

## УПРАВЛЕНИЕ СЛАБО СТРУКТУРИРОВАННЫМИ ПЛОХО ФОРМАЛИЗУЕМЫМИ СОЦИОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Ажмухамедов И.М.<sup>1</sup>

(ФБГОУ ВПО Астраханский государственный  
технический университет, Астрахань)

*Сформулированы принципы и предложены методы построения нечетких когнитивных моделей плохо формализуемых и слабо структурированных СТС. Разработана методика синтеза совокупности нечетких управляющих решений с минимальной «стоимостью».*

Ключевые слова: плохо формализуемые и слабо структурированные социотехнические системы, нечеткое когнитивное моделирование, веса Фишберна, индекс схожести, синтез управляющих решений.

### **1. Введение**

По мере ускорения научно-технического прогресса разработка методов анализа и управления различными системами становится все более актуальной задачей. При этом значительная часть систем являются социотехническими и кроме естественной (природной) и искусственной (технической) составляющей, в качестве важнейшего элемента содержат в себе человека, который часто выступает не только в качестве лица, принимающего решение (ЛПР), но и сам представляет

---

<sup>1</sup> *ИскандарМаратович Ажмухамедов, кандидат технических наук, доцент (aim\_agtu@mail.ru).*

собой объект управления. Наличие антропогенного фактора превращает описание СТС в плохо формализуемую задачу [11].

Рассмотрению таких проблем посвящено достаточно большое количество работ, в которых предлагаются различные подходы к их решению. Создание Л.Заде математического аппарата нечетких множеств, развитие в работах ученых института проблем управления РАН И.В.Прангишвили, О.П.Кузнецова, В.И.Максимова, Е.К.Корноушенко, А.А.Кулинича и других представителей этой отечественной научной школы, теории когнитивного моделирования, позволило решить достаточно широкий класс задач исследования плохо формализуемых (ПФ) и слабоструктурированных (СС) систем. В работах этих ученых приведены разнообразные методы представления плохо формализуемых знаний, позволяющие отражать как фактуальные знания о структуре, свойствах объектов предметной области, так и операционные знания о логических, причинно-следственных, ассоциативных зависимостях.

Изучению социотехнических систем (СТС) также посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых, например [9, 12-15]. Однако, несмотря на несомненные успехи в рамках данного направления, существует достаточно много СТС, анализ и управление которыми не соответствует современным требованиям.

Это связано с тем, что такие системы функционируют в условиях неопределенности, характеризуемой недостатком информации, необходимой для формализации протекающих в них процессов. Неопределенность обусловлена, с одной стороны, недостаточностью или полным отсутствием методов и средств измерения координат объекта управления в фазовом пространстве  $a$ , с другой стороны, с незнанием закономерностей протекания процессов ввиду их сложности и мало изученности. Указанные факторы приводят к невозможности аналитического описания и построения формальных моделей, учитывающих специфику СТС, что, в свою очередь, значительно снижает эффективность управления подобными системами, а часто делает его в принципе невозможным.

При этом резко возрастает роль ЛПР, который в случае, когда традиционные методы контроля, математического описания или управления не дают желаемых результатов, справляется с задачей с определенной степенью эффективности, опираясь на представления и знания экспертов в данной области и собственные опыт и интуицию [10].

Таким образом, существенный вклад в принимаемое ЛПР решение вносит субъективный фактор. Кроме того, в социотехнической системе он оказывает влияние не только на принятие, но и на результат воздействия управленческих решений, поскольку значительная часть этих воздействий направлена также на человека, который является неотъемлемой частью СТС.

В связи с этим возникает необходимость учета при формализации процессов, происходящих в СТС, особенностей, связанных с поведением человека, как важнейшего элемента социотехнической системы. Поэтому, при построении формальной модели целесообразно применение методов, основанных на воспроизведении интеллектуальной деятельности ЛПР. Они позволяют снизить степень субъективности принимаемых решений и, как следствие, повышают эффективность управления системой.

Наиболее удобным математическим аппаратом для описания и исследования социотехнических систем, позволяющим реализовать указанные требования и объединить при моделировании аналитические, статистические, лингвистические описания различных подсистем СТС, является нечеткое когнитивное моделирование (НКМ) - одно из направлений современной теории поддержки принятия решений при управлении ПФ и СС системами. Неоспоримыми достоинствами НКМ по сравнению с другими методами являются возможность формализации численно неизмеримых факторов, использования неполной, нечеткой и даже противоречивой информации [7].

Несмотря на это, методы нечеткого когнитивного моделирования используются для анализа и управления социотехническими системами недостаточно эффективно.

Сложившееся положение объясняется разнообразием предметных областей, в которых встречаются социотехнические системы, их слабой структурируемостью и плохой формализуемостью, которые затрудняют моделирование таких систем и ограничивает возможности практического управления ими.

Таким образом, с учетом особенностей ПФ и СС СТС, возникает необходимость расширения арсенала классической теории систем за счет применения методов нечеткого когнитивного моделирования, неформального оценивания и поиска рациональных решений с целью разработки унифицированного подхода к моделированию процессов, протекающих в различных СТС. Это даст возможность расширить класс задач, для которых возможно построение формальных моделей, что, в свою очередь, приведет к повышению эффективности управления социотехническими системами.

Для этого, прежде всего, необходимо:

1. Проанализировать особенности социотехнических систем.
2. Сформулировать принципы построения нечетких когнитивных моделей для анализа и управления плохо формализуемыми и слабо структурированными СТС.
3. Разработать методы моделирования, воплощающие эти принципы.

## ***2. Применение НКМ для моделирования ПФ и СС СТС.***

Социотехническая система – это объект управления, основными элементами которого являются человек (его знания, умения, настрой, ценностные установки, отношение к выполняемым функциям), техническая подсистема (устройства, инструменты и технологии, преобразующие вход в выход), окружающая среда.

Под ПФ социотехнической системой будем понимать объект, функционирующий в условиях существенной неопределённости, источником которой служат природная,

техническая и антропогенная подсистемы СТС. Неопределенность связана со слабой структурированностью системы, с высокой сложностью происходящих в системе процессов, их недостаточной изученностью, неточностью и/или невозможностью количественного измерения значений входных и выходных параметров подсистем, высоким взаимным влиянием, приводящим к синергетическому эффекту, и обуславливающим возникновение свойства эмерджентности (у системы появляются новые свойства, отсутствовавшие у отдельно взятых элементов и подсистем).

