

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА СИТУАЦИЙ И ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНЫХ КАРТ: ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ

А.А. Кулинич

Рассмотрены методы анализа влияний, структурного анализа, решения обратных задач и сценарного анализа, реализованные в системах анализа ситуаций на основе когнитивных карт и предназначенные для решения задач разработки стратегии управления слабоструктурированными ситуациями.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, слабоструктурированная ситуация, когнитивная карта, стратегия управления, анализ влияний, структурный анализ, обратная задача, сценарный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Для принятия решений по управлению сложными плохо определенными динамическими ситуациями экспертам и аналитикам приходится опираться на собственный опыт и представления о процессах, происходящих в динамических ситуациях, формализуя их в виде когнитивных карт. Когнитивная карта — это субъективное представление эксперта о процессах в сложной динамической ситуации, формально представляемое в виде ориентированного знакового графа [1].

Когнитивные карты строятся и настраиваются экспертным способом, но даже длительная и тщательная настройка когнитивной карты оставляет ее достаточно грубой субъективной моделью реальности [2].

В большинстве случаев для аналитиков и экспертов, работающих в условиях неопределенности в социально-политических и экономических ситуациях, такая субъективная модель является единственно возможной формализованной моделью сложных ситуаций, позволяющей получать и анализировать прогнозы развития ситуаций. Естественно, что прогнозы и решения, получаемые с такой грубой субъективной моделью, не точны, до-

статочно абстрактны, допускают множественные, часто противоречивые интерпретации.

Для поддержки аналитической и экспертной деятельности в сложных плохо определенных динамических ситуациях в России и за ее пределами разработаны компьютерные системы анализа ситуаций и поддержки принятия решений на основе когнитивных карт. В работе [2] были рассмотрены подходы и методы поддержки деятельности эксперта в процессах построения, параметризации, верификации и корректировки когнитивной карты, реализованные в системах [3–7], разработанных в России.

Задача принятия решений по управлению плохо определенной динамической ситуацией с помощью когнитивных карт заключается в разработке правдоподобной стратегии управления ситуацией. В настоящей работе анализируются подходы и методы поддержки разработки стратегии управления ситуацией.

В научной литературе имеются обзоры подходов и методов принятия решений с помощью когнитивных карт [8–10]. К сожалению, не все теоретически обоснованные методы анализа, рассмотренные в этих работах, могут быть реализованы в компьютерных системах из-за, например, их большой вычислительной сложности. Особенность настоящего обзора состоит в том, что здесь рассмат-

риваются и детально анализируются подходы и методы когнитивного анализа ситуаций, реализованные в существующих компьютерных системах.

Цель обзора заключается в анализе подходов и методов поддержки разработки стратегии управления ситуацией, реализованных в конкретных системах. Автор надеется, что такой обзор поможет аналитикам и лицам, принимающим решения, выбрать существующую или самостоятельно разработать систему поддержки их аналитической деятельности при принятии решений управления слабоструктурированными ситуациями.

1. РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННОЙ СИТУАЦИЕЙ С ПОМОЩЬЮ КОГНИТИВНЫХ КАРТ

Постановка задачи разработки стратегии управления слабоструктурированной ситуацией с помощью модели ситуации в виде когнитивной карты в общем виде может быть сформулирована следующим образом.

Слабоструктурированную ситуацию будем описывать кортежем: $\langle G(F, W), \Phi, X(0) \rangle$, где $G(F, W)$ — когнитивная карта, $F = \{f_i\}$ — множество факторов ситуации, $W = |w_{ij}|$ — матрица смежности, $w_{ij} \in [-1, 1]$; $\Phi = \{\varphi_i\}$ — шкалы факторов, заданные в виде отображения $\varphi_i: z_{ik} \rightarrow x_{ik}$, где z_{ik} — k -е лингвистическое значение фактора f_i , $z_{ik} \in Z$, Z — упорядоченное множество лингвистических значений (оценок значений, оценок приращений, или «абсолютных» лингвистических значений [2]), $x_{ik} \in [0, 1]$. $X(0) = (x_1(0), \dots, x_n(0))$, $x_i(0)$, $\forall i$ — вектор начальных значений всех факторов.

Для постановки задачи управления ситуацией необходимо определить множество управляющих и множество целевых факторов. Целевые и управляющие факторы определяются субъективно — экспертным путем. При этом множества управляющих и целевых факторов не фиксированы, а открыты. Это означает, что их состав может меняться в процессе поиска стратегии управления.

Итак, экспертным путем определяется множество управляющих факторов $F_{in} \subseteq F$. Управляющими считаются факторы, для которых эксперт предполагает наличие ресурсов управления R , заданных вектором ограничений $R = (r_1, \dots, r_m)$, где $r_i \in [0, 1]$ — максимально возможное значение i -го фактора ресурса. Ограничения на ресурсы позволяют определить для каждого фактора максимально возможные приращения значений факторов в виде вектора допустимых приращений факторов

$P_{in}^{\max} = (p_1, \dots, p_m)$, $p_i = r_i - x_i(0)$, где $p_i \in [-1, 1]$, $i = 1, \dots, m$, $x_i(0)$ — начальное значение фактора.

В когнитивных картах для задания управляющего воздействия обычно используют упорядоченные лингвистические оценки приращения ресурсов, вида — «Сильно увеличить», ..., «Сильно уменьшить», поэтому при разработке стратегии управления ситуацией удобно пользоваться конечными упорядоченными множествами допустимых приращений управляющих факторов $P_i = \{p_{i1}, \dots, p_{ik}\}$, $p_{ik} \in [-1, 1]$.

Множество стратегий управления ситуацией определится как прямое произведение возможных значений приращений управляющих факторов, с учетом их ресурсных ограничений P_i , т. е. $U^g = \times_i P_i$.

При этом любая стратегия $U_j \in U^g$ — это комбинация разных значений управляющих факторов, т. е. вектор входных воздействий $U_j = P(0)$.

Эксперт определяет цель управления ситуацией в виде множества целевых факторов $F_{out} \subseteq F$. Для каждого фактора из множества целевых факторов $f_i \in F_{out}$ определяется его целевое значение g_i .

Принято рассматривать два способа задания целевых значений факторов из множества F_{out} . Первый из них позволяет определить так называемую фиксированную цель, а второй — нефиксированную цель [11, 12].

Под фиксированной целью управления понимается вектор целевых факторов F_{out} и их значений $G = (g_1, \dots, g_q)$, $g_i \in [0, 1]$. Вектор целевых факторов может быть выражен и в терминах приращений $P_{out}^x = (p_1, \dots, p_q)$, $p_i \in [-1, 1]$, $p_i = g_i - x_i(0)$, $x_i(0)$, $i = 1, \dots, n$, начальное значение i -го фактора.

Под нефиксированной целью понимается вектор целевых факторов F_{out} и желаемые знаки их приращений $P_{out}^x = (p_1, \dots, p_q)$, $p_i \in \{-1, 0, 1\}$, где «-1» означает, что значение фактора $f_i \in F_{out}$ должно уменьшиться, «0» — не измениться и «1» — увеличиться, без указания конкретных значений степени роста или падения значения фактора. Таким образом, нефиксированная цель качественно определяет желаемые тенденции изменения состояния ситуации, т. е. направление ее развития.

Задача разработки стратегии управления ситуацией заключается в том, чтобы найти такую стратегию $U_j \in U^g$, что ее применение для получения прогноза развития ситуации $U_j W = P_{out}^x$ пе-



Подходы и методы поддержки принятия решений для разработки стратегии управления

Подходы и методы	Содержание поддержки экспертной деятельности
Анализ структуры когнитивной карты	Верификация когнитивной карты, анализ устойчивости ситуации, определение множества управляющих факторов
Анализ влияний факторов в когнитивной карте	Определение множества управляющих и целевых факторов. Определение непротиворечивости цели
Решение обратной задачи	Определение множества управляющих факторов и их значений
Сценарный анализ	Прогнозы развития ситуаций, сравнительный сценарный анализ прогнозов развития ситуаций, выбор лучшей стратегии управления ситуацией

реводит ситуацию из начального в целевое состояние $G = X(0) + P_{out}^x$.

Это общая постановка задачи, в рамках которой стратегия управления ситуацией разрабатывается с учетом специфики представления шкал факторов, методов определения силы связи между факторами, а также методов получения прогнозов развития ситуаций в системах моделирования [3–7], рассмотренных в работе [2].

