

# Синтез распределенной нечеткой иерархической модели в когнитивных сетях поддержки принятия решений в нечеткой среде

М. М. Гаврилов, В. Ю. Павлов

МАИ (НИУ)

mikle5479@gmail.com, Vutaliy\_pavlov@hotmail.com

А. Н. Аверкин

Федеральный исследовательский центр

«Информатики и управления» РАН

averkin2003@inbox.ru

**Аннотация.** В работе описан новый нечеткий многокритериальный метод решений FMCDM на основе нечеткого иерархического моделирования. В статье показано, как использовать нечеткую иерархическую модель вместе с другими методами FMCDM и описаны преимущества метода. Новый подход используется для преодоления присущих иерархическим методам ограничений путем использования нескольких распределенных хранилищ информации. Описывается связь с когнитивными сетями принятия решений (CNDS).

**Ключевые слова:** теория нечетких множеств; нечеткое иерархическое моделирование

## I. КОГНИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Когнитивные технологии в экономике основаны на применении когнитивной науки для исследования моделей принятия экономических решений в сознании человека. Среди направлений неортодоксальной экономики наряду с поведенческой и экспериментальной экономикой развивается когнитивная экономика. Объектом познавательной экономики является изучение процессов оценки, выбора и принятия решений в экономической деятельности и объяснение характера эволюции организаций и социальных институтов в условиях структурной неопределенности [1–7]. В данной работе дается описание одного из подходов к построению современных экономических систем – системы на основе иерархий Т. Саати и их применения в сфере поддержки принятия решений.

Задачи, решаемые с помощью когнитивных карт, состоят в нахождении и оценке влияния ситуационных факторов и получении прогнозов развития ситуации на основе рассчитанного влияния. В настоящее время для расчета влияний и прогнозов развития ситуации используются широкие нечеткие когнитивные карты (FCM). FCM – это нечеткий ориентированный граф с обратной связью, единицы которого являются нечеткими множествами. Ориентированные ребра графа отражают причинно-следственные связи между понятиями и

характеризуют численно степень влияния (веса) связанных понятий. Сила взаимодействия между факторами присваивается с помощью лингвистических ценностей, в отличие от простых когнитивных карт. Эти лингвистические значения выбираются из упорядоченного набора возможных сил влияний. Значения факторов, их увеличение также даются в лингвистической форме, и они выбираются из упорядоченных множеств возможных значений фактора и его возможных увеличений – масштабов факторов и масштабов увеличения.

FCM объединяет в себе свойства нечетких систем и нейронных сетей, т. е. FCM представляют собой нейронные сети, обученные преподавателем: чем больше дат доступно для моделирования задачи, тем более адаптивным представляется FCM в плане разработки и разработки подходящее решение. Таким образом, FCM подходит для задач поиска решения по многим альтернативам.

В системах поддержки интеллектуальных решений, которые используют когнитивные методы анализа человеческого сознания, помимо когнитивных карт широко используются также графические знаки, сетевые модели, графики причин и эффектов, сети поиска причины. Очень близкими в концепции когнитивных карт являются байесовские сети, сети доверия, аналитические сети Т. Саати.

Все эти модели можно назвать когнитивными сетями поддержки принятия решений (CNDS). Также используются гибридные интеллектуальные системы, основанные на CNDS. Они играют важную роль в решении проблем когнитивной экономики. Они являются основой систем когнитивной бизнес-аналитики, которые используют интеллектуальные системы с настройкой на сознание и логику эксперта и состоят из когнитивных и аналитических частей. Более низкий когнитивный уровень позволяет информации на верхний аналитический уровень для обработки [2]. Когнитивный уровень помогает использовать человеческие познавательные способности, возможность целостного восприятия ситуации и его умственных моделей для контроля процесса принятия решений в сложных ситуациях. Аналитический уровень

позволяет оценить ситуацию и использовать эту оценку для принятия решений.

В подходе на основе CNDS можно расширить возможности традиционного когнитивного подхода как из-за явного моделирования человеческого ментального пространства, так и из-за методов гибридизации CNDS с аналитическими моделями принятия решений. Это позволяет рассматривать CNDS как интерфейс с формальными моделями, который исправляет возможные когнитивные ошибки, возникающие при входе в систему [3, 4].

