

УДК 004.94

doi: 10.15622/rcai.2025.038

ПОДХОДЫ К УЧЕТУ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ НЕЧЕТКИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ

Р.А. Исаев (*Ruslan-Isaev-32@yandex.ru*)^{A,B}

К.И. Рыченкова (*k.ri4enkova@yandex.ru*)^B

И.А. Копелиович (*igor.copeliovitch@yandex.ru*)^B

А.Г. Подвесовский (*a.podvesovskiy@gmail.com*)^{A,B}

^A Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва

^B Брянский государственный технический университет, Брянск

В работе описывается проблема, связанная с недостаточной обоснованностью значений параметров нечетких когнитивных моделей на примере нечетких когнитивных карт В.Б. Силова. Рассматриваются причины существования этой проблемы, и на примере демонстрируется, что при использовании когнитивной модели для выработки стратегий управления отсутствие уверенности в значениях параметров может приводить к принятию ненадежных решений. Описываются недостатки применяемых подходов к снижению влияния неопределенности значений параметров когнитивных моделей на результаты моделирования, и предлагаются новые пути решения обозначенной проблемы. Первый из них предполагает модернизацию математического аппарата нечетких когнитивных карт Силова, в рамках которой неуверенность в значениях параметров интерпретируется как субъективная вероятность этих значений, при этом параметры представляются в форме случайных величин. Вторым подход основан на проведении анализа устойчивости параметров модели, под которым понимается исследование зависимости результатов моделирования от возможных ошибок в значениях параметров. Представлены ключевые направления исследований для разработки каждого из предложенных подходов.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, нечеткая когнитивная карта, параметрическая идентификация, неопределенность параметров, анализ устойчивости, случайная величина.

Введение

Одним из подходов, применяемых для разработки, анализа и обоснования решений в слабоструктурированных системах, является когнитивный подход. Этот подход ориентирован на структуризацию знаний о слабоструктурированной системе, для понимания основных процессов, протекающих в ней. При этом множество процессов описываются в виде модели экспертных знаний о законах и закономерностях функционирования системы, с преобладанием субъективных оценок и лингвистических значений. В рамках когнитивного подхода способом описания знаний об исследуемой системе и происходящих в ней процессах является когнитивная модель, которая допускает формальное представление в виде когнитивной карты. Когнитивной картой называется причинно-следственная сеть, которая отражает субъективное представление исследователя о системе (индивидуальное или коллективное) в виде множества семантических категорий, называемых факторами или концептами, и множества причинно-следственных связей между ними.

Когнитивные модели не могут использоваться для моделирования и прогнозирования точных количественных характеристик функционирования сложных систем, однако могут служить хорошим инструментом их разведочного анализа [Захарова и др., 2020]. В то же время, принципиально приближенный характер когнитивной модели не отменяет того факта, что результаты моделирования (в том числе выводы качественного характера) определяются структурой и параметрами модели и, таким образом, находятся под влиянием присущей ей неопределенности.

В настоящей работе исследуется проблема, связанная с недостаточной обоснованностью значений параметров когнитивных моделей на примере нечетких когнитивных карт (НKK), предложенных В.Б. Силовым [Силов, 1995].

1. Проблема недостаточной обоснованности значений параметров нечетких когнитивных моделей

В процессе построения когнитивных моделей реальных систем на основе НKK Силова неизбежно возникают неопределенности, которые могут иметь следующие формы:

- неопределенность самого множества концептов НKK (под которой понимается его возможная неполнота или избыточность, наличие в его составе неудачно концептуализированных понятий реальной системы);
- неопределенность множества влияний между концептами (возможное отсутствие необходимых влияний, наличие неадекватных или избыточных влияний);

- неопределенность значений сил влияний между концептами, а также значений прочих параметров НКК (возникающая, в первую очередь, ввиду возможности совершения ошибок и допущения неточностей в процессе оценки значений параметров).

Другими словами, можно говорить о существовании таких форм неопределенности когнитивной модели, как неопределенность ее структуры и неопределенность значений ее параметров. Далее в настоящей работе рассматривается только неопределенность значений параметров НКК, на примере сил влияний между концептами – отметим, что именно эта разновидность параметров модели является наиболее значимой с точки зрения процесса моделирования в целом.

