

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СОГЛАСОВАНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ДЕЛФИ

Ключевые слова: метод Делфи, экспертные оценки, показатель степени важности, анализ согласованности.

ВВЕДЕНИЕ

При реализации инновационных проектов одной из наиболее используемых в мире технологий является методология предвидения, позволяющая представить процесс принятия решений по отношению к поведению рассматриваемой сложной системы в будущем [1]. При построении альтернатив сценариев применяются методы качественного анализа, которые, как правило, включают формирование опросных форм, согласование экспертных оценок, обоснование достоверности полученных результатов.

В государственных программах развития многих стран на протяжении десятилетий для разработки стратегии на уровне мегаполисов, регионов и государства в целом используется метод Делфи [2]. Однако в настоящее время, несмотря на актуальность этого метода, практически отсутствуют математическая формализация и единый системный подход к формированию согласованных экспертных оценок.

В данной статье приводится формализация процесса согласования экспертных мнений в терминах нечетких интервальных оценок и интервальной метрики в целях обеспечения возможности проведения опроса в режиме on-line и построения обоснованных альтернатив сценариев на основе человеко-машинной платформы сценарного анализа.

1. СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Метод Делфи — процесс экспертного оценивания, состоящий из двух или более туров, в целях получения суждений о проблемах, которые характеризуются неточными, неполными знаниями и ориентированы на будущее. Главная направленность использования данного метода — оценка среднесрочных и долгосрочных проблем для выявления возможных масштабов тех или иных событий в фиксированный период времени, движущих сил, ограничений, факторов, экономических и социальных последствий определенных тенденций [3].

По каждому сформированному кластеру в режиме on-line привлекается группа профессиональных экспертов. На основании предоставленных материалов и необходимой дополнительной информации о предметной области они формируют совокупность гипотез о возможных сценариях развития будущего. При этом эксперты работают независимо друг от друга во избежание лишних дебатов и влияния авторитетных участников. Анонимность опроса является одним из основных факторов популярности и эффективности метода Делфи.

После процедуры формирования экспертных оценок и анализа их согласованности в целях повышения уровня обоснованности экспертных мнений при необходимости возможно проведение следующего тура. В таком случае эксперты знакомятся с результатами сформированных согласованных экспертных оценок предыдущего тура и осуществляется «обратная связь», т.е. они корректируют свои суждения.

Основные этапы экспертного оценивания на основе метода Делфи представлены на рис. 1.

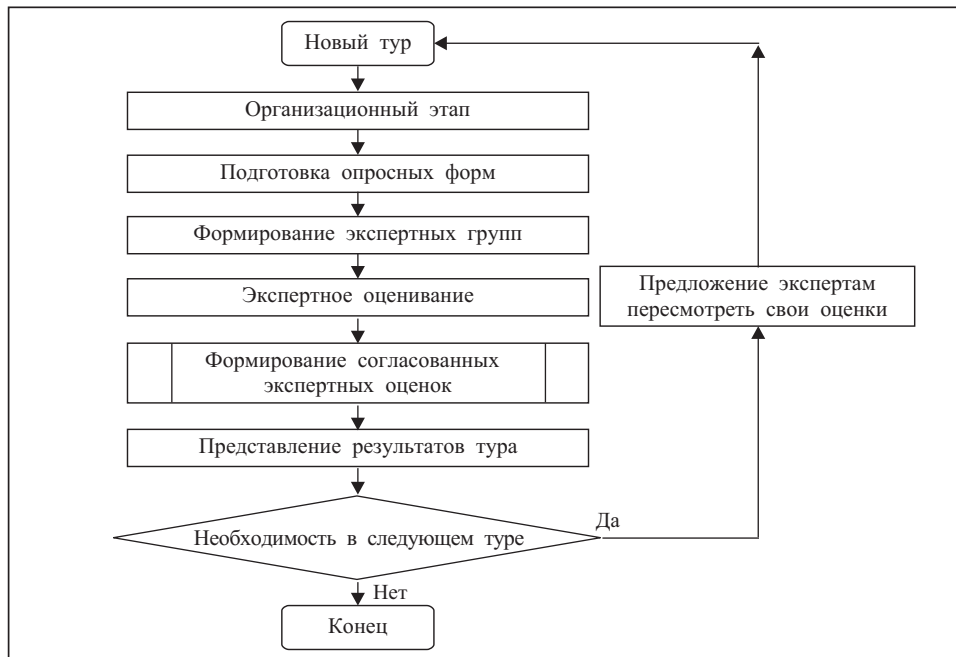


Рис. 1. Структурная схема алгоритма экспертного оценивания на основе метода Делфи

Характерной особенностью метода Делфи является уменьшение разброса оценок с каждым последующим туром и их растущая согласованность. Для реализации процедуры Делфи разработана формализация математического аппарата, применение которого позволяет с требуемой практической точностью выполнить согласование экспертных оценок для достижения консенсуса.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Приведем математическую постановку задачи для общего случая [4].

Рассмотрим конечное множество объектов

$$O = \{O_n | n = \overline{1, N}\}.$$

Каждый объект характеризуется конечным множеством показателей

$$I_n = \{I_{np} | p = \overline{1, P_n}\} \quad \forall O_n \in O.$$

Для каждого показателя объекта формируется группа экспертов

$$E_{np} = \{E_{npk} | k = \overline{1, K_{np}}\} \quad \forall I_{np} \in I_n.$$

Для каждого эксперта оценивается уровень компетентности

$$\chi_{np} = \{\chi_{npk} | k = \overline{1, K_{np}} \quad \forall E_{npk} \in E_{np}\}.$$

Каждый эксперт проводит экспертизу на основе предложенной ему информации в виде базовой 7-уровневой шкалы Миллера [5] качественного и количественного оценивания показателей (табл. 1). Принимая во внимание анонимность процедуры опроса, т.е. отсутствие обмена информацией между экспертами, наиболее вероятно случайное распределение оценок каждого показателя почти на всем интервале $[0; 1]$ s -го уровня шкалы.

