсутствуют четкие количественные связи между компонентами. При их структурировании количество элементов минимизируется для придания описанию более определенного характера. Слабая структурированность обычно связана с человеческим фактором. В СПФ-системах, к которым относится социально-экономическая система (СЭС), человек выступает как объект управления. При этом компоненты СЭС являются активными подсистемами, чьи цели могут противоречить общим целям системы. Плохо формализуемые системы характеризуются тем, что их функционирование невозможно описать количественными показателями. Это происходит потому, что параметры определяются не через объективные измерения, а на основе экспертных оценок. В таких системах возможные альтернативы не задаются заранее, а формируются непосредственно в процессе анализа.

Сложность структурирования и формализации СПФ — систем определяется такими их свойствами как: нелинейность, нестационарность, неаддитивность и стохастичность [1]. Особенности моделирования СПФ — систем и процессов отражает рисунок 1.

Когнитивное моделирование представляет собой метод анализа, который позволяет определить, как различные факторы влияют на достижение желаемого состояния объекта управления. Этот метод учитывает не только силу воздействия каждого фактора, но и различия в их влиянии на систему.

Особенности моделирования СПФ-систем

- **наличие человеческого фактора**
- **наличие системы экономических интересов, отражающей цели деятельности человека**
- **структура деятельности человека зависит от ресурсов и возможностей их использования**
- **построение структуры СПФ-системы возможно на основе организации и самоорганизации**
- **управление СПФ-системой и процессом должно соответствовать текущим и перспективным интересам человека**

Рис. 1. Особенности моделирования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем и процессов

Когнитивная карта представляет собой специальный вид ориентированного графа, где:

- Выделяется главная (целевая) вершина, описывающая будущее состояние объекта управления;
- Остальные вершины отображают различные факторы;
- Связи между факторами и целевой вершиной обозначаются стрелками разной толщины и со знаком, показывающим силу и направление влияния;
- Связи между факторами демонстрируют их схожесть или различие в воздействии на систему.

Элементы когнитивной карты называются концептами. Они подразделяются на три основные категории:

- Управляемые концепты (факторы, на которые можно оказывать влияние);
- Неуправляемые концепты (факторы, находящиеся вне контроля);
- Целевые концепты (желаемые состояния системы).

В качестве примера можно привести когнитивную карту, показывающую, как различные угрозы влияют на активы организации, которые, в свою очередь, влияют на конфиденциальность, целостность и доступность. Такая карта позволяет наглядно увидеть взаимосвязи между различными параметрами и их воздействие, рисунок 2.

Экспертная оценка играет ключевую роль в когнитивном моделировании, позволяя определить степень влияния различных факторов друг на друга и воздействие факторов на целевые показатели системы.