Возникновение ошибок в значениях сил влияний между концептами при построении НКК становится возможным ввиду действия многих факторов, среди которых можно выделить следующие:

- сложность формализации представлений экспертов о предметной области в терминах когнитивной модели и в рамках, задаваемых математическим аппаратом когнитивного моделирования;
- возможный недостаточный уровень компетентности экспертов в тех или иных аспектах сложных систем, вероятность чего повышается при построении когнитивных моделей междисциплинарных систем;
- особенности используемых методов параметрической идентификации [Подвесовский и др., 2019], накладывающие ограничения на точность получаемых значений параметров модели;
- возможность совершения экспертом случайных ошибок при использовании методов параметрической идентификации, в том числе ввиду того, что эти методы допускают некоторое нарушение согласованности экспертных суждений [Yager, 1982];
- несовершенство статистических данных, используемых для построения когнитивной модели с применением статистических методов идентификации [Подвесовский и др., 2019].

Наличие ошибок и неточностей в значениях параметров когнитивной модели обычно приводит к недостоверным результатам моделирования, что в конечном итоге может привести к принятию неэффективных и даже ошибочных управленческих решений.

Продemonстрируем, на примере абстрактной нечеткой когнитивной модели (рис. 1), ситуацию, в которой ошибки, допущенные при оценке значений сил влияний между концептами, способны привести к противоречию с точки зрения результатов моделирования. Представленная модель характеризуется силами влияний, указанными на соответствующих дугах когнитивного графа. Визуальное представление модели построено в разработанной с участием авторов СПИР «ИГЛА» [Захарова и др., 2020], в этой же системе получены приведенные далее результаты моделирования.

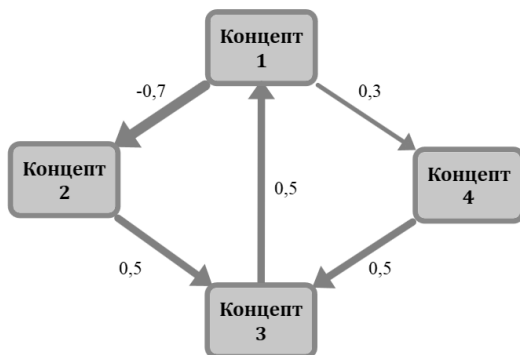


Рис. 1. Абстрактная нечеткая когнитивная модель для демонстрации влияния неопределенности значений параметров на результаты моделирования

Проведем сценарный анализ этой модели, исходя из следующих условий:

- управляемым концептом является «Концепт 1», при этом будут рассмотрены 7 сценариев управления (альтернатив), состоящих в установке различных значений данного концепта;
- целевым концептом является «Концепт 3», при этом целью управления является увеличение значения данного концепта в сравнении с текущим.

В результате моделирования возможных сценариев управления получим динамику значений целевого «Концепта 3» (рис. 2, слева), из которой видно, что оптимальный сценарий описывается Альтернативой 1. Данная альтернатива в качестве управляющего воздействия подразумевает уменьшение значения «Концепта 1» до предельно низкого уровня.

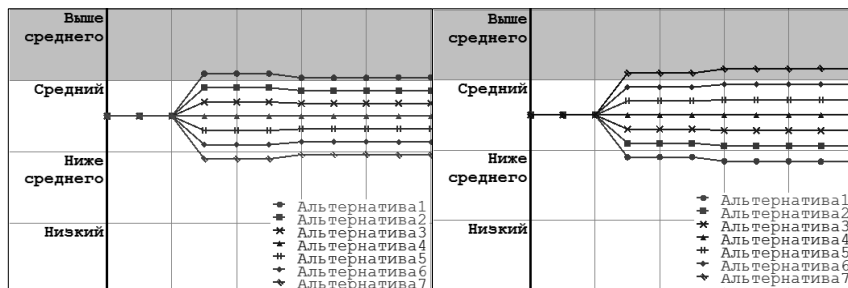


Рис. 2. Результаты сценарного анализа двух вариантов когнитивной модели: демонстрация смены порядка предпочтений между альтернативами

