

# КОГНИТИВНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА РИСКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ СЕТЕВЫХ ФОРМАЛИЗМОВ

**М.И. Гвоздик, кандидат технических наук, профессор;**  
**Т.Н. Антошина, кандидат педагогических наук, доцент;**  
**О.В. Уткин.**  
**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Оценка рисков и управление риском является важнейшей в комплексной проблеме разработки систем поддержки принятия решений для управления в условиях чрезвычайной ситуации. Предлагается метод когнитивного анализа и оценки рисков с использованием нечетких сетевых формализмов. Рассмотрен подход к разработке системы когнитивного анализа и оценки рисков с использованием нечетких сетевых формализмов, которая позволяет оценить существующие и потенциальные риски неблагоприятных ситуаций.

*Ключевые слова:* оценка рисков, поддержка принятия решений, когнитивный анализ, нечеткие сетевые формализмы

## COGNITIVE ANALYSIS AND RISK ASSESSMENT USING FUZZY NETWORK FORMALISMS

M.I. Gvozdik; T.N. Antoshina; O.V. Utkin.  
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

Risk assessment and risk management is crucial in the development of decision support systems for the management of emergency situations. A method for cognitive analysis and risk assessment using fuzzy network formalisms. Considered approach to the development of cognitive analysis and risk assessment using fuzzy formalisms, which allows the network to evaluate existing and potential risks of adverse situations.

*Keywords:* risk assessment, decision support, cognitive analysis, fuzzy formalisms network

Чрезвычайные ситуации (ЧС) всегда представляли и в обозримом будущем будут представлять существенную угрозу для населения Российской Федерации и человечества в целом. Оценка риска и управление риском ЧС включает в себя комплекс научных, научно-технических, организационных и иных мероприятий, направленных на разработку и эффективное внедрение новых знаний, техники и технологий для решения проблем снижения риска ЧС и смягчения их последствий.

### **Иерархическое оценивание риска**

В модели иерархического оценивания риска риск представлен в виде дерева критериев, полученного путем декомпозиции на критерии более частного характера. Иерархия строится методом структурной декомпозиции, сформулированной экспертом цели «сверху вниз», и заканчивается, когда определен уровень далее не декомпозируемых листовых критериев  $k_1, \dots, k_n$  [1].

Относительную важность критериев в иерархической структуре определяют как веса всех листовых критериев  $v_i$ , где  $v_i \in [0, 1]$ ,  $\sum_i v_i = 1$ , с помощью экспертной процедуры парного сравнения, нечеткого парного сравнения.

Ниже критериев следует уровень альтернатив  $A = \{A^J\}$ ,  $J=1, M$ , каждая из которых определяет риски, характеризующиеся набором свойств (атрибутов), совпадающих с названиями листовых критериев  $k_i$ . Для нахождения наилучшей альтернативы  $A^J \in A$  сравниваются пары альтернатив  $A^J$  по каждому листовому критерию, что позволяет представить каждую альтернативу в виде вектора  $A^J = (y_{k_1}^J, \dots, y_{k_n}^J)$ , где  $y_{k_i}^J \in [0, 1]$  – оценка интенсивности проявления свойства альтернативы  $A^J$ , совпадающего с названием критерия  $k_i$ .

Для оценки риска каждой альтернативой используется функция  $F : (A^J, v_i) \rightarrow \mathbf{R}$ ,  $i \in [1, n]$ , где  $v_i$  – веса листовых критериев в иерархической модели,  $A^J \in A$ ,  $J = \overline{1, M}$ . Оценка достижимости цели для альтернативы  $A^J$  имеет вид линейной свертки:

$$F(A^J, v_i) = \sum_{i=1}^n y_{k_i}^J v_i .$$

### Интегрированная модель оценки риска

Для повышения качества оценки риска в динамических ситуациях необходимо уменьшить субъективную составляющую прогнозов развития ситуации, получаемых экспертным способом. Уменьшение ошибки при экспертном прогнозировании риска могут быть получены при использовании для получения прогнозов когнитивных карт.

На рис. 1 и 2 показан классический подход оценивания риска при использовании альтернатив Т. Саати и предлагаемый когнитивный подход. В подходе Т. Саати (рис. 1) сгенерированные экспертом альтернативы попарно сравниваются по всем критериям.

