

**Подход к построению модели объекта экспертизы с возможностью
корректировки компетентности экспертов и оценки деятельности
рабочей группы. Часть 3. Построение семантико-иерархической модели
объекта экспертизы***

Е. А. Бурков[✉], П. И. Падерно

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия
[✉] eaburkov@gmail.com

Аннотация. Предлагаемая методика позволяет идентифицировать связи между различными атрибутами объекта экспертизы, тем самым получив его семантико-иерархическую модель. При этом имеется возможность осуществить апостериорную оценку компетентности экспертов с учетом эффективности их работы, оценив согласованность индивидуальных и результирующей семантико-иерархических моделей объекта экспертизы. Построение результирующей модели объекта экспертизы выполняется при помощи аналитического сопоставления и комплексирования мнений отдельных экспертов, представленных в виде матриц, содержащих информацию о структуре модели. После сравнения частных моделей с построенной результирующей моделью определяется корректирующая поправка к коэффициенту компетентности каждого эксперта. Скорректированный коэффициент компетентности должен адекватно отражать уровень профессиональных знаний и специализированных навыков эксперта, проявленных им при построении результирующей модели объекта экспертизы.

Ключевые слова: семантико-иерархическая модель, атрибутивная модель, коэффициент компетентности, критерии, объект экспертизы, показатели, рабочая группа, экспертная группа

Для цитирования: Бурков Е. А., Падерно П. И. Подход к построению модели объекта экспертизы с возможностью корректировки компетентности экспертов и оценки деятельности рабочей группы. Часть 3. Построение семантико-иерархической модели объекта экспертизы // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 7. С. 49–59. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-49-59.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

**Approach to Building a Model of the Object of Expertise with the Possibility
of Adjusting the Competence of Experts and Evaluating the Activities
of the Working Group. Part 3. Construction of a Semantic-Hierarchical Model
of the Object of Expertise**

E. A. Burkov[✉], P. I. Paderno

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia
[✉] eaburkov@gmail.com

Abstract. The proposed method makes it possible to identify the relationships between the various attributes of the object of expertise, thereby obtaining its semantic-hierarchical model. At the same time, it is possible to carry out a posteriori assessment of the competence of experts, taking into account the effectiveness of their work by assessing the consistency of individual and resulting semantic-hierarchical models of the object of expertise. The resulting model of the object of expertise is constructed by analytically comparing and merging the

* Продолжение, начало в Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, №№ 5, 6.

opinions of individual experts, presented in the form of matrices containing information about the structure of the model. After comparing the partial models with the resulting model, a corrective correction to the competence coefficient of each expert is determined. The adjusted competence coefficient should adequately reflect the level of professional knowledge and specialized skills of the expert shown by him in constructing the resulting model of the object of expertise.

Keywords: semantic-hierarchical model, attributive model, competence coefficient, criteria, object of expertise, indicators, working group, expert group

For citation: Burkov E. A., Paderno P. I. Approach to Building a Model of the Object of Expertise with the Possibility of Adjusting the Competence of Experts and Evaluating the Activities of the Working Group. Part 3. Construction of a Semantic-Hierarchical Model of the Object of Expertise // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 7. P. 49–59. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-49-59.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Несмотря на активное развитие в области так называемого искусственного интеллекта (ИИ), использование знаний опытных и квалифицированных специалистов при экспертизе и оценке различных сложных объектов – от повседневных товаров широкого употребления до комплексных информационно-технических систем [1]–[8] – не потеряло своей актуальности и в настоящее время. Более того, в ряде случаев методы экспертного оценивания находят свое применение при совершенствовании различных аспектов создания и использования современных информационных технологий, например, при определении основных точек для разметки и обучения нейронных сетей, служащих основой для систем ИИ.

Важным элементом методологии экспертного оценивания являются методы определения уровня и актуальности знаний самих экспертов, поскольку именно от него зависит надежность и результативность любой экспертизы. Подавляющее большинство работ в области экспертного оценивания [1]–[8], тем или иным образом затрагивающие вопрос оценки компетентности экспертов на различных этапах подготовки и проведения экспертиз, могут быть разделены на две категории на основании выбранного в них подхода. Первая категория рассматривает оценку компетентности экспертов как априорную процедуру (например, [9], [10]), реализуемую либо до выполнения опроса экспертов, т. е. до извлечения экспертной информации, либо даже до этапа формирования экспертной группы (ЭГ). Вторая категория рассматривает оценку компетентности экспертов как апостериорную процедуру (например, [11], [12]), реализуемую либо на этапе обработки экспертной информации, т. е. после опроса экспертов, в случае, если компетентность учиты-

вается при анализе и обработке полученных экспертных оценок, либо после окончания экспертизы в случае, если показатели компетентности используется только для составления рейтинга экспертов, необходимого в будущем для решения задачи по определению состава ЭГ. Оба указанных подхода – априорный и апостериорный – как правило не учитывают возможную положительную и отрицательную динамику показателей компетентности экспертов в процессе проведения экспертизы.

Следует заметить, что целью экспертизы может быть как непосредственная оценка конкретного объекта экспертизы (ОЭ), так и подготовка к такой оценке ОЭ, состоящая в построении модели ОЭ, необходимой для проведения его дальнейших оценочных экспертиз. Будем полагать, что цель рассматриваемой далее экспертизы состоит в построении *результатирующей семантико-иерархической модели объекта экспертизы* (РСИМОЭ) на основе, во-первых, имеющейся *результатирующей атрибутивной модели объекта экспертизы*¹ (РАМОЭ), во-вторых, набора частных (индивидуальных) *семантико-иерархических моделей объекта экспертизы* (СИМОЭ), полученных при опросе экспертов.

Построение РСИМОЭ с дополнительной процедурой корректировки компетентности экспертов, участвовавших в экспертизе, можно разбить на несколько стадий и этапов (рис. 1).

Исходные данные и обозначения. Основные исходные данные, необходимые для проведения экспертизы по построению РСИМОЭ, содержатся в РАМОЭ. Кроме того, будем полагать, что задачи формирования ЭГ и априорной оценки компетентности экспертов уже решены рабочей группой (РГ),

¹ Методика построения РАМОЭ подробно рассмотрена в [13] и [14].

т. е. известны численность и состав ЭГ, а также начальные коэффициенты компетентности² всех экспертов $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m, \alpha_k \in [\alpha_{\min}; \alpha_{\max}]$.



Рис. 1. Основные стадии и этапы метода

Fig. 1. Phases and stages of the method

Обозначим через a_{ij} j -й элемент³ i -й ступени любой иерархической структуры, считая число ступеней (уровней или ярусов иерархии) равным n , а общее число элементов i -й ступени равным l_i .