Оценка k -м экспертом p -го показателя n -го объекта указывается для каждого уровня $s \in [1; S]$ в виде множества $Q_{npk} = \{Q_{npks} | s = \overline{1, S}\}$, определяемого шкалой оценивания. В общем случае оценка Q_{npks} ставится в соответствие каждому s -му

уровню, который принимает значения середины интервалов $[x_s^-; x_s^+] \in [0; 1]$, т.е. $x_s \in (0,07; 0,21; 0,36; 0,5; 0,64; 0,79; 0,93)$.

Т а б л и ц а 1

Номер уровня, s	Качественная характеристика s -го уровня	Количественная характеристика s -го уровня	Оценка показателя объекта, μ_{npk}	Оценка показателя уверенности эксперта, ν_{npk}
1	Чрезвычайно низкий	$[x_1^-; x_1^+]$	μ_{npk1}	ν_{npk1}
2	Очень низкий	$[x_2^-; x_2^+]$	μ_{npk2}	ν_{npk2}
3	Низкий	$[x_3^-; x_3^+]$	μ_{npk3}	ν_{npk3}
4	Средний	$[x_4^-; x_4^+]$	μ_{npk4}	ν_{npk4}
5	Высокий	$[x_5^-; x_5^+]$	μ_{npk5}	ν_{npk5}
6	Очень высокий	$[x_6^-; x_6^+]$	μ_{npk6}	ν_{npk6}
7	Чрезвычайно высокий	$[x_7^-; x_7^+]$	μ_{npk7}	ν_{npk7}

Оценка Q_{npk} — совокупность пар (μ_{npk}, ν_{npk}) , где μ_{npk} — мнение эксперта о возможности нахождения значения p -показателя для s -го уровня в интервале $[x_s^-; x_s^+]$, а ν_{npk} — показатель уверенности эксперта в своем мнении [4]. Функции μ_{npk} и ν_{npk} принимают значения из интервала $[0; 1]$.

Таким образом, результаты экспертизы всех показателей объектов всеми экспертами формируются системой экспертного оценивания в виде

$$Q = \{Q_{npk} | n = \overline{1, N}; p = \overline{1, P_n}; k = \overline{1, K_{np}}; s = \overline{1, S}\}.$$

Процедура формирования результатов оценки всех объектов в виде итогового массива создает информационную основу для принятия дальнейших решений.

В целях повышения уровня обоснованности экспертных оценок и снижения уровня субъективизма индивидуальных мнений рассматривается процесс согласования экспертных оценок для каждого показателя каждого объекта.

3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Экспертные оценки каждого показателя каждого объекта экспертизы целесообразно анализировать независимо как результат независимости их формирования экспертами. Структурная схема алгоритма формирования согласованных экспертных оценок на основе метода Делфи представлена на рис. 2.

Приведем детальное описание каждого этапа алгоритма.

3.1. Выбор метрики на множестве экспертных оценок. Одной из основных задач анализа экспертных оценок является определение их меры согласованности. Таким образом, на множестве Q_{np} экспертных оценок показателя I_{np} объекта O_n необходимо задать метрику $r_{np}: Q_{np} \times Q_{np} \rightarrow R$, определяющую для любой пары оценок $Q_{npk_i}, Q_{npk_j} \in Q_{np}; k_i, k_j \in K_{np}$, меру их различия как расстояние между ними:

$$r_{npk_i k_j} = \rho(Q_{npk_i}, Q_{npk_j}). \quad (1)$$

Рассмотрим метрическое пространство (X, ρ) и множество C всех подмножеств этого пространства. Для элементов $A, B \in C$ введем метрику

$$\rho_C(A, B) = \inf(\varepsilon | B \subset A_\varepsilon, A \subset B_\varepsilon),$$

где $A_\varepsilon, B_\varepsilon$ — соответственно окрестности множеств A и B . Если (X, ρ) — полное метрическое пространство, то (C, ρ_ε) также является полным метрическим пространством [6].