Наличие антропогенного фактора приводит к тому, что многие характеристики СТС принципиально перестают быть строго определенными: связи между подсистемами описываются нечетко, остается открытым вопрос о количестве и составе входных данных, поскольку неизвестно, что может повлиять на поведение человека как элемента системы и т.д. Уровень (сила) некоторых управляющих воздействий при этом также определяется нечетко. Труднопредсказуем эффект влияния управляющих воздействий на антропогенные элементы системы. Поскольку цель системы при целеполагании часто формулируется лицом принимающим решение (ЛПР) или определяется системой более высокого уровня качественно (нечетко), это приводит к ее «размытости», появлению «диапазона допустимости» при достижении цели. Кроме того, процессы в социотехнических системах обычно подвержены существенному влиянию случайных факторов. Значительная часть реальных СТС являются сильно распределенными системами, не имеющими четких границ, что влечет за собой их слабую структурированность.

При этом, если для «снятия» некоторых неопределенностей при исследовании природной и технической подсистем СТС применимы классические методы математической статистики, то для антропогенной составляющей они не пригодны, поскольку неопределенность в данном случае носит субъективный характер. В отличие от объективной вероятности, которая отражает относительную частоту появления какого-либо события в общем объеме наблюдений,

под субъективной вероятностью понимается мера уверенности некоторого человека или группы людей (экспертов) в том, что данное событие в действительности будет иметь место.

Анализ современных работ в области системного анализа показал, что как мера уверенности человека в возможности наступления какого-либо события, субъективная вероятность формально наиболее часто представляется в виде вероятностной меры на множестве событий, полученной экспертным путем. При этом субъективная вероятность не просто представляет меру уверенности на множестве событий, а увязывается с системой предпочтений ЛПР, и в конечном итоге с функцией полезности, отражающей его предпочтения на множестве альтернатив [10].

Таким образом, основными особенностями, затрудняющими моделирование и управление плохо формализуемыми процессами в СТС и ограничивающими возможности применения традиционных методов поиска оптимального (или даже приемлемого) управленческого решения, являются нечеткость структуры системы в целом и/или отдельных ее подсистем; нечеткие связи между различными подсистемами и отдельными элементами; «размытость» значений элементов системы и целей ее функционирования; сложность оценки степени достижения нечетко определенного целевого состояния и отсутствие количественной меры отклонения текущего состояния системы от требуемого.

Традиционные теоретические методы управления предполагают поиск оптимального решения из фиксированного набора альтернатив для достижения четко поставленной цели. Вопросы идентификации проблем, формирования целей и множества альтернатив их достижения зачастую остаются в стороне.

В реальных управленческих ситуациях очень часто возникает задача, которая состоит не в том, чтобы сделать выбор между альтернативными решениями, а в том, чтобы проанализировать ситуацию для выявления реальных проблем и причин их появления. Понимание проблемы – обязательное

условие нахождения приемлемого решения [1]. Предварительный анализ проблемы и ее структуризация являются первым, наиболее сложным и трудно формализуемым этапом принятия решений [5].

При этом ЛПР приходится манипулировать качественной информацией в виде гипотез (предположений), интуитивных понятий и смысловых образов. Многочисленные исследования процессов принятия решений подтверждают, что ему несвойственно мыслить и принимать решения только в количественных характеристиках. Он мыслит, прежде всего, качественно, и для него поиск решения – это, поиск, в первую очередь, замысла решения, где количественные оценки играют вспомогательную роль [4].

При этом неудовлетворенность текущим состоянием системы, как правило, осознается ЛПР, но его представления о причинах и возможных способах изменения ситуации размыты, нечетки и противоречивы. Они зависят от его убеждений, особенностей восприятия, ценностных и практических установок, которыми он руководствуется в своей деятельности [10]. Поэтому структуры знания в мышлении субъекта управления оказываются важнейшими элементами ситуации, неустранимыми из модели принятия решений и формализация нечетких представлений – одна из задач, которую необходимо решать при разработке моделей и методов принятия решений в СТС.

Таким образом, подготовку и принятие решений в задачах управления СТС следует рассматривать как сложный интеллектуальный процесс разрешения проблем, несводимый исключительно к рациональному выбору. Для поддержки этого процесса, особенно на ранних его этапах, представляется целесообразным использовать когнитивный подход к моделированию и управлению, поскольку «он направлен на разработку формальных моделей и методов, поддерживающих интеллектуальный процесс решения проблем благодаря учету в этих моделях и методах когнитивных возможностей человека (восприятие, представление, познание, понимание, объяснение) при решении им управленческих задач» [1].

При этом к классу плохо формализуемых задач моделирования и управления, при решении которых использование НКМ представляется продуктивным, можно отнести задачи, характеризующиеся:

- наличием неопределенностей, носящих как объективный, так и субъективный характер;
- присутствием в них как количественных, так и качественных (вербальных) оценок параметров;
- отсутствием аналитического описания большинства взаимосвязей между параметрами задачи.

### **3. Концепция моделирования плохо формализуемых процессов в СТС**

Анализ особенностей плохо формализуемых процессов в СТС позволил сформулировать семь основных принципов, которые могут быть положены в основу концепции моделирования и управления ПФ и СС СТС, и определить пути их реализации:

1. *Получение и формализация качественной информации.* Концепция социотехнических систем в противоположность теориям технологического детерминизма, основывается на идее взаимодействия человека и машины. Поэтому знания человека играют при моделировании и управлении такими системами решающее значение. Большая часть информации, получаемой от эксперта, носит «качественный» характер. При этом основной формой представления знаний о координатах объекта управления в фазовом пространстве и/или закономерностях его функционирования является вербальная форма. Поэтому для реализации первого принципа предлагается использовать механизм формализации качественной информации на основе математического аппарата нечетких множеств.

