

# Разработка распределенной лингвистической системы поддержки принятия решений

**А.В. Демидовский**

E-mail: ademidovskij@hse.ru

**Э.А. Бабкин**

E-mail: eababkin@hse.ru

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
Адрес: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/20

## Аннотация

В данной работе предлагается новый подход к многокритериальному принятию решений на основе лингвистической информации, полученной от группы автономных экспертов. Данный подход позволяет лучше анализировать и быстрее находить решения для слабоструктурированных проблем, характеризующихся большим количеством факторов и неопределенностью контекста. Одним из ключевых элементов предлагаемой методологии является иерархия абстракций, предложенная Дж. ван Гигом и используемая для определения различных уровней, на которых находятся альтернативные решения и критерии для их оценивания. Интеграция этой иерархии позволяет всецело проанализировать проблемную ситуацию. Поэтому данный подход был назван многоуровневым многоатрибутным лингвистическим методом принятия решений (multi-level multi-attribute linguistic decision making, ML–MA–LDM).

Предлагаемый подход включает методологию, представляющую собой набор шагов, и математическую модель. Кроме того, представлен метод автоматического распределения весов экспертов в зависимости от уровня их уверенности в данной оценке. Данный оригинальный подход поддерживает работу как с качественными, так и с количественными оценками на протяжении всего процесса принятия решения по различным уровням абстракции. Наконец, демонстрируется прототип мультиагентной экспертной системы для решения слабоструктурированных проблем с учетом большого числа различных аспектов и неопределенности контекста. Данный прототип играет роль инструмента для конкурентного анализа и для целей верификации предложенной методологии.

Основные свойства подхода и прототипа продемонстрированы на примере решения конфликтной ситуации в области стратегического управления. Также были выделены преимущества, недостатки и направления развития предложенной методологии.

**Ключевые слова:** лингвистическое принятие решений; многокритериальный выбор; мета-решения; мультиагентные системы; нечеткая логика; слабоструктурированные проблемы; системы поддержки принятия решений.

**Цитирование:** Демидовский А.В., Бабкин Э.А. Разработка распределенной лингвистической системы поддержки принятия решений // Бизнес-информатика. 2019. Т. 13. № 1. С. 18–32.

**DOI:** 10.17323/1998-0663.2019.1.18.32

## Введение

В современном мире существует большое количество сложных и противоречивых проблем, таких как глобальное потепление, бедность, безработица. Такие проблемные ситуации могут быть разделены на две группы: структурированные и слабоструктурированные [1]. Последние характеризуются неопределенностью, изменчивостью окружения и многими другими усложняющими решение факторами. Большое подмножество слабоструктурированных проблем может характеризоваться многочисленными стейкхолдерами (или экспертами), альтернативными решениями и критериями, которыми пользуется лицо, принимающее решение (ЛПР). Предполагается, что выбор одной или нескольких альтернатив позволяет ЛПР найти решение проблемной ситуации, удовлетворяющее большинство стейкхолдеров. Поэтому создание новых моделей принятия решений и программных систем для поддержки многокритериального выбора является актуальной научной и социальной задачей.

Более того, такие проблемные ситуации зачастую имеют многочисленные аспекты (или размерности), такие как политические (например, политическое напряжение), экономические (например, выгода), этические (например, соответствие нормам морали) и так далее. Это и создает проблему многокритериального принятия решений [2, 3].

Поиск решения проблемы, оказывающей влияние на большое число стейкхолдеров, требует создания математических моделей, алгоритмов и методик, позволяющих анализировать субъективные оценки экспертов по различным аспектам. Зачастую эти аспекты могут быть выстроены как элементы иерархии. В предлагаемом подходе для многокритериального выбора предлагается использовать принцип мета-решений, предложенный Дж. ван Гигом [4]. В данной работе адаптируется основополагающая идея о выделении восьми уровней абстракции, которые характеризуют основные аспекты произвольной проблемной ситуации.

Существуют многочисленные попытки разработать новые подходы принятия решений или адаптировать существующие для практического применения в разных предметных областях. К наиболее актуальным предметным областям относятся такие как здравоохранение [5], оценка работы партнеров [6], подбор оптимальных элементов для углеволокнистых композитов [7], оценка логистических решений [8], планирование расписаний [9], вы-

бор поставщиков [10], анализ авиакатастроф [11]. Обычно для решения этих задач используются традиционные подходы: TOPSIS, ELECTRE, VIKOR. Существенным недостатком этих подходов является сильная зависимость от количественных оценок, даже в форме нечетких множеств [12]. С другой стороны, оценки экспертов могут быть как количественными, так и качественными. Качественные оценки становятся все более предпочтительными в сложных ситуациях, поскольку они, в отличие от количественных, лучше отражают нечеткую информацию (например, если эксперт сомневается и не может дать точную оценку). Однако, согласно проведенному исследованию, существует растущий тренд по объединению традиционных алгоритмов принятия решений и методов обработки качественных оценок. Ярким примером такого симбиоза является комбинация метода TOPSIS и модели на основе структуры 2-tuple [13].

Надежные и гибкие средства анализа качественных оценок разрабатываются в научной области под названием «лингвистическое принятие решений» [2, 3, 14–17] и «лингвистическое многоатрибутное принятие решений» [2]. Эти и другие подобные методы обработки качественных оценок носят название «вычисления со словами» (computing with words) [16–20]. Существуют три наиболее популярных подхода к работе с лингвистическими терминами [21]:

- ♦ лингвистическая вычислительная модель, построенная на функциях членства;
- ♦ лингвистическая символическая вычислительная модель, построенная на порядковых шкалах;
- ♦ максиминные операторы, лингвистическая символическая вычислительная модель, построенная на гладких комбинациях.

Зачастую информация, приходящая от экспертов, имеет гетерогенный характер в связи с мультигранулярностью. Для работы с такой информацией разработаны некоторые методы, связанные с объединением различных шкал в лингвистические иерархии [14, 22, 23].

В данной работе представлены результаты разработки нового подхода к многокритериальному лингвистическому принятию решений с учетом многочисленных иерархически упорядоченных проблемных аспектов. Данный подход включает методологию и прототип многоагентной экспертной системы для построения слабоструктурированных моделей с учетом неопределенности контекста и многочисленных аспектов проблемы.

Основным вкладом в развитие методов многокритериального анализа проблем является разработка новых научных принципов интеграции лингвистического принятия решений и принципа мета-решений Дж. ван Гига. Эта интеграция предоставляет стейкхолдерам структурированный метод анализа проблем с учетом различных аспектов, что позволяет получать более объективные решения по сравнению с решениями, полученными без учета многочисленных аспектов слабоструктурированных проблем.

Данная работа имеет следующую структуру. В разделе 1 дается необходимая вводная информация о базовых элементах предлагаемой методологии. Затем, в разделе 2, подробно описывается предлагаемый подход. В разделе 3 демонстрируется применимость предлагаемого подхода на примере конфликтной ситуации в рисовой промышленности Индии. Раздел 4 раскрывает детали архитектуры мультиагентной системы (МАС), построенной для демонстрации работы предложенной методологии. Наконец, в Заключение представлено анализ предложенного подхода и потенциальные направления дальнейших исследований.

## 1. Обзор литературы

Моделирование, анализ и решение слабоструктурированных проблем на основе лингвистических оценок используют некоторые важные математические структуры.

**Определение 1.** Лингвистическая переменная характеризуется кортежем

$$(H, T(H), U, G, M),$$

где  $H$  – имя переменной;

$T(H)$ , или просто  $T$  – множество названий  $H$ , иначе говоря, множество имен лингвистических значений  $H$ , где каждое значение – это переменная, которая обозначается в общем случае как  $x$  и принимает значения из множества терминов предметной области  $U$ , которые обозначаются как  $u$ ;

$G$  – синтаксическое правило (часто принимает форму грамматики) для генерации значений из  $H$ ;

$M$  – семантическое правило, которое определяет связь между  $H$ ,  $M(x)$ , где  $x$  – переменная, обозначенная выше [24].