При разработке стратегии управления ситуацией для заданной цели управления G пользователь системы решает две связанные задачи: 1) определение множества управляющих факторов F_{in} ; 2) определение значений приращений $U = (u_1, \dots, u_q)$ факторов из множества F_{in} .

Решение первой из них основывается на выборе различных сочетаний входных факторов и их значений для достижения цели управления на основе личных предпочтений и интуитивных представлений эксперта или же на основе структурного анализа когнитивной карты.

Решение второй задачи основано на решении обратной задачи, позволяющей по сформулированной фиксированной цели найти единственную или множество стратегий ее достижения.

Подходы и методы, анализируемые в данной статье, а также содержание поддержки принятия решений при разработке стратегии управления ситуацией представлены в таблице.

Рассмотрим реализации перечисленных подходов к разработке стратегии управления ситуацией в различных системах анализа ситуаций на основе когнитивных карт подробнее.

2. РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ СИТУАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И АНАЛИЗА ВЛИЯНИЙ

Анализ влияний — это анализ текущей ситуации, заключающийся в выделении и анализе путей влияния (каузальных цепочек) одних факторов на другие. Цель анализа состоит в формировании возможных альтернатив управляющих решений — стратегий управления ситуацией. Анализ влияний выделяет факторы с наиболее сильным влиянием на целевые факторы, т. е. факторы, значения которых следует изменить. Окончательный выбор управляющих факторов остается за лицом, принимающим решение, которое при выборе управляющего фактора должно учитывать и другие соображения, не отображенные когнитивной картой (например, ресурсы, необходимые для изменения управляющих факторов). Методы анализа влияний в когнитивных картах рассмотрены и проанализированы в работе [8].

В настоящей работе мы ограничиваемся обзором и обсуждением методов анализа влияний, реализованных в системах анализа ситуаций на основе когнитивных карт.

2.1. Структурный анализ и анализ влияний в когнитивных картах

Анализ влияний факторов заключается в выделении и анализе всех прямых и не прямых путей влияния между любой парой факторов, а также в определении суммарного влияния всех путей между факторами. Он рассматривается как составная часть структурного анализа ориентированного графа. Задачи структурного анализа когнитивной карты определяются несколько шире, чем просто анализ влияний факторов. Структурный анализ когнитивных карт включает в себя следующие три группы методов анализа структуры когнитивной карты:

Анализ связности факторов заключается в определении k -связности каждого фактора (k -связность фактора определяет множество факторов, связанных с анализируемым фактором путями длины k); анализе значимости факторов и связей между ними; анализе важности факторов; анализе среднего влияния факторов на все факторы и всех факторов на анализируемый фактор. Применение методов анализа факторов позволяет выбрать и обосновать управляющие факторы.

Анализ влияния факторов позволяет определить и проанализировать все пути между любой парой факторов, а также определить вес каждого пути, вес и характер суммарного влияния между факторами. Этот вид анализа применяется для верифи-

кации когнитивной карты, а также для обоснования и объяснения прогнозов развития ситуации, а также при определении множества управляющих факторов.

Анализ структуры когнитивной карты в целом позволяет: выделить сильно связанные компоненты когнитивной карты (кластеры), определить иерархическую организацию выделенных кластеров, выделить и проанализировать структурные «острова» или «дыры» в когнитивной карте, выполнить полиэдральный анализ когнитивной карты, позволяющий связать структуру когнитивной карты с устойчивостью динамических процессов в ней. Это анализ направлен на анализ структурной организации когнитивной карты и на анализ устойчивости. Кроме этого, применение методов данной группы позволяет верифицировать когнитивную карту.

Перечисленные методы структурного анализа находят применение в системе «Decision Explorer» [13, 14], системе структурного анализа «Pajek» [15], являющейся подсистемой системы моделирования когнитивных карт «FCMapper» [16], системе определения структурной значимости элементов когнитивной карты, реализованной средствами «MatLab» [17], системе для полиэдрального анализа структуры когнитивных карт [18], а также системах «Космос» [3], ИГЛА [5] и «Ситуация» [7].

2.1.1. Структурный анализ в системе анализа когнитивных карт «Decision Explorer»

Система анализа когнитивных карт «Decision Explorer» широко применяется для разработки стратегии развития бизнеса, построения системы корпоративных знаний, агрегирования знаний для построения корпоративных экспертных систем, анализа интервью и структуризации знаний, построения качественных моделей для моделирования системной динамики [13].

Для построения когнитивных карт здесь рекомендуется применять метод структурированного интервью, результаты которого представляются в виде репертуарных решеток [19], отражающих экспертные знания и оценки. Экспертные оценки, представленные в репертуарных решетках в системе «Decision Explorer», после преобразований представляются в виде множества факторов ситуации (концептов), связанных причинно-следственными отношениями, т. е. в виде когнитивной карты. При анализе ситуаций в системе «Decision Explorer» выделяются управляющие (входные) факторы (вершины орграфа) и целевые факторы (факторы-заклучения). Цель анализа влияний в этой системе заключается в выделении путей в орграфе, связывающих входные и целевые факторы. Путь, связывающий

входной и выходной факторы, здесь считается цепочкой аргументации, объясняющей возможное управление ситуацией.

Структурный анализ когнитивной карты в системе «Decision Explorer» предполагает применение следующих методов.

Определение целевых факторов (Heads). Целевые факторы — это факторы, представленные в графе вершинами, не имеющих выходящих связей. Такие факторы считаются факторами-заклучениями в цепочке аргументов, целью, которую необходимо достичь. Проверка наличия таких факторов в когнитивной карте позволяет убедиться в правильности и полноте определения цели.

Определение входных (управляющих) факторов (Tail). Входные (управляющие) факторы — это факторы, представленные в графе вершинами, не имеющими входящих дуг. Такие факторы служат началом цепочек аргументации, фиксирующих некоторые события или действия для управления ситуацией. При анализе ситуации пользователь системы активизирует входные факторы, что обеспечивает активизацию всей цепочки промежуточных факторов (аргументов) до целевых факторов.

Обнаружение факторов-сирот (Orphan). Факторы-сироты — это факторы, не имеющие связей с другими факторами когнитивной карты. Существование в когнитивной карте факторов-сирот, позволяет говорить об ошибках при ее построении.

Анализ кластеров (Clusters) — используется для выделения кластеров в когнитивной карте. Наличие кластеров акцентирует внимание аналитика на существование в когнитивной карте сгруппированных и сильно связанных подсистем, отражающих реальную структуру ситуации. Анализ кластеров в когнитивной карте позволяет установить, что все подсистемы представлены в когнитивной карте, а также проверить корректность их выделения.

Анализ доменов (Domain) направлен на определение связности фактора. В частности, он позволяет определить факторы, непосредственно связанные с анализируемым фактором. В результате анализа определяется число входящих и выходящих связей из анализируемого фактора. Этот анализ позволяет определить ключевые (важные) факторы анализируемой ситуации. Ключевыми считаются факторы, имеющие большее число связей с другими факторами.

Анализ центров когнитивной карты (Central). Этот анализ направлен на исследование k -связности факторов. Он позволяет анализировать влияние анализируемого фактора на некотором заданном удалении k .

Анализ сложных управляющих (входных) факторов (Cotail). Сложные входные факторы — это



управляющие факторы, имеющие две и более выходящие дуги. Они способны породить два и более путей к разным целевым факторам. Для принятия решений такие факторы интересны тем, что воздействие на один из них может привести к достижению векторной цели, включающей в себя два или более целевых фактора.

Анализ иерархической организации когнитивной карты (Hiesets) позволяет определить иерархическую организацию факторов. В качестве корневых вершин иерархии выделяются целевые факторы, следующий уровень иерархии содержит факторы, непосредственно связанные с целевыми вершинами, и т. д., до достижения входных управляющих факторов. В результате анализа для целевых факторов определяются иерархически организованные подмножества объясняющих факторов.

Анализ потенциальной силы факторов (Potency) выполняется только после определения иерархической организации когнитивной карты. Его суть заключается в нахождении пересечения подмножеств факторов, образующих иерархию и влияющих на целевые факторы. Если пересечения иерархических подмножеств не пусты, то они содержат сложные листовые факторы (cotail). Выбор таких факторов в качестве управляющих более предпочтителен, поскольку позволяет достичь векторной цели.