2. *Хранение и аккумуляция знаний в форме каузальных когнитивных карт.*

ПФ процессы функционирования и развития СС систем включают в себя различные события и тенденции, определяемые множеством факторов. При этом каждый из

факторов влияет на некоторое число других факторов, что приводит к образованию сети причинных отношений между ними. Поэтому для хранения и аккумуляции знаний о подобных процессах предлагается использовать каузальные когнитивные карты, как наиболее удобный способ описания ПФ и СС систем, дающий возможность наглядно представить анализируемую систему и легко интерпретировать причинно-следственные связи между концептами.

3. *Совместное использование количественной и качественной информации.* Знания эксперта являются обобщением его теоретических представлений (систематические знания) и опыта (эвристические знания). При этом обычно имеется не только качественная информация, являющаяся результатом интеллектуальной деятельности человека, но и некоторые количественные описания в форме традиционных математических соотношений. Поэтому связь между факторами в каузальной когнитивной карте при ее раскрытии до соответствующего уравнения, часто содержит как количественные (измеряемые), так и качественные (не измеряемые) переменные. Возникает целесообразность разработки механизма применения обоих видов информации, их взаимного сочетания и дополнения. Для совместного использования качественной и количественной информации при моделировании в качестве такого механизма предлагается использовать методику, основанную на нормировании разнородных параметров с целью приведения их к единому интервалу (носителю), с последующим рассмотрением четкого (количественного) значения факторов как частного случая нечетких чисел, заданных на этом носителе.

4. *Унификация представления новых знаний для включения их в состав модели.* По мере накопления знаний о процессах, происходящих в исследуемой системе, становится возможным более детально раскрывать характер связей между факторами. Для этого связь между любыми двумя концептами предлагается также представлять в виде нечеткой когнитивной модели более низкого уровня. При этом на верхний уровень передается значение связи, выявленное в ходе анализа НКМ нижнего

уровня. Такой иерархический способ построения НКМ позволит упростить анализ систем высокой степени сложности.

5. *Метрическая мера адекватности нечеткой модели.* Эффективное управление социотехнической системой возможно только тогда, когда ее модель обладает свойством адекватности. Причинами несоответствия являются недостоверность первичных данных от датчиков или качественной информации от экспертов, а так же не стационарность процессов, ввиду чего часть знаний теряет свою актуальность. Необходима количественная мера оценки степени адекватности разработанной НКМ текущему состоянию системы. В качестве такой метрической характеристики степени схожести качественных оценок, полученных экспериментальным и теоретическим путем, предлагается ввести разницу индексов схожести (ИС) между нечеткими числами, соответствующими значениям лингвистических переменных. Степень различия между ИС при распознавании лингвистического значения, полученного экспериментальным путем, и ИС при распознавании лингвистического значения, полученного при расчетах с использованием НКМ, даёт возможность судить об уровне адекватности модели.

6. *Наличие нечетких связей между концептами.* Определение интенсивности влияния одних факторов на другие в виде числового значения в сложных социотехнических системах часто оказывается для эксперта затруднительным или даже невозможным. Поэтому предпочтительнее использовать ранговые методы, при реализации которых требуется лишь упорядочить критерии. Для реализации данного принципа предлагается использовать модифицированный метод нестроого ранжирования, который позволяет определить интенсивность связей в НКМ в виде обобщенных весов Фишберна [2].

7. *Синтез управляющих решений на основе НКМ.* Для выработки управляющих воздействий (УВ) необходимо на основе разработанной модели СТС решить две задачи: прямую (для получения ответа на вопрос о необходимости применения УВ) и обратную (для определения множества УВ). Решение

прямой задачи подразумевает последовательное прохождение всех уровней иерархии когнитивного функционального графа и нахождение сверток векторного критерия с целью определения качественной оценки состояния системы в текущий момент времени. Решение данной задачи опирается на принципы представления качественной информации, применение различных сверток векторного критерия, правила действия с нечеткими числами. Решение обратной задачи подразумевает нахождение таких управляющих воздействий на наиболее значимые элементы системы, которые выводят ее на необходимый целевой уровень функционирования. Решение данной задачи базируется на применении методов оптимизации, теории знаковых и нечетких графов, имитационном моделировании. При этом интенсивность управляющего воздействия в общем случае также может выражаться нечетким значением из терм-множества соответствующей лингвистической переменной.

#### **4. Реализация концепции**

Для реализации сформулированных принципов были разработаны соответствующие методы, которые, в свою очередь, легли в основу практического воплощения концепции в виде алгоритмического и программного обеспечения систем поддержки принятия решений при управлении СТС.

В соответствии с *принципом хранения и аккумуляции знаний в форме каузальных когнитивных карт* в качестве универсальной модели социотехнической системы (STS) предложен кортеж:

$$(1) \quad STS = \langle G, QL, S, R, \Omega \rangle ,$$

где  $G$  – ориентированный граф, имеющий одну корневую вершину и не содержащий горизонтальных ребер в пределах одного уровня иерархии;  $QL$  – набор качественных оценок уровней каждого фактора в иерархии (лингвистическая переменная);  $S$  – множество весов ребер графа  $G$ , отражающих степень влияния концептов на элементы следующего уровня иерархии;  $R$  – набор правил для вычисления значений концептов

на каждом из уровней иерархии  $G$ ;  $\Omega$  - индекс схожести, позволяющий распознавать лингвистические значения концептов. В свою очередь  $G$  также представляет собой кортеж:

$$(2) \quad G = \langle \{GF_i\}; \{GD_{ij}\} \rangle,$$

где  $\{GF_i\}$  – множество вершин графа (факторов или концептов в терминологии НКМ);  $\{GD_{ij}\}$  – множество дуг, соединяющих  $i$ -ю и  $j$ -ю вершины (множество причинно-следственных связей между концептами);  $GF_0 = K_0$  – корневая вершина, отвечающая цели функционирования системы в целом (целевой концепт).