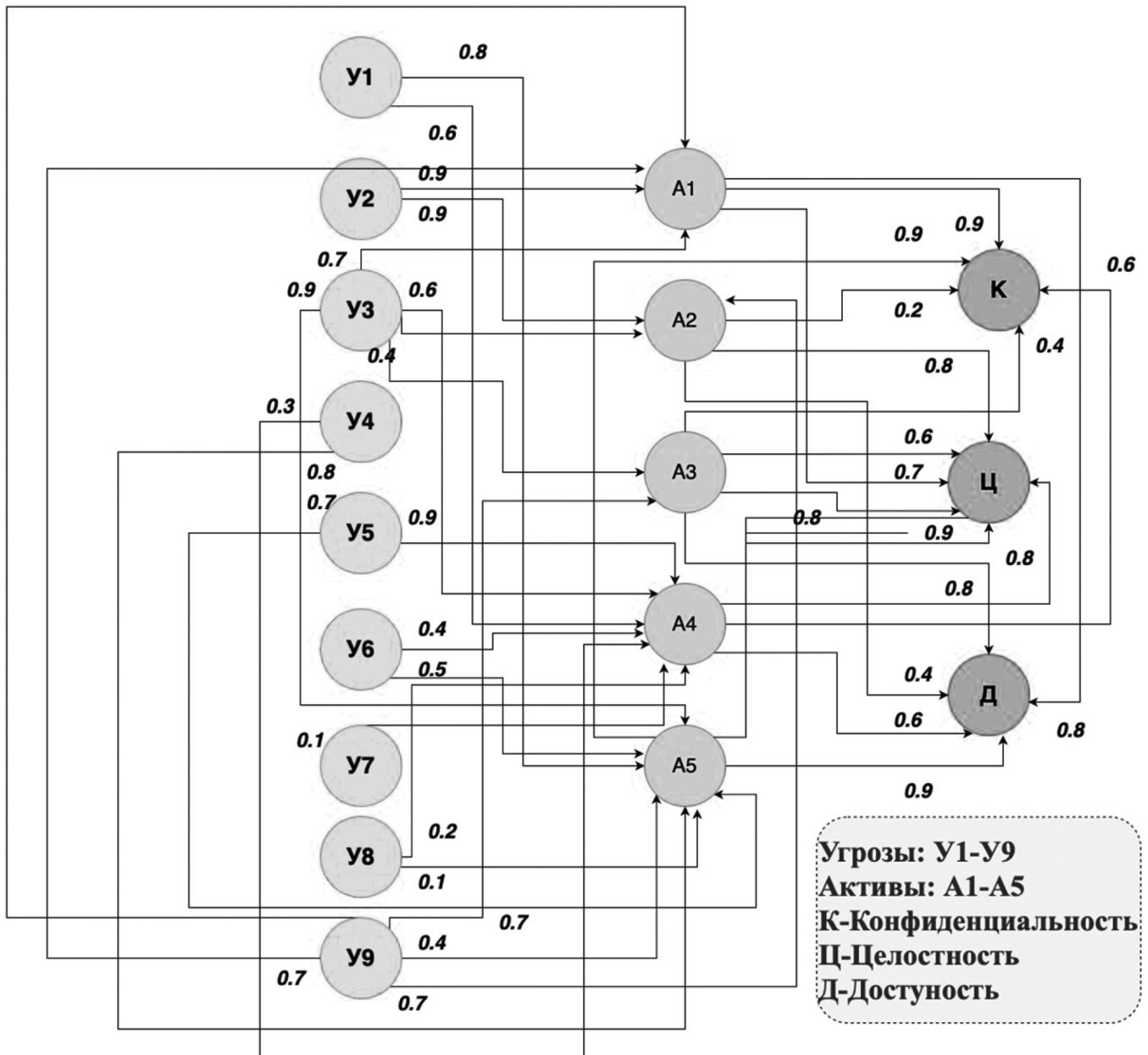


Рис. 2. Когнитивная карта взаимосвязи выявленных угроз и целевых показателей «Конфиденциальность, целостность, доступность»

Когнитивное моделирование предоставляет два важных аналитических инструмента:

- Возможность прогнозирования изменения целевого показателя при воздействии на управляющие факторы;
- Решение обратной задачи — формирование стратегии воздействий для достижения заданного значения целевого показателя.

Основные преимущества когнитивных моделей: выявление структуры причинно-следственных (каузальных) связей в сложных системах, которые невозможно проанализировать традиционными количественными

методами; эффективное использование экспертных знаний и опыта в конкретной предметной области; высокая наглядность представления информации, что облегчает понимание и анализ сложных взаимосвязей между компонентами системы; возможность работы с качественными оценками при отсутствии достаточных количественных данных; гибкость в адаптации модели под конкретные задачи исследования; способность учитывать неопределенность и неоднозначность в оценках влияния различных факторов.

Такой подход особенно ценен при анализе социально-экономических систем, где традиционные методы

часто оказываются недостаточно эффективными из-за сложности формализации многих важных факторов и взаимосвязей между ними [1–2].