Введем в рассмотрение ступенчатую⁴ полностью связную⁵ иерархическую структуру, которая, соответственно, определяется следующими свойствами:

² Если к построению РСИМОЭ привлекаются те же эксперты, которые ранее участвовали в построении РАМОЭ [13], то оценка их компетентности была получена ранее и откорректирована с учетом результативности их работы [14]. В ином случае можно полагать, что РГ привлечет к построению РСИМОЭ экспертов, с которыми у нее уже есть опыт работы, следовательно, априорные оценки компетентности этих экспертов уже известны РГ и представляют собой апостериорные оценки, полученные по итогам прошлых экспертиз, в которых эти эксперты принимали участие. Если же речь идет о привлечении совершенно новых экспертов, РГ может использовать различные априорные методы оценки компетентности.

³ В том случае, когда иерархическая структура представляет собой СИМОЭ, каждый элемент такой иерархической структуры соответствует некоторому атрибуту (показателю, характеристике и т. п.), входящему в РАМОЭ.

⁴ Ступенчатость иерархии означает, что допускается наличие связей только между элементами смежных ступеней (уровней) иерархии, при этом связи между элементами одной ступени также запрещены.

⁵ Полносвязность в случае ступенчатой иерархии означает, что каждый элемент иерархии – это элемент-родитель для всех элементов нижестоящей ступени и

1) корневой элемент иерархии $a_{11} = a_1$, представляющий собой *интегральный показатель качества* ОЭ, не имеет элементов-родителей, служит единственным элементом первой ступени иерархии и выступает элементом-родителем для всех элементов второй ступени (и только для них);

2) элемент a_{ij} ($i > 1$) – это элемент-потомок всех элементов $(i - 1)$ -й ступени иерархии, т. е. элементов $a_{i-1,1}, a_{i-1,2}, \dots, a_{i-1,l_{i-1}}$, и не имеет никаких других элементов-родителей;

3) элемент a_{ij} ($i < n$) – элемент-родитель для всех элементов $(i + 1)$ -й ступени иерархии, т. е. элементов $a_{i+1,1}, a_{i+1,2}, \dots, a_{i+1,l_{i+1}}$ (и только для них).

Произвольная n -ступенчатая иерархическая структура может быть однозначно описана набором матриц *межступенчатой связности* $G_1, G_2, \dots, G_{n-1}$, где матрица G_i размерности $l_i \times l_{i+1}$ (l_i и l_{i+1} – число элементов на i -й и $(i + 1)$ -й ступенях иерархии соответственно) содержит информацию обо всех имеющихся и отсутствующих связях между элементами i -й и $(i + 1)$ -й ступеней иерархии:

$$G_i = \{g_{jk}\}, i = \overline{1, n-1}, j = \overline{1, l_i}, k = \overline{1, l_{i+1}},$$

$$g_{jk} = \begin{cases} 0, \text{ элемент } a_{ij} \text{ не является} \\ \text{родителем элемента } a_{i+1,k}; \\ 1, \text{ элемент } a_{ij} \text{ является} \\ \text{родителем элемента } a_{i+1,k}. \end{cases} \quad (1)$$

Подготовительная стадия. Этап 1: подготовка первичной иерархической модели. Основываясь на построенной ранее РАМОЭ [13], [14], а также комплексе методических, нормативных и иных документов, РГ распределяет атрибуты ОЭ по ступеням иерархии и формирует таким образом *полностью связную семантико-иерархическую модель объекта экспертизы* (ПСИМОЭ) I_F (рис. 2), состоящую из n -ступеней.

Целесообразность построения ПСИМОЭ только РГ без привлечения экспертов обусловлена тем, что крайне сложно реализовать комплексирование (слияние) частных СИМОЭ, полученных экспертами индивидуально на основе анализа и структурирования РАМОЭ, в силу их высокой потенциальной несогласованности⁶.

элемент-потомок для всех элементов вышестоящей ступени иерархии.

⁶ Несогласованность частных иерархических моделей ОЭ заключается в их различии по следующим ключевым параметрам: количеству ступеней иерархии; количеству и

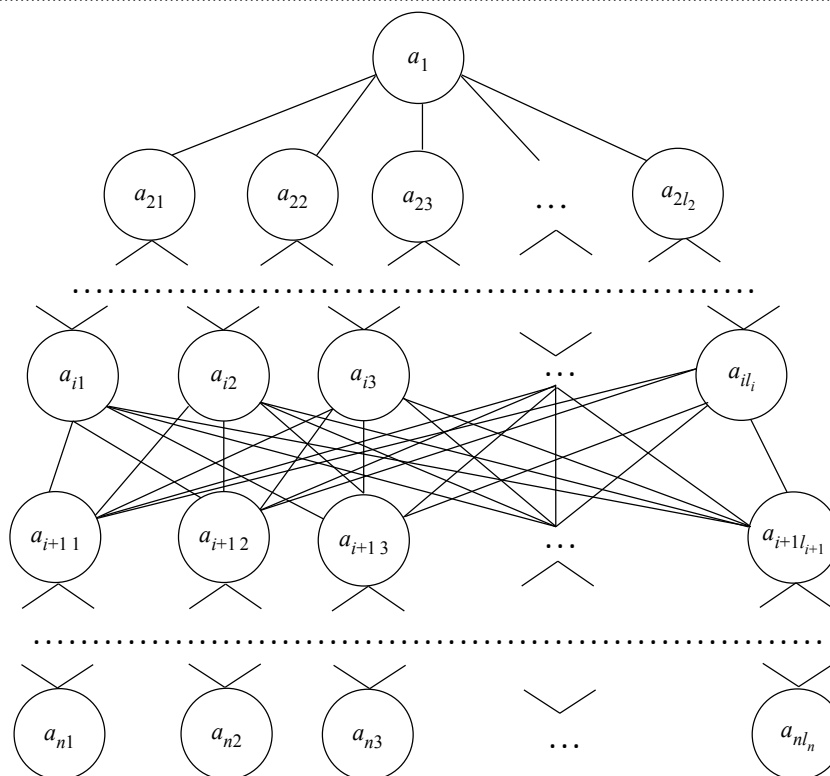


Рис. 2. Полносвязная семантико-иерархическая модель объекта экспертизы

Fig. 2. Fully connected semantic-hierarchical model of the object of expertise

ПСИМОЭ, построенная РГ и представляющая собой n -ступенчатую полносвязную иерархическую структуру, может быть описана набором матриц (1), все элементы которых будут равны единице в силу свойства полносвязности:

$$\forall i = \overline{1, n-1}, \forall j = \overline{1, l_i}, \forall k = \overline{1, l_{i+1}}: \mathbf{G}_i = \{g_{jk} = 1\}.$$

Этап 2: подготовка опросной анкеты. РГ подготавливает анкету⁷, включающую карту опроса (опросный лист) с ПСИМОЭ, представленной как в графическом, так и в матричном виде. В анкету включается также описание возможностей эксперта по редактированию ПСИМОЭ, которые, в частности, заключаются в добавлении и удалении⁸ связей между элементами смежных ступеней иерархии. Эксперт может реализовывать это графическим (вычеркивание и добавление связей непосредственно на графическом

представлении ПСИМОЭ) или алгебраическим (подстановка нулей и единиц на соответствующие позиции в матрицы $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_{n-1}$) способом, выбрав более подходящий конкретно для него вариант.