При построении  $G$  на уровне  $N$  располагаются концепты, на которые могут оказывать влияние только факторы, расположенные на уровнях меньших  $N$ . Уровни иерархии целесообразно формировать на основе функциональной модели процесса. При этом процесс переработки входной информации в выходную последовательно производится отдельными подсистемами (концептами) общей системы. Каждый концепт « $m$ », находящийся на уровне « $n$ », получает на вход набор данных  $\{X_{nm}\}$  и перерабатывает его в выходное значение  $Y_{nm}$  согласно правилу  $R^{nm}$ :

$$(3) \quad Y_{nm} = R^{nm}(X_{nm})$$

Значения  $Y_{nm}$  в свою очередь являются входными данными для подсистем (концептов) более высокого уровня иерархии. Концепты, участвующие в иерархии, в большинстве случаев представляют собой численно не измеримые величины. Поскольку информация о состоянии данных концептов формулируется экспертом в вербальной форме, для *формализации качественной информации* вводится лингвистическая переменная «Уровень фактора»  $QL$  и определяется терм-множество ее значений, состоящее в общем случае из 9 элементов, принадлежащих отрицательной  $QL^-$  и положительной  $QL^+$  области значений:

$$(4) \quad QL = \{U(QL^-; 0; QL^+)\} = \{\text{Высокий отриц. (B)}; \text{Выше среднего отриц. (BC)}; \text{Средний отриц. (C)}; \text{Низкий отрицательный (H)}; \text{Нулевой (0)}; \text{Низкий положит. (H^+)}; \text{Средний положит. (C^+)}; \text{Выше среднего положит. (BC^+)}; \text{Высокий положит. (B^+)}\}.$$

В качестве семейства функций принадлежности используем девятиуровневый классификатор, где соответствующие функции принадлежности нечетких чисел, заданных на отрезке  $[-1,1]$  вещественной оси, представляют собой трапеции:

$$(5) \quad \{B(-1;-1;-0,85;-0,75); BC(-0,85;-0,75;-0,65;-0,55); C(-0,65;-0,55;-0,45;-0,35); H(-0,45; -0,35; -0,25; -0,15); \langle 0 \rangle (-0,25;-0,15;0,15;0,25); H^+(0,15;0,25;0,35;0,45); C^+(0,35;0,45;0,55;0,65); BC^+(0,55;0,65;0,75;0,85); B^+(0,75;0,85;1;1)\},$$

где в нечетком числе  $XX(a_1, a_2, a_3, a_4)$   $a_1$  и  $a_4$  - абсциссы нижнего основания,  $a_2$  и  $a_3$  - абсциссы верхнего основания трапеции.

Суть данного нечеткого классификатора в том, что если о факторе неизвестно ничего, кроме того, что он может принимать любые значения в пределах  $[-1;1]$  (принцип равнопредпочтительности), и надо провести ассоциацию между качественной и количественной оценками фактора, то предложенный классификатор делает это с максимальной достоверностью. При этом сумма всех функций принадлежности для любого  $x \in [-1;1]$  равна единице, что указывает на его непротиворечивость.

Применение классификатора позволяет перейти от качественного описания уровня параметра к стандартному количественному виду соответствующей функции принадлежности из множества нечетких трапециевидных чисел. При этом в рамках такого представления четкие значения после их нормирования и приведения к интервалу  $[-1;1]$  рассматриваются как частный случай, что позволяет реализовать *принцип совместного использования количественной и качественной информации*.

Значения весов  $s_{ij} \in [-1;1]$  из множества  $S$  могут быть получены экспертным путем. При этом необходимо учесть, что «мягкие» качественные измерения типа сравнения, отнесения к классу, упорядочения гораздо более надежны, чем назначение субъективных вероятностей, количественных оценок важности критериев, «весов» полезностей и т.п. [3;6]. Кроме того, для эксперта в большинстве случаев затруднительно дать непосредственные численные оценки. Поэтому

предпочтительнее ранговые методы, при реализации которых требуется лишь упорядочить критерии.

Для оценки *силы нечетких связей между концептами* в [2] был предложен модифицированный метод нестроого ранжирования, в соответствии с которым экспертом производится нумерация всех критериев по возрастанию степени их значимости. Причем допускается, что эксперту не удастся различить между собой некоторые критерии. В этом случае при ранжировании он помещает их рядом в произвольном порядке. Затем проранжированные критерии последовательно нумеруются. Оценка (ранг) критерия определяется его номером. Если на одном месте находятся несколько неразличимых между собой критериев, то за ранг каждого из них принимается номер всей группы как целого объекта в упорядочении.

Найденные предложенным способом оценки представляют собой обобщение системы весов Фишберна для случая смешанного распределения предпочтений, когда наряду с предпочтениями в систему входят и отношения безразличия. Веса Фишберна отражают тот факт, что системе убывающего предпочтения  $N$  альтернатив наилучшим образом отвечает система снижающихся по правилу арифметической прогрессии весов. Поэтому эти веса представляют собой рациональные дроби, в знаменателе которых стоит сумма  $N$  первых членов натурального ряда (арифметической прогрессии с шагом 1), а в числителе – убывающие на единицу элементы натурального ряда, от  $N$  до 1 (например,  $3/6$ ,  $2/6$ ,  $1/6$ ). Таким образом, предпочтение по Фишберну выражается в убывании на единицу числителя рациональной дроби весового коэффициента более слабой альтернативы.

При использовании метода нестроого ранжирования на граф  $G$  необходимо наложить систему отношений предпочтения:

$$(6) \quad E = \{GF_i(e)GF_j \mid e \in (\succ; \approx)\},$$

где  $GF_i$  и  $GF_j$  – факторы одного уровня иерархии  $G$ ;  $\succ$  – отношение предпочтения;  $\approx$  – отношение безразличия.

Такая система позволяет определить обобщенные на случай предпочтения/безразличия факторов по отношению друг к другу веса Фишберна для каждой дуги  $GD_{ij}$  (веса связей).