На рисунке 3 представлен циклический процесс когнитивного моделирования, обеспечивающий анализ и принятие решений в плохо определенных ситуациях и, в частности, с использованием метода сценарного прогнозирования (планирования) на основе когнитивных карт, который позволяет определить вероятные (возможные) тенденции развития событий по альтернативным вариантам, а также возможные последствия принимаемых решений с целью выбора наиболее предпочтительной альтернативы.

В этом случае функционирование исследуемой системы S представляется в виде когнитивной карты K_S , на основе которой 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 необходимые (желательные) изменения состояния системы в виде выражения 1.1:

$$S = (X^C R(X^C), \quad (1.1)$$

где X^C — множество целевых факторов; $R(X^C)$ — вектор оценок динамики факторов, которые определяют необ-

ходимые (желательные) направления изменения целевых факторов [3].

В общем случае исследование слабоструктурированных и плохо формализуемых систем может быть представлено в виде метанабора моделей, (рисунок 4), а формальная когнитивная модель объекта исследования — в виде Кортжа вида 1.2:

$$M_S = \langle K_F(X_{\text{ВНЕШ}} \cup X_{\text{ВНУТР}}), f_{KF}; C(X^C R(X^C)); \{AS^P(H_c^P, H_y^P)\}, X(0); G(0) \rangle \quad (1.2)$$

где: $K_F(X_{\text{ВНЕШ}} \cup X_{\text{ВНУТР}})$ — 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;

$AS^P(H_c^P, H_y^P)$, — 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. 3. Циклический процесс когнитивного моделирования [22]



Рис. 4. Метанабор моделей исследования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем

Когнитивные модели позволяют обеспечить решение двух классов задач, рисунок 5:

- саморазвития (динамического анализа саморазвития ситуации для определения значений целевого фактора при текущих значениях внешних и внутренних факторов);
- управляемого развития:
 - прогнозирования ситуации путем определения состояния целевого фактора при существующих (текущих) и возможных воздействиях на внешние и внутренние факторы (прямая задача);
 - управляемого развития, позволяющая определить какие воздействия необходимо оказать на внешние и внутренние факторы (концепты), чтобы достичь заданное состояние целевого фактора (обратная задача).

На рисунке 6 представлена структурная схема процесса когнитивного моделирования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем [4].

Процесс когнитивного моделирования укрупненно включает 3 этапа [1]:

1. Анализ проблемного поля ситуации построение когнитивной карты;
2. Структурно-целевой анализ и верификация когнитивной модели;



Рис. 5. Задачи, решаемые на основе когнитивных карт

3. Сценарное статическое и динамическое моделирование.

Статическое моделирование обеспечивает оценку взаимовлияния между концептами и цепочками концептов, влияния концепта на систему и наоборот, оценку консонанса (меры доверия к знаку и силе воздействия) и др. В рамках статического моделирования проводится расчет системных показателей когнитивной карты, позволяющих оценить качество когнитивной модели, расчет матрицы транзитивного замыкания; построение

графов α -уровня для различных значений α ; анализ НКК на основе системных показателей и α -срезов.

Динамическое моделирование обеспечивает исследование динамики поведения слабоструктурированной и плохо формализуемой системы на основе модели импульсных процессов, представляющих собой воздействия на управляемые факторы когнитивной карты и анализ изменений значений целевых концептов (показателей функционирования исследуемой системы). В результате генерируются альтернативные векторы воздействий на управляемые концепты когнитивной карты, что позволяет выявить предпочтительный вариант альтернативы, задаваемый лицом, принимающим решения (ЛПР) в условиях заданных ограничений на ресурсы, необходимые для формирования импульсных воздействий.