Оценочная стадия. Этап 3: опрос экспертов. Экспертам $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_m$ выдаются для заполнения анкеты, в карте опроса которых приведена визуализированная ПСИМОЭ, а также соответствующий ей набор матриц межступенчатой связности $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_{n-1}$, все элементы которых равны единице.

Этап 4: получение и формализация результатов опроса. Результатом работы каждого s -го эксперта $\mathcal{E}_s$ служит частная СИМОЭ I_s , имеющая вид ступенчатой иерархической структуры атрибутов ОЭ, наличие или отсутствие связей между которыми отражают представления и знания данного эксперта об ОЭ (рис. 3).

Ступенчатая иерархия I_s , отражающая мнение s -го эксперта относительно наличия или отсутствия связей между элементами смежных ступеней может быть однозначно описана набором матриц межступенчатой связности $\mathbf{G}_{s1}, \mathbf{G}_{s2}, \dots, \mathbf{G}_{sn-1}$. Матрица $\mathbf{G}_{si}$ размером $l_i \times l_{i+1}$ отображает наличие или отсутствие связей между элементами i -й и $(i+1)$ -й ступеней по мнению s -го эксперта:

совокупности элементов на каждой ступени; наличие и отсутствие связей между различными парами элементов.

⁷ Для повышения удобства и уменьшения сложности редактирования ПСИМОЭ экспертами целесообразно реализовать опросный лист в электронном виде.

⁸ Экспертам запрещается удалять связи между элементами 1-й и 2-й ступеней ПСИМОЭ, поскольку это приведет к слишком существенному изменению модели ОЭ, которое может быть реализовано только в ходе совместной переработки ПСИМОЭ экспертами и РГ, если такая необходимость будет выявлена в ходе экспертизы.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{G}_{si} &= \{g_{jk}\}, s = \overline{1, m}, i = \overline{1, n-1}, \\
 &\quad j = \overline{1, l_i}, k = \overline{1, l_{i+1}}, \\
 g_{jk} &= \begin{cases} 0, \text{ элемент } a_{ij} \text{ не является} \\ \text{родителем элемента } a_{i+1k} \\ \text{по мнению } s\text{-го эксперта;} \\ 1, \text{ элемент } a_{ij} \text{ является} \\ \text{родителем элемента } a_{i+1k} \\ \text{по мнению } s\text{-го эксперта.} \end{cases}
 \end{aligned} \quad (2)$$

Аналитическая стадия. Этап 5: построение результирующей модели. Для построения РСИМОЭ необходимо выполнить комплексирование всех частных СИМОЭ I_s , отражающих индивидуальные представления экспертов об ОЭ. Используемая процедура комплексирования должна учитывать разницу в уровне опыта и знаний отдельных экспертов, при этом возможны различные варианты представления коэффициентов компетентности, отличающиеся сложностью компетентностной модели экспертов и уровнем ее детализации.

Вариант 1. Каждый из экспертов $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_m$ обладает некоторой априорной компетентностью, которая в рамках данной экспертизы принимается неизменной. Тогда мы имеем набор скалярных коэффициентов компетентности экспертов $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$.

Вариант 2. Компетентность каждого из экспертов $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_m$ различна при сравнении элементов различных ступеней иерархии и зависит только от номеров ступеней. Тогда получается набор векторов компетентности экспертов $\alpha_s = (\alpha_{s1}, \alpha_{s2}, \dots, \alpha_{sn-1})$, $s = \overline{1, m}$.

Вариант 3. Компетентность каждого из экспертов $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_m$ различна при сравнении конкретных элементов смежных ступеней СИМОЭ. Тогда мы имеем набор матриц компетентности экспертов $\mathbf{Q}_{s1}, \mathbf{Q}_{s2}, \dots, \mathbf{Q}_{sn-1}$, элементами которых служат коэффициенты компетентности экспертов при сопоставлении соответствующих строке и столбцу элементов СИМОЭ:

$$\mathbf{Q}_{si} = \{\alpha_{jk}\}, s = \overline{1, m}, i = \overline{1, n-1}, j = \overline{1, l_i}, k = \overline{1, l_{i+1}},$$

где элемент α_{jk} матрицы $\mathbf{Q}_{si}$ – коэффициент компетентности s -го эксперта при анализе связи между элементами a_{ij} (j -й элемент i -й ступени СИМОЭ) и a_{i+1k} (k -й элемент $(i+1)$ -й ступени СИМОЭ).

Комплексирование экспертных мнений требует проведения анализа матриц (2), составленных экспертами, при котором проводятся последовательные сравнения аналогичных элементов матриц у разных экспертов, а также учитывается число или суммарная компетентность экспертов, высказав-