Перечисленные методы структурного анализа когнитивной карты направлены на анализ факторов когнитивной карты и ее структуры. Они позволяют определить множество входных факторов для заданного множества целевых факторов.

Анализ влияний в системе «Decision Explorer» выполняется для любой пары факторов. При анализе влияний определяются все пути влияния, которые представляются в виде цепочки аргументации, включающей в себя фактор из множества управляющих факторов (начало аргументации), промежуточные факторы и заключение цепочки аргументации, включающее в себя фактор из множества целевых факторов.

Структурный анализ с помощью системы «Decision Explorer» дает рекомендации для выбора управляющих факторов из множества возможных, но окончательный выбор управляющего фактора остается за экспертом, опирающимся на свои личные предпочтения, не формализуемые, не учитываемые и не моделируемые этой системой.

2.1.2. Структурный анализ в системе «FCMapper»

Данная система [16] состоит из двух практически автономных программных подсистем. Первая из них — это подсистема анализа нечетких когни-

тивных карт, включающая в себя подсистемы ввода когнитивной карты и получения прогноза развития ситуации. Система реализована на базе электронных таблиц «MS Excel». Для структурного анализа когнитивная карта, заданная в виде таблицы «MS Excel», экспортируется в файл и передается во вторую подсистему структурного анализа «Pajek» [15].

Система «Pajek» представляет собой универсальную систему структурного анализа сетевых структур большой размерности [15]. Методы анализа, реализуемые в ней, могут быть применены для анализа когнитивных карт. В системе «Pajek» реализованы функции редактирования когнитивной карты, позволяющие работать с отдельными факторами или с множеством факторов когнитивной карты. Основные функции редактирования: удаление связей или факторов, петель, добавление связей и факторов; изменение значений весов связей.

Среди функций редактирования интересны групповые операции редукции, позволяющие упростить сложные когнитивные карты. Они работают со всеми факторами, удовлетворяющими критериям, которые задает пользователь. Это следующие групповые операции работы с факторами и связями:

- редукция когнитивной карты по степеням факторов — рекурсивно удаляет из когнитивной карты факторы, степень которых (по входным, выходным связям) ниже некоторого заданного уровня;

- иерархическая редукция когнитивной карты — рекурсивно удаляет факторы, не имеющие соседей или имеющих одного соседа; такая редукция позволяет получить упрощенную иерархически организованную когнитивную карту;

- редукция подразделения — рекурсивное удаление факторов, имеющих два соседних фактора и добавление непосредственной связи между ними.

В системе «Pajek» реализованы следующие **методы анализа факторов** когнитивной карты:

- вычисление степеней всех факторов — позволяет определить число входных дуг, число выходных дуг и общее число дуг для любого фактора когнитивной карты;

- нахождение центров в графе (центральными называются факторы, которые получают по связям от соседних факторов больше, чем им отдают);

- определение степени центральности (degree centrality) факторов — вычисляется вектор, характеризующий степень центральности каждого фактора, которая определяется как отношение степени фактора (число дуг, инцидентных фактору) к общему числу факторов в когнитивной карте, уменьшенному на единицу;

— определение плотности центрального фактора (Closeness centrality); основывается на анализе соотношения кратчайших путей, выходящих из центральной вершины ко всем путям, проходящим через нее;

— определение связности центрального фактора (Betweenness centrality) — основано на определении отношения числа кратчайших путей, проходящих через центральную вершину, ко всем кратчайшим путям в когнитивной карте;

— определение всех циклов в когнитивной карте.

Перечисленные методы анализа факторов могут применяться не только к центральным, но и любым факторам когнитивной карты. Все эти методы позволяют охарактеризовать важность фактора в когнитивной карте и могут быть применены для выбора управляющих факторов.

Для анализа структуры когнитивной карты в целом в системе «Pajek» служат следующие методы:

— определение доменов (доменом фактора называется множество ближайших соседей анализируемого фактора по входящим, выходящим связям или всем связям); система позволяет определить домен фактора в виде подграфа анализируемой когнитивной карты;

— определение k -ядра когнитивной карты, представляющего собой подграф рассматриваемого графа (когнитивной карты), каждый из факторов которого содержит ровно k ближайших соседей-факторов;

— определение взвешенного k -ядра когнитивной карты — определяется подграф, в котором сумма весов на дугах не превышает заранее заданного пользователем значения k ;

— определение «структурных островов» в когнитивной карте (структурным островом называется множество факторов (вершин) в когнитивной карте (кластер), сила связи между которыми больше, чем сила связи с факторами за пределами этого кластера — «структурного острова»);

— определение «структурных дыр» в когнитивной карте (отношение суммы весов связей между факторами i и j к сумме всех связей i -го фактора характеризует «структурную дыру» в когнитивной карте: так, значение «1» этого отношения определяет полностью изолированный фактор — «структурную дыру»);

— иерархическая декомпозиция графа, позволяющая представить когнитивную карту в виде иерархии связанных кластеров; выполняется также иерархическая декомпозиция с заданными условиями, например, в качестве условия может быть задан размер кластера в иерархии (число факторов, включенных в кластер) и др.

Анализ путей влияния факторов. Система «Pajek» дает возможность анализа путей влияния между любой парой факторов в когнитивной карте. Выявляются и анализируются кратчайший путь, путь с минимальным весом, с заданной максимальной длиной, решается задача нахождения максимального потока между факторами.

Перечисленные методы позволяют исследовать структуру когнитивной карты в целом, что облегчает ее верификацию, и, кроме этого, определить связность и значимость отдельных факторов, получить обобщенные характеристики факторов когнитивной карты, что облегчает выбор управляющих факторов при разработке стратегии управления ситуацией.

2.2. Структурная значимость элементов когнитивной карты

Оригинальный подход к анализу структуры когнитивной карты, отличный от рассмотренных ранее методов структурного анализа, предложен в работе [17].

Здесь анализируется структурная значимость элементов когнитивной карты (т. е. факторов и связей между ними). Под оценкой структурной значимости элемента понимается степень изменения структурных свойств когнитивной карты $G = (F, W)$, которую влечет за собой модификация элемента или его исключение из когнитивной карты. Для получения количественных оценок структурной значимости элемента анализируется совокупность связей, имеющих в графе G .

Связь (f_i, f_j) между вершинами графа f_i и f_j — это совокупность простых ориентированных путей из вершины f_i в вершину f_j . Знаком пути из f_i в f_j считается знак произведения весов, входящих в него ребер, а его весом — произведение весов входящих в него ребер. Связям (f_i, f_j) сопоставляется одна из следующих количественных оценок: наличие или отсутствие связи: $r(f_i, f_j) \in \{0, 1\}$; «проводимость связи» $p(f_i, f_j)$ — величина, обратная весу минимального пути из вершины f_i в вершину f_j ; «общая проводимость» связи $P(f_i, f_j)$ — учитывает проводимости всех путей из вершины f_i в вершину f_j .

Графу G в целом сопоставляется оценка r_G , характеризующая структуру графа и равная сумме оценок имеющихся в нем связей. Значимость элемента графа (вершины или связи) оценивается как разность оценок до и после модификации этого элемента.

Структурная значимость фактора. Модификация вершины f_i означает ее удаление из графа, а



ее структурная значимость $q(f_i) = r_G - r_G(f_i)$, где $r_G(f_i)$ — структурная характеристика графа G после удаления из него вершины f_i .

Структурная значимость связи. Модификация связи заключается в ее исключении, изменении направления, в замене знака на противоположный, а также в изменении веса связи в некоторых пределах. Оценка структурной значимости связи определяется соотношением: $q(f_i, f_j) = r_G - r_G(f_i, f_j)$, где $r_G(f_i, f_j)$ — структурная характеристика графа G после удаления из него связи (f_i, f_j) .

Структурная значимость знака связи. Для анализа структурной значимости связей графа при изменении его знака, графу в целом сопоставляется векторная оценка $r_G = (r_G^+, r_G^-)$, где r_G^+ — сумма оценок $r_G^+(f_i, f_j)$, вычисленная по положительным путям между вершинами (f_i, f_j) , а r_G^- — сумма оценок $r_G^-(f_i, f_j)$, вычисленная по отрицательным путям между вершинами (f_i, f_j) .