Предположим теперь, что при оценке сил влияний «Концепта 1» на зависящие от него «Концепт 2» и «Концепт 4» были допущены ошибки. Смоделируем это предположение, назначив указанным влияниям измененные значения: соответственно -0,3 и 0,7 (таким образом, знаки влияний остаются теми же, а их интенсивности меняются). Проведем повторный сценарный анализ модели, исходя из прежних условий. Получим (рис. 2, справа), что теперь оптимальный сценарий управления описывается Альтернативой 7, подразумевающей увеличение значения «Концепта 1» до предельно высокого уровня. Кроме того, заметим, что порядок предпочтений на множестве всех рассмотренных альтернатив изменился на противоположный.

Таким образом, допущение при построении когнитивной модели ошибок даже на уровне значений сил влияний (в том числе, при верно заданных знаках влияний) способно привести к искаженным результатам анализа модели, «рекомендующим» выбор такого управляющего воздействия на систему, которое на практике окажется неэффективным.

2. Анализ путей снижения влияния неопределенности значений параметров на результаты моделирования

В практике когнитивного моделирования сложился ряд способов противодействия рассмотренному выше типу неопределенности, имеющему место в когнитивных моделях.

Так, одним из важных этапов когнитивного моделирования является верификация построенной НКК. Этот этап направлен на выявление возможного несоответствия имеющейся когнитивной модели самой моделируемой системе, в контексте всех рассмотренных выше форм неопределенности. Важным аспектом эффективно организованного процесса верификации является применение подходов, направленных на активизацию и использование когнитивных способностей человека, для повышения вероятности обнаружения допущенных при построении модели ошибок. Наиболее естественным из них является подход, связанный с визуализацией НКК и ее визуальным анализом. Так, в работе [Исаев и др., 2020] представлены метафоры визуализации когнитивных карт, которые могут применяться для визуального обнаружения избыточности или неполноты множества влияний в составе когнитивной модели.

В то же время, эффективность верификации как средства противодействия неопределенности значений параметров остается невысокой. Это обусловлено акцентом существующих подходов к верификации на выявление и исправление ошибок в структурных (а не параметрических) аспектах модели. Что касается возможностей поиска ошибок в значениях сил влияний, то верификация может поспособствовать обнаружению

влияний с неверно заданными знаками – однако, как уже демонстрировалось, даже при верных знаках влияний, неточности в их значениях могут стать причиной ненадежных результатов моделирования.

Другим важным направлением работы в области повышения точности и достоверности оценки параметров НКК является совершенствование самих методов идентификации модели. В случае экспертных методов оно может быть направлено на повышение «разрешающей способности» метода (т.е. разнообразия различных значений сил влияний, которые эксперт может обоснованно задать с применением данного метода [Подвесовский и др., 2019]), а также на усовершенствование механизмов оценки согласованности выносимых экспертом суждений [Исаев и др., 2017]. Совершенствование статистических методов может затрагивать вопросы учета низкого качества используемых данных, устранения явления мультиколлинеарности [Подвесовский и др., 2019] и т.д.

Тем не менее, развитие методов параметрической идентификации НКК не позволит полностью устранить присутствие неопределенности в значениях параметров. Так, экспертные методы не способны обеспечить идеальную согласованность суждений эксперта, в то время как любой факт нарушения согласованности уже вносит неопределенность в результаты обработки суждений. Проблема статистических методов состоит в несовершенстве количественных данных о моделируемой системе, которое всегда имеет место на практике (ввиду чего получаемые на основе этих данных величины, такие как регрессионные коэффициенты, являются лишь оценками искомых параметров, а не их достоверными значениями).