## II. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ НЕЧЕТКАЯ ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Основой модели является иерархическая структура факторов, полученная в результате функционально-структурированной декомпозиции области данных [8, 11–13]. Мета-уровни структуры следующие: первый уровень – это уровень глобальных целей, второй уровень – это уровень целей соперника, третий уровень – это уровень мер для достижения глобальных целей и соперников цели удаления. Последний уровень – это уровень конкретных действий. Связи в иерархии определяют зависимость реализации элемента верхнего уровня от соответствующего элемента базового уровня. Таким образом, реализация возможных мер для достижения цели зависит от конкретных предпринятых действий. Эта иерархия позволяет оценить важность всех элементов уровня с учетом их вклада в реализацию элементов верхнего уровня. Модель иерархического анализа структуры позволяет обрабатывать оценки локальных факторов. Эти оценки, как правило, нечеткие и непоследовательные, получены из источников различной надежности (от экспертов с разным уровнем компетентности). Эта иерархическая модель также позволяет получить общую глобальную согласованность и надежность в смысле теорий оценок нечетких множеств. Таким образом, каждое решение будет характеризоваться его важностью с учетом его роли в структуре факторов. Но такая характеристика решения недостаточна для всесторонней оценки. Необходимо учитывать дополнительные характеристики решения, такие как его реализация в экономических, социальных, политических и т. д. Но иерархическая модель может найти наиболее приемлемое решение в текущей ситуации.

Мы предлагаем новый подход для преодоления присущих иерархическим методам ограничений путем использования нескольких распределенных хранилищ информации. Построение нечеткой иерархической модели может быть распределено между несколькими экспертами. Они могут работать в одном домене или в разных доменах. Также распределенные вычислительные методы используются для экспертных оценок и получения результата.

## III. МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

Особую роль в комплексном объектном анализе играет анализ структуры диаграмм связей факторов (график

имеет форму упорядоченной иерархической ранговой структуры). Непосредственно влияющие факторы находятся на последнем уровне графика. Реализация этих факторов (как правило, они представляют собой конкретные действия), распространяющиеся вверх на последовательно расположенных уровнях иерархической структуры факторов, приведут к реализации всех вышеперечисленных факторов и, наконец, к достижению глобальных целей развития сложного объекта. На данный момент строгой формулировки проблемы построения структуры многоуровневой структуры иерархии не существует. Но, можно указать принципы его построения. Эти принципы сформулированы в виде шести необходимых условий, которым должны удовлетворять рассмотренные иерархические структуры. Естественно, что реальные иерархические структуры будут удовлетворять этим условиям только в определенной мере, что зависит от используемых методов и алгоритмов их формирования.

- Структуры иерархических факторов строятся на основе глубокого смысла используемых факторов; факторы на базовом уровне раскрывают смысл факторов верхнего уровня, или основные факторы уровня представляют собой события, реализация которых способствует реализации факторов верхнего уровня.
- Реализация некоторых факторов, лежащих на одном уровне, не должна влиять на реализацию других факторов этого уровня. Другими словами, факторы одного уровня должны быть независимыми друг от друга.
- Факторы на рассматриваемом уровне напрямую зависят только от факторов ближайшего базового уровня иерархии.
- Полнота выявляемых факторов: коэффициент на рассматриваемом уровне иерархии полностью реализуется, если также реализуется все влияние на его факторы реализации следующего базового уровня.
- Положительная взаимосвязь между факторами верхнего уровня и факторами базового уровня: реализация базовых факторов уровня не должна приводить к уменьшению возможности реализации факторов верхнего уровня.
- Линейность функциональных связей между соседними уровнями факторов.