Для того, чтобы использовать такие лингвистические оценки, важно выбрать лингвистические дескрипторы для множества концептов, а также определить гранулярность неопределенности. Обычно

множество концептов обозначается как  $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ . Степень гранулярности такого множества зависит от контекста проблемной ситуации.

На основе заданных определений Херрера с соавторами [25] предложили классическую модель анализа лингвистических оценок, используя структуру под названием “2-tuple”.

### 1.1. Классическая модель на основе структуры “2-tuple”

Структура «2-tuple» образована парой [25]:

- ♦  $s_i \in S = \{s_0, \dots, s_g\}$  – лингвистический концепт;
- ♦  $\alpha$  – численное значение (или «символическая трансляция»), которое показывает результат работы функции членства, иначе говоря, расстояние до ближайшего концепта  $s_i \in S = \{s_0, \dots, s_g\}$ , если  $s_i$  – не точное соответствие полученному результату.

Позднее авторы предложили большое количество операторов [3], позволяющих агрегировать лингвистическую информацию.

### 1.2. Усовершенствованная модель на основе структуры «2-tuple»

Основная проблема классической модели заключается в необходимости определить базовую шкалу для всех оценок и правила перевода этих оценок в единую шкалу. Выбор шкалы и правил перевода в эту шкалу становится самостоятельной сложной задачей. В своей недавней работе [26] исследователи предложили модель, которая позволяет работать сразу с несколькими шкалами без дополнительных преобразований. Основное отличие между классической моделью [25] и усовершенствованным аналогом [26] заключается в наборе правил перевода из структуры «2-tuple» в численное представление, и наоборот. Важно отметить, что модель не предполагает, что альтернативы и критерии могут меняться во времени, как, например, это учитывается в модели с биполярными множествами лингвистических оценок [27]. Усовершенствованная модель «2-tuple» [26] используется в подходе, предлагаемом в данной работе.

**Определение 2.** Функция перевода [26]. Пусть  $S = \{s_0, \dots, s_g\}$  – набор лингвистических понятий,  $\mathcal{S}$  – множество структур «2-tuple»,  $g = \tau + 1$  – его гранулярность,  $\beta$  – нормализованный результат символической агрегации. Тогда функция перевода может быть определена следующим образом:

$$\delta_g : [0,1] \rightarrow S \times [-0.5, 0.5]$$

$$\delta_g(\beta) = (s_i, \alpha) = \begin{cases} s_i, i = \text{round}(\beta, \tau) \\ \alpha = \beta\tau - i, \alpha \in [-0.5, 0.5) \end{cases} \quad (1)$$

где *round* – это функция, которая округляет  $\beta$  до ближайшего к  $\beta$  целого  $i \in \{0, 1, \dots, g\}$ .

**Определение 3.** Обратная функция перевода [26]. Пусть  $S = \{s_0, \dots, s_g\}$  – набор лингвистических понятий,  $\mathcal{S}$  – множество структур «2-tuple»,  $g = \tau + 1$  – его гранулярность,  $(s_i, \alpha)$  – структура «2-tuple» на  $S$ , где  $\alpha \in [-0.5, 0.5)$ . Тогда всегда существует функция  $\delta_g^{-1}$  такая, что для заданной структуры «2-tuple» она возвращает эквивалентное численное значение  $\alpha \in [0, 1)$ :

$$\delta_g^{-1} : S \times [-0.5, 0.5) \rightarrow [0, 1]$$

$$\delta_g^{-1}(s_i, \alpha) = \frac{1 + \alpha}{\tau} = \beta. \quad (2)$$

### 1.3. Модель на основе структуры «2-tuple» для сравнительной лингвистической информации

Разумно предположить, что эксперты не способны оценивать альтернативы по заданным критериям одинаково хорошо. Если эксперты не способны дать точную оценку, то они могут дать сравнительную оценку или даже выразить ее в виде самостоятельного предложения, например, следующего вида: «<что-то> лучше, чем | такое же, как | хуже, чем <что-то>». Эта идея легла в основу подхода, который называется HFLTS (hesitant fuzzy linguistic term sets – колеблющиеся нечеткие наборы лингвистических оценок) [28].

**Определение 4.** HFLTS [29]. Пусть  $S = \{s_0, \dots, s_g\}$  – множество лингвистических концептов. Тогда HFLTS, или  $H_S$  – это упорядоченное конечное множество последовательных лингвистических концептов из  $S$ :

$$H_S = \{s_i, s_{i+1}, \dots, s_j\}, S_k \in S, k \in \{1, \dots, g\} \quad (3)$$

Для того, чтобы избежать потери информации во время использования HFLTS, был предложен другой подход, который называется колеблющимся множеством из структур «2-tuple» (hesitant 2-tuple set) [26]. Также существуют операторы для агрегации и сравнения таких множеств: MTWA [26], MNTWA [26] и т.д.

**Определение 5.** Hesitant 2-tuple set [26]. Пусть  $S = \{s_0, \dots, s_g\}$  – множество лингвистических кон-

цептов,  $(b_i, \alpha_i)$  – структура 2-tuple на  $S, i = 1, 2, \dots, n$ . Если  $(b_i, \alpha_i) < (b_j, \alpha_j)$  для любых  $(i < j)$ , то  $(b_1, \alpha_1), (b_2, \alpha_2), \dots, (b_i, \alpha_i)$ , обозначаемое как  $T_S$  – это «hesitant 2-tuple set» для любых  $< j$ . Тогда HFLTS, или  $H_S$  – это упорядоченное конечное подмножество последовательных лингвистических концептов из  $S$ .

### 1.4. Принцип мета-решений для анализа проблемных ситуаций на различных уровнях абстракции

Исходя из того, что во время поиска решения сложных проблем требуется анализировать ситуацию по различным аспектам, было решено использовать восемь уровней абстракции, предложенных Дж. ван Гигом в его принципе мета-решений [26]. Эти уровни используются как базовый набор аспектов произвольной анализируемой проблемы. Перечислим все восемь уровней в порядке возрастания абстракции: управленческий, экономический, научный, юридический, политический, эпистемологический, этический, эстетический.

**Определение 6.** Абстракция – это ментальный процесс, при котором представления о реальности определяются на различных уровнях концептуализации.

**Определение 7.** Уровень абстракции (уровень логики) – перспектива или точка зрения, с которой стейкхолдеры пытаются решить проблему. Выбранная перспектива отражает исторические навыки эксперта на заданном уровне абстракции (уровне логики).

## 2. Предлагаемый подход к многокритериальному принятию решений

В предыдущем разделе были рассмотрены базовые подходы лингвистического принятия решений, а также восемь уровней абстракции, которые жизненно необходимы для анализа сложных проблем. Важно отметить, что существующие подходы концентрируются либо только на количественных, либо только на качественных оценках. Очень малое число работ посвящено обработке обоих видов оценок. В то же время современные методологии не учитывают то, что эксперты могут иметь разную квалификацию, а также принадлежать различным уровням абстракции, таким как политика, экономика и т.д. Более того, существующие методы принятия решений демонстрируются на искусственных примерах с очень малым числом экспертов и

альтернативных решений. Наконец, демонстрация работы не осуществляется в виде динамики много-агентной системы (МАС), несмотря на то что это помогло бы не только выявить существенные недостатки этих подходов, но и проанализировать поведение агентов и особенности их взаимодействия. В частности, важно учитывать фактор доверия между экспертами. Предлагаемый в данной работе подход позволяет решить вышеперечисленные проблемы и учесть недостающие элементы.

В данном разделе описан разработанный подход к решению слабоструктурированных задач, который учитывает множественные иерархически выстроенные аспекты проблемной ситуации и позволяет производить вычисления над гетерогенными оценками. Данный подход был назван многоуровневым многоатрибутным лингвистическим методом принятия решений (multi-level multi-attribute linguistic decision making, ML–MA–LDM).