Структурная значимость знака связи $q^\pm(f_i, f_j)$ определяется как разность между компонентами вектора r_G до и после изменения знака влияния на противоположный, т. е. $q^\pm(f_i, f_j) = (r_G^+ - r_G^+(f_i, f_j), r_G^- - r_G^-(f_i, f_j))$, где $r_G^+(f_i, f_j)$ структурная характеристика графа, вычисленная по положительным путям после изменения знака связи (f_i, f_j) на противоположный; $r_G^-(f_i, f_j)$ — структурная характеристика графа, вычисленная по отрицательным путям после изменения знака связи (f_i, f_j) на противоположный знак.

Упорядоченные множества значений структурной значимости вершин $(q(f_i))$, $\forall i$, могут быть использованы экспертом и аналитиком при формировании множества управляющих факторов.

Изложенные методы определения значимости элементов когнитивной карты реализованы в системе [17] на базе пакета Matlab. В настоящее время в нее входят следующие методы анализа: определение связанных компонент; вычисление оценок структурной значимости вершин, ребер, знаков и весов влияния в когнитивной карте; выделение сильно связанных компонент; построение графа конденсации; вычисление циклических характеристик элементов.

Структурный анализ когнитивной карты, анализ влияний, а также анализ структурной значимости элементов когнитивной карты дает обобщенные статические характеристики структуры

когнитивной карты, не позволяющие судить о значимости элементов когнитивной карты в смысле поведения системы, например, ее устойчивости.

Для этих целей в работе [18] предлагается использовать аппарат алгебраической топологии и теории графов, позволяющий анализировать структуру когнитивной карты (связности факторов) как сложное многомерное геометрическое образование — симплициальный комплекс. В настоящее время анализ симплициальных комплексов применяется для моделирования свойств связности различных сетей взаимодействующих элементов (подсистем, сущностей и др.) таких, как коммуникации, трафики, биологические сети, и др.

2.3. Полиэдральный анализ структуры когнитивной карты

Данный анализ позволяет представить когнитивную карту в трехмерном пространстве в виде полиэдрального комплекса — конечного множества выпуклых многогранников, имеющих общие грани. Такое представление позволяет визуализировать некоторые геометрические особенности когнитивной карты, скрытые при представлении ее в виде планарного графа.

Анализ структурной связности в полиэдральном анализе основан на исследовании q -связности симплициальных комплексов.

Для когнитивной карты $G = (F, W)$, где $F = \{f_i\}$ — множество факторов когнитивной карты, W — матрица смежности, симплициальный комплекс состоит из множества вершин F и множества симплексов X , образованных из этих вершин в соответствии с заданным бинарным отношением W . То есть матрица смежности W определяет симплициальный комплекс $K_X(F, X)$, в котором элементы множества F рассматриваются как вершины, а элементы σ_p множества X , $\sigma_p \in X$ определяют грани, отражающие связность фактора f_i из множества F , т. е. симплекс — строка матрицы смежности W . Нижний индекс симплекса соответствует его геометрической размерности, т. е. $\dim \sigma_p = p$.

Для характеристики связности симплексов в комплексе используется понятие цепи связи. Два симплекса, не имеющие общей грани, могут быть связаны последовательностью (цепью) промежуточных симплексов, которые объединяются в одну группу или q -компоненту. Число компонент на каждом уровне связанности q изменяется от 0 до $\dim K$ и содержит информацию о структуре комплекса в целом, отражая глобальную связность системы.

Два симплекса σ_i и σ_j комплекса K соединены цепью q -связи, если в комплексе K существует та-

кая последовательность симплексов $(\sigma_{aq}, \dots, \sigma_{cq})$, что σ_{aq} — грань симплекса σ_i , σ_{cq} — грань симплекса σ_j , кроме этого, все промежуточные симплексы $\sigma_{aq-1}, \sigma_{aq}$ также имеют общую грань, $q = \min\{aq, q-1, \dots, cq\}$.

Если два симплекса q -связаны, то в комплексе K эти симплексы $q-1, \dots, 0$ -связаны. Понятие q -связности [20] порождает на комплексе K рефлексивное, симметричное и транзитивное отношение, т. е. отношение эквивалентности. Для каждого значения размерности $q = 0, 1, 2, \dots, \dim K$ определяется число различных классов эквивалентности Q_q . Вектор классов эквивалентности $Q = (Q_q, \dots, Q_0)$ симплицеального комплекса K называется первым структурным вектором системы, а его анализ — Q -анализом.

Q -анализ системы, представленной структурным вектором, позволяет избежать трудности аналитического характера и предоставляет возможности для анализа не только структуры, но и ее поведения в динамике. Анализ значений элементов структурного вектора для различных симплицеальных комплексов позволяет классифицировать их по степени сложности структурной организации и использовать эту информацию для практических целей. Так, в работе [18] исследуется зависимость свойства устойчивости системы от характера ее структурного вектора. Для проведения Q -анализа когнитивных карт с целью анализа их устойчивости разработаны соответствующие программные средства [18].

2.4. Анализ влияний в нечетких когнитивных картах «Космос» и ИГЛА

Для поддержки принятия решений при разработке стратегии управления ситуацией в системах, моделирующих нечеткие когнитивные карты, используются обобщенные структурные показатели влияния и консонанса факторов нечетких когнитивных карт [3, 5].

Для получения обобщенных структурных показателей нечетких когнитивных карт служит двойная положительно определенная матрица смежности $W' = |w'_{ij}|_{2n \times 2n}$ [3].

Из матрицы транзитивного замыкания получают [3]:

— матрицу положительного взаимного влияния $P_S = [p_{ij}]_{n \times n}$, где элементы p_{ij} получаются из элементов матрицы W' по правилу: $p_{ij} = w'_{2i2j}$, если $w'_{2i2j} > w'_{(2i-1)(2j-1)}$; иначе $p_{ij} = 0$;

— матрицу отрицательного взаимного влияния — $N_S = [n_{ij}]_{n \times n}$, где элементы n_{ij} получаются по

правилу $n_{ij} = w'_{(2i-1)(2j-1)}$, если $w'_{2i2j} < w'_{(2i-1)(2j-1)}$; иначе $n_{ij} = 0$;

— матрицу взаимного консонанса $C_S = [c_{ij}]_{n \times n}$, где $c_{ij} = |p_{ij} - n_{ij}| / |p_{ij} + n_{ij}|$, $p_{ij} \in P_S$, $n_{ij} \in N_S$, $\forall ij$;

— матрицу взаимного диссонанса $D_S = [d_{ij}]_{n \times n}$, где $d_{ij} = 1 - c_{ij}$, $\forall ij$.

Для исследования структурных особенностей когнитивной карты используются обобщенные характеристики влияния и консонанса (диссонанса) одного из факторов на все оставшиеся факторы. Используются следующие характеристики:

— консонанс влияния i -го фактора на систему

$$\bar{C}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}, \text{ где } c_{ij} \text{ — консонанс влияния } i\text{-го фактора на } j\text{-й, } \forall j;$$

этот показатель характеризует среднее значение неопределенности влияний i -го фактора на все остальные факторы системы;

— консонанс влияния системы на j -й фактор

$$\bar{C}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{ij}; \text{ этот показатель характеризует среднее значение неопределенности влияний всех факторов системы на } j\text{-й фактор};$$

— показатель \bar{P}_i влияния i -го фактора на систему

$$\bar{P}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_{ij}, \text{ где } p_{ij} \text{ — показатель влияния } i\text{-го фактора на } j\text{-й};$$

этот показатель характеризует среднее значение влияния i -го фактора на все остальные факторы системы;

— показатель влияния системы на j -й фактор

$$\bar{P}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{ij}; \text{ этот показатель характеризует среднее значение влияния всех факторов системы на } j\text{-й фактор};$$

— показатель централизации консонанса влияния $I_i^c = \bar{C}_i - \bar{C}_i$, характеризующий баланс консонансов влияния i -го фактора на систему и системы на i -й фактор;

— показатель централизации влияния $I_i^p = \bar{P}_i - \bar{P}_i$, характеризующий баланс влияния i -го фактора на систему и системы на i -й фактор.