Для вычисления значений на следующем уровне иерархии при известных значениях концептов более низкого уровня, определенных в терминах лингвистической переменной  $QL$ , и заданном множестве весов дуг  $S$ , влияния нижестоящих концептов агрегируются по правилам  $R_i$  из множества  $R$ . В качестве элементов множества  $R$ , в зависимости от специфики влияния концептов друг на друга, могут выступать мультипликативная, аддитивная, минимаксная и т.п. свертки векторного критерия. При этом на нижних уровнях иерархии из-за возможности компенсации значений одних факторов за счет других чаще всего применяется аддитивная свертка. Для нахождения значения комплексного критерия  $GF_0$ , в случае, когда он не может рассматриваться как сумма частных критериев, применяется мультипликативная свертка:

$$(7) \quad GF_0 \equiv K_0 = \prod_j K_j^{sign(s_{0j})(1-|s_{0j}|)}$$

в которой под произведением понимается операция умножения соответствующих лингвистическим значениям  $K_j$  НЧ из (5);  $s_{0j}$  – веса влияния частных критериев  $K_j$  на  $K_0$  ( $\sum s_{0j} = 1$ ). Значение мультипликативного критерия, в отличие от аддитивного, резко уменьшается при малых значениях отдельных критериев, что позволяет исключить нежелательные варианты при принятии решения в случае, когда каждый из частных критериев значим, и не допускается их взаимная компенсация. В особо критичных системах в качестве  $K_0$  используется минимальное значение оценки соответствия критериев  $K_j$  требуемому значению (принцип «самого слабого звена»).

При нахождении сверток значения некоторых частных критериев необходимо предварительно инвертировать. В случае лингвистического описания для нахождения инверсии (противоположного значения) фактора  $F$  предлагается использовать формулу:

$$(8) \quad Inv(F) = \begin{cases} (1 - \mu(F)), & \text{если } \mu(F) \text{ задана на } [0; 1]; \\ (-1 - \mu(F)), & \text{если } \mu(F) \text{ задана на } [-1; 0]; \\ (-\mu(F)), & \text{если } \mu(F) \text{ задана на } [-1; 1]. \end{cases}$$

где  $\mu(F)$  функция принадлежности нечеткого числа, соответствующего лингвистическому значению  $QL_F$  фактора  $F$ .

В случае если возможно четкое (количественное) описание влияния одних концептов на другие, то в качестве элементов множества  $R$  выступают аналитические формулы, преобразующие входные данные в выходные.

Если кроме качественных значений факторов в НКМ присутствуют и количественные данные, то простейшим способом для их совместного учета при вычислении свертки векторного критерия является закругление количественных оценок до их качественного описания, и последующий переход к изложенной выше методике оценки. Однако такой подход приводит к потере точности.

Для совместного использования количественной и качественной информации без закругления предлагается методика, предусматривающая использование точного значения количественно измеряемого параметра  $P_i$ . Для этого вычисляется нормированное значение  $\bar{P}_i$  по формуле:

$$(9) \quad \bar{P}_i = (P_i - P_{min}) / (P_{max} - P_{min}),$$

где  $P_{min}$  и  $P_{max}$  – минимальное и максимальное значение  $P_i$ , соответственно.

Нормирование приводит разнородные параметры к единому интервалу  $[-1, 1]$ . Затем, значение фактора представляется в виде НЧ  $X(a_1, a_2, a_3, a_4)$ , в котором  $a_1=a_2=a_3=a_4=\bar{P}_i$ . Если измерения  $\bar{P}_i$  произведены с известной погрешностью  $\delta$ , то  $a_1=a_2-\delta$ ;  $a_2=a_3=\bar{P}_i$ ;  $a_4=a_3+\delta$ . Таким образом, нормированное значение фактора, имеющего четкое количественное представление, рассматривается как частный случай НЧ, заданного на  $[-1; 1]$

При нахождении сверток векторного критерия в иерархии  $G$  под суммой или произведением лингвистических значений факторов понимается сумма или произведение соответствующих им нечетких чисел. В этом случае результат также является нечетким числом, которое необходимо

лингвистически распознать, чтобы выработать суждение о качественном уровне показателей. Для этого вычисляется индекс схожести  $\Omega$ , характеризующий степень соответствия значения фактора той или иной качественной оценке из термножества лингвистической переменной  $QL$ .

Индекс схожести  $\Omega$  находится следующим образом:

$$(10) \quad \Omega = \frac{(1+\tilde{\rho})}{2} \quad (11) \quad \tilde{\rho} = \frac{\rho_{in}-\rho_{out}}{\rho_{in}+\rho_{out}}$$

где  $\rho_{out}$  представляет собой площадь нечеткого числа, характеризующего результат, лежащую вне эталонного числа, а  $\rho_{in}$  - площадь, лежащую внутри этого же эталонного числа.

Определенный таким образом индекс схожести, изменяясь от 0 до 1, характеризует близость найденной свертки к тому или иному нечеткому числу, которое, в свою очередь, соответствует элементу эталонного термножества. При этом обеспечивается семантическое соответствие: чем больше индекс схожести, тем выше степень соответствия вычисленного значения одному из элементов термножества  $QL$ .

Разница индексов схожести качественных оценок, полученных экспериментальным и теоретическим путем, может быть использована в качестве метрической характеристики степени адекватности нечеткой когнитивной модели.

Построенная модель должна быть открыта для совершенствования и уточнения. Этому способствует принцип унификации представления новых знаний для включения их в состав модели. Для включения в состав модели новых знаний, полученных в результате изучения процессов, происходящих в исследуемой системе, предлагается представлять эти знания в виде НКМ более низкого уровня, построенной по изложенному выше алгоритму. При этом на верхний уровень передается значение связи, выявленное в ходе анализа НКМ нижнего уровня. Такой иерархический способ построения НКМ позволяет унифицировать форму представления знаний, способствует более эффективному их хранению и обработке.

Значения концептов НКМ в общем случае являются функциями времени  $t$ . При проведении динамических расчетов необходимо задать их начальные значения при  $t = 0$ . Тогда

значение произвольного концепта  $K_j$  в дискретные моменты времени  $t=1, 2, 3, \dots$  находится по формуле:

$$(12) \quad K_j(t) = K_j(t - 1) + H(\Delta U_i, STS, t)$$

где  $H(\Delta U_i, STS, t)$  – обобщенная функция влияния приращений  $\Delta U_i$  воздействующих на  $K_j$  концептов на выходное значение  $K_j$ , заданная кортежем  $STS$ .

Алгоритм нахождения начальных значений концептов зависит от того, к какому типу процессов они относятся. В случае объективных процессов, вызванных техногенными или природными источниками, для этого используются методы статистического анализа, в результате применения которых после нормирования каждому фактору ставится в соответствие некоторая функция принадлежности на  $[-1;1]$ .