### 2.1. Описание шагов ML–MA–LDM

Предлагаемый подход состоит из нескольких последовательных шагов, начиная с определения правил оценивания и заканчивая коммуникацией полученного решения (рисунок 1). Важно отметить, что эти шаги по отдельности описывались в различных работах, посвященных процессу принятия решений (например, [30, 31]), однако их не объединяли в согласующуюся последовательность. Предлагаемый подход включает:

1. Определение правил оценивания и распределения весов критериев. В предлагаемом подходе мы делаем следующие предположения:

- а. эксперты дают честные оценки;
- б. эксперты верят друг другу;
- с. эксперты выбирают гранулярность оценок в соответствии со своим опытом и знанием о проблеме;
- д. эксперты имеют одинаковое понимание оценок.

2. Определение доступных лингвистических шкал, контекстно-свободной грамматики и функции перевода.

3. Многоуровневое определение желаемого состояния, критериев и альтернатив:

- а. анализ желаемого состояния на каждом уровне абстракции;
- б. формулирование критериев на каждом уровне абстракции;
- с. формулирование альтернатив.

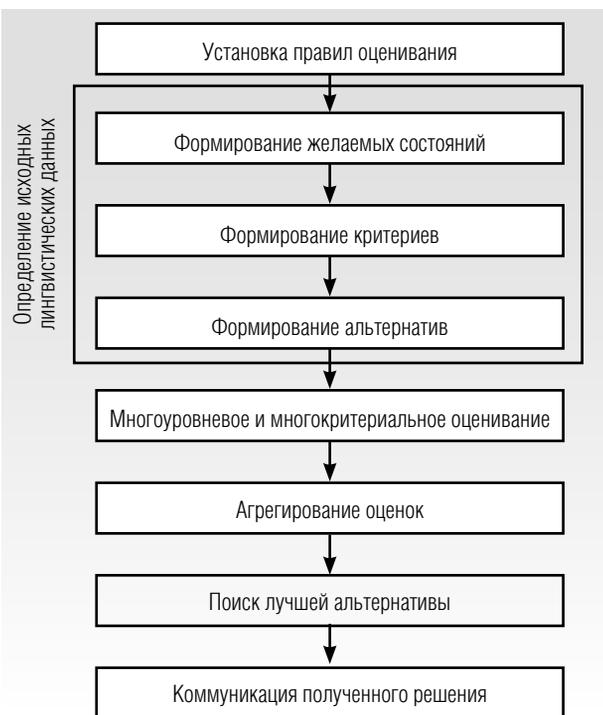


Рис. 1. Предлагаемая методология решения слабоструктурированных проблем в условиях неопределенности контекста и нечетких оценок

4. Многоуровневое и многокритериальное оценивание:

- а. сбор оценок;
- б. поиск лучшей альтернативы;
- с. коммуникация полученного решения.

### 2.2. Агрегирование информации

После того, как критерии и альтернативы были определены, все эксперты начинают давать оценки для каждой альтернативы по всем заданным критериям.

Пусть  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  – список альтернатив,  $c = \{c_1, c_2, \dots, c_M\}$  – список критериев,  $e = \{e_1, e_2, \dots, e_T\}$  – список экспертов. Мы предполагаем, что каждый эксперт  $e_k$  может оценивать альтернативы, используя различные лингвистические шкалы  $S_{g_k}$  с гранулярностью  $g_k$ . В случае сравнительных оценок мы имеем грамматику  $G_H$ , которая также может быть использована для создания лингвистических оценок. Кроме того, критерии задаются для каждого уровня абстракции по принципу мета-решений ван Гига, то есть пусть  $l = \{l_1, l_2, \dots, l_Z\}$  – список всех уровней абстракции.

Общая последовательность шагов представлена на рисунке 2. Эти шаги описывают подготовку



Рис. 2. Структура шага «Агрегирование оценок» предложенной методологии

и агрегацию оценок, полученных от экспертов. В результате каждая альтернатива имеет итоговую оценку, которая используется для ранжирования и поиска лучшего решения. Ранжирование осуществляется в соответствии с правилами, определенными для сравнения "hesitant 2-tuple fuzzy sets".

**Шаг 1. Формирование матриц оценок в виде HFLTS.** Исходя из предположения, что эксперты могут давать оценки в различной форме, необходимо преобразовать их в единый формат. Оценки должны быть переведены в вид HFLTS, так как данный формат достаточно гибок для представления как точных, так и интервальных оценок. В результате для каждого эксперта получается матрица оценок

$$R_k = \left( T_{S_{g_k}}^{ij} \right)_{N \times M},$$

где  $T_{S_{g_k}}^{ij}$  – оценка экспертом  $e_k$   $i$ -й альтернативы по  $j$ -му критерию в форме HFLTS на шкале  $S_{g_k}$ .

**Шаг 2. Агрегация оценок на уровне критериев.** Во время данного шага рассчитывается аккумулярованная оценка по каждой альтернативе  $i$  на каждом уровне абстракции  $l$  и для каждого эксперта  $e_k$ . Оценка получается за счет агрегации оценок по каждому критерию на каждом уровне абстракции. Таким образом, для каждого эксперта получается следующая матрица:

$$T_i^j = MHTW A_{S_{g_k}}^p \left( T_{S_{g_k}}^v \right), \quad c_v \in I_j, \quad (4)$$

где  $i$  – индекс альтернативы;

$j$  – индекс уровня абстракции;

$p$  – вектор весов критериев,

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_M)^T, \quad p_j \geq 0, \quad \sum_{j=1}^M p_j = 1.$$

Здесь предлагается использовать оператор МНТ-МА, так как каждый критерий имеет заданный ему вес. Таким образом, для каждого эксперта получаем следующую матрицу решений:

$$R_k = \left( T_{S_{g_k}}^{ij} \right)_{N \times Z},$$

где  $T_{S_{g_k}}^{ij}$  – оценка эксперта  $e_k$   $i$ -й альтернативы на  $j$ -м уровне абстракции в форме HFLTS на шкале  $S_{g_k}$ .

**Шаг 3. Перевод оценок на уровни абстракции.**

Далее требуется агрегация оценок на каждом из уровней абстракции. Однако, выходом предыдущего шага является  $T$  матриц с оценками, каждая матрица размера  $N \times Z$ . Для того, чтобы осуществить агрегацию оценок по уровням абстракции, требуется сделать  $Z$  матриц с оценками, каждая размера  $N \times T$ , где  $N$  – число альтернатив и  $T$  – число критериев. Таким образом, для каждого уровня абстракции получаем следующую матрицу решений:

$$R_U = \left( T_{S_{g_k}}^{ij} \right)_{N \times T},$$

где  $T_{S_{g_k}}^{ij}$  – оценка на  $l_u$ -м уровне абстракции  $i$ -й альтернативы  $j$ -м экспертом в форме HFLTS на шкале  $S_{g_k}$ .

**Шаг 4. Агрегация оценок на уровне экспертов.**

На данном шаге осуществляется расчет аккумулярованной оценки на каждом уровне абстракции  $l_u$ , для каждой  $i$ -й альтернативы и для каждого эксперта. Пусть  $w$  – вектор весов значимости экспертов,

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_T)^T, \quad w_j \geq 0, \quad \sum_{j=1}^T w_j = 1.$$

Тогда для каждого уровня абстракции получается следующая матрица:

$$T_i^j = MHTW A_{S_{g_k}}^w \left( T_{S_{g_k}}^{i_1}, T_{S_{g_k}}^{i_2}, \dots, T_{S_{g_k}}^{i_T} \right), \quad (5)$$

где  $i$  – индекс альтернативы;

$j$  – индекс уровня абстракции.