Для обеспечения генерации альтернатив задаются начальные значения всех концептов когнитивной карты, проводится оценка характера изменения значений всех концептов, для анализа выбираются недоминируемые альтернативы. На основе результатов проведенного исследования формируются варианты предложений для ЛПР. Результатом когнитивного моделирования является выработка научно-обоснованных управляющих мероприятий с учетом поставленных целей и задач.

В настоящее время для моделирования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем и процессов находят применение нечеткие когнитивные карты (НКК), в которых взаимосвязь между факторами представляется в виде нечетких переменных, что позволяет описать силу связей между концептами когнитивной карты качественными значениями. На рисунке 7 представлены разновидности НКК [3–5]:

- НКК В. Силова, в которых для обозначения взаимосвязи концептов используется в виде нечеткой матрицы смежности;
- нечеткие продукционные когнитивные карты, в которых взаимовлияние концептов описывается нечеткими продукционными правилами;
- обобщенные нечеткие продукционные когнитивные карты, позволяющие реализовать моделирование сложных систем путем использования расширенных возможностей по анализу когнитивных карт на основе продукционных правил;
- нечеткие реляционные когнитивные карты, обеспечивающие гибкость построения и анализа нечетких моделей слабоструктурированных систем на основе реляционного представления нечетких соотношений влияния между концептами;
- нейрософские реляционные карты, позволяющие использовать свойство тройственности логики (истина, ложь и неопределенность), обеспечивающее ее представление в 3D-нейрософском пространстве;

- динамические когнитивные сети, использующие для описания модели дифференциальные уравнения;
- гибридные НКК, использующие генетический алгоритм для обучения когнитивной карты.

В работах Борисова В.В. [26–27] класс нечетких когнитивных моделей на основе когнитивных карт расширен рядом новых моделей:

- совместимые НКК;
- нечеткие когнитивно-игровые модели;
- нечеткие коалиционные когнитивные модели;
- нечеткие нейросетевые когнитивные темпоральные модели;
- композиционные гибридные нечеткие модели.

Наибольшее распространение получили нечеткие когнитивные карты. Выбор нечеткой когнитивной карты обосновывается следующими причинами. Классические когнитивные карты не в полной мере обеспечивают построение адекватной и достоверной математической модели из-за высокого уровня неопределенности взаимодействия компонентов объекта исследования. Модели на основе классических когнитивных карт являются линейными и не обеспечивают возможность учета динамических свойств реальных систем, таких как нелинейность, нестационарность, неаддитивность и недетерминированность.

Основным преимуществом нечетких когнитивных моделей (НКМ) в сравнении с другими подходами является возможность формального описания неизмеримых факторов, представление взаимозависимостей между объектами и компонентами в виде нечетких отношений взаимовлияния с использованием методов нечеткой каузальной алгебры, а также использование неполной, нечеткой, в том числе противоречивой информации.

НКМ позволяет наилучшим образом отразить неопределенность, динамику, а также состояние концептов когнитивной карты и их взаимосвязей. Модель НКК позволяет описать поведение сложной системы в целом, а каждый концепт НКК — ее факторную характеристику.

В настоящее время на основе НКМ базируется большинство современных систем моделирования и прогнозирования сложных слабоструктурированных систем, отличающихся высокой степенью неопределенности и стохастичности, к классу которых относятся социальные системы, социально-экономические и организационно-технические системы и др.

В последнее время семейство НКМ существенно расширилось и дополнилось следующими классами НКК [8–11]: интервально-значные НКК, серые (интервальные) НКК, грубые НКК, интуиционистские НКК, динамические НКК.