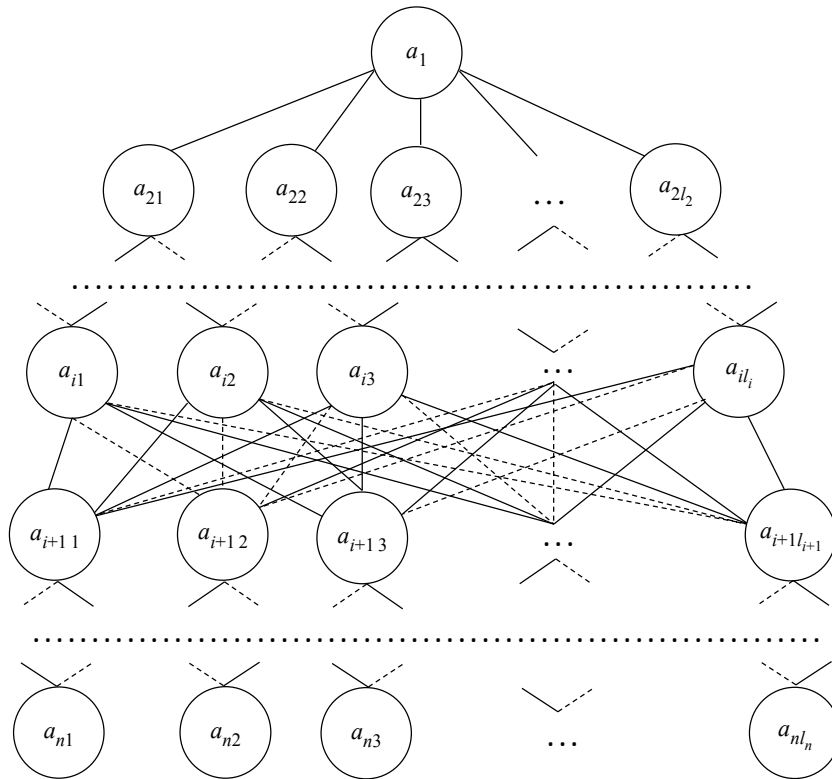


Рис. 3. Индивидуальная семантико-иерархическая модель объекта экспертизы (штриховые линии соответствуют связям, которые эксперт удалил из предложенной ему модели)
Fig. 3. Individual semantic-hierarchical model of the object of expertise (dashed lines correspond to the connections that the expert removed from the proposed model)

шихся за установление или за удаление каждой конкретной связи между элементами иерархии.

Анализ мнений экспертов⁹ относительно включения или не включения связи между элементами (показателями) a_{ij} (i -й элемент k -й ступени) и a_{i+1k} (k -й элемент $(i+1)$ -й ступени) в СИМОЭ реализуется рассмотренным далее образом с использованием следующих обозначений:

- x_{ijk} – число экспертов, высказавшихся за включение связи между элементом-родителем a_{ij} и элементом-потомком a_{i+1k} в СИМОЭ;

- $\bar{x}_{ijk}$ – доля экспертов, высказавшихся за включение связи между элементом-родителем a_{ij} и элементом-потомком a_{i+1k} в СИМОЭ;

- $1 - \bar{x}_{ijk}$ – доля экспертов, высказавшихся за исключение связи между элементом-родителем a_{ij} и элементом-потомком a_{i+1k} в СИМОЭ;

- ω_{ijk} – общая (суммарная) компетентность экспертов, высказавшихся за включение связи между элементом-родителем a_{ij} и элементом-потомком a_{i+1k} в СИМОЭ;

- $\bar{\omega}_{ijk}$ – доля компетентности экспертов, высказавшихся за включение связи между элементом-родителем a_{ij} и элементом-потомком a_{i+1k} в СИМОЭ, в общей компетентности всех экспертов относительно данной связи;

- $1 - \bar{\omega}_{ijk}$ – доля компетентности экспертов, высказавшихся за исключение связи между элементом-родителем a_{ij} и элементом-потомком a_{i+1k} в СИМОЭ, в общей компетентности всех экспертов относительно данной связи.

В зависимости от выбранного варианта компетентностной модели экспертов формульные зависимости, используемые для вычисления значений x_{ijk} , $\bar{x}_{ijk}$, ω_{ijk} , $\bar{\omega}_{ijk}$, будут иметь различный вид. В случае 1-го варианта значения x_{ijk} , $\bar{x}_{ijk}$, ω_{ijk} , $\bar{\omega}_{ijk}$ вычисляются с помощью (3), в случае же 2-го или 3-го вариантов вычисления проводятся по формулам (4) и (5) соответственно:

$$\begin{aligned} x_{ijk} &= \sum_{s=1}^m x_{sijk}, \quad \bar{x}_{ijk} = \sum_{s=1}^m x_{sijk} / m, \\ \omega_{ijk} &= \sum_{s=1}^m \alpha_s x_{sijk}, \quad \bar{\omega}_{ijk} = \sum_{s=1}^m \alpha_s x_{sijk} / \sum_{s=1}^m \alpha_s; \end{aligned} \quad (3)$$

⁹ Если введено ограничение на редактирование экспертами связей между элементами 1-й и 2-й ступеней ПСИМОЭ, анализ экспертных мнений следует начинать со связей между элементами 2-й и 3-й ступени, далее последовательно спускаясь по иерархии на одну ступень вниз.

$$\begin{aligned} x_{ijk} &= \sum_{s=1}^m x_{sijk}, \quad \bar{x}_{ijk} = \sum_{s=1}^m x_{sijk} / m, \\ \omega_{ijk} &= \sum_{s=1}^m \alpha_{si} x_{sijk}, \quad \bar{\omega}_{ijk} = \sum_{s=1}^m \alpha_{si} x_{sijk} / \sum_{s=1}^m \alpha_{si}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} x_{ijk} &= \sum_{s=1}^m x_{sijk}, \quad \bar{x}_{ijk} = \sum_{s=1}^m x_{sijk} / m, \\ \omega_{ijk} &= \sum_{s=1}^m \alpha_{sijk} x_{sijk}, \quad \bar{\omega}_{ijk} = \sum_{s=1}^m \alpha_{sijk} x_{sijk} / \sum_{s=1}^m \alpha_{sijk}. \end{aligned} \quad (5)$$

Результаты вычислений по формулам (3), (4) или (5) сводятся в наборы матриц вида

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i &= \{x_{jk}\}, \quad \bar{\mathbf{X}}_i = \{\bar{x}_{jk}\}, \quad \mathbf{W}_i = \{\omega_{jk}\}, \\ \bar{\mathbf{W}}_i &= \{\bar{\omega}_{jk}\}, \quad i = \overline{1, n-1}, \quad j = \overline{1, l_i}, \quad k = \overline{1, l_{i+1}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Итоговое решение об установлении или удалении связи между элементами a_{ij} и a_{i+1k} СИМОЭ принимается на основе элементов матриц (6) с применением обобщенных критериев, вычисляемых в виде среднего арифметического V_a , среднего геометрического V_g или среднего квадратического V_k :

$$\begin{aligned} V_a^+ &= (\bar{x}_{ijk} + \bar{\omega}_{ijk}) / 2, \quad V_a^- = 1 - V_a^+, \\ V_g^+ &= \sqrt{\bar{x}_{ijk} \bar{\omega}_{ijk}}, \quad V_g^- = \sqrt{(1 - \bar{x}_{ijk})(1 - \bar{\omega}_{ijk})}, \\ V_k^+ &= \sqrt{\left(\frac{-2}{\bar{x}_{ijk} + \bar{\omega}_{ijk}}\right) / 2}, \\ V_k^- &= \sqrt{(1 - \bar{x}_{ijk})^2 + (1 - \bar{\omega}_{ijk})^2} / 2. \end{aligned} \quad (7)$$

РГ выбирает один из критериев (7), и если для элементов СИМОЭ a_{ij} и a_{i+1k} выполняется критериальное условие $V^+ > V^-$, связь между данными элементами добавляется в РСИМОЭ.