Ввиду невозможности обеспечить отсутствие неопределенности значений параметров НКК, на практике прибегают к попыткам снизить влияние этого фактора на результаты анализа когнитивной модели. Наиболее интуитивным способом такого снижения является проведение повторного моделирования с несколько измененными условиями. В частности, при наличии сомнений в корректности определенного аспекта структуры НКК или ее параметров, в модель вносят изменение, касающееся данного аспекта (тем самым моделируя предполагаемую ошибку в нем). Сравнение результатов анализа скорректированной таким образом модели с результатами анализа ее исходного варианта позволяет оценить степень значимости их различий – и, следовательно, степень влияния смоделированной ошибки на получаемые результаты. Далее полученную информацию можно использовать, например, для более тщательной верификации конкретных аспектов когнитивной модели или оценки надежности различных стратегий управления.

Проблема такого подхода заключается в его интуитивном характере и несистемности процесса его реализации, а также в отсутствии адекватных механизмов автоматизации этого процесса в средствах программной под-

держки когнитивных моделей. Следствием этого обычно является моделирование лишь небольшой части возможных ошибок, неэффективный учет либо отсутствие учета различных вероятностей наличия ошибок в разных элементах НКК, затрудненный (ввиду отсутствия специальных средств поддержки) анализ результатов и т.д. В целом, фактор несистемности применения описанного подхода не позволяет раскрыть его потенциально высокую эффективность. Далее в работе будут представлены авторские предложения, связанные с постановкой этого подхода на системную основу.

Наконец, необходимо упомянуть о существовании ряда других типов когнитивных моделей (помимо НКК Силова), особенности математического аппарата которых потенциально могут способствовать решению либо снижению значимости исследуемой проблемы. Так, предложены типы когнитивных карт, параметры которых не являются конкретными числовыми значениями. К таким можно отнести нечеткие продукционные когнитивные карты (НПКК) [Борисов и др., 2012], сочетающие преимущества продукционных правил и нечеткой логики. Другой подобный тип моделей – нечеткие реляционные когнитивные карты (НРКК) – представляют собой расширение классических НКК за счет реляционного представления нечетких соотношений [Борисов и др., 2012]. Позже были предложены темпоральные когнитивные модели, среди которых выделяются нечеткие реляционные [Borisov et al., 2024], мягкие реляционные [Борисов, 2024] и нейро-нечеткие [Borisov et al., 2022]. Однако построение и анализ упомянутых типов когнитивных моделей является более сложным, в частности, требуется задание функций принадлежности для лингвистических переменных и продукционных правил. При этом исследуемая проблема отчасти сохраняется ввиду неизбежной недостаточной обоснованности параметров уже самих функций принадлежности и правил.

Итак, проведенный обзор показал недостаточность существующих путей снижения влияния неопределенности значений параметров НКК на результаты когнитивного моделирования. В этой связи далее в работе представлены два альтернативных взгляда на организацию данного процесса на системной основе.

3. Когнитивные модели с представлением параметров как случайных величин

Предлагается рассмотреть новый тип когнитивных моделей, являющийся обобщением НКК Силова, в котором все параметры модели представлены как случайные величины (СВ), способные принимать значения из соответствующих допустимых диапазонов. При этом вероятность конкретного значения параметра модели следует интерпретировать как степень уверенности в том, что параметр принимает именно это значение.

Такой подход к интерпретации вероятности характерен также для байесовской теории. Отметим, что в ряде работ (например, [Aguilar, 2003], [Cai et al., 2010]) предлагались разновидности когнитивных моделей, основанных на НКК Коско [Kosko, 1986], аппарат которых также включает в себя элементы случайности – однако, используемые в других аспектах (например, случайное срабатывание влияния между концептами).

Идентификацию параметров таких НКК предлагается начинать с построения непрерывных СВ, описывающих силы влияний между концептами. Интуитивным решением является выбор нормального распределения, что обосновано центральной предельной теоремой, учитывающей суммарное воздействие множества факторов в сложных системах. Для построения непрерывной СВ с нормальным распределением необходимо задать математическое ожидание () и среднеквадратическое отклонение (). Математическое ожидание силы влияния может быть определено с помощью любого из методов, используемых при задании параметров НКК Силова. Стандартное отклонение, в свою очередь, должно отражать степень нарушения согласованности экспертных оценок или уровень несовершенства статистических данных о системе.