Если вектор весов не задан, то веса могут быть рассчитаны автоматически:

$$m(i) = \begin{cases} w, & i = 1 \\ \left( 1 - \sum_{j=1}^{i-1} w \right) \times w, & 1 \leq i \leq T \\ 1 - \sum_{j=1}^{i-1} w, & i = x, \end{cases} \quad (6)$$

где  $w \in [0, 1)$  – заданная ЛПР доля оценки первого эксперта в сумме весов.

Таким образом, формируется матрица решений

$\mathbf{R}_k = \left( \mathbf{T}_{S_{sk}}^{ij} \right)_{N \times Z}$ , где  $\mathbf{T}_{S_{sk}}^{ij}$  – агрегированная оценка  $i$ -й альтернативы на  $j$ -м уровне абстракции в форме HFLTS на шкале  $S_{g_k}$ .

**Шаг 5. Агрегация оценок по уровням абстракции.**

На данном шаге формируется итоговая оценка  $i$ -й альтернативы в результате агрегирования оценок для этой альтернативы по всем уровням абстракции:

$$\mathbf{T}_i = \text{MHTWA}_{S_{sk}}^q \left( \mathbf{T}_{S_{sk}}^{i_1}, \mathbf{T}_{S_{sk}}^{i_2}, \dots, \mathbf{T}_{S_{sk}}^{i_Z} \right), \quad (7)$$

где  $i$  – индекс альтернативы;

$\mathbf{q}$  – вектор весов уровней абстракции,

$$\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_Z)^T, \quad q_j \geq 0, \quad \sum_{j=1}^Z q_j = 1.$$

Таким образом, получаем вектор оценок  $\mathbf{r} = \left( \mathbf{T}_{S_{sk}}^i \right)_N$ , где  $\mathbf{T}_{S_{sk}}^i$  – агрегированная оценка  $i$ -й альтернативы в форме HFLTS на шкале  $S_{g_k}$ .

В результате сформированы оценки, которые получились в результате пошагового агрегирования оценок экспертов по различным уровням абстракции. ЛПП может использовать как финальное решение, так и проследить то, как менялась оценка данной альтернативы на каждом шаге. Кроме того, легко вносить изменения в предложенную методологию: например, путем ограничения количества уровней абстракции, на которых должно осуществляться принятие решения.

**3. Демонстрация на примере**

Для демонстрации работы предлагаемого подхода авторами была выбрана сложная проблемная ситуация в рисовой промышленности в штате Чхаттисгарх (Индия) [32]. Рис – это один из основных продуктов Индии с точки зрения объемов потребления. Данный штат является основным источником необработанного риса в стране. Первый шаг изучения данной проблемной ситуации – описание текущего состояния.

**3.1. Описание текущего состояния**

В штате Чхаттисгарх рисовая промышленность подчиняется государству. Есть огромное число фермеров, большинство из которых – домашние хозяйства среднего и малого размера. Эти домашние хозяйства очень зависят от погодных условий и политики государства, направленной на скупку всего оставшегося нераспроданного за сезон риса по очень низкой цене с целью распределения среди бедных слоев на-

селения. Поэтому домашним хозяйствам приходится брать кредиты, и они часто оказываются банкротами из-за неспособности выплатить долги. Это приводит к сокращению доли рабочих, вовлеченных в рисовую промышленность. После выращивания риса, фермеры продают его мельникам. Мельники не торопятся продавать рис, так как государство будет скупать его по очень низким ценам в конце сезона. Они очищают необработанный рис и продают его через специальных торговых агентов. Мельничный бизнес имеет низкую прибыльность, и это влияет на сокращение количества фирм на рынке, оставляя на нем только больших игроков. Эти большие игроки договариваются о цене на рис и снижают ее почти до уровня себестоимости. Рис экспортировать нельзя по причине использования запрещенных удобрений, к тому же ухудшающих атмосферу. Общая политическая обстановка нестабильна.

**3.2. Описание желаемого состояния**

Домашние хозяйства получают субсидии от государства. Оставшийся нераспроданным рис покупается в конце сезона либо государством, либо мельниками по рыночной цене. Государство контролирует и запрещает создание монополий мельниками. Более того, активная экспортная политика позволяет мельникам получать большую прибыль. Внедрение инноваций позволяет избавиться от загрязняющих удобрений и открывает возможность экспортировать рис. Мельники имеют общий логистический пункт, для эффективного использования имеющихся транспортных ресурсов. Бедняки получают рис от государства, и это мотивирует их становиться фермерами. В результате высокая степень занятости снижает хаос на улицах.

Из-за большого числа аспектов данной проблемной ситуации существует множество альтернативных решений. Каждое альтернативное решение определяет набор действий, которые необходимо оценить по сформированным критериям. Предлагается специальная техника для генерации альтернативных решений:

1. Определение желаемого состояния промышленности на каждом уровне абстракции;
2. Определение критериев на каждом уровне абстракции;
3. Определение конкретных альтернативных решений, отталкиваясь от желаемого состояния.

В данном случае можно выделить следующих экспертов: представителя Министерства внутренних

Таблица 1.

Опыт экспертов, участвующих в оценивании

	MLA	ELA	SLA	LLA	PLA	EPLA	ETLA	ALA
DFD		X		X	X		X	X
DSP					X		X	X
F	X						X	X
M	X						X	X
SA		X					X	X
RT							X	X
E			X			X	X	X

дел (DFD), представителя Министерства по социальной политике (DSP), представителя фермеров (F), хозяина мельницы (M), торгового агента (SA), перевозчика риса (RT) и эколога (E).

Предполагается, что эксперты имеют опыт на следующих уровнях абстракции (таблица 1): управленческий (MLA), экономический (ELA), научный (SLA), юридический (LLA), политический (PLA), эпистемологический (EPLA), этический (ETLA), эстетический (ALA).

3.3. Агрегирование информации

Согласно предлагаемой методологии, следующие действия требуются для принятия взвешенного решения сложившейся проблемной ситуации.

**Шаг 1. Формулирование матриц оценок.** Поскольку HFLTS позволяет использовать различные лингвистические шкалы и отсутствует необходимость приводить оценки к единой шкале, единственное необходимое преобразование заключается в переводе всех оценок в форму HFLTS. Пусть эксперт дал оценку («хорошо», «очень хорошо»). Оценка может быть переведена в необходимую форму:  $\{(s_6^7, 0), (s_7^7)\}$ , где  $S^7 = \{s_1^7 - \text{очень плохо}, s_2^7 - \text{плохо}, s_3^7 - \text{почти плохо}, s_4^7 - \text{неплохо}, s_5^7 - \text{чуть лучше}, s_6^7 - \text{хорошо}, s_7^7 - \text{очень хорошо}\}$ .

Наконец, когда все оценки представлены в едином виде, можно начинать их агрегирование. Также необходимо определить веса критериев и уровней абстракции. В данном случае, исходя из того, что нет предположений о важности отдельных критериев или альтернатив, веса распределяются равномерно между альтернативами и критериями.

**Шаг 2. Агрегирование оценок на уровне критериев.** Первым шагом агрегации является получение оценки для каждого эксперта, альтернативы и уров-

Таблица 2.

Оценки DFD по альтернативе A.ETLA.1

	Критерии на уровне абстракции PLA		
	C.PLA.1	C.PLA.2	C.PLA.3
A.ETLA.1	$\{(s_3^9)\}$	$\{(s_6^9)\}$	$\{(s_4^9)\}$

ня абстракции. Агрегация осуществляется по критериям, которые относятся к одному уровню абстракции. В примере выше предполагается, что эксперт из Министерства внутренних дел (DFD) дал следующие оценки альтернативе A.ETLA.1 (Таблица 2) на политическом уровне абстракции (PLA).