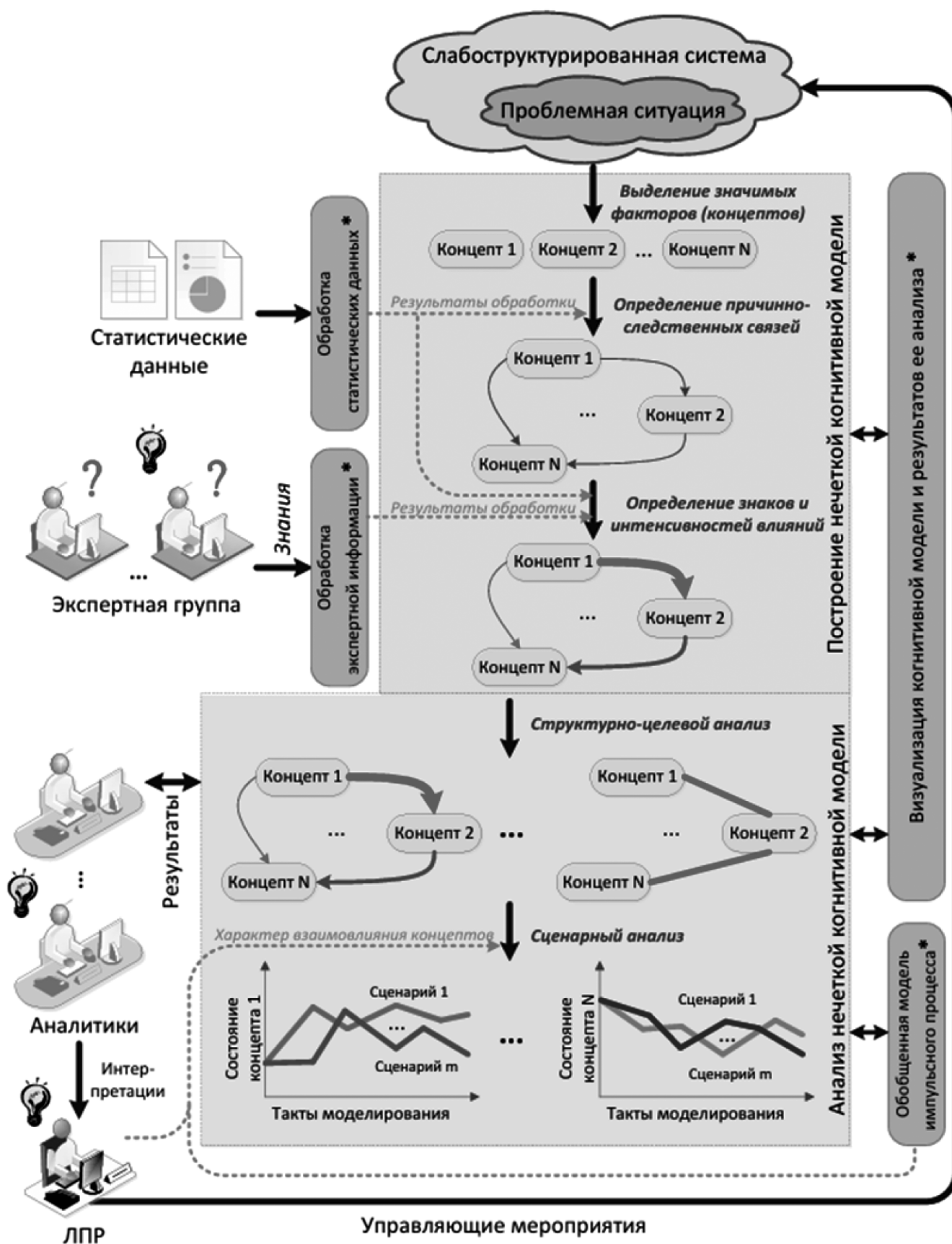


Рис. 6. Структурная схема процесса когнитивного моделирования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем



Рис. 7. Классификация когнитивных карт

Они отличаются способами представления отношений между концептами, а также алгоритмами передачи управляющих воздействий от управляемых факторов к целевым показателям.

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 адекватной модели объекта исследования [12].