Рассмотрим пространство экспертных оценок с метрикой (1). Принимая во вни-

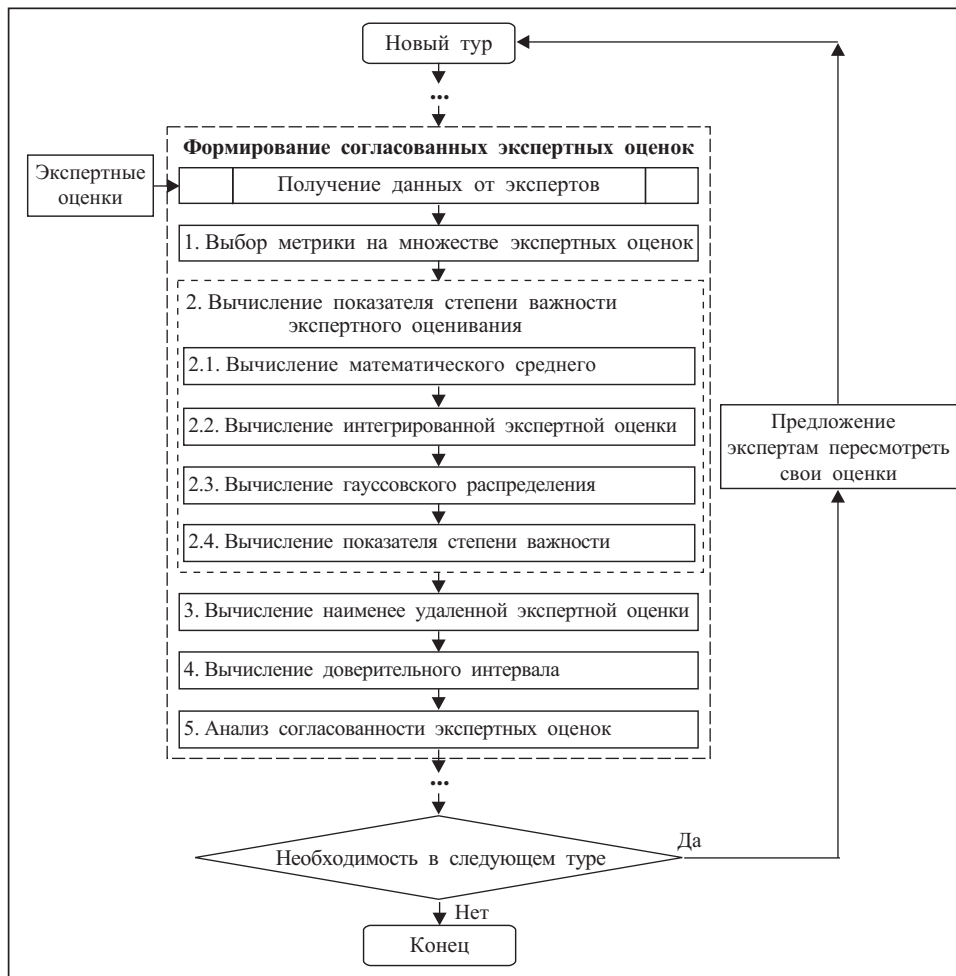


Рис. 2. Структурная схема алгоритма формирования согласованных экспертных оценок

мание, что v_{npks} — показатель уверенности эксперта в поставленной оценке, $(1 - v_{npks})$ — соответственно показатель его неуверенности, а $\mu_{npks}(1 - v_{npks})$ — взвешенная поправка оценки эксперта. С учетом сказанного вместо точечной оценки, представленной на рис. 3, а, получаем точечную оценку с отклонениями, графическое представление которой дано на рис. 3, б.

Для учета показателя уверенности v_{npks} при анализе согласованности экспертных оценок и формировании окончательного результата экспертизы каждой оценке Q_{npk} для каждого s -го уровня поставим в соответствие следующий интервал (рис. 3, в):

$$d_{npks} = [d_{npks}^-; d_{npks}^+] = [\max(0, (\mu_{npks} - \mu_{npks}(1 - v_{npks}))); \min(1, (\mu_{npks} + \mu_{npks}(1 - v_{npks})))]. \quad (2)$$

Таким образом, вместо множества точечных оценок Q_{np} получаем множество интервальных оценок

$$\bar{Q}_{np} = \{\bar{Q}_{npk} | k = \overline{1, K_{np}}\}, \quad \bar{Q}_{npk} = \{\{\bar{Q}_{npks}^-; \bar{Q}_{npks}^+\} | s = \overline{1, S}\}.$$

На множестве интервалов $D = \{d_{npks} | n = \overline{1, N}, p = \overline{1, P_n}, k = \overline{1, K_{np}}, s = \overline{1, S}\}$ введем интервальную метрику

$$\rho_{d_{npk_{i;s}}, d_{npk_{j;s}}} = \max(|d_{npk_{i;s}}^- - d_{npk_{j;s}}^-|, |d_{npk_{i;s}}^+ - d_{npk_{j;s}}^+|), \quad (3)$$

которая представляет собой меру различия между интервалами $[d_{npk_{i;s}}^-; d_{npk_{i;s}}^+]$ и $[d_{npk_{j;s}}^-; d_{npk_{j;s}}^+]$. Заметим, что метрика (3) на множестве интервалов имеет место и в том случае, когда интервалы пересекаются или содержатся один в другом (рис. 3, з).

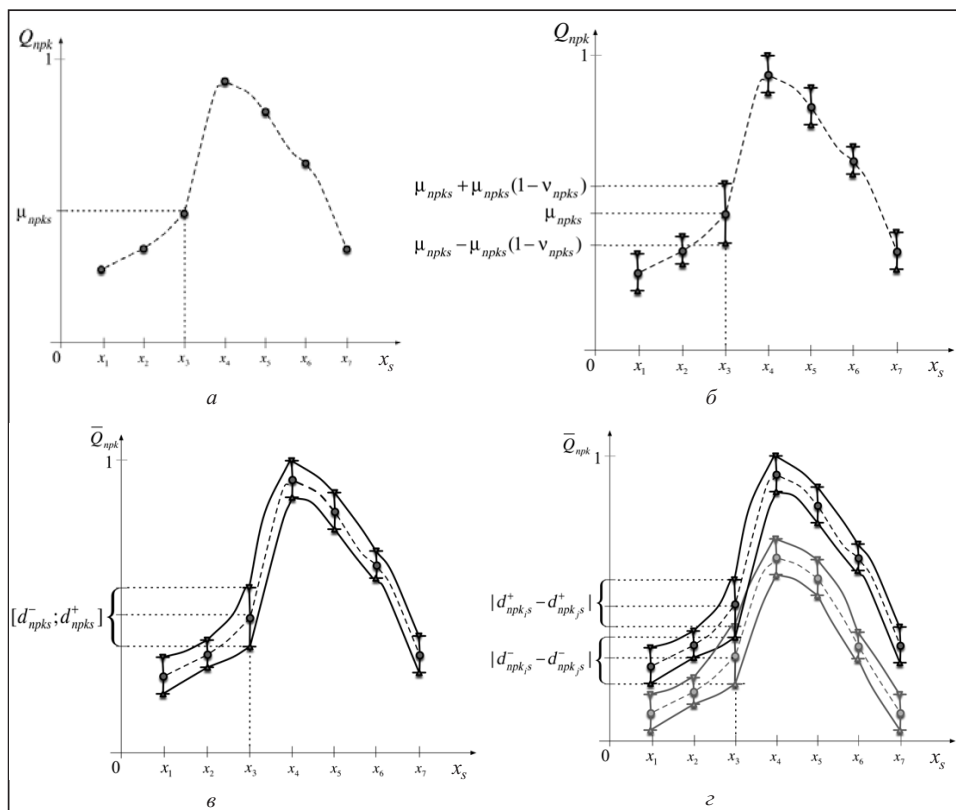


Рис. 3. Графическое представление экспертных оценок: точечная оценка (а); точечная оценка с отклонениями (б); интервальная оценка (в); расстояние между интервальными оценками (г)

На множестве построенных интервальных оценок вводится метрика

$$\rho_{d_{npk_{i;s}}, d_{npk_{j;s}}} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \rho_{d_{npk_{i;s}}, d_{npk_{j;s}}}.$$

Последующие этапы структурной схемы алгоритма формирования согласованных экспертных оценок (рис. 2) рассматриваются в соответствии с полученным метрическим пространством.