Помимо простого сравнения доли экспертов и доли общей компетентности экспертов, высказавшихся за установление или удаление связи между элементами a_{ij} и a_{i+1k} СИМОЭ, критерии (7) позволяют использовать более сложные принципы принятия решений, например, базирующиеся на анализе истинности набора следующих неравенств: $V_a^+ > V_a^-$, $V_g^+ > V_g^-$, $V_k^+ > V_k^-$. Принимая во внимание возможное расхождение между результатами сравнения критериев (7) между собой (например, $V_a^+ = V_a^-$, $V_g^+ > V_g^-$, $V_k^+ < V_k^-$) можно сконструировать несколько комплексных критериев¹⁰:

¹⁰ Помимо комплексных критериев могут быть сконструированы и другие.

$$\begin{aligned}
V_1^+ &= (V_a^+ + V_\Gamma^+ + V_K^+)/3, V_1^- = (V_a^- + V_\Gamma^- + V_K^-)/3; \\
V_2^+ &= \sqrt[3]{V_a^+ V_\Gamma^+ V_K^+}, V_2^- = \sqrt[3]{V_a^- V_\Gamma^- V_K^-}; \\
V_3^+ &= \sqrt{((V_a^+)^2 + (V_\Gamma^+)^2 + (V_K^+)^2)/3}, \\
V_3^- &= \sqrt{((V_a^-)^2 + (V_\Gamma^-)^2 + (V_K^-)^2)/3}.
\end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, решение вопроса об установлении или удалении связи между элементами СИМОЭ a_{ij} и a_{i+1k} может быть принято на основании того из критериев (7) или (8), который РГ посчитает наиболее удобным и адекватным для задания *решающего правила*, позволяющего однозначно идентифицировать связи между элементами иерархии и тем самым перейти от ПСИМОЭ к РСИМОЭ.

Проводя подобный анализ и соответствующие вычисления для всех пар смежных элементов ПСИМОЭ, начиная с пары элементов a_{21} и a_{31} и заканчивая парой элементов $a_{n-1}l_{n-1}$ и $a_n l_n$, РГ получит РСИМОЭ I_R , которой будет соответствовать свой набор матриц межступенчатой связности $\mathbf{G}_{R1}, \mathbf{G}_{R2}, \dots, \mathbf{G}_{Rn-1}$, т. е. $\mathbf{G}_{Ri} = \{g_{ijk}\}$, $i = \overline{1, n-1}$, $j = \overline{1, l_i}$, $k = \overline{1, l_{i+1}}$.

Дополнительная стадия. Этап 6: корректировка компетентности экспертов¹¹. Корректировка компетентности экспертов направлена на приведение их коэффициентов компетентности к соответствию результативности их работы по идентификации связей РСИМОЭ, т. е. по сути представляет собой реализацию механизма обратной связи для экспертов и РГ, который полезен при условии многократного повторного привлечения к экспертизам определенного пула экспертов. Благодаря этому РГ получает инструмент рационального подбора экспертов, а сами эксперты – стороннюю оценку уровня их профессиональной и экспертной компетентности.

Целесообразность и степень корректировки коэффициента компетентности s -го эксперта $\mathcal{E}_s$ выявляется с помощью аналитического сравнения частной СИМОЭ I_s , представленной в виде набора матриц $\mathbf{G}_{s1}, \mathbf{G}_{s2}, \dots, \mathbf{G}_{sn-1}$, с РСИМОЭ I_R , представленной в виде набора матриц $\mathbf{G}_{R1}, \mathbf{G}_{R2}, \dots, \mathbf{G}_{Rn-1}$. Данное поэлементное сравнение матриц реализуется для каждого из экспертов $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_m$ отдельно и начинается с мат-

риц $\mathbf{G}_{s2}$ и $\mathbf{G}_{R2}$, отражающих связи между элементами 2-й и 3-й ступеней иерархии¹², а заканчивается матрицами $\mathbf{G}_{sn-1}$ и $\mathbf{G}_{Rn-1}$, отражающими связи между элементами предпоследней и последней ступеней иерархии.

При сравнении любой пары матриц $\mathbf{G}_{si}$ и $\mathbf{G}_{Ri}$ внимание обращается на имеющиеся различия или совпадения в одинаково расположенных элементах анализируемых матриц, которые могут проявляться в виде четырех возможных случаев:

- *Случай «01»:* элемент g_{jk} матрицы $\mathbf{G}_{si}$ равен 0, а элемент g_{jk} матрицы $\mathbf{G}_{Ri}$ равен 1, т. е. эксперт $\mathcal{E}_s$, посчитал¹³, что связь между элементами a_{ij} и a_{i+1k} несущественна, однако по обобщенному мнению экспертной группы, полученному РГ с помощью критериев (7) или (8), данная связь значима, и потому она присутствует в РСИМОЭ.

- *Случай «10»:* элемент g_{jk} матрицы $\mathbf{G}_{si}$ равен 1, а элемент g_{jk} матрицы $\mathbf{G}_{Ri}$ – 0, т. е. эксперт $\mathcal{E}_s$, посчитал¹⁴, что связь между элементами a_{ij} и a_{i+1k} значима, однако по обобщенному мнению экспертной группы, полученному РГ с помощью критериев (7) или (8), данная связь несущественна, и потому она отсутствует в РСИМОЭ.

- *Случай «11»:* элементы g_{jk} матриц $\mathbf{G}_{si}$ и $\mathbf{G}_{Ri}$ равны 1, т. е. мнение эксперта $\mathcal{E}_s$, который посчитал, что связь между элементами a_{ij} и a_{i+1k} значима, совпало с обобщенным мнением экспертной группы, и данная связь присутствует в РСИМОЭ.

- *Случай «00»:* элементы g_{jk} матриц $\mathbf{G}_{si}$ и $\mathbf{G}_{Ri}$ равны 0, т. е. мнение эксперта $\mathcal{E}_s$, который посчитал, что связь между элементами a_{ij} и a_{i+1k} несущественна, совпало с обобщенным мнением экспертной группы, и данная связь отсутствует в РСИМОЭ.