Для упрощения дальнейшей адаптации методов анализа НКК Силова к новому типу моделей необходимо преобразование непрерывных СВ в дискретные путем дискретизации с заданным шагом. В связи с этим возникает задача подбора оптимальной частоты дискретизации, которая обеспечивать баланс между точностью представления данных и вычислительными затратами.

В целом, использование СВ для представления параметров НКК позволит формализовать неопределенность, связанную с оценкой этих параметров. Такой подход, учитывающий потенциальные ошибки и погрешности в ходе оценки, обеспечит повышение точности и надежности результатов моделирования. Разработка специализированного математического аппарата для построения и анализа НКК, параметры которых представлены в форме СВ, позволит получать более подробные результаты моделирования, приводящие к более обоснованным управленческим решениям.

4. Анализ устойчивости параметров когнитивных моделей

Другой предлагаемый подход к учету фактора неопределенности значений параметров НКК основан на следующей идее: вместо устранения возможных ошибок, допущенных при определении значений параметров, целесообразно исследовать, как именно различные изменения этих значений влияют на результаты анализа модели. Такой тип исследования и соответствующий подход в целом будем далее называть анализом устойчивости когнитивной модели. Следует отличать данное понимание термина

«анализ устойчивости» от схожих процессов исследования когнитивных карт (описанных, например, в [Робертс, 1986]), при котором цель анализа состоит в выявлении возможной нестабильности динамики модели в условиях воздействия импульсного процесса, обусловленной особенностями структуры и параметров когнитивной карты.

Проведение анализа устойчивости предполагает формирование пространства гипотетически возможных результатов моделирования, полученных в условиях различных предположений о наличии и величине ошибки в тех или иных параметрах когнитивной модели. Анализ этого пространства с позиции различий между результатами позволит находить обоснованные ответы на следующие значимые вопросы:

- Каким параметрам когнитивной модели следует уделить наибольшее внимание при верификации? То есть, возможно выявление параметров, ошибки в которых наиболее существенно повлияют на результаты моделирования, в том числе тех параметров, ошибки в значениях которых могут привести к принципиально неверному предсказанию динамики моделируемой системы в конкретных условиях.

- Какие из возможных стратегий управления моделируемой системой являются наиболее робастными, т.е. остаются эффективными даже в условиях допущения значительных неточностей при построении когнитивной модели, а какие, напротив, следует использовать с осторожностью?

- Наличие обоснованных ответов на указанные вопросы позволит, во-первых, оптимизировать процесс верификации когнитивной модели, снизив его трудоемкость за счет введения приоритизации при проверке параметров, а во-вторых, при использовании когнитивного моделирования в задачах управления сложными системами, поспособствует обнаружению более надежных стратегий управления.

Обобщенный алгоритм анализа устойчивости когнитивной модели включает в себя следующие этапы.

1. Сбор и формализация представлений эксперта о возможных ошибках в значениях параметров НКК.

2. Генерация на основе исходной НКК и полученных данных множества альтернативных вариантов НКК с изменениями в значениях параметров.

3. Получение результатов моделирования для всех сгенерированных вариантов НКК.

4. Анализ результатов моделирования с целью нахождения ответов на сформулированные выше актуальные типы вопросов о модели. Используемые при этом методы и подходы могут быть ориентированы как на исследование количественных характеристик полученных результатов (в том числе посредством специально разработанных метрик), так и на использование когнитивных способностей человека-аналитика за счет привлечения механизмов визуализации информации [Захарова и др., 2013] и проведения визуального анализа [Захарова и др., 2017].

Реализация каждого из перечисленных этапов требует соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения, разработка которого и является главной задачей развития описанного подхода.

Заключение

Представленные в работе подходы предложены в рамках исследования проблемной ситуации в когнитивном моделировании, связанной с невозможностью получения полностью достоверных значений параметров когнитивной модели при ее построении. Оба подхода в конечном итоге направлены на повышение результативности когнитивного моделирования как средства выработки стратегий управления сложными системами.