В предлагаемой модели (рис. 2) построена когнитивная карта ситуации, факторы которой связываются с близкими по смыслу листовыми критериями. Эксперт генерирует альтернативы, а прогнозы их применения, получаемые с помощью когнитивной модели, автоматически передаются для оценки в оценочную иерархию. В отличие от классического подхода, число альтернатив в этом случае неограниченно, а добавление новой альтернативы не добавляет экспертной работы.

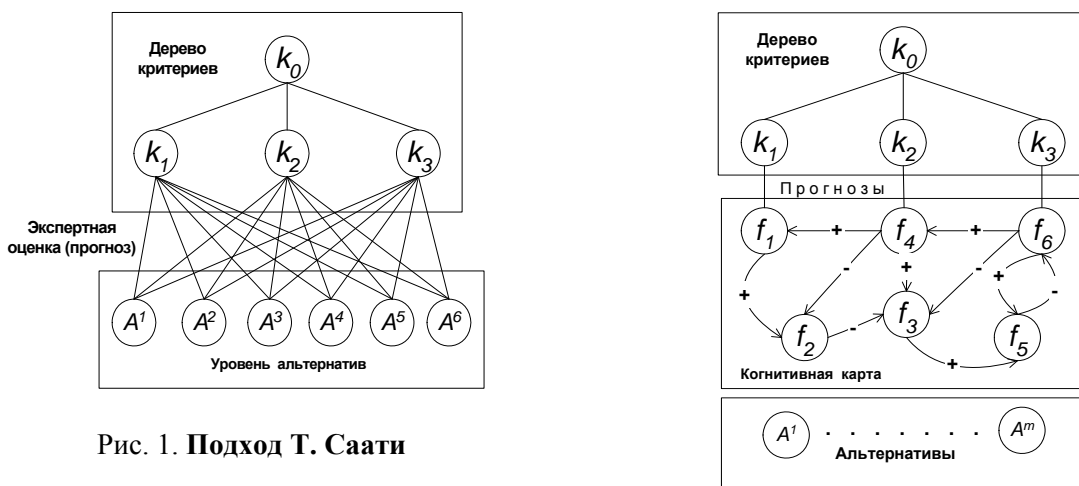


Рис. 1. Подход Т. Саати

## Рис. 2. Когнитивная карта ситуации

Предлагаемый подход требует разработки методов создания когнитивной модели, построения шкал листовых критериев и учета влияния консонансов значений факторов когнитивной модели на оценку риска в иерархической модели.

### Классическое построение когнитивной карты

Для оценки риска с использованием предлагаемого подхода необходимо представить модель проблемной области в виде когнитивной карты, которая должна включать факторы, близкие по смыслу листовым критериям.

Когнитивные карты – это разновидность математических моделей для формализации описания сложного объекта, проблемы или функционирования системы и выявления причинно-следственных связей между их элементами в результате воздействия на эти элементы или изменения характера связей. Когнитивные карты представляют моделируемую систему в виде множества концептов, отображающих ее объекты или атрибуты, связанных между собой отношениями влияния или причинно-следственными связями [2].

Существующая в настоящее время методология построения когнитивных карт ориентирована на построение концептуальных моделей, отражающих наиболее общие законы развития и управления ситуацией. Для решения проблемы интеграции когнитивной модели и иерархической модели можно использовать системную методологию построения когнитивной карты ситуации (Кулинич, 2003), основанную на структурно-функциональной декомпозиции ситуации и описании ее в структурном и функциональном аспектах. При структурной декомпозиции определяются основные характеристики  $F_i = \{f_{ij}\}$  всех элементов ситуации  $d_i$ . Далее для каждого элемента ситуации  $d_i \in D$  строятся когнитивные карты:  $(F_i, W_i)$ , где  $F_i = \{f_{ij}\}$  факторы элемента  $d_i$ ,  $W_i$  – матрица смежности графа, отражающая знания о законах функционирования элемента ситуации  $d_i$ . Когнитивные карты отдельных элементов объединяются в когнитивную карту сложной ситуации  $(F, W)$ , где  $F = \cup F_i$  – множество факторов – факторов ситуации;  $W$  – матрица смежности орграфа, описывающая сложную ситуацию и включающая матрицы  $W_i$  отдельных элементов ситуации и связи между ними. Построение когнитивной карты на основе такой методологии позволяет разработать когнитивную карту близкую по уровню детализации описания к уровню детализации описания ситуации в модели иерархического оценивания.