Пусть веса критериев одинаковые:  $w = (0,33, 0,33, 0,33)$ . Для расчета агрегированного значения используется оператор MHTWA:

$$MHTWA_{S^{9t}}^w \left( \{(s_3^9)\}, \{(s_6^9)\}, \{(s_4^9)\} \right) = \{(s_4^7, 0,33)\}$$

**Шаг 3. Перевод оценок на уровни абстракции.** Данный шаг представляет собой техническую трансформацию имеющихся матриц и описан в шаге 3 предлагаемой методологии.

**Шаг 4. Агрегация оценок на уровне экспертов.** На этом шаге рассчитывается аккумулированное значение для каждой альтернативы на каждом уровне абстракции. Свертка осуществляется по оценкам экспертов. В данном случае веса распределяются между экспертами таким образом, что эксперт, давший наиболее точную оценку, получает наибольший вес.

**Шаг 5. Агрегация оценок по уровням абстракции.** На данном шаге оценки аккумулируются по уровням абстракции с целью получения агрегированного значения для каждой альтернативы. Таблица 3 содержит результаты агрегации оценок по описанному выше проблемному сценарию.

Таблица 3.

**Упорядоченный список альтернатив и аккумулярованных оценок**

	Имя альтернативы	Оценка
A.ELA.7	Увеличить урожай за счет создания системы орошения	$\{(s_6^7)\}$
A.SLA.3	Снизить объемы использования удобрений	$\{(s_4^7)\}$
A.ELA.2	Повысить налоги фермерам	$\{(s_4^7)\}$
A.ELA.1	Повысить субсидии фермерам	$\{(s_4^7)\}$

**Шаг 6. Поиск лучшей альтернативы.** Список из агрегированных оценок должен быть отсортирован согласно правилам сравнения структур «hesitant 2-tuple set». В данном случае лучшим решением становится A.ELA.7 «Увеличить урожай за счет создания системы орошения».

**Шаг 7. Коммуникация найденного решения.** Всем участникам процесса принятия решения объявляется о найденном решении. Важно отметить, что для того, чтобы найти решение, многочисленные альтернативные решения оценивались по различным критериям, а также что агрегация осуществлялась отдельно на каждом уровне абстракции, представляющем важный аспект проблемной ситуации.

**4. Детали реализации**

**4.1. Архитектура MAC и ее реализация**

Для валидации предлагаемого метода принятия решений была разработана экспертная система, в рамках которой была проведена симуляция описанного выше сценария. Решение было реализовано как многоагентная программная система (MAC) с архитектурой, выстроенной в соответствии с моделью убеждений, желаний и намерений [33]. Данная модель представляет собой набор важных принципов выстраивания MAC и активно применяется в различных проектах, таких как моделирование логистических цепей [34], транспортная логистика [35] и составление расписания [36]. Для реализации была использована технологическая платформа JASON<sup>1</sup> и ее расширение – JaCaMo фреймворк<sup>2</sup>. JASON предоставляет мощный интерпретатор AgentSpeak и основные базовые блоки для взаимодействия агентов, в то время как JaCaMo предоставляет такие ар-

<sup>1</sup> <http://jason.sourceforge.net/wp/>  
<sup>2</sup> <http://jacamo.sourceforge.net/>

тефакты окружения, как ставки, задачи и т.д. Новые численные и лингвистические алгоритмы были реализованы на языке программирования Java и интегрированы в агента-координатора JASON с помощью прокси Java-AgentSpeak. Архитектура MAC представлена на *рисунке 3*. Детальное объяснение на уровне имплементации представлено на *рисунке 4*.

В данной системе существует два типа агентов: координатор и эксперт. В то время, как достаточно иметь одного координатора для управления процессом принятия решений, существует несколько сущностей экспертов, которые предоставляют оценки, основываясь на проблемном контексте. Количество экспертов в симуляции напрямую связано с количеством экспертов в реальной жизни.

Координатор – это агент, у которого есть две основные цели: инициирование процесса принятия решений, а также аккумулярование и нахождение лучшего альтернативного решения на основе предоставленных оценок. В то же время координатор активирует основную цель экспертов через публикацию задачи в артефакте «Общее окружение». Эксперты достигают своей цели через оценивание заданной проблемы на основе альтернатив и критериев, предоставленных координатором. Как только все оценки получены, координатор пытается выполнить свою вторую задачу – поиск лучшей альтернативы. У экспертов, напротив, цель всего одна – предоставление оценок через публикацию своих оценок в «Общем окружении». Оба типа агентов (эксперт и координатор) подписаны на сущность «Победитель» в «Общем окружении» и получают оповещение о результатах, когда поиск лучшего решения заканчивается.

**4.2. Описание принятия решения в многоагентной экспертной системе**

Алгоритм принятия решения в многоагентной экспертной системе соответствует предлагаемой в данной работе методологии. На шаге подготовки координатор знакомит экспертов с артефактом «Общее окружение», в котором они будут вместе работать. Эксперты также подготавливаются к работе через подписку на исполнение будущих задач. Как только эксперты получают оповещение о появлении новой задачи, они начинают предоставлять свои оценки по заданной проблемной ситуации. Также эксперты подписываются на оповещения о выигравшей альтернативе, чтобы узнать о результатах агрегирования. Когда вся подготовка завершена и эксперты ожидают появления задачи, координатор публикует