## IV. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ С НЕЧЕТКИМИ ОЦЕНКАМИ

Прежде всего, мы должны построить иерархию. На объектах  $Z = \{1, 2, \dots, N\}$  задан ориентированный граф  $G_r = (Z, W)$  без циклов с множеством вершин, совпадающим с множеством объектов, и множеством дуг  $W$ . Наличие дуги  $(i, j) \in W$  означает, что вес  $z_i$  объекта

(вершины)  $i$  напрямую зависит от веса объекта  $j$ . Граф  $G_r$  имеет структуру графа целей и задач некоторой сложной системы, если все вершины этого графа могут быть расположены на непересекающихся уровнях  $V_1, \dots, V_M$  таким образом, что дуги графа соединяют только вершины смежные уровни и эти дуги ведут сверху вниз, от уровня  $V$  до уровня  $V_{i+1}$ ,  $i = 1, \dots, M-1$ ; вершины, из которых не выходят дуги, расположены на уровне  $V_M$ ; все вершины, в которые не входят дуги, расположены на уровне  $V_1$ . Построение иерархии является одним из самых сложных этапов из-за сложной формализации используемых объектов, таких как цели, цели соперников и т. п. После построения иерархии элементарные оценки делаются экспертами. Элементарная оценка состоит в получении для некоторых вершин  $i \in V_m$  парных оценок  $(r_{jk}^{(i)})$  весов дуг  $(i, j) \in W$ ,  $j \in \Gamma_i = \{k \mid (i, k) \in W\}$ . Парные оценки показывают, сколько раз вклад объекта  $j$  больше, чем вклад объекта  $k$  в достижение цели  $i$  объекта  $j$ ,  $k \in \Gamma_i$ . Эти оценки могут быть точными ( $r_{jk}^{(i)} \in R_+$  – неотрицательные числа), интервалом ( $r_{jk}^{(i)} = [a_{jk}^{(i)}, b_{jk}^{(i)}] \subset R$  – интервал) или нечеткими числами ( $r_{jk}^{(i)} = \{(t, \mu_{jk}^{(i)}(t)) \mid t \in R_+\}$  – замкнутые выпуклые нечеткие множества  $R_+$ ). Последний случай включает лингвистические оценки и два предыдущих случая. Тем самым мы получаем в результате элементарной оценки взвешенное бинарное отношение  $R^{(i)} = \{((j, k), r_{jk}^{(i)}) \mid j, k \in \Gamma_i\}$  на множестве объектов  $\Gamma_i$ , которое дает интенсивность превосходства объектов. Получив оценки, мы должны их усреднить. В каждой из элементарных оценок могут участвовать несколько экспертов, поэтому для некоторых пар  $(j, k)$  объектов  $j, k \in \Gamma_i$  разные эксперты  $s$  могут назначать разные оценки  $r_{jk}^{(i)s}$  ( $s$  – номер эксперта). Процедура усреднения экспертной оценки заключается в определении средней геометрической оценки.

#### V. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕСОВ ДУГ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Результат парных оценок, средний по элементарной оценке  $i$  – точное, интервальное или нечеткое отношение  $R_{(i)}$  – используется при определении весов  $y_{i,j}$ , всех дуг  $(i, j) \in W$ , выходящих из вершины  $i$ . Весы дуг удовлетворяют следующему условию:

$$\sum_{j \in \Gamma_i} y_{ij} = 1; y_{ij} \geq 0, \forall i \in \Gamma_i$$

Если на первом уровне  $y_1$  имеется несколько объектов, то производится «нулевая» элементарная оценка, это означает, что необходимо провести парное сравнение

коэффициентов важности объектов. В результате «нулевой» оценки определяются коэффициенты важности объектов первого уровня.

#### VI. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВАЖНОСТИ

После обработки результатов элементарных оценок определяются коэффициенты значимости  $z_j$  объектов  $j \in V_1$  первого уровня иерархической структуры. Также определяются веса  $y_{ji}$  всех дуг  $(i, j) \in W$  (коэффициенты относительной важности вершины  $Y_{ji}^{(s)}$  для вершины  $Y_i^{(s-1)}$  ближайшего верхнего уровня, где  $s$  – номер уровня. Весовые коэффициенты объектов базового уровня определяются повторением сверху вниз пересчета весов объектов (коэффициенты значимости объектов):

$$z_i = \sum_{j \in \Gamma_i^{-1}} y_{ji} z_j, i \in V_2,$$

.....