Заключение

В настоящее время применение когнитивного моделирования является эффективным инструментом для анализа и моделирования сложных систем, которые трудно поддаются структуризации и количественной оценке. Такие системы, известные как слабоструктурированные и плохо формализуемые (СПФ-системы),

характеризуются отсутствием четких количественных взаимосвязей между их элементами. Особенно ярко это проявляется в социально-экономических системах (СЭС), где человек выступает не только как управляемый элемент, но и как активная подсистема со своими целями и интересами, которые могут противоречить общим целям системы.

Проведенный обзор существующих источников выявил, что СПФ-системы отличаются тем, что их поведение и процессы невозможно адекватно описать с помощью количественных показателей и математических.

Таким образом, проведенный анализ показал отличительные особенности и возможности методов когнитивного моделирования для решения задач анализа функционирования и прогнозирования поведения слабоструктурированных и плохо формализуемых систем [13-14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеева З.К., Коврига С.В. Формирование стратегии развития социально-экономических объектов на основе когнитивных карт. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. — С. 184.
2. Исаев Р.А. Математическое обеспечение и информационная технология поддержки нечетких когнитивных моделей управления слабоструктурированными социально-экономическими системами: специальность 05.13.10 «Управление в социальных и экономических системах»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Исаев Руслан Александрович, 2021. — 178 с. — EDN TUONIC.
3. Авдеева З.К. Подход к постановке задач управления на когнитивной модели ситуации для стратегического мониторинга / З.К. Авдеева, С.В. Коврига // Управление большими системами. Выпуск 5. — 2016. — С. 120–146.
4. Васильев В.И. Интеллектуальные системы защиты информации: уч. пособие / В.И. Васильев // — М.: Машиностроение. — 2013. — 172с.
5. Кулинич А.А., Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы / А.А. Кулинич // Пробл. управл., 2010, выпуск 3, 2–16.
6. Пылькин А.Н. Проектирование систем поддержки принятия решений для оценки состояния здоровья пациентов в условиях неопределенности / А.Н. Пылькин, А.В. Крошили, С.В. Крошили // Информатика и системы управления. — 2010. — №4(26). — С. 82–94. 152.

7. Борисов В.В. Нечеткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов // 2-е изд. стереотип. Горячая линия — Телеком, Москва, Россия. — 2015. — 283с. 21.
8. Борисов В.В. Систематизация нечетких и гибридных нечетких моделей / В.В. Борисов // Нечеткие системы и мягкие вычисления, т.29. — №4. — 2020. — С. 100–116.
9. Федулов А.С. Нечеткие реляционные когнитивные карты / А.С. Федулов // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2005. — №. 1. — С. 120–132., 141.
10. Espinosa M.L. Fuzzy Cognitive Maps with Rough Concepts / M.L. Espinosa, B. Depaire, K. Vanhoof // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI'2013). Paphos, Greece, Sept. 30 — Oct. 2. — 2013. — P. 527–536.
11. Hajec P., Interval-Valued Fuzzy Cognitive Maps for Supporting Business Decisions / P. Hajec, O. Prochazka // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Fuzzy Systems. Vancouver, BC, Canada. —2016. — P. 531–536.
12. Papageorgiou E.I. Intuitionistic Fuzzy Cognitive Maps / E.I. Papageorgiou D.K. Iakovidis // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. — Vol. 21. — No. 2 — 2013. — P. 342–354
13. Суздальский Д.А. Применение нечетких когнитивных карт в условиях принятия решений для обеспечения информационной безопасности / Д.А. Суздальский // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2024. — № 3. — С. 113–117. — DOI 10.37882/2223–2966.2024.03.33. — EDN GZDKL.
14. Суздальский Д.А. Оптимизация оценки риска для поддержки принятия решений с использованием интеллектуальной модели, основанной на нечетких логических выводах возобновляемых правил / Д.А. Суздальский // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2024. — № 6. — С. 121–127. — DOI 10.37882/2223–2966.2024.06.36. — EDN DEIZSW.

© Суздальский Дмитрий Андреевич (ya.jummer@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»