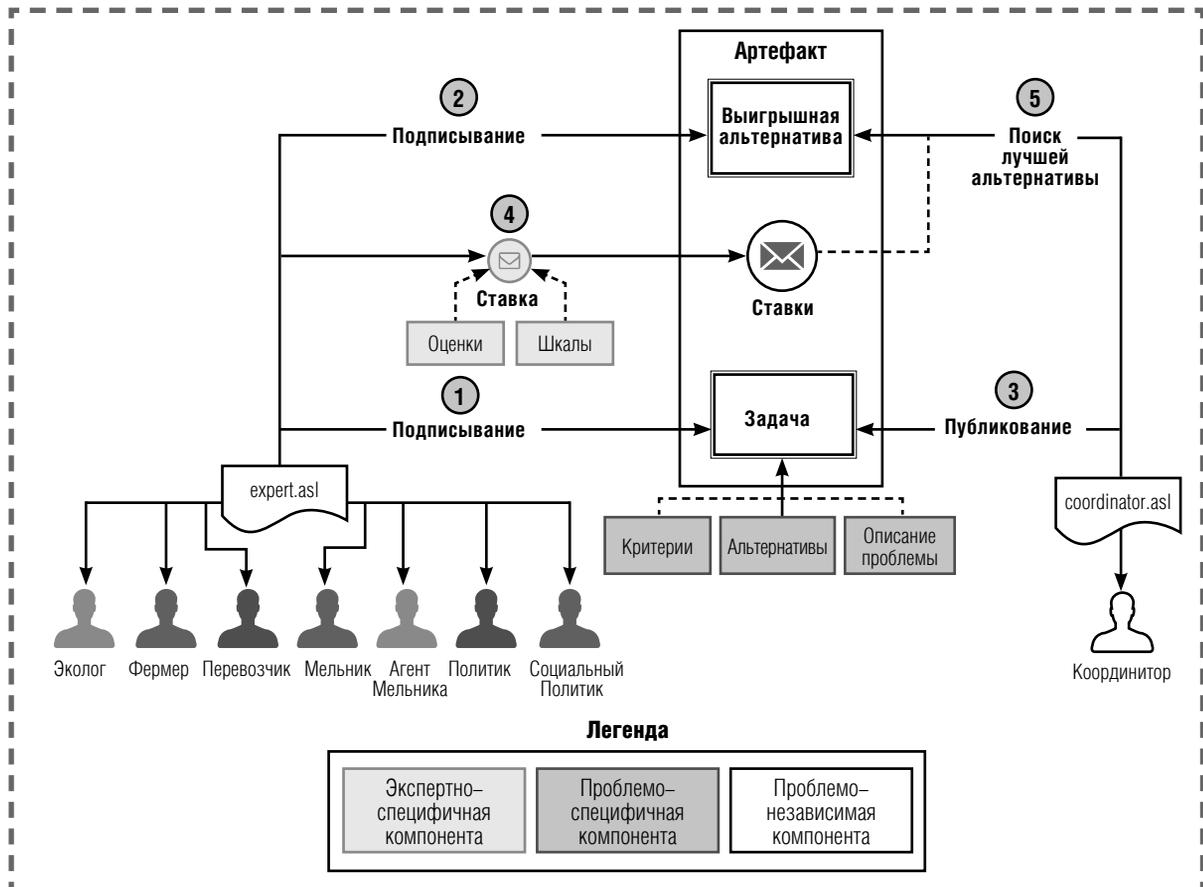


Рис. 3. Мультиагентная архитектура разработанной системы

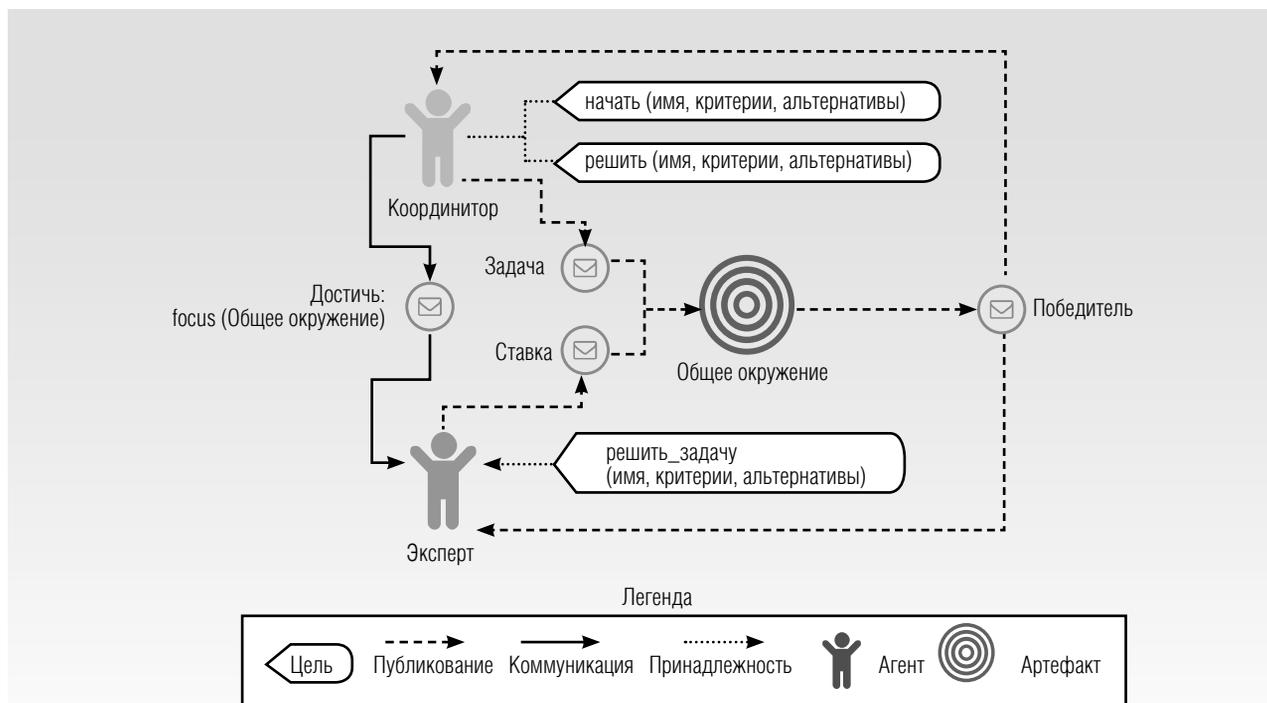


Рис. 4. Реализация системы средствами JASON

ее. Задача содержит описание проблемы, альтернатив и критериев, т.е. всю необходимую информацию для анализа экспертами и оценивания всех альтернатив по заданным критериям.

После того, как эксперты оценили все альтернативы, они публикуют ставки, которые содержат эти оценки, а также описание шкал, в которых эти оценки осуществлялись. Все ставки обрабатываются и хранятся в артефакте «Общее окружение». Координатор либо ждет, чтобы все эксперты предоставили свои оценки, либо по истечении заданного интервала закрывает прием ставок. Как только прием заканчивается, координатор начинает аккумулировать оценки в соответствии с формальным алгоритмом, описанным выше. По окончании вычислений, выигравшая альтернатива публикуется, и все эксперты узнают об этом. На этом симуляция заканчивается, однако вся МАС остается работающей в ожидании новых запросов.

Реализация алгоритмов агрегации гетерогенных оценок была выполнена в соответствии с современными корпоративными стандартами разработки программного обеспечения. Более того, авторы предложили формат описания проблемной ситуации и ее важных аспектов (критериев, альтернатив, уровней абстракции, экспертов). Программная реализация прототипа доступна на GitHub<sup>3</sup> и содержит всю систему, описанную на *рисунке 4*. Она может быть расширена для более общих случаев.

### Заключение

В рамках данной работы было проведено исследование предметной области в соответствии с методологией Design Science [37]. Анализ существующих подходов к многокритериальному лингвистическому принятию решений показал существующие недостатки и проблемы этих методов в применении к проблемам, которые описываются гетерогенной информацией и неопределенностью контекста. С одной стороны, существуют традиционные алгоритмы принятия решений, которые помогают экспертам определить лучшую альтернативу, однако качественные оценки при этом не учитываются. С другой стороны, методы лингвистического принятия решений предполагают использование гетерогенных оценок, однако, они могут быть с трудом применены к решению слабоструктурированных проблем, ввиду отсутствия единой методологии для поиска лучшей

альтернативы. Более того, такие слабоструктурированные проблемы характеризуются большим числом стейкхолдеров.

В предлагаемом подходе происходит расширение существующих методов лингвистического принятия решений с помощью принципа мета-решений Дж. ван Гига, в соответствии с которым предлагается анализировать проблему на восьми различных уровнях абстракции.

Разработанный подход также имеет ряд улучшений по сравнению с существующими методами. Как уже отмечалось, заметным недостатком существующих подходов является их фокус либо только на количественных оценках (например, TOPSIS, ELECTRE, VIKOR и т.д.), либо только на качественных [25, 26, 29]. Очень небольшое число подходов предполагает работу с обоими типами оценок [13] или нечеткими множествами [12]. Предлагаемый подход изначально выстраивается из соображений работы с обоими типами оценок. В то же время современные методологии не учитывают тот факт, что эксперты различаются в своих знаниях в различных предметных областях, например, политике или экономике. Более того, разработанное решение предлагает надежный механизм автоматического распределения весов оценок экспертов в зависимости от точности их оценок. Также в ходе работы был предложен формат описания слабоструктурированных проблем. Существующие подходы демонстрируются на искусственных примерах, далеких от реальности. Апробация предлагаемой методологии осуществлялась на существующей проблеме, которая затрагивает большое число стейкхолдеров. Кроме того, была осуществлена реализация данного подхода, а также алгоритмов агрегации лингвистических оценок, поскольку, несмотря на активное развитие самих методов лингвистического принятия решений, открытые решения отсутствуют. Наконец, реализация осуществлялась в виде многоагентной системы (МАС). Это позволяет ЛПР анализировать поведение экспертов и особенности их взаимодействия (например, можно учитывать фактор доверия между экспертами). Все вышеперечисленные факторы учтены при разработке новой методологии. Насколько известно авторам работы, аналогичных решений пока не существует, и предложенная методология является важной инновацией в контексте слабоструктурированных проблем с большим числом стейкхолдеров и альтернатив, то есть проблем из реальной жизни. Разработанная экспертная система выбрала решение

<sup>3</sup> <https://github.com/demid5111/lingvo-dss-bdi>

проблемы с рисовой промышленностью в штате Чхаттисгарх (Индия).