### Нечеткие когнитивные карты

Введенная в работе «Модель оценки альтернатив управления слабоструктурированными динамическими ситуациями» [2], нечеткая лингвистическая когнитивная карта является самым общим формализмом, использование которого позволит более тонко и многогранно оценить риск.

Нечеткой лингвистической когнитивной картой (НЛКК) называют когнитивную карту, состояния концептов которой и влияния между ними задаются лингвистическими терм-множествами.

Каждый концепт  $K_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) описывается соответствующей лингвистической переменной  $\langle \tilde{K}_i, T_i, D_i \rangle$ , где  $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_{m_i}^i\}$  – терм-множество лингвистической переменной (набор лингвистических значений концепта, характеризующих его типовые состояния);  $m_i$  – число типовых состояний данного концепта;  $D_i$  – базовое множество  $\tilde{K}_i$ . Для описания термов  $T_z^i$  ( $z \in Z = \{1, 2, \dots, m_i\}$ ), соответствующих типовым состояниям (значениям)

концепта  $K_i$ , используются нечеткие переменные  $\langle T_z^i, D_i, \tilde{C}_z^i \rangle$ , то есть значение  $T_z^i$  описывается нечетким множеством  $\tilde{C}_z^i$  в базовом множестве  $D_i$ :

$$\tilde{C}_z^i = \{ \langle \mu_{C_z^i}(d)/d \rangle, d \in D_i. \}$$

Веса влияния между типовыми состояниями каждой пары концептов нечеткой лингвистической когнитивной карты задаются нечеткими переменными  $\langle T_{zl}^{w_{ij}}, D_{w_{ij}}, \tilde{H}_{zl}^{w_{ij}} \rangle$ , которые описываются нечеткими множествами  $\tilde{H}_{zl}^{w_{ij}}$  в базовом множестве  $D_{w_{ij}}$  ( $K_i, K_j \in \mathbf{K}, z \in Z = \{1, 2, \dots, m_i\}, l \in L = \{1, 2, \dots, m_j\}$ ) следующего вида:

$$\tilde{H}_{zl}^{w_{ij}} = \{ \langle \mu_{H_{zl}^{w_{ij}}}(d)/d \rangle, d \in D_{w_{ij}}. \}$$

На рис. 3 показан пример структуры НЛКК.