3.2. Вычисление показателя степени важности экспертного оценивания.

На этапе процедуры формирования согласованных экспертных оценок необходим механизм оценивания степени важности индивидуальных оценок экспертов, выраженных в количественном виде.

По центральной предельной теореме [7] сумма большого числа случайных величин, влияние каждой из которых близко к нулю, имеет распределение, близкое к нормальному.

С учетом этого факта на множестве Q_{np} интервальных экспертных оценок вводится показатель степени важности экспертного оценивания

$$W_{np} = \{w_{npk} | w_{npk} = w_{np}(\bar{Q}_{npk})\} \quad \forall p = \overline{1, P_n}, \quad \forall n = \overline{1, N},$$

что позволяет определить вес мнения каждого k -го эксперта

$$w_{npk} = w_{np}(\bar{Q}_{npk}) = (1 - \rho(\bar{Q}_{npk}, \tilde{Q}))\chi_{npk}, \quad (4)$$

где χ_{npk} — показатель компетентности k -го эксперта относительно p -го показателя n -го объекта, \tilde{Q} — интервальная оценка, которая получается путем дискретизации гауссовской плотности. Таким образом, вес экспертного мнения тем больше, чем ближе оценка эксперта к гауссовской плотности на множестве экспертных оценок.

Приведем алгоритм вычисления гауссовской плотности.

1. Определяется математическое среднее $\bar{M}_{nps} = \{\bar{M}_{nps}^-, \bar{M}_{nps}^+\}$, $s = \bar{1}, S$ множества построенных интервальных экспертных оценок для каждого s -уровня:

$$\bar{M}_{nps}^- = M\bar{Q}_{nps}^- = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K_{np}} \bar{Q}_{npks}^-; \quad \bar{M}_{nps}^+ = M\bar{Q}_{nps}^+ = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K_{np}} \bar{Q}_{npks}^+. \quad (5)$$

2. Вычисляется интегрированная экспертная оценка $\bar{Q}_{np} = \{\bar{Q}_{np}^-, \bar{Q}_{np}^+\}$, $s = \bar{1}, S$ по каждому уровню s , наименее удаленная от вычисленного математического среднего:

$$\bar{Q}_{np}^- = \arg \min_{\bar{Q}_{npks}^-} (|\bar{Q}_{npks}^- - \bar{M}_{nps}^-|); \quad \bar{Q}_{np}^+ = \arg \min_{\bar{Q}_{npks}^+} (|\bar{Q}_{npks}^+ - \bar{M}_{nps}^+|). \quad (6)$$

3. Вводится (с учетом того, что площадь под кривой гауссовской плотности всегда равна единице [8]) корректирующий коэффициент нормирования к интервалу $[0; 1]$ в целях корректного построения интервальной гауссовской плотности в виде

$$K_{np}^- = \frac{1}{S(\bar{Q}_{np}^-)}; \quad K_{np}^+ = \frac{1}{S(\bar{Q}_{np}^+)}, \quad (7)$$

где $S(\bar{Q}_{np}^-)$ (рис. 4, а) и $S(\bar{Q}_{np}^+)$ — площади под кривыми соответственно нижней и верхней границ построенной интегрированной экспертной оценки.

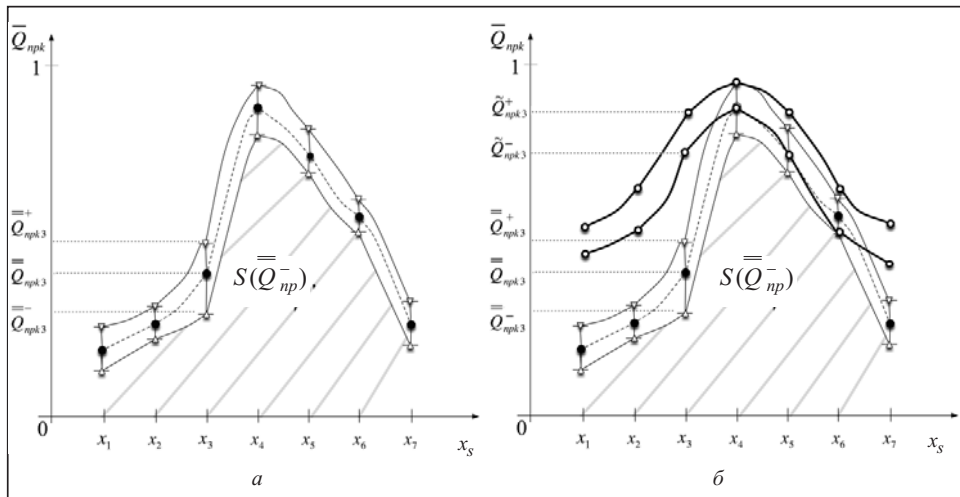


Рис. 4. Графики построения интервальной гауссовской плотности: площадь под кривой нижней границы интегрированной экспертной оценки (а); интервальная гауссовская плотность (б)

Для вычисления площади под кривой достаточно учесть значение каждого уровня $x_s \in (0,07; 0,21; 0,36; 0,5; 0,64; 0,79; 0,93)$, которому соответствует некоторое значение интегрированной экспертной оценки.