Важным шагом любого исследования является определение дальнейших направлений работы. Авторы предлагают следующие направления исследований, позволяющие устранить недостатки предложенного подхода:

1. Учет фактора доверия между экспертами;
2. Учет разности онтологий экспертов. Эта разность выражается как разное понимание одних и тех же лингвистических концептов у разных экспертов (в предлагаемой методологии, авторы предполагают, что онтологии у всех экспертов одинаковы). ■

### Литература

1. Zopounidis C., Doumpos M. Intelligent decision aiding systems based on multiple criteria for financial engineering. Springer Science & Business Media, 2000.
2. Xu Z. Linguistic decision making. Theory and methods. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
3. Martinez L., Rodriguez R., Herrera F. The 2-tuple linguistic model: Computing with words in decision making. Cham: Springer, 2015.
4. Van Gigh J. Metadecisions: Rehabilitating epistemology. Springer Science & Business Media, 2003.
5. Dehe B., Bamford D. Development, test and comparison of two multiple criteria decision analysis (MCDA) models: A case of healthcare infrastructure location // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No 19. P. 6717–6727.
6. Piltan M., Sowlati T. A multi-criteria decision support model for evaluating the performance of partnerships // Expert Systems with Applications. 2016. Vol. 45. P. 373–384.
7. Alemi-Ardakani M., Milani A.S., Yannacopoulos S., Shokouhi G. On the effect of subjective, objective and combinative weighting in multiple criteria decision making: A case study on impact optimization of composites // Expert Systems with Applications. 2016. Vol. 46. P. 426–438.
8. Senthil S., Srirangacharyulu B., Ramesh A. A robust hybrid multi-criteria decision making methodology for contractor evaluation and selection in third-party reverse logistics // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41. No 1. P. 50–58.
9. Markou C., Koulinas G.K., Vavatsikos A.P. Project resources scheduling and leveling using multi-attribute decision models: Models implementation and case study // Expert Systems with Applications. 2017. Vol. 77. P. 160–169.
10. Cid-Lopez A., Hornos M.J., Carrasco R.A., Herrera-Viedma E. Applying a linguistic multi-criteria decision-making model to the analysis of ICT suppliers' offers // Expert Systems with Applications. 2016. Vol. 57. P. 127–138.
11. Skorupski J. Multi-criteria group decision making under uncertainty with application to air traffic safety // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41. No 16. P. 7406–7414.
12. Igoulalene I., Benyoucef L., Tiwari M.K. Novel fuzzy hybrid multi-criteria group decision making approaches for the strategic supplier selection problem // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No 7. P. 3342–3356.
13. Linguistic multi-criteria decision-making model with output variable expressive richness / A. Cid-Lopez [et al.] // Expert Systems with Applications. 2017. Vol. 83. P. 350–362.
14. Espinilla M., Liu J., Martinez L. An extended hierarchical linguistic model for decision making problems // Computational Intelligence. 2011. Vol. 27. No 3. P. 489–512.
15. Herrera F., Herrera-Viedma E. Linguistic decision analysis: steps for solving decision problems under linguistic information // Fuzzy Sets and Systems. 2000. Vol. 115. No 1. P. 67–82.
16. Linguistic decision making: Tools and applications / L. Martinez [et al.] // Information Sciences. 2009. Vol. 179. No 14. P. 2297–2298.
17. Yager R.R. Concepts, theory, and techniques a new methodology for ordinal multiobjective decisions based on fuzzy sets // Decision Sciences. 1981. Vol. 12. No 4. P. 589–600.
18. Martinez L., Da R., Herrera F. Computing with words in decision support systems: An overview on models and applications // International Journal of Computational Intelligence Systems. 2010. Vol. 3. No 4. P. 382–395.
19. Martinez L., Herrera F. An overview on the 2-tuple linguistic model for computing with words in decision making: Extensions, applications and challenges // Information Sciences. 2012. No 207. P. 1–18.
20. Yager R.R. An approach to ordinal decision making // International Journal of Approximate Reasoning. 1995. Vol. 12. No 3–4. P. 237–261.
21. Xu Z. A method based on linguistic aggregation operators for group decision making with linguistic preference relations // Information sciences. 2004. Vol. 166. No 1–4. P. 19–30.
22. Herrera F., Herrera-Viedma E., Martinez L. A fusion approach for managing multi-granularity linguistic term sets in decision making // Fuzzy Sets and Systems. 2000. Vol. 114. No 1. P. 43–58.
23. Herrera F., Martinez L. A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multigranular hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision-making // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). 2001. Vol. 31. No 2. P. 227–234.
24. Zadeh L. A theory of approximate reasoning // Machine Intelligence. 1979. No 9. P. 149–194.
25. Herrera F., Martinez L. A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2000. Vol. 8. No 6. P. 746–752.
26. Wei C., Huchang L. A multigranularity linguistic group decision making method based on hesitant 2 tuple sets // International Journal of Intelligent Systems. 2016. Vol. 31. No 6. P. 612–634.
27. Liu H., Le J., Martinez L. A dynamic multi-criteria decision making model with bipolar linguistic term sets // Expert Systems with Applications. 2018. Vol. 95. P. 104–112.
28. Torra V. Hesitant fuzzy sets // International Journal of Intelligent Systems. 2010. Vol. 25. No 6. P. 529–539.

29. Rodriguez R., Martinez L., Herrera F. Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2012. Vol. 20. No 1. P. 109–119.
30. Mardani A., Jusoh A., Zavadkas E.K. Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – Two decades review from 1994 to 2014 // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No 8. P. 4126–4148.
31. Nguyen H.-T., Dawal S.Z.M., Nukman Y., Aoyama H. A hybrid approach for fuzzy multi-attribute decision making in machine tool selection with consideration of the interactions of attributes // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41. No 6. P. 3078–3090.
32. Garg M. Cases on supply chain and distribution management: Issues and principles. IGI Global, 2012.
33. Bratman M. Intention, plans, and practical reason. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1987.
34. Baykasoglu A., Kaplanoglu V. An application oriented multi-agent based approach to dynamic load/truck planning // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No 15. P. 6008–6025.
35. Satunin S., Babkin E. A multi-agent approach to intelligent transportation systems modeling with combinatorial auctions // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41. No 15. P. 6622–6633.
36. Babkin E., Abdulrab H., Babkina T. AgentTime: A distributed multi-agent software system for university's timetabling // From System Complexity to Emergent Properties. Berlin: Springer, 2009. P. 141–154.
37. Peffers K., Tuunanen T., Rothenberger M.A., Chatterjee S. A design science research methodology for information systems research // Journal of Management Information Systems. 2007. Vol. 24. No 3. P. 45–77.

### Об авторах

**Демидовский Александр Владимирович**

аспирант кафедры информационных систем и технологий, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/20;  
E-mail: ademidovskij@hse.ru

**Бабкин Эдуард Александрович**

кандидат технических наук, PhD (Computer Science);  
профессор кафедры информационных систем и технологий, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/20;  
E-mail: eababkin@hse.ru

---

## Developing a distributed linguistic decision making system

**Alexander V. Demidovskij**

E-mail: ademidovskij@hse.ru

**Eduard A. Babkin**

E-mail: eababkin@hse.ru

National Research University Higher School of Economics  
Address: 25/12, Bolshaya Pecherskaya Street, Nizhny Novgorod 603155, Russia

**Abstract**

In this paper, a new approach to multi-criteria decision making is proposed based on linguistic information taken from a group of autonomous experts. This approach provides an opportunity to better analyze and find solutions for poorly structured problems with consideration of their multidimensionality and uncertainty of context. One of the key components of the proposed methodology is the hierarchy of abstractions proposed by John van Gigch, which presents the levels of alternative solutions and criteria for assessing them. By integrating this hierarchy, it is claimed that the problem situation can be comprehensively analyzed. Therefore, we call our approach multi-level multi-attribute linguistic decision making (ML–MA–LDM).