Таким образом, при поэлементном сравнении матриц $\mathbf{G}_{si}$ и $\mathbf{G}_{Ri}$ можно выявить по два вида несовпадений и совпадений пар их элементов. Далее будем полагать, что совпадение мнения отдельного

¹¹ Проведение дополнительной стадии целесообразно лишь в том случае, если РГ считает, что экспертиза прошла успешно и перед этим удалось получить РСИМОЭ, отражающую солидарное мнение большей части ЭГ об ОЭ.

¹² При ограничении на редактирование экспертами связью между элементами 1-й и 2-й ступеней ПСИМОЭ $\forall s = \overline{1, m}: \mathbf{G}_{s1} = \mathbf{G}_{R1}$.

¹³ Возможно, мнение эксперта обусловлено его излишней категоричностью в суждениях.

¹⁴ Возможно, мнение эксперта обусловлено его излишней осторожностью в суждениях.

эксперта с мнением квалифицированного большинства экспертов для каждого из рассмотренных случаев всегда одинаково влияет на корректировку коэффициента его компетентности, т. е. не зависит от текущего значения этого коэффициента или рассматриваемых ступеней иерархии.

Введем в рассмотрение набор матриц $\mathbf{B}_{si}$, каждая из которых будет содержать информацию о совпадении мнения s -го эксперта с обобщенным мнением экспертной группы относительно наличия и отсутствия связей между всеми элементами i -й и $(i + 1)$ -й ступеней СИМОЭ:

$$\mathbf{B}_{si} = \mathbf{G}_{si} - \mathbf{G}_{Ri} = \{b_{jk}\}, s = \overline{1, m}, \\ i = \overline{1, n-1}, j = \overline{1, l_i}, k = \overline{1, l_{i+1}}; \\ b_{jk} = \begin{cases} 0, \text{мнение } \mathcal{E}_s \text{ о наличии/отсутствии} \\ \text{связи между элементами } a_{ij} \text{ и } a_{i+1k} \\ \text{согласуется с } \mathcal{E}\mathcal{G}; \\ 1, \text{мнение } \mathcal{E}_s \text{ о наличии связи} \\ \text{между элементами } a_{ij} \text{ и } a_{i+1k} \\ \text{не согласуется с } \mathcal{E}\mathcal{G}; \\ -1, \text{мнение } \mathcal{E}_s \text{ об отсутствии} \\ \text{связи между элементами } a_{ij} \text{ и } a_{i+1k} \\ \text{не согласуется с } \mathcal{E}\mathcal{G}. \end{cases} \quad (9)$$

Каждой матрице из набора (9) поставим в соответствие вектор¹⁵ $\mathbf{b}_{si} = (b_{si}^-, b_{si}^0, b_{si}^+)$, элементы которого имеют следующие значения:

- b_{si}^- – число отрицательных элементов матрицы $\mathbf{B}_{si}$, т. е. число случаев «01», выявленных при аналитическом сравнении матриц $\mathbf{G}_{si}$ и $\mathbf{G}_{Ri}$, когда s -й эксперт посчитал связь между некоторой парой элементов i -й и $(i + 1)$ -й ступеней СИМОЭ несущественной, тогда как по обобщенному мнению ЭГ данная связь была признана значимой и, следовательно, отражена в РСИМОЭ;

- b_{si}^+ – число положительных элементов матрицы $\mathbf{B}_{si}$, т. е. число случаев «10», выявленных при аналитическом сравнении матриц $\mathbf{G}_{si}$ и $\mathbf{G}_{Ri}$, когда s -й эксперт посчитал связь между некоторой парой элементов i -й и $(i + 1)$ -й ступеней СИМОЭ значимой, тогда как по обобщенному мнению ЭГ данная связь была признана несущественной и, следовательно, не отражена в РСИМОЭ;

- b_{si}^0 – число нулевых элементов матрицы $\mathbf{B}_{si}$, т. е. суммарное число случаев «00» и «11», выяв-

ленных при аналитическом сравнении матриц $\mathbf{G}_{si}$ и $\mathbf{G}_{Ri}$, когда мнения ЭГ и s -го эксперта о значимости или несущественности связи между некоторой парой элементов i -й и $(i + 1)$ -й ступеней СИМОЭ совпали.

Для количественной оценки степени отклонения мнений отдельных экспертов от обобщенного мнения ЭГ введем в рассмотрение¹⁶ ε^+ и ε^- – допустимые доли отклонения мнения одного эксперта от мнения всей ЭГ, которые также можно характеризовать как допустимые степени категоричности и осторожности суждений эксперта. В простейшем случае ε^+ и ε^- имеют одинаковое численное значение (ε^+ и ε^-) и неизменны для всех ступеней иерархии, но при необходимости РГ может использовать различные значения, в том числе задать различные допустимые доли отклонения для каждой пары смежных ступеней иерархии, т. е. $\varepsilon_i = (\varepsilon_i^-, \varepsilon_i^+)$, $i = \overline{2, n-1}$.

Теперь для каждого s -го эксперта могут быть найдены наблюдаемые доли отклонения его суждений от обобщенного мнения ЭГ:

$$\beta_{si}^- = b_{si}^- / (b_{si}^- + b_{si}^0 + b_{si}^+), \\ \beta_{si}^+ = b_{si}^+ / (b_{si}^- + b_{si}^0 + b_{si}^+), \quad i = \overline{2, n-1}. \quad (10)$$

Альтернативный способ оценки доли отклонения мнения эксперта от обобщенного мнения ЭГ может базироваться на использовании функции $E(\mathbf{G}_{Ri})$, значение которой равно числу единичных элементов в матрице $\mathbf{G}_{Ri}$, т. е. числу установленных связей между i -й и $(i + 1)$ -й ступеней СИМОЭ. В этом случае наблюдаемые доли отклонения мнения s -го эксперта от обобщенного мнения ЭГ оцениваются следующим образом:

$$\tilde{\beta}_{si}^- = b_{si}^- / E(\mathbf{G}_{Ri}), \\ \tilde{\beta}_{si}^+ = b_{si}^+ / E(\mathbf{G}_{Ri}), \quad i = \overline{2, n-1}. \quad (11)$$

Выбор между способами (10) и (11) делает РГ. При высокой степени связности между элементами смежных ступеней иерархии оценки наблюдаемых долей отклонений, полученные этими двумя

¹⁵ Сумма элементов вектора $\mathbf{b}_{si}$ полностью определяется размером матрицы $\mathbf{B}_{si}$, т. е. числом элементов на i -й и $(i + 1)$ -й ступенях иерархии: $b_{si}^- + b_{si}^0 + b_{si}^+ = l_i l_{i+1}$.