Разработка математического аппарата описанных в статье когнитивных моделей нового типа подразумевает существенную модернизацию всех этапов технологии когнитивного моделирования на основе НКК Силова за счет создания новых и адаптации существующих методов идентификации, верификации, структурно-целевого и сценарного анализа, а также визуализации модели.

Закономерным направлением дальнейшего развития подхода к анализу устойчивости когнитивных моделей является включение в рассмотрение помимо параметров модели также и ее структурных элементов.

Еще одним направлением исследований является выработка критериев сравнения результативности двух представленных подходов к противодействию параметрической неопределенности НКК, для дальнейшего проведения экспериментов на прикладных задачах и формирования обоснованных практикой представлений о перспективности развития каждого из подходов.

Список литературы

- [Борисов и др., 2012] Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 284 с.
- [Борисов, 2024] Борисов В.В. Мягкие реляционные темпоральные когнитивные модели: прямые и обратные задачи // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции. Т. 1. – Смоленск: Универсум, 2024. – С. 85-93.
- [Захарова и др., 2013] Захарова А.А., Шкляр А.В. Метафоры визуализации // Научная визуализация. – 2013. – Т. 5, № 2. – С. 16-24.
- [Захарова и др., 2017] Захарова А.А., Вехтер Е.В., Шкляр А.В. Методика решения задач анализа данных при использовании аналитических визуальных моделей // Научная визуализация. – 2017. – Т. 9, № 4. – С. 78-88.
- [Захарова и др., 2020] Захарова А.А., Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. Нечеткие когнитивные модели в управлении слабоструктурированными социально-экономическими системами // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – № 4(20). – С. 5-23. DOI: 10.38028/ESI.2020.20.4.001.

- [Исаев и др., 2017] Исаев Р.А., Подвесовский А.Г. Оценка согласованности суждений эксперта при построении функции принадлежности нечеткого множества методом множеств уровня // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13, № 3. – С. 9-15. – doi: 10.25559/SITITO.2017.3.499.
- [Исаев и др., 2020] Исаев Р.А., Подвесовский А.Г. Верификация причинно-следственных связей в когнитивных моделях на основе применения метафор визуализации нечетких когнитивных карт // Научная визуализация. – 2020. – Т. 12, № 4.
- [Подвесовский и др., 2019] Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. Идентификация структуры и параметров нечетких когнитивных моделей: экспертные и статистические методы // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7, № 6.
- [Робертс, 1986] Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам: пер. с англ. – М.: Наука, 1986. – 496 с.
- [Силов, 1995] Силов В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. – М.: ИНПРО-РЕС, 1995.
- [Aguilar, 2003] Aguilar J. A dynamic fuzzy cognitive map approach based on random neural networks // Int. J. Comput. Cognit. – 2003. – Vol. 1(4). – P. 91-107.
- [Borisov et al., 2022] Borisov V., Luferov V. Method for Forecasting Multidimensional Time Series Based on Neuro-Fuzzy Cognitive Temporal Models // In: Proceedings of the Fifth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’21). Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 330. – Springer, Cham, 2022. – doi: 10.1007/978-3-030-87178-9_15.
- [Borisov et al., 2024] Borisov V.V., Zharkov A.P., Luferov V.S. Scenario Modeling Based on Fuzzy Relational Temporal Cognitive Models // Pattern Recognit. Image Anal. – 2024. – Vol. 34(3). – P. 624-631. – doi: 10.1134/S1054661824700445.
- [Cai et al., 2010] Cai Y., Miao C., Tan A.-H., Shen Z., Li B. Creating an immersive game world with evolutionary fuzzy cognitive maps // IEEE J. Comput. Graphics Appl. – 2010. – Vol. 30(2). – P. 58-70.
- [Kosko, 1986] Kosko B. Fuzzy cognitive maps // International Journal of Man-Machine Studies. – 1986. – Vol. 24. – P. 65-75.
- [Yager, 1982] Yager R.R. Level sets for membership evaluation of fuzzy subset // Fuzzy Sets and Possibility Theory: Recent Developments (R.R. Yager, ed.). – Pergamon, New York, 1982. – P. 90-97.