$$z_i = \sum_{j \in \Gamma_i^{-1}} y_{ji} z_j, i \in V_M$$

$$(\Gamma_i^{-1} = \{j \mid (j, i) \in W\}).$$

#### VII. КОНСЕНСУС-АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ЭКСПЕРТОВ

Важность коэффициентов определяется действительностью результатов элементарных оценок. В этом случае оценки начальных пар являются нечеткими или смешанными, справедливость результатов равна степени согласования начального нечеткого отношения  $R^{(i)}$  и полученной сверх транзитивной матрицы, которая определяется в результате решения специальной задачи аппроксимации оценок. Решение проблемы приближения оценки производится с использованием модифицированного метода Макеева и Шахнова [9, 10]. В случае, когда оценки точные или интервальные, точность результатов характеризуется степенью изменения границ интервалов, которые назначаются экспертами.

Предложенный подход используется также в гибридных системах поддержки принятия решений на основе нечетких когнитивных карт и нечеткой иерархической модели [5, 14].

#### VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разложение в иерархической модели производится до уровня, который содержит факторы с качественным или количественным масштабом значений. Для применения методов FMCDM необходимо построить отображение на  $[0,1]$ . Это означает, что необходимо создать функцию принадлежности, которая преобразует каждое значение из

шкалы в действительное число из  $[0,1]$ . Число интерпретируется как предпочтение выбранного значения коэффициента для достижения главной иерархической цели (фактора верхнего уровня). Нуль интерпретируется как индекс минимального предпочтения, в сравнении с единицей, которая интерпретируется как индекс максимального предпочтения.

На основе относительных весов важности можно построить единую шкалу для шкал градаций факторов. Использование методов FMCDM позволяет получить коэффициент предпочтения альтернативы, т.е. означает коэффициенты предпочтений значений факторов последнего уровня.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Абдикеев Н.М., Аверкин А.Н., Ефремова Н.А. Когнитивная экономика в инновационную эпоху // Журнал Вестника Российского Экономического Университета. 2010. с 1, 3-20.
- [2] Абдикеев Н.М., Аверкин А.Н. и другие. Когнитивная бизнес-аналитика. Москва: Инфра Издательство. 2010.
- [3] Абрамова Н.А., Коврига С.В. О рисках, связанных с ошибками экспертов и аналитики. В когнитивном анализе и контроле за развитием ситуаций: труды 4-го Международного. Москва: Институт проблем управления РАН. 2004. т. 2. с. 12-23.
- [4] Абрамова Н.А., Коврига С.В., Макаренко Д.И., Максимов В.И. Когнитивный подход в управлении. Journal of Control Sciences. 2007. с 3, 2-8.
- [5] Аверкин А.Н., Кузнецов О.П., Кулинич А.А., Титова Н.В. Поддержка принятия решений в области полуструктурированных данных: анализ ситуации и оценка альтернатив // Вестник Российской академии наук. Теория и системы управления. 2006. С 3, 139-149.
- [6] Росс Д. Экономическая теория и когнитивная наука: микроосаждение. The MIT Press. 2005.
- [7] Уоллиссер Б. Когнитивная экономика. Springer. 2008.
- [8] Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Москва: Радио и связь, 1991. 224 с.
- [9] Макеев С.П., Шахнов И.Ф. Альтернативные последовательности на основе нечетких оценок. М.: ВЦ АН СССР. 1989.
- [10] Макеев С.П., Шахнов И.Ф. Секвенирование объектов в иерархических системах // Известия АН СССР. Технич. кибернет., 1991, N 3. 29-46 с.
- [11] Дженсен Р.Е. Сравнение собственных векторов, методов наименьших квадратов и логарифмических методов наименьших квадратов, EJOR, 1986, т. 127 с.
- [12] Саати Т., Варгас Л.Г. Несоответствие и сохранение рангов // Журнал математической психологии. 1984. вып. 28, с. 205-214.
- [13] Saaty, T.L., Принятие решений по множеству критериев – аналитическая иерархия процесса. публикации RWS, 2-е изд., 1990.
- [14] Averskin A.N., Agrafonova T.V., Titova N.V. System of Decision Making Support Based on Fuzzy Models // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2009. Vol. 48, № 1.