4. Определяется интервальная гауссовская плотность $\tilde{Q}_{np} = \{[\tilde{Q}_{nps}^-; \tilde{Q}_{nps}^+], s = \overline{1, S}\}$ (рис. 4, б), границы которой задаются формулой гауссовской плотности [7] с учетом коэффициента нормирования к интервалу $[0; 1]$:

$$\tilde{Q}_{nps}^- = \frac{1}{K_{np}^- \sqrt{2\pi\tilde{D}^-}} e^{-\frac{(x_s - \tilde{M}^-)^2}{2\tilde{D}^-}}, \quad \tilde{Q}_{nps}^+ = \frac{1}{K_{np}^+ \sqrt{2\pi\tilde{D}^+}} e^{-\frac{(x_s - \tilde{M}^+)^2}{2\tilde{D}^+}}. \quad (8)$$

Интегрированная экспертная оценка должна быть максимально приближена к интервальной гауссовской плотности, т.е. для нахождения гауссовской плотности необходимо решить задачу оптимизации

$$\sum_{s=1}^S \rho(\tilde{Q}_{nps}; \overline{Q}_{nps}) \rightarrow \min,$$

которая сводится к следующей задаче:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{s=1}^S \left(\left| \frac{1}{K_{np}^- \sqrt{2\pi\tilde{D}^-}} e^{-\frac{(x_s - \tilde{M}^-)^2}{2\tilde{D}^-}} - \overline{Q}_{nps}^- \right| \right) \rightarrow \min, \\ \sum_{s=1}^S \left(\left| \frac{1}{K_{np}^+ \sqrt{2\pi\tilde{D}^+}} e^{-\frac{(x_s - \tilde{M}^+)^2}{2\tilde{D}^+}} - \overline{Q}_{nps}^+ \right| \right) \rightarrow \min. \end{array} \right.$$

Задачу оптимизации решаем с помощью численных методов, например методом равномерного поиска [9].

Таким образом, w_{npk} — показатель степени важности мнения k -го эксперта в соответствии с (4) рассчитывается с учетом интервальной гауссовской плотности $\tilde{Q}_{np} = \{[\tilde{Q}_{nps}^-; \tilde{Q}_{nps}^+], s = \overline{1, S}\}$ и введенной для общего случая интервальной метрики (3), которая в терминах интервальных оценок имеет вид

$$\rho(\overline{Q}_{npks}; \tilde{Q}_{npks}) = \max(|\overline{Q}_{npks}^- - \tilde{Q}_{npks}^-|, |\overline{Q}_{npks}^+ - \tilde{Q}_{npks}^+|). \quad (9)$$

3.3. Вычисление наименее удаленной экспертной оценки. На множестве экспертных оценок в целях дальнейшего согласования экспертных суждений определяется оценка, наименее удаленная от мнений других экспертов.

Приведем алгоритм вычисления указанной оценки.

1. Строится матрица расстояний $d_{npk_i k_j} = \rho(\overline{Q}_{npk_i}, \overline{Q}_{npk_j})$ между оценками экспертов по метрике ρ_{np} :

$$D_{np} = \{d_{npk_i k_j} | k_i, k_j \in \overline{1, K_{np}}\}. \quad (10)$$

2. Вычисляется вектор, каждая компонента которого равна сумме всех элементов соответствующей строки матрицы D_{np} :

$$S_{np} = \{S_{npk} | S_{npk} = \sum_{k_j=1}^{K_{np}} d_{npk_i k_j}, k_i = \overline{1, K_{np}}\}. \quad (11)$$

3. Находится минимальная компонента вектора S_{np} , которая соответствует значению оценки эксперта, наименее удаленной от мнений других экспертов:

$$M_{np} = \arg \min_{k=1, K} (S_{npk}). \quad (12)$$

3.4. Вычисление доверительного интервала. Доверительный интервал T_{np} должен содержать фиксированную часть экспертных оценок, наименее удален-

ных от M_{np} по метрике $\rho(\bar{Q}_{npk}, M_{np})$. Выводы экспертов, которые войдут в доверительный интервал, будут считаться согласованными.

В процессе формирования доверительного интервала для учета веса оценки каждого эксперта используется показатель степени важности (4), что позволяет уточнить метрику (9):

$$\tilde{\rho}_{npk} = \rho(M_{np}, \bar{Q}_{npk})(1 - w_{npk}).$$

Таким образом, экспертные оценки с наименьшим значением показателя степени важности более удалены от M_{np} , что дает возможность скорректировать в сторону уменьшения их влияние на результаты экспертизы.

Для определения доверительного интервала в первом туре могут использоваться несколько приемов. Рассмотрим некоторые из них:

$$\bar{Q}_{npk} \in T_{np}, \text{ если } \tilde{\rho}_{npk} < P \max_{\bar{Q}_{npk}} (\tilde{\rho}_{npk}),$$

где P — априорно заданный показатель отношения радиуса доверительного интервала к наиболее удаленной от M_{np} оценке эксперта;

$$\bar{Q}_{npk} \in T_{np}, \text{ если } \bar{Q}_{npk} = \arg \min_{\bar{Q}_{npk}} (\tilde{\rho}_{npk})$$

$$\text{при } \text{card}(T_{np}) < \text{card}(E_{np}) S^{(T_{np})},$$

где $S^{(T_{np})}$ — априорно заданный показатель отношения числа согласованных экспертных оценок, принадлежащих доверительному интервалу T_{np} , к общему количеству оценок в экспертной группе E_{np} ;

$$\bar{Q}_{npk} \in T_{np}, \text{ если } \tilde{\rho}_{npk} < R_1^{(T_{np})}, \quad (13)$$

где $R_1^{(T_{np})}$ — априорно заданный радиус.

После процедуры формирования доверительного интервала определяется радиус множества экспертных оценок как расстояние от наиболее удаленной оценки из доверительного интервала к M_{np} :

$$R^{(T_{np})} = \max_{\bar{Q}_{npk}} (\tilde{\rho}).$$

Радиус $R^{(T_{np})}$ фиксируется на уровне первого тура, и доверительный интервал в следующих турах вычисляется по формуле

$$\bar{Q}_{npk} \in T_{np}, \text{ если } \tilde{\rho} < R^{(T_{np})}.$$

3.5. Анализ согласованности экспертных оценок. В каждом туре с помощью сформированного доверительного интервала на последнем этапе алгоритма вычисляется показатель согласованности экспертных оценок, чтобы определить необходимость в следующем туре экспертизы.