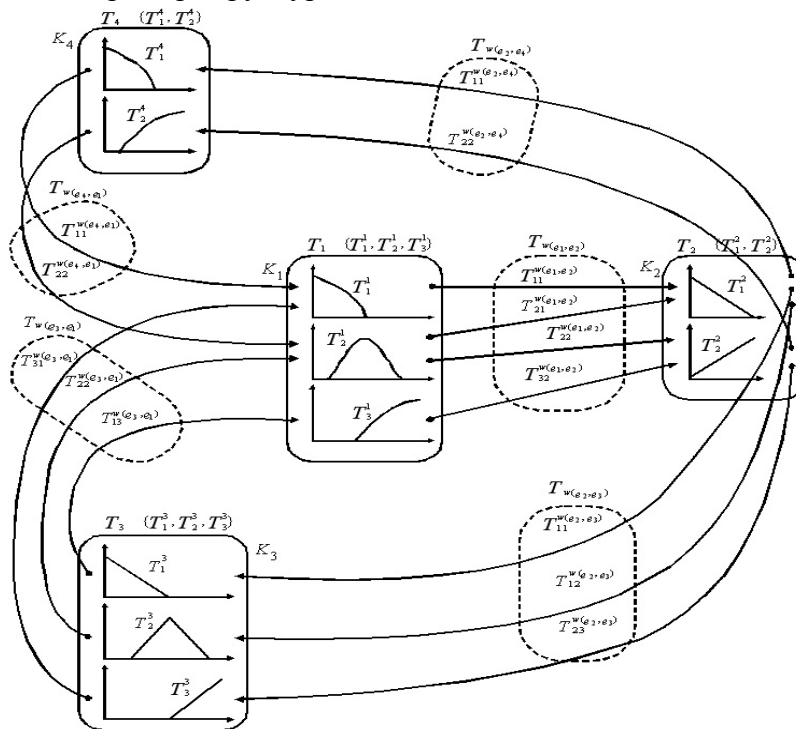


Рис. 3. Пример структуры нечеткой лингвистической когнитивной карты

Реализация оценки риска, анализ влияния различных факторов основаны на компьютерном моделировании динамики когнитивной карты. В указанной работе предложен метод анализа динамики НЛКК и алгоритм его реализации.

Формально любая когнитивная карта (и НЛКК) может быть представлена графом, при этом каждая дуга в этом графе представляет некую функциональную зависимость между соответствующими базисными факторами, то есть когнитивная модель ситуации представляется функциональным графом. Это позволяет использовать соответствующие сетевые формализмы (сети Петри, Е-сети и их различные обобщения).

### Сетевые формализмы для представления НЛКК

Предлагается для описания НЛКК использовать обобщение сетей Петри – G-сети.

G-сеть определяется как  $S=(P, T, K)$ , где  $P = \bigcup_{i=1}^I p^i$ ,  $P^i = (p^i_1, p^i_2, \dots, p^i_n)$  – конечное

множество позиций i-типа; I – количество типов позиций,  $I, n \geq 0$ ;  $T = \bigcup_{j=1}^J T^j$ ,  $T^j = (t^j_1, t^j_2, \dots, t^j_m)$  – конечное множество переходов; J – количество типов переходов,  $J, m \geq 0$ ;  $P \cap T = \emptyset$ ;  $K: P \times T \cup T \times P \rightarrow N$  – отношение инцидентности. Структура G-сети подобна структуре ординарной сети Петри, то есть каждый переход и позиция связаны не более чем одной дугой. В то же время принципиальным отличием является наличие различных типов позиций и переходов. Не трудно видеть, что структура G-сети полностью соответствует классическому определению сети.

Для более детального описания разнообразных свойств объектов и отношений между ними в сетевых моделях, а также различных качеств составных элементов, добавим в G-сети математические модели всех отдельных элементов, то есть всем позициям и переходам G-сети поставим в соответствие некоторые математические структуры.

Указанные математические структуры определяются на основании анализа свойств объектов и отношений между ними.

Можно предложить для каждой позиции и перехода свою математическую структуру в соответствии со свойствами объекта исследования, учитываемыми при разработке модели. При этом математическая структура позиции передает все свои свойства маркерам, находящимся в данной позиции, а математическая структура перехода передает все свои свойства соответствующему обобщенному оператору перехода.

Каждая позиция G-сети любого типа маркируется некоторым количеством маркеров. При этом маркерами являются слова над некоторым алфавитом, а правила срабатывания переходов описываются правилами вывода абстрактной формальной системы, например, нормальной канонической системы.

Маркировка M G-сети представляет собой вектор маркировок каждой позиции. Пусть маркерами в G-сети являются слова, составленные из символов алфавита A, а маркировка M определяется как отображение:

$$P \rightarrow (A^*)^{\textcircled{a}}, \text{ где } (A^*)^{\textcircled{a}} = A^* \times A^* \times A^* \times \dots$$

Маркировка G-сети может изменяться посредством выполнения переходов. Выполнение перехода состоит из удаления одного или нескольких маркеров из каждой входной позиции и добавления одного или нескольких маркеров в каждую выходную позицию. Переход может выполняться, только если он возбужден, условия возбуждения зависят от его типа и вида маркеров, находящихся во входных позициях, в рамках принятой абстрактной формальной системы. Выполнения переходов образуют работу сети.

Вид и количество удаляемых и добавляемых маркеров определяется с помощью правил абстрактной формальной системы, которые не без некоторой утраты общности, для одного маркера могут быть подобны продукциям в системе Поста, что позволяет каждое правило представить как несколько продукций, которые имеют несколько левых частей и несколько правых. В остальном они подобны.