Our approach includes a methodology that is the particular sequence of steps and the mathematical model, as well as the method to automatically distribute weights of experts' assessments depending on their confidence level. Furthermore, this novel approach supports both qualitative and quantitative assessments that are strictly propagated through the complete decision making process across all hierarchical levels of abstraction. Finally, we demonstrate a prototype of a multi-agent expert system for solving poorly structured models with regard to their context uncertainty and multiple aspects. This prototype plays the role of simulation engine for competitive solutions and for verification purposes of the proposed methodology.

Capabilities of the developed approach and the prototype were demonstrated in a practical case of solving a complex conflict problem of strategic management, as well as rigorous analysis of the proposed approach strengths and weakness that defines the direction for further research.

**Key words:** linguistic decision making; multi-criteria choice; meta-decisions; multi-agent systems; fuzzy logic; poorly structured problems; decision support systems.

**Citation:** Demidovskij A.V., Babkin E.A. (2019) Developing a distributed linguistic decision making system. *Business Informatics*, vol. 13, no 1, pp. 18–32.

**DOI:** 10.17323/1998-0663.2019.1.18.32

## References

- Zopounidis C., Doumpos M. (2000) *Intelligent decision aiding systems based on multiple criteria for financial engineering*. Springer Science & Business Media.
- Xu Z. (2012) *Linguistic decision making. Theory and methods*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Martinez L., Rodriguez R., Herrera F. (2015) *The 2-tuple linguistic model: Computing with words in decision making*. Cham: Springer.
- Van Gigch J. (2003) *Metadecisions: Rehabilitating epistemology*. Springer Science & Business Media.
- Dehe B., Bamford D. (2015) Development, test and comparison of two multiple criteria decision analysis (MCDA) models: A case of healthcare infrastructure location. *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no 19, pp. 6717–6727.
- Piltan M., Sowlati T. (2016) A multi-criteria decision support model for evaluating the performance of partnerships. *Expert Systems with Applications*, vol. 45, pp. 373–384.
- Alemi-Ardakani M., Milani A.S., Yannacopoulos S., Shokouhi G. (2016) On the effect of subjective, objective and combinative weighting in multiple criteria decision making: A case study on impact optimization of composites. *Expert Systems with Applications*, vol. 46, pp. 426–438.
- Senthil S., Srirangacharyulu B., Ramesh A. (2014) A robust hybrid multi-criteria decision making methodology for contractor evaluation and selection in third-party reverse logistics. *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no 1, pp. 50–58.
- Markou C., Koulinas G.K., Vavatsikos A.P. (2017) Project resources scheduling and leveling using multi-attribute decision models: Models implementation and case study. *Expert Systems with Applications*, vol. 77, pp. 160–169.
- Cid-Lopez A., Hornos M.J., Carrasco R.A., Herrera-Viedma E. (2016) Applying a linguistic multi-criteria decision-making model to the analysis of ICT suppliers' offers. *Expert Systems with Applications*, vol. 57, pp. 127–138.
- Skorupski J. (2014) Multi-criteria group decision making under uncertainty with application to air traffic safety. *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no 16, pp. 7406–7414.
- Igoulalene I., Benyoucef L., Tiwari M.K. (2015) Novel fuzzy hybrid multi-criteria group decision making approaches for the strategic supplier selection problem. *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no 7, pp. 3342–3356.
- Cid-Lopez A., Hornos M.J., Carrasco R.A., Herrera-Viedma E., Chiclana F. (2017) Linguistic multi-criteria decision-making model with output variable expressive richness. *Expert Systems with Applications*, vol. 83, pp. 350–362.
- Espinilla M., Liu J., Martinez L. (2011) An extended hierarchical linguistic model for decision-making problems. *Computational Intelligence*, vol. 27, no 3, pp. 489–512.
- Herrera F., Herrera-Viedma E. (2000) Linguistic decision analysis: steps for solving decision problems under linguistic information. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 115, no 1, pp. 67–82.
- Martinez L., Ruan D., Herrera F., Herrera-Viedma E., Wang P.P. (2009) Linguistic decision making: Tools and applications. *Information Sciences*, vol. 179, no 14, pp. 2297–2298.
- Yager R.R. (1981) Concepts, theory, and techniques a new methodology for ordinal multiobjective decisions based on fuzzy sets. *Decision Sciences*, vol. 12, no 4, pp. 589–600.
- Martinez L., Da R., Herrera F. (2010) Computing with words in decision support systems: An overview on models and applications. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 3, no 4, pp. 382–395.
- Martinez L., Herrera F. (2012) An overview on the 2-tuple linguistic model for computing with words in decision making: Extensions, applications and challenges. *Information Sciences*, no 207, pp. 1–18.
- Yager R.R. (1995) An approach to ordinal decision making. *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 12, no 3–4, pp. 237–261.

21. Xu Z. (2004) A method based on linguistic aggregation operators for group decision making with linguistic preference relations. *Information sciences*, vol. 166, no 1–4, pp. 19–30.
22. Herrera F., Herrera-Viedma E., Martínez L. (2000) A fusion approach for managing multi-granularity linguistic term sets in decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 114, no 1, pp. 43–58.
23. Herrera F., Martínez L. (2001) A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multigranular hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision-making. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 31, no 2, pp. 227–234.
24. Zadeh L. (1979) A theory of approximate reasoning. *Machine Intelligence*, no 9, pp. 149–194.
25. Herrera F., Martínez L. (2000) A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 8, no 6, pp. 746–752.
26. Wei C., Huchang L. (2016) A multigranularity linguistic group decision-making method based on hesitant 2-tuple sets. *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 31, no 6, pp. 612–634.
27. Liu H., Le J., Martínez L. (2018) A dynamic multi-criteria decision making model with bipolar linguistic term sets. *Expert Systems with Applications*, vol. 95, pp. 104–112.
28. Torra V. (2010) Hesitant fuzzy sets. *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 25, no 6, pp. 529–539.
29. Rodríguez R., Martínez L., Herrera F. (2012) Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 20, no 1, pp. 109–119.
30. Mardani A., Jusoh A., Zavadkas E.K. (2015) Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – Two decades review from 1994 to 2014. *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no 8, pp. 4126–4148.
31. Nguyen H.-T., Dawal S.Z.M., Nukman Y., Aoyama H. (2014) A hybrid approach for fuzzy multi-attribute decision making in machine tool selection with consideration of the interactions of attributes. *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no 6, pp. 3078–3090.
32. Garg M. (2012) *Cases on supply chain and distribution management: Issues and principles*. IGI Global.
33. Bratman M. (1987) *Intention, plans, and practical reason*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
34. Baykasoglu A., Kaplanoglu V. (2015) An application oriented multi-agent based approach to dynamic load/truck planning. *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no 15, pp. 6008–6025.
35. Satunin S., Babkin E. (2014) A multi-agent approach to intelligent transportation systems modeling with combinatorial auctions. *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no 15, pp. 6622–6633.
36. Babkin E., Abdulrab H., Babkina T. (2009) AgentTime: A distributed multi-agent software system for university's timetabling. *From System Complexity to Emergent Properties*. Berlin: Springer, pp. 141–154.
37. Peffer K., Tuunanen T., Rothenberger M.A., Chatterjee S. (2007) A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, vol. 24, no 3, pp. 45–77.

### About the authors

#### Alexander V. Demidovskij

Doctoral Student, Department of Information Systems and Technologies, National Research University Higher School of Economics, 25/12, Bolshaya Pecherskaya Street, Nizhny Novgorod 603155, Russia;  
E-mail: ademidovskij@hse.ru

#### Eduard A. Babkin

Cand. Sci. (Tech.), PhD (Computer Science);  
Professor, Department of Information Systems and Technologies, National Research University Higher School of Economics, 25/12, Bolshaya Pecherskaya Street, Nizhny Novgorod 603155, Russia;  
E-mail: eababkin@hse.ru