Перечисленные характеристики каждого фактора ситуации позволяют упорядочить их по показателям влияния и консонанса влияния системы на фактор (\bar{P}_i, \bar{C}_i) и фактора на систему (\bar{P}_i, \bar{C}_i).

Очевидно, что лучшими кандидатами на включение во множество управляющих факторов будут



факторы с большим влиянием и консонансом влияния фактора на систему.

Анализ показателей централизации консонанса влияния I_i^c и влияния I_i^p позволяет выявить сбалансированные факторы, т. е. факторы, влияние и консонанс влияния которых на систему и системы на них приблизительно равны, т. е. $I_i^c \approx 0$, и несбалансированные факторы, влияние которых на систему и системы на них оказывает усиливающее или ослабляющее воздействие.

Детальный анализ управляющих факторов в системах «Космос» и ИГЛА основан на анализе матриц: $C_S = [c_{ij}]_{n \times n}$ — взаимного консонанса, $D_S = [d_{ij}]_{n \times n}$ — взаимного диссонанса, $P_S = [p_{ij}]_{n \times n}$ — положительного взаимного влияния и $N_S = [n_{ij}]_{n \times n}$ — отрицательного взаимного влияния.

Для анализа используют множество α -среза для отношений, описываемых перечисленными матрицами (α -срез оставляет в этих матрицах элементы, значения которых больше или равны $\alpha \in [0, 1]$), что позволяет выделить множество связанных факторов с α -уровнями взаимовлияния и консонанса. Взаимосвязанные факторы со значениями консонанса и уровнем влияния выше α -среза здесь называются «фигурами».

Взаимосвязанные факторы с высокими уровнями консонанса влияния и считаются «хорошими фигурами», а с высоким уровнем диссонанса влияния считаются «плохими фигурами». Факторы, включенные в «хорошие фигуры», предпочтительно используются при разработке стратегии управления ситуацией.

Методы поддержки разработки стратегии управления ситуацией, основанные на структурном анализе когнитивных карт, помогают работе аналитика при принятии решений по выбору управляющих факторов, верификации когнитивной карты, анализе устойчивости ситуации. Недостаток структурного анализа состоит в большой трудоемкости, которая проявляется при анализе сильно связанных когнитивных карт большой размерности, а также при выборе управляющих факторов для достижения векторной цели. В сильно связанной когнитивной карте факторы, включенные в вектор цели, зависимы. Это означает, что анализ влияния отдельного управляющего фактора на отдельный целевой фактор должен выполняться с учетом зависимости всех целевых факторов. В реальности, процесс выбора управляющих факторов для достижения векторной цели оказывается достаточно трудоемким.

В системе «Ситуация» [7] реализован метод, основанный на анализе структурных характеристик когнитивной карты и позволяющий преодолеть трудности структурного анализа, возникающие при разработке стратегии достижения векторной цели в сильно связанных когнитивных картах большой размерности.

2.5. Структурный анализ в системе «Ситуация»

В системе «Ситуация» [7] для выбора множества управляющих факторов и разработки стратегии управления ситуацией используется критерий оценки динамики фактора (ОДФ) [11] и транзитивное замыкание матрицы смежности когнитивной карты.

Критерий ОДФ отражает тенденции изменения значений факторов ситуации, сформулированные экспертом, и формально определяется следующим образом.

Пусть $P_{out}^x = (p_1, \dots, p_m)$ — целевой вектор приращений, где $p_i \in [-1, 1]$ — желаемое изменение значения i -го фактора. Оценка динамики фактора — это вектор $r(P_{out}^x) = (r_1, \dots, r_m)$, где $r_i \in \{-1, 0, 1\}$ — компоненты вектора, принимающие соответственно значение -1 или 1 , если значение фактора желательнее уменьшить или увеличить, и значение 0 , если желаемое направление изменения фактора неопределенно.

Противоречивость цели. Противоречия в векторе цели возникают из-за зависимости факторов, включенных в его состав. Например, если два фактора f_i и f_j вектора цели связаны отрицательной связью $w_{ij} = -1$, а аналитик или эксперт определил, что в ОДФ $r_i = 1$ и $r_j = 1$ ($r_i = -1$ и $r_j = -1$), то невозможно достичь одновременного увеличения (уменьшения) этих факторов. Критерий ОДФ в системе «Ситуация» позволяет найти такие противоречия в целевом векторе.

Показано [11], что вектор цели непротиворечив, если $r_i r_k = \text{sign}(w_{ik}^*)$, $\forall r_i, r_k \in r(P_{out}^x)$, где w_{ik}^* — элемент матрицы W^* транзитивного замыкания.

Данный критерий непротиворечивости цели позволяет ее скорректировать, исключив противоречивые факторы.

Согласованность цели и вектора управляющих воздействий. Критерий ОДФ позволяет определить согласованность вектора управления с вектором цели. В работе утверждается [11], что вектор управлений $U = (u_1, \dots, u_p)$ согласован с вектором

цели P_{out}^x , если знаки элементов вектора управлений удовлетворяют условию:

$$\text{sign } u_t = \text{sign}(r_s) \dots \text{sign}(w_{st}), \forall u_t \in U, \forall p_s \in P_{out}^x.$$

По данному критерию согласованности качественно определяются знаки приращения управляющих факторов для изменения состояния ситуации в направлении цели.

Эффективность управляющего фактора. Для определения множества управляющих факторов в системе «Ситуация» используется показатель, характеризующий эффективность управляющего фактора, которая определяется как абсолютное значение суммы коэффициентов влияния данного фактора на целевые факторы [11]:

$$E(u_k) = \left| \sum_{i=1}^m r_i w_{ki} \right|.$$

Вычисление показателей эффективности управляющих факторов, позволяет упорядочить их по эффективности влияния на целевые факторы и в качестве управляющих факторов F_{in} выбирать факторы с наибольшими значениями этого показателя.

Система «Ситуация» позволяет проверять разрабатываемую стратегию управления на принципиальную (при условии неограниченных ресурсов) и реальную возможность достижения цели (при заданных ограничениях на ресурсы).

Перечисленные методы, приемы и возможности снижают субъективизм вырабатываемого решения и уменьшают переборную составляющую при разработке стратегии управления ситуацией.

Конструирование стратегии управления ситуацией с помощью структурного анализа остается все еще субъективным процессом. Здесь нет строгого критерия лучшей стратегии.

3. РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ СИТУАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Несколько снизить субъективизм процесса разработки стратегии управления ситуацией характеристик можно путем применения методов решения обратных задач. Решение обратной задачи позволяет определить значения приращений всех факторов из выбранного множества управляющих факторов $F_{in} \subseteq F$, позволяющих перевести ситуацию из текущего состояния $X(0)$ в целевое состояние G .

Общая постановка обратной задачи следующая. Задана матрица транзитивного замыкания W^* ког-

нитивной карты и целевой вектор P_{out}^x приращений значений признаков ситуации, характеризующий целевое состояние. Задача заключается в нахождении вектора управляющих воздействий $U = (u_1, \dots, u_p)$ таких, что для всех значений входных факторов $u_i \in U, u_i \in [-1, 1]$, выполняется равенство $UW^* = P_{out}^x$.

Методы решения обратной задачи в рассматриваемых системах анализа когнитивных карт определяются используемой моделью получения прогнозов развития ситуации. В настоящей статье рассматриваются два метода получения прогноза: с суммированием и без суммирования приращений факторов [2]) и два способа определения цели (фиксированная, нефиксированная цель).

3.1. Метод решения обратной задачи для модели прогноза с суммированием приращений факторов

В системе «Ситуация» для получения прогнозов развития ситуации используется модель получения прогноза с суммированием приращений значений факторов на каждом шаге получения прогноза [7].

Методы решения обратной задачи для этой модели прогноза разработаны в работе [11, 12], в которой рассмотрены методы решения обратной задачи для фиксированной (цель определена в виде вектора целевых значений факторов P_{out}^x) и нефиксированной цели (определено только направление к цели в виде вектора направлений ОДФ).

Метод решения обратной задачи для нефиксированной цели. При решении обратной задачи для нефиксированной цели учитывается свойство линейности динамической системы, позволяющей свести задачу нахождения управляющих воздействий к задаче максимизации целевой функции при заданных ограничениях [11]:

$$\sum_{k=1}^p \left(\sum_{i=1}^m r_i w_{ik} \right) u_k \Rightarrow \max,$$

$$-1 \leq u_k \leq 1,$$

$$\sum_{k=1}^p u_k \leq Q,$$

где r_i — компонента вектора ОДФ, w_{ik} — элемент матрицы транзитивного замыкания, u_k — компонента вектора управляющих воздействий; Q — ограничения на число ненулевых факторов в векторе управлений.