¹⁶ Допустимые доли отклонения задаются РГ в зависимости от сложности экспертизы и строгости процедуры корректировки коэффициентов компетентности экспертов. В относительно простых экспертизах или в случае, если РГ считает целесообразным провести жесткую корректировку коэффициентов компетентности экспертов, участвовавших в экспертизе, допустимые доли отклонения выбираются из диапазона от 0.05 до 0.1. Таким образом, чем строже РГ и сложнее экспертиза, тем меньшее отклонение допускается при анализе согласованности экспертных мнений.

способами, будут различаться очень незначительно. В дальнейшем будем полагать, что вычисления проводились по формуле (10).

После вычисления для s -го эксперта *наблюдаемых долей отклонений* проводится их сопоставление с *допустимыми долями отклонения* посредством формирования двух следующих векторов:

$$\mathbf{r}_s^- = (r_{s2}^-, r_{s3}^-, \dots, r_{s(n-1)}^-), \quad \forall i = \overline{2, n-1}: r_{si}^- \geq 1, \\ r_{si}^- = \begin{cases} \beta_{si}^- / \varepsilon_i^-, & \text{если } \beta_{si}^- / \varepsilon_i^- > 1, \\ 1, & \text{если } 0 \leq \beta_{si}^- / \varepsilon_i^- \leq 1; \end{cases} \quad (12)$$

$$\mathbf{r}_s^+ = (r_{s2}^+, r_{s3}^+, \dots, r_{s(n-1)}^+), \quad \forall i = \overline{2, n-1}: r_{si}^+ \geq 1, \\ r_{si}^+ = \begin{cases} \beta_{si}^+ / \varepsilon_i^+, & \text{если } \beta_{si}^+ / \varepsilon_i^+ > 1, \\ 1, & \text{если } 0 \leq \beta_{si}^+ / \varepsilon_i^+ \leq 1. \end{cases} \quad (13)$$

На основе элементов векторов (12) и (13) могут быть вычислены коэффициенты категоричности и осторожности s -го эксперта, отражающие, как часто и как сильно он отклонялся от обобщенного мнения ЭГ, реализуя случаи «01» и «10» соответственно:

$$c_s^- = n^{-1} \sqrt[n-1]{\prod_{i=2}^{n-1} r_{si}^-}, \\ c_s^+ = n^{-1} \sqrt[n-1]{\prod_{i=2}^{n-1} r_{si}^+}, \quad c_s^- \geq 1, \quad c_s^+ \geq 1. \quad (14)$$

В свою очередь, на основе коэффициентов (14) может быть вычислен *коэффициент общей несогласованности* s -го эксперта, при этом РГ может использовать весовые коэффициенты γ^- и γ^+ , отражающие его представления о том, каким случаям несогласованности («01» или «10») он придает большее значение, и, соответственно, сильнее штрафовать экспертов¹⁷ за эти случаи:

$$c_s^\Sigma = \gamma^- c_s^- + \gamma^+ c_s^+ \geq 1, \quad \gamma^- + \gamma^+ = 1.$$

Теперь, чтобы провести корректировку коэффициента компетентности s -го эксперта α_s , остается найти *корректирующий множитель* Δ_s , и, соответственно, определить *скорректированный коэффициент компетентности* s -го эксперта, умножая α_s на Δ_s :

$$\alpha'_s = \alpha_s \Delta_s, \\ \Delta_s = \begin{cases} 1/c_s^\Sigma, & \text{если } 1/c_s^\Sigma \leq \Delta_{\max}, \\ \Delta_{\max}, & \text{если } 1/c_s^\Sigma > \Delta_{\max}. \end{cases} \quad (15)$$

Если РГ хочет ограничить масштаб возможной корректировки коэффициентов компетентности экспертов в (15) по итогам одной экспертизы, она может наложить ограничение на корректирующий множитель Δ_s , задав его максимальное допустимое значение $\Delta_{\max}$. Например, при $\Delta_{\max} = 2$ коэффициент компетентности любого эксперта можно будет уменьшить при корректировке не более чем в два раза.

Закключение. Рассмотренные в данной статье модели и процедуры анализа и обработки экспертных оценок позволяют:

- реализовать формализованный переход от РАМОЭ к РСИМОЭ, идентифицируя связи между атрибутами ОЭ, используя знания и опыт членов РГ и ЭГ;

- выполнить корректировку коэффициентов компетентности экспертов, задействованных для построения РСИМОЭ, на основе анализа их внутригрупповой согласованности.

Достоинствами предложенной методики служат:

- высокая степень формализации, позволяющая автоматизировать значительную часть расчетов;

- возможность динамического изменения коэффициентов компетентности экспертов в ходе длительной работы с ними;

- использование принципа обратной связи для анализа эффективности работы ЭГ по построению РСИМОЭ.

Актуальными направлениями дальнейшего развития представленного комплекса моделей и процедур анализа и обработки экспертных оценок можно считать:

- конструирование и анализ различных видов комплексных критериев, используемых для перехода от ПСИМОЭ к РСИМОЭ;

- усложнение модели введением матриц межступенчатой связности, элементы которых имеют небинарный вид;

- разработка этапа идентификации весов связей между элементами РСИМОЭ¹⁸ и этапа оценки эффективности работы РГ при построении ПСИМОЭ;

- расширение стадии корректировки коэффициентов компетентности таким образом, чтобы РГ имела возможность не только штрафовать экспертов, но и поощрять.

¹⁷ Если РГ посчитает случаи «01» и «10» одинаковыми по важности, оба весовых коэффициента будут равны 0.5.

¹⁸ Для этого в методику может быть интегрирован метод анализа иерархий, разработанный Т. Л. Саати [15].