Критерием согласованности экспертных мнений является показатель согласованности $S^{(T_{np})}$ — отношение количества согласованных оценок, которые попали в доверительный интервал T_{np} , к общему количеству оценок в экспертной группе E_{np} :

$$S^{(T_{np})} = \frac{\text{card}(T_{np})}{\text{card}(E_{np})}. \quad (14)$$

Критерием окончания процедуры экспертизы может быть, например, превышение показателем $S^{(T_{np})}$ некоторого априорно заданного уровня S^* , фиксированное количество туров и т.д.

Будем считать, что выводы группы экспертов согласованы, если показатель согласованности (14) является устойчивым, т.е. для каждого m -го тура экспертизы выполняется следующее соотношение:

$$S_{np}^{(T_{m-1})} < S_{np}^{(T_m)}. \quad (15)$$

Если в неравенстве (15) меняется знак на противоположный, то мнения экспертов расходятся. В этом случае рабочая группа может принять решение о проведении следующего тура экспертного оценивания. Экспертам предлагается пересмотреть свои суждения и сделать переоценку показателей на основе объявленных результатов предыдущего тура в целях уточнения и повышения уровня согласованности экспертных мнений и достижения консенсуса.

На последнем туре экспертного оценивания в качестве окончательной согласованной оценки \hat{Q}_{np} показателя I_{np} объекта O_n группой экспертов E_{np} принимается оценка, наиболее приближенная к M_{np} .

Согласованная экспертная оценка \hat{Q}_{np} объективно подтверждает обоснованность принятия показателем I_{np} значения, которое соответствует определенному s -му уровню шкалы Миллера. Точечная оценка с наибольшей возможностью реализации и максимальной степенью уверенности в поставленной оценке вычисляется следующим образом:

$$s(\hat{Q}_{np}) = s(M_{np}) = \arg \max (M_{nps}) \wedge \min (|M_{nps}^+ - M_{nps}^-|), \quad (16)$$

$$\hat{Q}_{np} = (M_{nps(\hat{Q}_{np})}^+ + M_{nps(\hat{Q}_{np})}^-) / 2.$$

ПРИМЕР

Рассматривается задача выявления наиболее приемлемых ниш рынка сбыта инновационного оборудования типа точка-многоточка для обеспечения широкополосной беспроводной связи.

Эксперты $E_{11} = \{E_{11k} | k = \overline{1,16}\}$ в соответствии с их уровнями компетентности $\chi_{11} = \{\chi_{11k} | k = \overline{1,16}\}$, значения которых приведены в табл. 2, анонимно, независимо друг от друга, оценили объект $O_1 = \text{«Иновационное оборудование широкополосной беспроводной связи»}$ по критерию $I_1 = \text{«Ниши применимости разработанного инновационного оборудования на рынке сбыта»}$.

Таблица 2

Показатель компетентности	Значения показателя компетентности экспертов															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
χ_k	0,80	0,40	1,00	1,00	0,60	0,80	0,80	0,20	1,00	0,60	0,80	1,00	0,80	0,95	0,85	1,00

Процедура оценивания проведена для 16 экспертов с использованием шкалы Миллера по следующим уровням ($s=1,7$).

1. Спрос на такое оборудование слишком мал, так как высокоскоростной Интернет уже проведен преимущественно по всей Украине ($x_1 \in [0; 0,14]$).
2. Существуют незанятые ниши, где такое оборудование применимо, но не более 5% от объема РРЛ-решений ($x_2 \in (0,14; 0,24]$).
3. Операторы, предоставляющие услуги корпоративного доступа (Укртелеком, Альтернет, CDMA, Пан-телеком и другие), заинтересованы в таком оборудовании ($x_3 \in (0,24; 0,43]$).
4. Сотовые операторы (Beeline, МТС, Киевстар и другие) заинтересованы в таком оборудовании для построения опорной сети в районах с высокой плотностью абонентов в целях развития услуг 3G/LTE/mobileTV ($x_4 \in (0,43; 0,57]$).

5. Операторы WiMAX/LTE заинтересованы в таких системах ($x_5 \in (0,57; 0,72]$).

6. Любой оператор будет заинтересован в таком высокоскоростном и недорогом беспроводном оборудовании ($x_6 \in (0,72; 0,86]$).

7. Рынок никем не занят, спрос будет большой ($x_7 \in (0,86; 1,00]$).

Полученные точечные оценки экспертов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Номер эксперта	Точечные экспертные оценки по 7-уровневой шкале Миллера													
	1		2		3		4		5		6		7	
	μ_{1k1}	ν_{1k1}	μ_{1k2}	ν_{1k2}	μ_{1k3}	ν_{1k3}	μ_{1k4}	ν_{1k4}	μ_{1k5}	ν_{1k5}	μ_{1k6}	ν_{1k6}	μ_{1k7}	ν_{1k7}
1	0,00	0,70	0,60	0,85	0,05	0,80	0,10	0,60	0,15	0,75	0,65	0,80	0,65	0,85
2	0,00	0,90	0,10	0,80	0,05	0,85	0,95	0,95	1,00	1,00	0,70	1,00	0,70	0,95
3	0,20	0,90	0,80	0,96	0,40	0,85	0,45	0,95	0,85	0,88	0,50	0,78	0,50	0,82
4	0,60	1,00	0,80	1,00	0,65	1,00	0,40	0,98	0,70	1,00	0,65	0,93	0,65	1,00
5	0,20	0,98	0,65	1,00	0,25	1,00	0,60	1,00	0,00	1,00	0,63	1,00	0,63	1,00
6	0,40	1,00	0,45	0,80	0,65	1,00	0,80	0,95	0,85	0,98	0,82	0,90	0,82	1,00
7	0,00	1,00	0,80	0,85	0,09	1,00	0,20	1,00	0,65	0,80	0,24	1,00	0,24	1,00
8	0,00	1,00	0,20	1,00	0,85	1,00	0,93	1,00	1,00	1,00	0,95	1,00	0,95	1,00
9	0,20	1,00	0,80	0,95	0,74	1,00	0,28	1,00	0,65	1,00	0,40	0,97	0,40	1,00
10	0,20	0,96	0,85	1,00	0,80	0,87	0,22	1,00	0,46	1,00	0,40	1,00	0,40	1,00
11	0,00	1,00	0,80	1,00	0,67	1,00	0,40	1,00	1,00	0,97	0,43	1,00	0,43	0,94
12	0,00	1,00	0,30	0,99	0,65	1,00	0,67	0,98	0,85	0,94	0,80	1,00	0,80	1,00
13	0,40	0,99	0,65	1,00	0,00	1,00	0,80	1,00	0,88	0,95	0,19	0,93	0,19	1,00
14	0,20	1,00	0,50	0,85	0,60	0,85	0,65	0,90	0,90	1,00	0,77	1,00	0,77	0,95
15	0,50	1,00	0,89	0,92	0,65	0,93	0,47	0,95	0,80	0,90	0,82	0,80	0,82	1,00
16	0,22	0,96	0,85	0,95	0,42	0,90	0,59	1,00	0,90	1,00	0,68	1,00	0,68	0,95