В этом случае правила срабатывания переходов удобно представлять в виде таблицы, состоящей из  $k+v$  столбцов и  $r$  строк, где  $k$  – количество входных позиций перехода;  $v$  – количество выходных позиций;  $r$  – количество различных правил срабатывания одного перехода. Применение таблицы заключается в том, что каждая строка рассматривается как одно из правил срабатывания. Строка в свою очередь может интерпретироваться элементами некоторой абстрактной формальной системы, например, для наглядности, как составная продукция в системе Поста. Каждой входной позиции соответствует одна из левых частей продукции, а каждой выходной позиции – одна из правых частей.

Левая часть продукции применяется к маркерам, находящимся во входных позициях. При этом если в позиции содержится более одного маркера, то продукция применяется к любому из тех, который ей удовлетворяет. Так, левая часть составной продукции применяется ко всем входным позициям. Если в текущей маркировке отсутствует такая комбинация маркеров, которая удовлетворяет левой части первой продукции, то применяется следующая (если она имеется). Если достигнут конец таблицы, то переход не является возбужденным. Заметим здесь, что правила возбуждения перехода G-сети являются усилением правил возбуждения переходов в простой сети Петри, так как при отсутствии маркера в позиции продукция не применяется.

Отсутствие маркера обозначается в маркировке пустым символом А. Перед началом выполнения G-сети она имеет маркировку М, которая называется начальной. Маркированная G-сеть – это набор (Р, Т, К, А, Г, М).  $A=(a_g)$  – алфавит сети,  $\Gamma=(\gamma^i \rightarrow \gamma^j)$  – множество продукции. Если после выполнения перехода  $t_k$  маркировка  $M_k$  изменяется на маркировку  $M_{k+1}$ , то  $M_{k+1}$  называется непосредственно достижимой из  $M_k$ , что обозначается  $M_k \xrightarrow{t} M_{k+1}$ . Транзитивное замыкание отношения непосредственной достижимости образует отношение достижимости. Множество всех маркировок G-сети, достижимых из маркировки М, обозначается  $R(C, M)$ . Выполнение сети, то есть процесс смены маркировок, можно представить в общем виде гиперграфом достижимости. В нашем случае – это ориентированный граф, множеством вершин которого является  $R(C, M)$ , дуга  $(M_1, M_2)$ , помеченная символом  $t$ , принадлежит графу тогда и только тогда, когда  $M_1 \xrightarrow{t} M_2$ . Граф достижимых маркировок G-сети может быть бесконечным.

G-сети, так же как сети Петри и их различные расширения и обобщения, можно подвергнуть формальному анализу. Однако в общем виде можно получить лишь самые общие результаты, использование которых в прикладных исследованиях затруднительно. В то же время можно выделить некоторые классы G-сетей, формальный анализ которых позволяет получить ряд полезных свойств, обеспечивающих, прежде всего, обоснованность их применения для разработки моделей в интересах исследовательских испытаний.

Среди возможных различных классов G-сетей выделим следующие:

- $G^*$  – G-сеть с одним типом переходов, одним типом позиций и продуктами Поста;
- $G_P$  – G-сеть с различными типами позиций и одним типом переходов;
- $G_T$  – G-сеть с различными типами переходов и одним типом позиций;
- $G_S$  – стохастическая G-сеть;
- $G_F$  – нечеткая G-сеть;
- $G_H$  – иерархическая G-сеть.

### **$G_F$ – нечеткая G-сеть**

Рассмотрим  $G_F$  – нечеткую G-сеть. Для реализации возможности работы с нечеткими величинами и нечеткой логикой в рамках G-сети следует рассмотреть функционирование управляющих переходов в этих условиях.

Управляющие переходы G-сети дают возможность исследовать процессы управления потоками данных, приоритетности в обработке информации, исходя из значений управляющего предиката для оценки риска.

При исследовании мультиагентного управления, оценке его эффективности и количественных характеристик, места в переходах представляют собой возможные состояния управляемой сети, а предикаты – значения управляющих воздействий агентов. При условии наличия нечеткости в логике работы агентов возникает проблема адаптации аппарата G-сетей, а именно их управляющих переходов, к введению нечеткой логики. Условие адаптации нечеткой логики к теории G-сетей является необходимым для использования данного аппарата при моделировании работы нечетких мультиагентных сетей. Для доказательства возможности использования нечеткой логики в управляющих

переходах G-сетей необходимо показать, что ее введение не изменит основных правил работы перехода, таких как условие активности перехода, функция перехода.