Эта задача решается методами линейного программирования, которые дают решение для фиксированного набора управляющих факторов — заданной стратегии управления $U_j \in U^g$ [11]. Однако выбор подмножества управляющих факторов $F_{in} \subseteq F$, включенных в стратегию достижения цели и определяемых ограничением на число ненулевых факторов в векторе управлений Q , осуществляется субъективно путем перебора или с учетом структурных характеристик факторов.

Метод решения обратной задачи для фиксированной цели. Фиксированная цель считается достигнутой, если установившиеся значения факторов в прогнозе равны значениям факторов целевого вектора. Установившиеся значения факторов в прогнозе ($Y_{уст}$) определяются с помощью матрицы транзитивного замыкания по соотношению:

$$Y_{уст} = CW^*X(0) + CW^*BU, \quad (1)$$

где C и B — матрицы, ненулевые элементы которых выделяют, соответственно, целевые и управляющие факторы в исходной матрице смежности W , W^* — матрица транзитивного замыкания матрицы W , $X(0)$ — начальное состояние всех факторов, U — вектор управляющих воздействий.

Задача заключается в нахождении вектора управления U при условии, что установившиеся значения факторов в прогнозе $Y_{уст}$ равны целевым значениям факторов G , т. е. $Y_{уст} = G$. Система линейных уравнений (1) представляется в виде

$$CW^*BU = G - CW^*X(0)$$

и решается относительно вектора U .

В работе [11] вектор U предлагается искать методом наименьших квадратов [21].

В этом случае вектор управляющих воздействий определится из соотношения:

$$U^* = (CW^*B)^+(G - CW^*X(0)) + E_N - (CW^*B)^+CWB)h,$$

где $(CW^*B)^+$ — псевдообратная матрица, h — произвольный вектор размера p .

В случае, когда число управляющих факторов p больше числа целевых факторов m ($p > m$), система уравнений имеет бесконечное множество, каждое из которых приводит к достижению цели. Из множества этих решений выбирается решение нормального вида

$$U^* = (CW^*B)^+(G - CW^*X(0)),$$

т. е. решение, обладающее минимальной нормой среди всех решений.

Недостатки такого метода: компоненты вектора решения могут выходить за пределы ограничений

$[-1, 1]$, т. е. цели нельзя достигнуть при заданных ограничениях на ресурсы; решения, полученные этим способом, не могут быть интерпретированы в рамках предметной области анализируемой модели и, следовательно, не реализуемы.

3.2. Метод решения обратной задачи для модели прогноза без суммирования приращений факторов

В системах «Компас» [6] и «Канва» [4] прогноз развития ситуации получается с помощью модели прогноза без суммирования приращений прогнозных значений факторов [2]. Решение обратной задачи в этом случае основывается на методах решения нечетких реляционных уравнений, разработанных в работах [22–26].

Описаны [24–26] алгоритмы решения обратных задач для случая, когда для вычисления значений вектора G используется композиция *максимум — умножение (max-product)*, обозначаемая далее символом « \circ ». Они позволяют получить множество решений обратной задачи $\Omega = \{U_{max}, U_{min}\}$ — одно максимальное U_{max} и множество минимальных решений $U_{min} = \{U_1, U_2, \dots, U_q\}$, где U_{max}, U_1, \dots, U_q — векторы значений факторов ситуации.

При решении обратной задачи считается заданными матрица транзитивного замыкания W^* и целевой вектор требуемых приращений значений признаков ситуации $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$. Задача заключается в нахождении множества векторов входных воздействий $\Omega = \{U\}$ таких, что для всех $U \in \Omega$ выполняется равенство $U \circ W^* = G$. Решения обратной задачи находятся путем решения матричного уравнения $U \circ W^* = G$ относительно вектора U .

Для решения обратной задачи для получения прогноза развития ситуации без суммирования приращений вводятся следующие матричные операции [22, 23].

- Результатом матричной операции $\hat{\alpha}$ над квадратной матрицей $A_{n \times n}$ и n -мерным вектором-столбцом B_n является матрица $C = A \hat{\alpha} B$, где элемент матрицы $c_{ij} = a_{ij} \alpha b_j$ определен следующим образом:

$$a_{ij} \alpha b_j = \begin{cases} 1, & \text{если } b_j \geq a_{ij}; \\ b_j / a_{ij} & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

- Операция \min над квадратной матрицей C порядка n : $\min(C)$. Вектор-столбец $D = \min(C)$, i -й элемент которого равен минимальному элементу в i -й строке матрицы C , т. е. $d_i = \min_j c_{ij}$.

- Результатом матричной операции $\hat{\beta}$ над квадратной матрицей $A_{n \times n}$ и n -мерным вектором B_n является матрица C , элемент которой $c_{ij} = a_{ij} \beta b_j$, где β — операция для произвольных чисел a_{ij}, b_j , определяется следующим образом:

$$a_{ij} \beta b_j = \begin{cases} 0, & \text{если } b_j > a_{ij} \text{ или } a_{ij} = b_j = 0; \\ b_j / a_{ij} & \text{а противном случае.} \end{cases}$$

- Результатом матричной операции $\hat{\gamma}$ над квадратной матрицей $A_{n \times n}$ и n -мерным вектором B_n является матрица C , элементы которой $c_{ij} = a_{ij} \gamma b_j$, где γ — операция для произвольных чисел a_{ij} и b_j , определяется следующим образом:

$$a_{ij} \gamma b_j = \begin{cases} 0, & \text{если } a_{ij} \neq b_j; \\ a, & \text{если } a_{ij} = b_j. \end{cases}$$

- Определим $\Phi(A)$ как множество матриц $\Phi(A) = \{\phi_i(A)\}$, полученных по следующему правилу:
 - матрица A представляется как вектор столбцов $A = [\phi(a_1), \phi(a_2), \dots, \phi(a_n)]$, где $\phi(a_i)$ — вектор столбец матрицы A , $\phi(a_i) = (\phi_{i1}, \phi_{i2}, \dots, \phi_{in})^T$, $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ — элементы столбца a_i ;

— матрицы $\phi_i(A)$ из множества матриц $\Phi(A)$ формируются таким образом, чтобы в каждом столбце матрицы A содержался только один ненулевой элемент, а все остальные элементы обнуляются; т. е. матрица $\phi_i(A) \in \Phi(A)$ содержит уникальное сочетание ненулевых элементов столбцов исходной матрицы A , которое получается перебором всех возможных сочетаний ненулевых элементов столбцов матрицы A .

В терминах введенных операций решение обратной задачи для качественных и нечетких когнитивных карт имеет вид:

$$\text{— вектор } U_{\max} = \min(W^* \hat{\alpha} G^T);$$

— все минимальные решения

$$U_{\min} = \{ \max_n [\Phi((W^* \hat{\beta} G^T) \gamma (\min(W^* \hat{\alpha} G^T)^T))] \} = \\ = \{ \max_n [\Phi((W^* \hat{\beta} G^T) \gamma (U_{\max})^T)] \}.$$

Поскольку при решении обратной задачи используются двойные положительно определенные матрицы транзитивного замыкания W^* и вектор цели G [3], то решения U_{\max} и U_{\min} представляются в виде двойных векторов, в которых компонента с индексом $2j$ характеризуют положительное u_{2j}^+ , а с индексом $2j-1$ — отрицательное u_{2j-1}^- значения

приращения управляющего фактора f_j . В этом случае управляющее воздействие, подаваемое на фактор f_j , характеризуется приращением u_j и консонансом c_j .

Приращение управляющего фактора

$$u_j = \text{sign}(u_{2j}^+ - u_{2j}^-) \max(u_{2j}^+, u_{2j}^-),$$

а когнитивный консонанс

$$c_j = |u_{2j} - u_{2j-1}| / (u_{2j} + u_{2j-1}).$$

Данный алгоритм формирует множество решений и требует дополнительной аналитической работы для выбора лучшего решения — стратегии управления ситуацией. Переборный механизм получения множества матриц $\Phi(A)$ делает этот алгоритм решения обратной задачи для нечетких и качественных когнитивных карт NP-полным. Решение переборных задач этого класса сложности требует больших временных затрат и трудно реализуется в компьютерных системах.