В случае же субъективного фактора для определения значения концепта необходимо построить «модель субъекта» - НКМ более низкого уровня иерархии. При этом учитываются: уровень прав субъекта в системе; уровень мотивированности его действий, зависящий от степени лояльности, от его психологического портрета, преследуемых субъектом целей и т.д.; психофизические возможности субъекта; его компетентность (уровень знаний и навыков); техническая оснащенность (используемые методы и средства) (рис. 1).

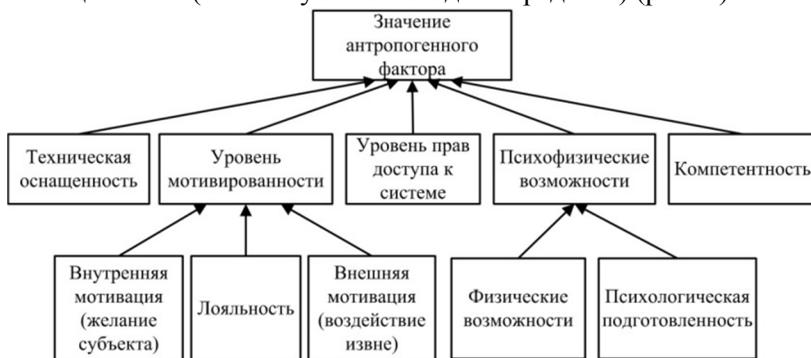


Рис. 1. НКМ для определения уровня антропогенных факторов

Последовательное нахождение сверток векторного критерия на всех уровнях иерархии когнитивного

функционального графа позволяет оценить состояние системы в текущий момент времени и выработать обоснованное суждение о необходимости *синтеза управляющих решений (СУР)*.

Решение задачи *СУР* подразумевает вывод системы на необходимый целевой уровень функционирования, обычно определяемый ЛПР нечетко, путем соответствующих воздействий на наиболее значимые наборы факторов  $X_i$  (управляющие кластеры), на которые ЛПР имеет возможность влиять, путем изменения значений входящих в эти кластеры концептов  $U_i$ .

### 5. Синтез управляющих решений

Непересекающиеся управляющие кластеры  $X_i$  *независимо* друг от друга влияют на целевые концепты. Для нахождения значений управляющих концептов  $U_i$ , совокупность которых обеспечивает необходимое значение кластера  $X_i$ , строится НКМ более низкого уровня, согласно принципу *унификации представления знаний*.

При использовании для нахождения значений концептов на каждом из уровней иерархии НКМ (кроме, возможно последнего, «нулевого») аддитивной свертки вида:

$$(13) \quad K_j = \sum_i s_{ij} K_i$$

(где  $\{K_i\}$  - совокупность факторов, влияющих на фактор более высокого уровня  $K_j$ ;  $s_{ij}$  - веса влияния  $i$ -го фактора на  $j$ -й), совокупный по всем возможным путям влияния  $t$  вклад приращений управляющих факторов  $\Delta U_i$  в приращение значения целевого концепта  $\Delta K_n$  находится по формуле:

$$(14) \quad \Delta K_n = \sum_i a_{in} \Delta U_i \quad ,$$

где

$$(15) \quad a_{in} = \sum_m a_m^{in} \quad ; \quad (16) \quad a_m^{in} = \prod_l s_{ml}^{in} \quad ;$$

$s_{ml}^{in}$  - вес ребра  $l$  в  $t$  - й связи между  $U_i$  и  $K_n$ .

Исходя из принципа *совместного использования количественной и качественной информации*, все значения концептов представляются в виде нечетких чисел. Аддитивная свертка не меняет форму нечетких чисел, она лишь сдвигает их в рамках  $[-1;1]$ . Это позволяет использовать значение сдвига в качестве числовой характеристики приращения факторов. Разница между значениями факторов в этом случае также может быть выражена величиной сдвига, отличающего одно НЧ от другого.

С учетом вышеизложенного в случае использования в НКМ аддитивной свертки предлагается следующая методика *СУР*, состоящая из *двух* этапов. *На первом* - решается задача нахождения минимальных наборов кластеров и их приращений для приведения целевых концептов к заданному ЛПР уровню. *На втором этапе* для каждого кластера в каждом из наборов определяется такое множество приращений входящих в него управляющих концептов, которое, с одной стороны, обеспечивает необходимое приращение значения кластера, вычисленное на предыдущем этапе, а с другой – требует минимальных затрат (материальных, временных, финансовых и т.п.) для его достижения. В качестве управляющего решения выбирается набор кластеров, имеющий минимальную «стоимость» реализации.

Задача *первого этапа* - нахождение необходимого приращения значений кластеров - сводится к решению матричного уравнения

$$(17) \quad A \bullet \Delta X = \Delta K,$$

где  $A = \{a_{ij}\}$  - матрица коэффициентов влияния приращений кластера  $X_i$ , на приращение  $j$ -го целевого концепта (матрица смежности);  $a_{ij} \in [0;1]$  и находится по формулам (15) и (16), в которых в качестве  $K_i$  выступает кластер  $X_i$ ;  $\Delta X = \{x_i\}$  – вектор приращений значений кластеров  $X_i$ ;  $\Delta K = \{k_j\}$  - вектор необходимых приращений значений целевых концептов ( $k_j$  находятся как разница между заданными ЛПР для  $j$ -го целевого концепта значениями и текущей величиной данного целевого концепта);  $\bullet$  - символ операции агрегирования нечетких значений, в качестве которой используется композиция «*max*-

*product*»:  $k_j = \max\{a_{ij} \cdot x_i\}$ . Матричное уравнение, расписанное по элементам вектора  $k_j$ , превращается в систему уравнений вида:

$$(18) \quad \bigvee_i a_{ij} \cdot x_i = k_j$$

где под дизъюнкцией понимается операция взятия максимума.

В общем случае нахождение решений такой системы уравнений, как было показано А.В.Марковским [8], эквивалентно решению задачи нахождения множества безызбыточных покрытий, которая является NP-полной задачей, поскольку к ней сводится известная NP-полная задача нахождения минимального покрытия (содержащего минимальное число элементов и, следовательно, безызбыточного). Поэтому необходимо использовать все возможные средства упрощения как самой системы, так и соответствующей ей таблицы покрытий.