Условие активности перехода при введении нечеткой логики в работу перехода не отличается от классического: переход считается активным, если входное место  $p_1$  имеет метку, а все некоторые выходные места  $p_k$  пусты.

В качестве функции перехода возможно использовать трапецевидный вид функции принадлежности, графически это выглядит так (рис. 4):

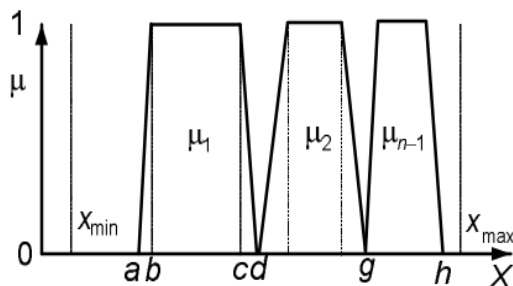


Рис. 4. Функция перехода

Используя общепринятые методы работы с функциями принадлежности в рамках нечеткой логики [4], функции переходов вычисляются сравнительно просто и понятен их расчет, например в среде Matlab Fuzzy Logic Toolbox.

В результате проведенного анализа могут быть сформулированы основные правила работы управляющих переходов с нечеткостью в их предикатах, что дает возможность создавать модели оценки риска, включающие в себя элементы нечеткой логики.

### **Особенности построения системы когнитивного анализа и оценки рисков с использованием нечетких сетевых формализмов**

Предлагается подход к разработке системы когнитивного анализа и оценки рисков с использованием нечетких сетевых формализмов, которая позволяет оценить существующие и потенциальные риски неблагоприятных ситуаций.

Разработана аналитическая часть системы, состоящая из двух основных частей: блок начальной подготовки данных для анализа, блок формализации и анализа знаний.

Блок начальной подготовки данных для анализа отвечает за подготовку множества данных для анализа и определения атрибутов, по которым будет производиться анализ. Основным этапом является перевод исследуемых данных в числовые и нормирования числовых данных путем их взвешивания. Взвешивание производится экспертом, путем присваивания числовых значений атрибутам. Исследуемые числовые данные необходимо нормировать, чтобы каждый из атрибутов имел равный вес при сравнении. Также необходимо учитывать и вес атрибута относительно других атрибутов для правильного нормирования.

Блок формализации и анализа знаний обеспечивает формализацию, сохранение и использование банка знаний для оценки риска, а также для формирования начальной структуры предметных областей, моделей объекта управления и в целом базы знаний. Основой данного блока является когнитивные карты, использующие нечеткие сетевые формализмы. Блок позволяет выявлять, ранжировать и согласовывать экспертные представления различных специалистов.

### **Выводы**

Приведены основные результаты исследований, рассмотрен подход к разработке системы когнитивного анализа и оценки рисков с использованием нечетких сетевых формализмов, который позволяет оценить существующие и потенциальные риски неблагоприятных ситуаций.

Система когнитивного анализа и оценки рисков с использованием нечетких сетевых формализмов включает модель иерархического оценивания рисков в виде когнитивной карты специального вида.

Предложен подход к разработке системы когнитивного анализа и оценки рисков с использованием нечетких сетевых формализмов, которая позволяет оценить существующие и потенциальные риски неблагоприятных ситуаций.

Разработана аналитическая часть системы, состоящая из двух основных частей: блок начальной подготовки данных для анализа, блок формализации и анализа знаний.

### **Литература**

1. Кулинич А.А., Титова Н.В. Модель оценки альтернатив управления слабоструктурированными динамическими ситуациями. М.: Физматлит, 2006. С. 348–356.

2. Федулов А.С., Борисов В.В., Круглов В.В. Нечеткие модели и сети М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 284 с.

3. Буханько А.Н., Дуравкин Е.В. Применение нечеткой логики в управляющих переходах Е-сетей // Системы обработки информации. 2008. Вып. 3 (70).

4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 725 с.