Это обстоятельство определяет особенности практической реализации метода решения обратной задачи в системах анализа когнитивных карт «Компас» [6] и «Канва» [4].

В системе «Компас» для определения приращений значений факторов используются оценочные шкалы приращений [2]. При решении обратной задачи пользователь определяет фиксированную цель управления, т. е. определяет множество целевых факторов и значений их приращений в виде вектора $P_{out}^x = (p_1, \dots, p_q)$, $p_i \in [-1, 1]$.

Стратегия управления в этой системе определяется пользователем вначале абстрактно, в виде множества управляющих факторов F_{in} , выбранных на основе личных предпочтений. Алгоритм решения обратной задачи, рассмотренный ранее, позволяет определить значения $U = (u_1, \dots, u_m)$ ранее выбранных управляющих факторов F_{in} . Поскольку

цель P_{out}^x , сформулированная пользователем, может содержать противоречия, в системе «Компас» проверяется пригодность решения обратной задачи путем получения прогноза развития ситуации $P_{out}^x = (p_1, c_1; \dots; p_q, c_q)$ при управляющих воздействиях $U = (u_1, \dots, u_m)$, полученных из решения обратной задачи.

Для выявления противоречий в векторе цели полученный прогноз развития ситуации анализируется с помощью подсистемы объяснения прогноза [27] для факторов с невысокими значениями консонанса.

Недостаток метода решения обратной задачи, примененного в системе «Компас», заключается в



том, что пользователь определяет множество управляющих факторов F_{in} перебором, ориентируясь на личные предпочтения, а не на структурные характеристики факторов.

Этого недостатка лишен подход к решению обратной задачи, реализованный в системе «Канва». Здесь для поддержки работы пользователя по формированию вектора управляющих воздействий учитываются структурные характеристики факторов, сила их влияния на целевые факторы. В состав системы «Канва» входит советующая система, в основу работы которой положены покомпонентное рассмотрение вектора цели и выбор управляющего фактора с учетом силы его влияния на целевой фактор. Пользователь задает фиксированную цель $G = (g_1, \dots, g_n)$ и конструирует стратегию управления ситуацией для каждой компоненты вектора цели $g_i \in G$ в диалоге с советующей системой.

Для выбранной компоненты вектора цели g_i алгоритм решения обратной задачи определяет два множества управляющих факторов и их значений соответственно с положительными и отрицательными приращениями факторов: U_i^+ и U_i^- .

Элементы множеств U_i^+ и U_i^- упорядочены по силе влияния на выбранный целевой фактор и рассматриваются как «советы» пользователю системы по выбору управляющих воздействий для достижения значения целевого значения $g_i \in G$ фактора f_i .

Значения управляющих факторов из множеств U_i^+ и U_i^- представляются в интерфейсах системы «Канва» в «абсолютных» лингвистических шкалах [2], т. е. на понятном пользователю языке. На основе личных предпочтений пользователь выбирает управляющий фактор из множества U_i^+ или U_i^- , добавляя его в вектор управляющих воздействий U_v . Выбранный управляющий фактор со значением u_k^i устанавливает целевое значение g_i фактора f_i целевого вектора G . Далее определяется управляющее воздействие для следующей компоненты целевого вектора $g_k \in G$. Последовательный выбор управляющих воздействий для всех компонент вектора цели позволяет в диалоговом режиме сформировать вектор управляющих воздействий U_v достижения векторной цели G .

При конструировании стратегии управления ситуацией советующая система может давать противоречивые советы, вызванные противоречиями в целевом векторе. Для обнаружения противоречий в цели значения консонансов и степень дости-

жения целевых значений факторов визуализируется в виде гистограммы.

Процесс поиска решения в системе «Канва» представляет собой итерационный процесс, заключающийся в последовательном определении компонент вектора решения U_v . Такой интерактивный режим поиска решений позволяет субъекту сформировать стратегию управления ситуацией.

Несомненным достоинством применения методов решения обратных задач в поддержке разработки стратегии управления ситуацией служит возможность получить вектор управляющих факторов и их значений. К недостаткам следует отнести получение множества решений (неединственность решения), а также большую вычислительную сложность решения обратной задачи. Поэтому при разработке стратегии управления ситуацией в системах анализа когнитивных карт актуальна задача выбора лучшей стратегии, которая представляет собой задачу многокритериального оценивания и решается экспертом субъективно.

Поддержка принятия решений по выбору лучшей стратегии управления ситуацией в системах на основе когнитивных карт осуществляется методом сценарного анализа.

4. СЦЕНАРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГНОЗОВ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИИ

Сценарный анализ ситуаций основан на моделировании развития ситуации при различных управляющих воздействиях (стратегиях) и последующим сравнительном анализе прогнозов развития ситуации, их количественной или качественной оценке, позволяющей выбрать лучшую стратегию управления ситуацией.

Формально сценарий в рассматриваемых системах определяется как пара $(U_v, X_v(n))$, где U_v — вектор управляющих воздействий, $X_v(n)$ — установленные значения вектора прогноза развития ситуации, порожденные вектором управляющих воздействий U_v , v — номер сценария.

Сценарный анализ заключается в поэлементном сравнительном анализе прогнозных значений факторов $X_v(n)$ в различных сценариях $\forall v$ в целях выявления тенденции в изменении состояния ситуаций при различных входных воздействиях U_v и выбора лучшей стратегии. Лучшая стратегия выбирается путем визуального сравнения установленных значений целевых факторов в различных сценариях. Для удобства визуального сравнения целевые значения факторов в разных сценариях представляются в виде гистограмм.

В системе «Ситуация» [7] сценарный анализ ситуации заключается в сравнительном анализе прогнозов развития ситуации для двух случаев:

— сценарий развития ситуации без управления получается в случаях, когда в качестве управляющих воздействий рассматриваются существующие в момент наблюдения ситуации тенденции $(U_T, X_v(n))$, U_T — тенденции развития ситуации в начальный момент времени;

— сценарий развития ситуации с управлением направлен на корректировку нежелательного развития ситуации под влиянием тенденций U_T ; развитие ситуации корректируется подачей управляющих воздействий U_v , т. е. $((U_T + U_v), X_v(n))$, U_v — вектор управления, выработанный аналитиком (пользователем).

В системах «Космос» [3], «Канва» [4] и ИГЛА [5] реализована возможность сценарного анализа так называемого импульсного прогноза развития ситуацией.

Для получения так называемого импульсного прогноза развития ситуации определяется его составная матрица, включающая в себя векторы прогнозов развития ситуации на последовательных шагах моделирования: $X_v = |X_v(0)^T, \dots, X_v(n)^T|$, где $X_v(n)^T$ — транспонированный вектор прогноза, полученный на последовательных шагах моделирования $t = 0, \dots, n$. При этом i -я строка матрицы импульсного прогноза X_v^t отражает динамику изменения i -го фактора ситуации, и сценарий развития ситуации с импульсным прогнозом определяется парой (U_v, X_v^t) .

Сценарный анализ импульсных прогнозов развития ситуации проводится методом визуализации динамики изменения значений факторов в виде линейной диаграммы, на которой представляется пошаговая динамика изменения одного фактора в разных сценариях.

Для поддержки принятия решений по выбору лучших сценариев в системе моделирования «Канва» реализована подсистема парного сравнения сценариев. Аналитик выбирает один из сценариев в качестве базового, установившиеся прогнозные значения всех факторов базового сценария и некоторого рассматриваемого сценария для сравнительного анализа представляются в «абсолютных» лингвистических значениях в таблице сравнения.

Достоинством сценарного анализа, реализованного в рассмотренных системах и основанного на визуализации и сравнении прогнозных значений факторов в разных сценариях, можно считать его простоту и наглядность. Однако трудности выбора

лучшей стратегии управления возникают при ее выборе по нескольким критериям. Многокритериальное оценивание сценариев развития ситуаций, полученных в системах анализа когнитивных карт, рассматривается в работе [28]. В работе [29] описан диалоговый комплекс иерархического оценивания сценариев МИОС и технология оценивания сценариев по многим критериям.