Алгоритм сокращения размерности задачи и ее решения сводится к следующему:

1. Исключаются из рассмотрения несущественные переменные  $x_i$ , коэффициенты при которых удовлетворяют неравенству  $a_{ij}/k_j < 1$  во всех уравнениях системы (т.е. диапазон изменения значений несущественных переменных недостаточен для того, чтобы влиять на выполнение уравнений системы).

2. Для оставшихся (существенных) переменных находятся их базовые значения в соответствующих уравнениях. Базовым значением существенной переменной  $x_i$  называется величина  $\hat{x}_i$ , равная минимуму отношений  $k_j/a_{ij}$  для всех уравнений, содержащих  $x_i$ . Значение  $\hat{x}_i$  считается *принадлежащим* уравнению  $j$ , если  $\hat{x}_i = k_j/a_{ij}$ , т.е. минимум достигается на данном уравнении  $j$ . Базовое значение может принадлежать нескольким уравнениям.

3. Строится таблица покрытий  $T$ . Столбцы таблицы соответствуют переменным  $x_i$ , строки – номерам уравнений системы. Если значение  $\hat{x}_i$  *принадлежит* уравнению  $j$ , то в ячейке  $(i; j)$  таблицы  $T$  ставится 1, иначе – 0. При этом

считается, что столбец принадлежит *ядру* таблицы покрытий, если существует строка, покрываемая только им. Такой столбец входит в любое покрытие. Не каждая таблица имеет ядро, но если оно выделено, то таблицу можно сократить, вычеркнув все принадлежащие ядру столбцы и покрываемые ими строки.

4. Находится множество безызбыточных покрытий. Избыточной называют строку  $t_j$ , которую можно удалить из таблицы без изменения множества возможных покрытий. Строка является избыточной, если любое покрытие строк таблицы  $T$ , отличных от  $t_j$ , покрывает также и строку  $t_j$ . Это имеет место, если строка  $t_j$  *мажорирует* некоторую другую строку  $t_j'$ , т.е.  $t_j$  содержит единицы во всех столбцах таблицы  $T$ , в которых содержит единицы строка  $t_j'$ .

Оставшиеся после удаления избыточных строк ненулевые столбцы образуют множество безызбыточных решений, которые соответствуют минимальным наборам кластеров  $D_q = \{X_j^q\}$  ( $X_j^q$  -  $j$ -й кластер, входящий в  $q$ -й минимальный набор) и их приращениям  $\Delta\bar{X}_j^q$ , обеспечивающим переход в целевое состояние.

Задача *второго этапа* решается следующим образом. Каждый кластер  $X_j^q$  представляется в виде НКМ, описывающей влияние приращений входящих в него управляющих факторов  $U_i^{qj}$  на приращение всего кластера  $\Delta X_j^q$ . С учетом (14)-(16), значения  $\Delta U_i^{qj}$  должны удовлетворять уравнениям:

$$(19) \quad \sum_i a_i^{qj} \Delta U_i^{qj} = \Delta \bar{X}_j^q, \quad i = \overline{1, N}; \quad q = \overline{1, M}$$

где  $M$  – количество кластеров в минимальном наборе,  $N$  – количество  $U_i^{qj} \in X_j^q$ . При этом, поскольку кластеры должны различаться хотя бы одной парой  $U_i^{qj}$ , то всегда  $N > M$ . На приращения  $\Delta U_i^{qj}$  накладываются ограничения:

$$(20) \quad \Delta \check{U}_i^{qj} \leq \Delta U_i^{qj} \leq \Delta \hat{U}_i^{qj},$$

где  $\Delta \check{U}_i^{qj}$ ;  $\Delta \hat{U}_i^{qj}$  – минимально и максимально возможное приращение  $U_i^{qj}$ .

После перехода к переменным  $\Delta\dot{U}_i^{qj} = \Delta U_i^{qj} - \Delta\check{U}_i^{qj}$  выражения (19) и (20) примут вид:

$$(21) \quad \sum_i a_i^{qj} \Delta\dot{U}_i^{qj} = \Delta\bar{X}_j^q, \quad \text{где} \quad \Delta\bar{X}_j^q = \Delta\bar{X}_j^q - \sum_i a_i^{qj} \Delta\check{U}_i^{qj},$$

$$(22) \quad \Delta\dot{U}_i^{qj} \leq \Delta\hat{U}_i^{qj} - \Delta\check{U}_i^{qj}; \quad \Delta\dot{U}_i^{qj} \geq 0$$

Для каждого набора  $D_q$ , подбирается такая совокупность приращений управляющих факторов  $\Delta U_i^{qj}$ , входящих в кластеры  $X_j^q$ , которая удовлетворяет (21)-(22) и обеспечивает минимум «стоимости»  $P_{D_q}$  реализации приращения набора  $D_q$ :

$$(23) \quad P_{D_q} = \sum_i P_{\Delta U_i^q} \cdot \Delta U_i^q \rightarrow \min$$

где  $P_{\Delta U_i^q}$  – «стоимость» приращения управляющего фактора  $U_i^q$  (суммирование ведется по всем  $U_i^q$ , независимо в какой кластер  $X_j^q$  набора  $D_q$  они входят).

Таким образом, для реализации второго этапа *СУР* получаем задачу линейного программирования (*ЗЛП*): (21)-(23), которая решается симплекс методом. Если каждый управляющий фактор  $U_i^{qj}$  входит лишь в один кластер  $X_j^q$  решение *ЗЛП* упрощается. В этом случае с целью удовлетворения условия (23) при решении уравнений (21) для каждого  $U_i^{qj}$  вычисляется величина  $c_i^{qi} = a_i^{qj} / P_{\Delta U_i^{qj}}$ . Затем  $U_i^{qj}$  упорядочиваются по убыванию значений  $c_i^{qi}$  и решение уравнений (21) обеспечивается последовательным выбором максимально возможных значений  $\Delta\hat{U}_i^{qj}$  в упорядоченной последовательности до получения значения  $\Delta\bar{X}_j^q$ , после чего оставшиеся значения  $\Delta U_i^{qj}$  принимаются равными нулю. Найденные значения  $\Delta U_i^{qj}$  обеспечивают минимум «стоимости»  $P_{D_q}$  для каждого из наборов  $D_q$ . В качестве управляющего решения (*УР*) выбирается  $D_q$ , имеющий минимальную «стоимость» реализации:

$$(24) \quad UP = D_Q, \quad \text{где} \quad Q = \arg(\min_q P_{D_q})$$

В общем случае при использовании в НКМ не аддитивной свертки, методика *СУР* сводится к обеспечению минимума разницы между заданным ЛПР значением  $\bar{K}_0$  и текущей величиной данного целевого концепта  $\tilde{K}_0$ :

$$\Delta K_0(\Delta U_i) = |\tilde{K}_0(t) - \bar{K}_0| \rightarrow \min.$$

С учетом (12):

$$(25) \Delta K_0(\Delta U_i) = |K_0(t-1) + H(\Delta U_i, STS, t) - \bar{K}_0| \rightarrow \min$$