Согласованные экспертные оценки формируются в соответствии со структурной схемой алгоритма, представленной на рис. 2. По точечным оценкам в соответствии с (2) строятся интервальные экспертные оценки (табл. 4).

Таблица 4

Номер эксперта	Интервальные экспертные оценки по 7-уровневой шкале Миллера								
	1			2			3		
	d_{1k1}^-	μ_{1k1}	d_{1k1}^+	d_{1k2}^-	μ_{1k2}	d_{1k2}^+	d_{1k3}^-	μ_{1k3}	d_{1k3}^+
1	0,00	0,00	0,00	0,51	0,60	0,69	0,04	0,05	0,06
2	0,00	0,00	0,00	0,08	0,10	0,12	0,04	0,05	0,06
3	0,18	0,20	0,22	0,77	0,80	0,83	0,34	0,40	0,46
4	0,60	0,60	0,60	0,80	0,80	0,80	0,65	0,65	0,65
5	0,20	0,20	0,20	0,65	0,65	0,65	0,25	0,25	0,25
6	0,40	0,40	0,40	0,36	0,45	0,54	0,65	0,65	0,65
7	0,00	0,00	0,00	0,68	0,80	0,92	0,09	0,09	0,09
8	0,00	0,00	0,00	0,20	0,20	0,20	0,85	0,85	0,85
9	0,20	0,20	0,20	0,76	0,80	0,84	0,74	0,74	0,74
10	0,19	0,20	0,21	0,85	0,85	0,85	0,70	0,80	0,90
11	0,00	0,00	0,00	0,80	0,80	0,80	0,67	0,67	0,67
12	0,00	0,00	0,00	0,30	0,30	0,30	0,65	0,65	0,65
13	0,40	0,40	0,40	0,65	0,65	0,65	0,00	0,00	0,00
14	0,20	0,20	0,20	0,43	0,50	0,58	0,51	0,60	0,69
15	0,50	0,50	0,50	0,82	0,89	0,96	0,60	0,65	0,70
16	0,21	0,22	0,23	0,81	0,85	0,89	0,38	0,42	0,46

Интервальные экспертные оценки по 7-уровневой шкале Миллера											
4			5			6			7		
d_{1k4}^-	μ_{1k4}	d_{1k4}^+	d_{1k5}^-	μ_{1k5}	d_{1k5}^+	d_{1k6}^-	μ_{1k6}	d_{1k6}^+	d_{1k7}^-	μ_{1k7}	d_{1k7}^+
0,06	0,10	0,14	0,11	0,15	0,19	0,52	0,65	0,78	0,04	0,65	0,06
0,90	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70	0,70	0,70	0,90	0,70	1,00
0,43	0,45	0,47	0,75	0,85	0,95	0,39	0,50	0,61	0,53	0,50	0,77
0,39	0,40	0,41	0,70	0,70	0,70	0,60	0,65	0,70	0,35	0,65	0,35
0,60	0,60	0,60	0,00	0,00	0,00	0,63	0,63	0,63	0,40	0,63	0,40
0,76	0,80	0,84	0,83	0,85	0,87	0,74	0,82	0,90	0,47	0,82	0,47
0,20	0,20	0,20	0,52	0,65	0,78	0,24	0,24	0,24	0,15	0,24	0,15
0,93	0,93	0,93	1,00	1,00	1,00	0,95	0,95	0,95	0,94	0,95	0,94
0,28	0,28	0,28	0,65	0,65	0,65	0,39	0,40	0,41	0,60	0,40	0,60
0,22	0,22	0,22	0,46	0,46	0,46	0,40	0,40	0,40	0,65	0,40	0,65
0,40	0,40	0,40	0,97	1,00	1,03	0,43	0,43	0,43	0,61	0,43	0,69
0,66	0,67	0,68	0,80	0,85	0,90	0,80	0,80	0,80	0,40	0,80	0,40
0,80	0,80	0,80	0,84	0,88	0,92	0,18	0,19	0,20	0,03	0,19	0,03
0,59	0,65	0,72	0,90	0,90	0,90	0,77	0,77	0,77	0,43	0,77	0,47
0,45	0,47	0,49	0,72	0,80	0,88	0,66	0,82	0,98	0,37	0,82	0,37
0,59	0,59	0,59	0,90	0,90	0,90	0,68	0,68	0,68	0,48	0,68	0,54

Для вычисления показателей степени важности экспертных оценок определяется гауссовская плотность по алгоритму, приведенному в п. 3.2:

1) определяется математическое среднее (5) интервальных экспертных оценок:

$$\bar{M}_{11} = ([0,19; 0,18], [0,59; 0,66], [0,45; 0,49], [0,52; 0,55], [0,70; 0,76], [0,47; 0,64], [0,46; 0,49]) ;$$

2) вычисляется интегрированная экспертная оценка (6):

$$\bar{Q}_{11} = ([0,19; 0,10], [0,22; 0,24], [0,40; 0,44], [0,58; 0,63], [0,67; 0,71], [0,60; 0,63], [0,42; 0,44]) ;$$