Список литературы

1. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. М.: Статистика, 1980. 263 с.
2. Литвак Б. Г. Экспертные оценки и принятие решений. М.: ПП «Патент», 1996. 271 с.
3. Райхман Э. П., Азгальдов Г. Г. Экспертные методы в оценке качества товаров. М.: Экономика, 1974. 149 с.
4. Бурков Е. А., Падерно П. И., Пахарьков Г. Н. Экспертиза: системные проблемы и пути их решения при выборе медицинской аппаратуры // Биотехносфера. 2010. № 2(8). С. 6–14.
5. Коробов В. Б. Теория и практика экспертных методов / под ред. Б. И. Кочурова. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2021. 281 с.
6. Гузий А. Г., Лушкин А. М., Майорова Ю. А. Теория и практика экспертного анализа состояний сложных динамических систем. М.: ИД Академии Жуковского, 2015. 127 с.
7. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С. О применении экспертных методов при оценке эффективности и качества информационных систем // Системы и средства информатики. 2022. Т. 32, № 2. С. 47–57. doi: 10.14357/08696527220205.
8. Квалиметрическая экспертиза строительных объектов / под ред. В. М. Маругина, Г. Г. Азгальдова. СПб.: Политехника, 2008. 528 с.
9. Петриченко Г. С., Петриченко В. Г. Методика оценки компетентности экспертов // Политемат. сетевой электрон. науч. журн. КубГАУ. 2015. № 109(05). С. 80–91.
10. Петриченко Г. С., Петриченко В. Г. Экспертное оценивание при выборе эффективного мероприятия // Науч. вед. БелГУ. Сер.: Экономика. Информатика. 2015. № 13(210). С. 122–127.
11. Марычева П. Г. Методика оценки компетентности экспертов // Вестн. Самарского ГТУ. Сер.: Техн. науки. 2018. Т. 60, № 4. С. 29–40. doi: 10.14498/tech.2018.4.%25u.
12. Ситков Р. А., Щельников В. Н., Петрушин И. Е. Методика проведения экспертного опроса по оцениванию свойств и факторов, влияющих на качество и компетентность экспертов // Фундаментальные исследования. 2016. № 11 (ч. 5). С. 944–948.
13. Бурков Е. А., Падерно П. И. Подход к построению модели объекта экспертизы с возможностью корректировки компетентности экспертов и оценки деятельности рабочей группы. Ч. 1. Метод построения атрибутивной модели // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 5. С. 33–44. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-33-44.
14. Бурков Е. А., Падерно П. И. Подход к построению модели объекта экспертизы с возможностью корректировки компетентности экспертов и оценки деятельности рабочей группы. Ч. 2. Методы корректировки компетентности экспертов и оценки деятельности рабочей группы // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 6. С. 47–57. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-47-57.
15. Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / пер. с англ. д. т. н., проф. О. Н. Андрейчиковой. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 360 с.

Информация об авторах

Бурков Евгений Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: eaburkov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8788-6470>

Падерно Павел Иосифович – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Заслуженный деятель науки РФ.

E-mail: pipaderno@list.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9032-5084>

References

1. Beshelev S. D., Gurvich F. G. Matematiko-statisticheskie metody jekspertnyh ocenok. M.: Statistika, 1980. 263 s. (In Russ.).
2. Litvak B. G. Jekspertnye ocenki i prinjatje reshenij. M.: PP «Patent», 1996. 271 s. (In Russ.).
3. Rajhman Je. P., Azgal'dov G. G. Jekspertnye metody v ocenke kachestva tovarov. M.: Jekonomika, 1974. 149 s. (In Russ.).
4. Burkov E. A., Paderno P. I., Pahar'kov G. N. Jekspertiza: sistemnye problemy i puti ih reshenija pri vybore medicinskoj apparatury // Biotechnosfera. 2010. № 2(8). S. 6–14. (In Russ.).
5. Korobov V. B. Teorija i praktika jekspertnyh metodov / pod red. B. I. Kochurova. M.: NIC INFRA-M, 2021. 281 s. (In Russ.).
6. Guzij A. G., Lushkin A. M., Majorova Ju. A. Teorija i praktika jekspertnogo analiza sostojanij slozhnyh dinamicheskix sistem. M.: ID Akademii Zhukovskogo, 2015. 127 s. (In Russ.).
7. Zacarinnyj A. A., Iononkov Ju. S. O primenenii jekspertnyh metodov pri ocenke jeffektivnosti i kachestva informacionnyh sistem // Sistemy i sredstva informatiki. 2022. T. 32. №. 2. S. 47–57. doi: 10.14357/08696527220205. (In Russ.).

8. Kvalimetriceskaja jekspertiza stroitel'nyh ob#ektov / pod. red. V. M. Marugina, G. G. Azgal'dova. SPb.: Politehnika, 2008. 528 s. (In Russ.).

9. Petrichenko G. S., Petrichenko V. G. Metodika ocenki kompetentnosti jekspertov // Politemat. setevoy jelektron. nauch. zhurn. KubGAU. 2015. № 109(05). S. 80–91. (In Russ.).

10. Petrichenko G. S., Petrichenko V. G. Jekspertnoe ocenivanie pri vybere jeffektivnogo meroprijatija // Nauchnye vedomosti BelGU. Ser.: Jekonomika. Informatika. 2015. № 13(210). S. 122–127. (In Russ.).

11. Marycheva P. G. Metodika ocenki kompetentnosti jekspertov // Vestn. Samarskogo GTU. Ser.: Tehnicheskie nauki. 2018. T. 60, № 4. S. 29–40. doi: 10.14498/tech.2018.4.%25u. (In Russ.).

12. Sitkov R. A., Shhel'nikov V. N., Petrushin I. E. Metodika provedeniya jekspertnogo oprosa po ocenivaniju svoystv i faktorov, vlijajushhih na kachestvo i kompe-

tentnost' jekspertov // Fundamental'nye issledovaniya. 2016. № 11 (chast' 5). S. 944–948. (In Russ.).

13. Burkov E. A., Paderno P. I. Podhod k postroeniju modeli ob#ekta jekspertizy s vozmozhnost'ju korrektilirovki kompetentnosti jekspertov i ocenki dejatel'nosti rabochej gruppy. Ch. 1. Metod postroeniya atributivnoj modeli // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2025. T. 18, № 5. S. 33–44. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-33-44. (In Russ.).

14. Burkov E. A., Paderno P. I. Podhod k postroeniju modeli ob#ekta jekspertizy s vozmozhnost'ju korrektilirovki kompetentnosti jekspertov i ocenki dejatel'nosti rabochej gruppy. Ch. 2. Metody korrektilirovki kompetentnosti jekspertov i ocenki dejatel'nosti rabochej gruppy // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2025. T. 18, № 6. S. 47–57. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-47-57. (In Russ.).

15. Saati T. L. Prinjatие reshenij pri zavisimostyah i obratnyh svyazjah: Analiticheskie seti / per. s angl. d. t. n., prof. O. N. Andrejchikovej. M.: Izd-vo LKI, 2008. 360 s. (In Russ.).

Information about the authors

Evgeniy A. Burkov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Information Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: eaburkov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8788-6470>

Pavel I. Paderno – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Information Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University. Honored Worker of Science of the Russian Federation.

E-mail: pipaderno@list.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9032-5084>

Статья поступила в редакцию 13.05.2025; принята к публикации после рецензирования 27.05.2025; опубликована онлайн 29.09.2025.

Submitted 13.05.2025; accepted 27.05.2025; published online 29.09.2025.