Остаются в силе ограничения (20), которые совместно с (25) образуют задачу условной оптимизации на пространстве нечетких управляющих воздействий  $\Delta U_i$ . Ее решение целесообразно осуществлять методом прямого поиска (например, методом Хука-Дживса), поскольку применение градиентных методов затруднено из-за необходимости вычисления производных функции  $H(\Delta U_i, STS, t)$ .

В случае, когда функция  $\Delta K_0(\Delta U_i)$  оказывается не унимодальной (т.е. достигает целевого состояния при разных значениях  $\Delta U_i$ ), необходимо оценить «стоимость» каждого решения и выбрать решение с минимальной «стоимостью».

## 6. Выводы

Таким образом, предложенный подход к исследованию и управлению СТС позволяет учесть все их основные особенности: нечеткая когнитивная модель отражает нечеткость структуры социотехнической системы в целом; нечеткие связи эффективно оцениваются с помощью весов Фишберна; «размытость» значений элементов системы и целей ее функционирования учитывается путем введения лингвистических переменных и соответствующих их термножеству нечетких классификаторов, многокритериальность – с помощью использования различных «сверток» векторного критерия. Предложенная методика *СУР* дает возможность подбирать управляющие воздействия с минимальной «стоимостью» для вывода системы в целевое состояние.

## Литература

1. АВДЕЕВА З.К., КОВРИГА С.В., МАКАРЕНКО Д.И. *Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями)* // Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций. Труды 6-й Межд. конф./Под ред. З.К.Авдеевой, С.В.Ковриги. М.: Институт проблем управления РАН. – 2006., С.41-54.
2. АЖМУХАМЕДОВ И.М. *Анализ и управление комплексной безопасностью на основе когнитивного моделирования* // Управление большими системами. Выпуск 29. М.: ИПУ РАН, 2010. С.5-15.
3. АСАНОВ А.А., ЛАРИЧЕВ О.И. *Влияние надежности человеческой информации на результаты применения методов принятия решений.* // Автоматика и телемеханика. № 5. 1999. С.20–31.
4. ДИЕВ В.С. *Нечеткость в принятии решений* // Философия науки. – 1998. – № 1(4). – С. 45–52.
5. КОВРИГА С.В., МАКСИМОВ В.И. *Применение структурно-целевого анализа развития социально-экономических ситуаций* // Проблемы управления, 2005. – №3. – С. 39–43.
6. ЛАРИЧЕВ О.И., МОШКОВИЧ Е.М. *Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решения.* М.: Наука, 2006.
7. МАКСИМОВ В.И., КОРНОУШЕНКО Е.К. *Аналитические основы применения когнитивного подхода при решении слабоструктурированных задач* // Труды ИПУ РАН. - М., 1999. – Т. 2. – С.95-109.
8. МАРКОВСКИЙ А.В. *О решении нечетких уравнений типа «tax-product» в обратных задачах управления и принятия решений.* // Автоматика и телемеханика, №9, 2004, С.149-159.
9. ОСТАПЕНКО Г.А., МЕШКОВА Е.А. *Информационные операции и атаки в социотехнических системах:* / Остапенко Г.А. Под редакцией Борисова В.И.- М: Горячая линия-Телеком, 2006. - 184 с.

10. ПРОТАЛИНСКИЙ О.М. *Применение методов искусственного интеллекта при автоматизации технологических процессов.* - Астрахань:Изд. АГТУ, 2004.-184с.

11. ПРОТАЛИНСКИЙ О.М., АЖМУХАМЕДОВ И.М. *Системный анализ и моделирование слабо структурированных и плохо формализуемых процессов в социотехнических системах* // «Инженерный вестник Дона»: электронный научно-инновационный журнал, 3/2012// <http://www.ivdon.ru/magazine/latest/n3y2012/910/>.

12. CHAULA J. A. *A Socio-Technical Analysis of Information Systems Security Assurance A Case Study for Effective Assurance* // Department of computer and systems sciences Stockholm University/KTH Ph.D. theses: No 06-016 [Электронный ресурс] [www.dsv.su.se/eng/publikationer/index.html](http://www.dsv.su.se/eng/publikationer/index.html)

13. FREY W. *Socio-Technical Systems in Professional Decision Making.* [Электронный ресурс] <http://cnx.org/content/m14025/latest/>

14. GREEN D. *Socio-technical Systems in Global Markets.* [Электронный ресурс] <http://nuleadership.wordpress.com/2010/08/23/socio-technical-systems-in-global-markets/>

15. TRIST E.L. *The evolution of socio-technical systems: A conceptual framework and an action research program.* // Ontario Quality of Working Life Center, Occasional Paper no. 2. Article Source: <http://EzineArticles.com/239366>

## MODELING AND CONTROL OF BAD FORMALIZABLE AND POORLY STRUCTURED SOCIAL ENGINEERING SYSTEMS

**Iskandar Azmuhamedov**, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Cand.Sc., assistant professor ([aim\\_agtu@mail.ru](mailto:aim_agtu@mail.ru)).

*Abstract: The opportunity of application of fuzzy cognitive modeling to manage social engineering systems (SES). Formulated the principles of building fuzzy cognitive models formalizable and poorly structured SES. Modeling techniques are developed that embody these principles. The technique of synthesis management*

*solutions enabling glean controlling actions with minimal "cost" for with drawl system in the target State.*

**Keywords:** bad formalized and poorly structured social engineering system, fuzzy cognitive modeling, Fishburne, similarity index weight, synthesis of control solutions.