В работе [30] исследованы методы построения иерархии оценивания, для любых когнитивных карт ситуации, обеспечивающие максимальное пересечение множества факторов когнитивной карты ситуации и листовых факторов (критериев оценивания) иерархии оценивания. Кроме этого, исследованы методы согласования шкал факторов когнитивной модели и листовых критериев оценивания, обеспечивающие корректность многокритериальных оценок сценариев развития ситуации. Разработанные методы позволяют передавать прогнозные значения разных сценариев в модель иерархического оценивания, что дает возможность диалогового режима оценивания сценариев.

Интересные теоретические разработки сценарного анализа представлены в книге [31], в которой рассмотрена методология формирования сценариев развития ситуаций на основе выделения и формализации их основных элементов, предложены операции в сценарных пространствах, позволяющие синтезировать сценарии с заданными свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К сожалению, рассмотренные методы поддержки принятия решений по выбору стратегии управления динамической плохо определенной ситуацией не позволяют однозначно определить стратегию достижения поставленной цели. Для поддержки принятия решений по выбору стратегии достижения цели широко используются структурные характеристики субъективных когнитивных карт, когнитивная графика, трудно формализуемые понятия типа «хороших» или «плохих» фигур.

Поддержка принятия решений по разработке стратегии управления ситуацией на основе решения обратной задачи предлагает множество точных решений, но при этом выбор того или иного решения остается задачей, субъективно решаемой экспертом.

Решения, предлагаемые системами поддержки принятия решений, в условиях достаточно грубой субъективной модели (когнитивной карты) можно считать лишь ориентирами, стимулами, активизирующими интеллектуальную деятельность экс-



перта. Поэтому окончательное решение по управлению ситуацией, принимаемое экспертом, как правило, является более или менее удачной субъективной интерпретацией решений, предложенных рассмотренными методами поддержки принятия решений.

Несмотря на высокий уровень субъективизма решений, принимаемых с помощью систем анализа ситуаций на основе когнитивных карт, эти системы могут быть полезны для концептуального анализа и моделирования сложных и плохо определенных политических, экономических или социальных ситуаций, для разработки вариантов стратегий управления и механизмов их реализации страны, региона, предприятия, фирмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Axelrod R.* The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites. — Princeton: University Press, 1976.
2. *Кулинич А.А.* Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления. — 2010. — № 3. — С. 2—16.
3. *Силов В.Б.* Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. — М.: ИНПРО-РЕС, 1995. — 228 с.
4. *Кулинич А.А.* Когнитивная система поддержки принятия решений «Канва» // Программные продукты и системы. — 2002. — № 3. — С. 25—28.
5. *Коростелёв Д.А., Лагерева Д.Г., Подвесовский А.Г.* Система поддержки принятия решений на основе нечетких когнитивных моделей «ИГЛА» // Одиннадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием / 28 сент. — 3 окт. 2008 г, г. Дубна. — М., 2008. — Т. 3. — С. 329—337.
6. *Кулинич А.А., Максимов В.И.* Система концептуального моделирования социально-политических ситуаций «Компас» / Сб. докл. «Современные технологии управления». Науч.-практ. семинар «Современные технологии управления для администрации городов и регионов». — М., 1998. — С. 115—123.
7. *Максимов В.И., Григорян А.К., Корноушенко Е.К.* Программный комплекс «Ситуация» для моделирования и решения слабоформализованных проблем // Междунар. конф. по проблемам управления. Москва, 29 июня — 2 июля 1999 г. / ИПУ РАН. — М., 1999. — С. 58—65.
8. *Кузнецов О.П., Кулинич А.А., Марковский А.В.* Анализ влияния при управлении слабоструктурированными ситуациями на основе когнитивных карт // Человеческий фактор в управлении / Под ред. Н.А. Абрамовой, К.С. Гинсберга, Д.А. Новикова. — М.: КомКнига, 2006. — С. 313—344.
9. *Когнитивный подход в управлении* // З.К. Авдеева, С.В. Коврига, Д.И. Макаренко, В.И. Максимов / Проблемы управления. — 2007. — № 3. — С. 2—8.
10. *Кузнецов О.П.* Интеллектуализация поддержки управляющих решений и создание интеллектуальных систем // Там же. — 2009. — № 3.1. — С. 64—72.
11. *Максимов В.И.* Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций // Там же. — 2005. — № 3. — С. 30—38.
12. *Корноушенко Е.К., Максимов В.И.* Управление ситуацией с использованием структурных свойств ее когнитивной карты // Тр. Ин-та пробл. упр. им. В.А. Трапезникова РАН. — М.: 2000. — Т. XI. — С. 85—90.
13. *Brightman J.* An introduction to Decision Explorer. Banxia Software Ltd. 2002. — URL: <http://www.banxia.com/pdf/de/DEIntro1.pdf> (дата обращения 01.06.2011).
14. *Ackermann F., Eden C., Cropper S.* Getting Started with Cognitive Mapping. Decision Explorer. Banxia Software Ltd. 2004. — URL: <http://www.banxia.com/pdf/de/GettingStarted-With-CogMapping.pdf> (дата обращения 01.06.2011).
15. *De Nooy W., Mrvar A., Batagelj V.* Exploratory Social Network Analysis With Pajek. Structural Analysis in the Social Sciences 27. — Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
16. *Batagelj V., Mrvar A.* Pajek. Program for Analysis and Visualization of Large Networks Reference Manual. List of commands with short explanation. Version 1.26. Ljubljana, January 7, 2010. — URL: <http://www.fcmapppers.net/joomla/> (дата обращения 01.06.2011).
17. *Марковский А.В.* Анализ структуры знаковых ориентированных графов // Теория и системы управления. — 1997. — № 5.
18. *Горелова Г.В., Захарова Е.Н., Радченко С.Н.* Исследование слабоструктурированных проблем социально-экономических систем: когнитивный подход. — Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2006. — 332 с.
19. *Kelly G.A.* The Psychology of Personal Constructs. — New York: Norton, 1955.
20. *Atkin R., Casti J.* Polyhedral Dynamics and the Geometry of Systems, RR-77-6. — International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, March, 1977.
21. *Лоусон Ч., Хенсон Р.* Численное решение задач методом наименьших квадратов. — М.: Наука, 1986. — 232 с.
22. *Pappis C.P., Sugeno M.* Fuzzy relational equations and the Inverse Problem // Fuzzy Sets and Systems. — 1985. — N 15. — P. 79—90.
23. *Pedrycz W.* Fuzzy models and relational equations // Math. Modeling. — 1987. — N 9. — P. 427—434.
24. *Pedrycz W.* Algorithms for solving fuzzy relational equations in a probabilistic setting // Ibid. — 1990. — N 38. — P. 313—327.
25. *Pappis C.P., Adamopoulos G.I.* A computer algorithm for the solution of the inverse problem of fuzzy systems // Ibid. — 1991. — N 39. — P. 279—290.
26. *Pappis C.P., Adamopoulos G.I.* A software routine to solve the generalized inverse problem of fuzzy relational equations // Ibid. — 1992. — N 47. — P. 319—322.
27. *Кулинич А.А.* Верификация когнитивных карт на основе объяснения прогнозов / Управление большими системами. — 2010. — Вып. 30.1. — С. 453—469.
28. *Давыдов С.В., Максимов В.И.* Многокритериальное иерархическое оценивание ситуаций при когнитивном моделировании // Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций (CASC'2001) / Матер. 1-й Междунар. конф. — 2001. — Т. 1.
29. *Авдеева З.К., Максимов В.И., Рабинович В.М.* Интегрированная система «КУРС» для когнитивного управления развитием ситуаций // Тр. ИПУ РАН. — 2001. — Т. XIV. — С. 89—114.
30. *Поддержка принятия решений в слабоструктурированных предметных областях. Анализ ситуаций и оценка альтернатив* / А.Н. Аверкин, О.П. Кузнецов, А.А. Кулинич, Н.В. Титова // Теория систем и управления. — 2006. — Вып. 3. — С. 139—149.
31. *Методы формирования сценариев развития социально-экономических систем* / В.В. Кульба, Д.А. Кононов, С.А. Косяченко, А.Н. Шубин. — М.: СИНТЕГ, 2004. — 296 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Кульбой.

Кулинич Александр Алексеевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎(495) 334-76-39, ✉kulinich@ipu.ru.