3) вычисляется корректирующий коэффициент нормирования к интервалу [0; 1] (7):

$$K_{np}^- = 2,05; K_{np}^+ = 1,94;$$

4) определяется гауссовская плотность (8) с учетом коэффициента нормирования:

$$\tilde{Q}_{11} = ([0,09; 0,10], [0,22; 0,24], [0,40; 0,44], [0,58; 0,63], [0,67; 0,71], [0,60; 0,63], [0,42; 0,44]) .$$

Показатели степени важности $w_{np}(\bar{Q}_{npk})$ в соответствии с (4) имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} w_{11}(\bar{Q}_{11.1}) &= 0,50, & w_{11}(\bar{Q}_{11.2}) &= 0,29, & w_{11}(\bar{Q}_{11.3}) &= 0,76, & w_{11}(\bar{Q}_{11.4}) &= 0,75, \\ w_{11}(\bar{Q}_{11.5}) &= 0,47, & w_{11}(\bar{Q}_{11.6}) &= 0,62, & w_{11}(\bar{Q}_{11.7}) &= 0,52, & w_{11}(\bar{Q}_{11.8}) &= 0,14, \\ w_{11}(\bar{Q}_{11.9}) &= 0,74, & w_{11}(\bar{Q}_{11.10}) &= 0,40, & w_{11}(\bar{Q}_{11.11}) &= 0,58, & w_{11}(\bar{Q}_{11.12}) &= 0,86, \\ w_{11}(\bar{Q}_{11.13}) &= 0,52, & w_{11}(\bar{Q}_{11.14}) &= 0,79, & w_{11}(\bar{Q}_{11.15}) &= 0,59, & w_{11}(\bar{Q}_{11.16}) &= 0,82. \end{aligned}$$

Определяется наименее удаленная экспертная оценка M_{np} по алгоритму, приведенному в п. 3.3:

1) строится матрица расстояний (10) между оценками экспертов:

$$D_{11} = \begin{array}{c|ccccc} \text{эксперт 1} & 0,00 & 0,49 & \dots & 0,44 & 0,41 \\ \text{эксперт 2} & 0,50 & 0,00 & \dots & 0,53 & 0,34 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{эксперт 15} & 0,44 & 0,53 & \dots & 0,00 & 0,20 \\ \text{эксперт 16} & 0,41 & 0,34 & \dots & 0,20 & 0,00 \end{array};$$

2) вычисляется вектор (11) из соответствующих строк полученной матрицы:

$$S_{np} = [6,22 \ 6,15 \ \dots \ 4,57 \ 3,73];$$

3) находится оценка (12), наименее удаленная от мнений других экспертов, которая соответствует эксперту № 16:

$$M_{11} = \text{эксперт 16}(3,74).$$

В доверительный интервал T_{11} , рассчитанный с использованием соотношения (13) с учетом $R_1^{(T_{11})} = 0,5$, вошли эксперты под номерами 3–7, 9–16. Показатель уровня согласованности $S^{T_{11}} = 0,81$, который превышает априорно заданный порог согласованности $S^* = 0,8$, указывает на согласованность экспертных оценок в данном туре экспертного оценивания.

Точечная оценка с наибольшей возможностью реализации и максимальной степенью уверенности в поставленной оценке по формуле (16) соответствует уровню $s(Q_{11}) = 5$.

Таким образом, большинство экспертов сошлись во мнении, что операторы WiMAX / LTE будут заинтересованы в предлагаемом инновационном оборудовании типа точка-многоточка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная стратегия формирования согласованных экспертных оценок при реализации метода Делфи с использованием интервальных оценок и интервальной метрики осуществляется в интерактивно-диалоговом режиме согласования анонимных экспертных мнений. Данная процедура проводится в несколько туров и продолжается до тех пор, пока не будет достигнут консенсус в отношении решаемой проблемы.

Представление математического аппарата в терминах интервальных оценок и интервальной метрики с учетом компетентности экспертов и их уверенности в поставленной оценке позволяет формализовать процесс согласования на высоком уровне обобщенности, проводить реализацию процедуры согласования на любом метрическом пространстве и решать задачи технологического предвидения из разных предметных областей.

Основными преимуществами и особенностями интерактивно-диалогового процесса формирования согласованных экспертных мнений при реализации метода Делфи являются:

- возможность учета новых идей экспертов;
- акцентирование внимания на диаметрально противоположных мнениях;
- обеспечение согласования противоположных суждений (формирование согласованного мнения, которое представляет лучший вариант, а не выбор одной из противоположностей);
- обеспечение стимула для креативности.

Данная формализация с использованием приемов искусственного интеллекта является основой вычислительного алгоритма и автоматизированного инструментария [8], обеспечивающего проведение экспертного оценивания в режиме on-line в составе Информационной платформы сценарного анализа [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Технологическое предвидение. — К.: Политехника, 2005. — 165 с.
2. Foresight methodologies. Training Module 2. — Vienna: UNIDO CEE / NIS, 2003. — P. 100–120.
3. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения. — 2-е изд., перераб. и доп. — К.: Наук. думка, 2011. — 728 с.
4. Панкратова Н.Д. Математическое обеспечение задач технологического предвидения применительно к отрасли промышленности // Систем. дослідж. та інформ. технології. — 2002. — № 1. — С. 26–33.
5. Miller G. A. The magical number seven plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information // Psycholog. Rev. — 1956. — **63**. — P. 81–97.
6. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. — 4-е изд. — М.: Наука. 1976. — 544 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. — 4-е изд. — М.: Наука, Физматгиз, 1969. — 576 с.
8. Малафеева Л.Ю. Розробка структурованої бази знань для розв'язання задач з технологічного передбачення // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2009. — № 6. — С. 61–68.
9. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособ. — 2-е изд. — М.: Высш. шк., 2005. — 544 с.
10. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Информационная платформа сценарного анализа задач технологического предвидения // Кибернетика и системный анализ. — 2003. — № 4. — С. 112–124.

Поступила 29.03.2012