

УДК 519.816

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2025-18-8-50-58>

Методика идентификации весовых коэффициентов связей и компонентов семантической модели на основе групповых парных сравнений

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

Аннотация. Разработана поэтапная методика анализа и обработки групповых экспертных оценок, позволяющая формализовать и решить задачу идентификации весовых коэффициентов связей и компонентов семантической модели иерархического типа, предварительно построенной для некоторой предметной области или проблемной ситуации. В основу методики положен модифицированный для работы с группой экспертов метод анализа иерархий, предложенный Т. Саати. Особенность методики заключается в использовании специально разработанного критерия согласованности экспертных оценок, выраженных в шкале отношений, позволяющего количественно оценить возможность комплексирования (поэлементного перемножения) матриц парных сравнений экспертов группы. Для применения методики должны быть заданы весовые коэффициенты, отражающие знания и компетентность отдельных экспертов группы в различных аспектах предметной или проблемной области. На первом этапе методики эксперты попарно сравнивают между собой компоненты выделенного фрагмента семантической модели по степени их значимости (вклада в модель). Далее из экспертных суждений, приведенных к численному виду с помощью специальной вербально-числовой шкалы, формируются матрицы парных сравнений. На втором и третьем этапах определяются сначала векторы, а затем матрицы компетентности отдельных экспертов, необходимые для выполнения последующих этапов методики. На четвертом этапе вычисляются групповые матрицы парных сравнений комплексированием матриц парных сравнений отдельных экспертов. На пятом этапе выполняется проверка адекватности полученного результата с помощью предложенного критерия согласованности. В случае низкой согласованности наиболее диссонирующие частные матрицы парных сравнений исключаются и групповая матрица пересчитывается. На последнем этапе методики от корневого компонента и вниз последовательно вычисляются весовые коэффициенты сначала связей (локальных приоритетов), а затем компонентов (глобальных приоритетов) семантической модели.

Ключевые слова: матрица парных сравнений, согласованность экспертов, семантическая модель, локальный приоритет, глобальный приоритет, комплексирование, метод анализа иерархий, экспертные оценки

Для цитирования: Бурков Е. А., Падерно П. И. Методика идентификации весовых коэффициентов связей и компонентов семантической модели на основе групповых парных сравнений // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 8. С. 50–58. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-8-50-58.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Method for Identifying Weight Coefficients of Connections and Components of a Semantic Model Based on Group Paired Comparisons

E. A. Burkov✉, P. I. Paderno

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ eaburkov@gmail.com

Abstract. This paper proposes a step-by-step methodology for analyzing and processing group expert assessments that allows formalizing and solving the problem of identifying the weighting coefficients of connections and components of a hierarchical semantic model preliminarily constructed for a certain subject area or problem situation. The methodology is based on the analytic hierarchy process proposed by T. Saaty, modified for working with a group of experts. The peculiarity of the methodology lies in the use of a specially developed criterion for the consistency of expert assessments expressed in a ratio scale, which allows for a quantitative assessment of the possibility of combining (element-by-element multiplication) matrices of pairwise comparisons of experts. To apply the methodology, weight coefficients are used that reflect the knowledge and competence of individual experts of the group in various aspects of the subject or problem area. At the first stage of the methodology, experts compare the components of the selected fragment of the semantic model in pairs according to their degree of significance (contribution to the model). Then, from the expert judgments reduced to a numerical form using a special verbal-numerical scale, pairwise comparison matrices are formed. At the second and third stages, vectors and then matrices of competence of individual experts are determined, which are necessary for the implementation of subsequent stages of the methodology. At the fourth stage, group matrices of paired comparisons are calculated by combining the matrices of paired comparisons of individual experts. At the fifth stage, the adequacy of the obtained result is checked using the proposed consistency criterion. In case of low consistency, the most dissonant private matrices of paired comparisons are excluded and the group matrix is recalculated. At the last stage of the methodology, weight coefficients are calculated sequentially from the root component and downwards, first for connections (local priorities), and then for components (global priorities) of the semantic model.

Keywords: matrix of paired comparisons, expert consistency, semantic model, local priority, global priority, aggregation, analytic hierarchy process, expert assessments

For citation: Burkov E. A., Paderno P. I. Method for Identifying Weight Coefficients of Connections and Components of a Semantic Model Based on Group Paired Comparisons // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 8. P. 50–58. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-8-50-58.

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

Системный подход к принятию решений не приемлет в качестве основных точек опоры интуицию и личный опыт, как это было во времена, когда управление было скорее искусством, чем наукой. И по мере накопления знаний и развития науки и техники установился глобальный тренд на применение математических моделей принятия решений в полном соответствии с высказыванием Иммануила Канта о тождественности истины и математики в науке. Некогда машины позволили человеку избавиться от бремени тяжелого физического труда, и на современном этапе технического прогресса все активнее поднимается вопрос не только формализации процессов сбора, обработки и анализа данных, но и передачи ма-

шина права принятия решений, от которых в прямом смысле может зависеть жизнь человека. Тем не менее, существуют области, где не только автоматизация, но даже и формализация процессов контроля и управления продвигается с большим трудом. В первую очередь, речь, конечно, о так называемом человеческом факторе, исключение или снижение влияния которого и подразумевает автоматизация, а также о различных гуманитарных и смежных с ними областях человеческой деятельности, в которых субъективный человеческий опыт пока не удастся в полной мере заменить математическими моделями и базами знаний. Но работа в этом направлении все равно ведется, и одна из ветвей системного анализа, из-

вестная как теория принятия решений, занимается постановкой и решением задач, напрямую с этим связанных. Среди них можно выделить задачи, связанные с коллективным принятием решений.

Сама по себе идея коллективного принятия решений совсем не нова и возникла вместе с усложнением структуры человеческого социума. Различные советы, собрания, комиссии и жюри представляют собой один из старейших и по сию пору актуальных механизмов человеческого самоуправления. Однако и проблемы, связанные с эффективным применением этого механизма, существуют столь же давно, поскольку имманентно проистекают из ранее упомянутого человеческого фактора, избавиться от которого можно только вместе с самим человеком. Как отобрать людей, которые действительно обладают нужными знаниями и навыками? Как обеспечить плодотворную коммуникацию и сотрудничество между этими людьми? Что делать, если не получается достичь консенсуса? Все эти вопросы актуальны и по сей день.

Концепция групповых экспертиз состоит в том, что для решения сложной проблемы (при этом сложность может проистекать из целого ряда различных факторов и условий: масштабности проблемы, срочности ее решения, высокой цены ошибки и т. п.) необходимо привлечь специалистов соответствующей предметной или профессиональной области. Эти специалисты, которых далее будем называть экспертами, во-первых, призваны обеспечить базу необходимых для решения проблемы знаний, во-вторых, должны выполнить анализ проблемы, который даже если не позволит получить ее однозначное и полное решение, то обеспечит рекомендации по тому, как ее нужно решать дальше.

Широко применяемый системный подход к решению сложных проблем состоит в их аналитическом структурировании и редукции или, иначе говоря, в поэтапной декомпозиции исходной проблемы. В результате такого подхода может быть получена семантическая модель, или иначе онтология, проблемы либо области существования проблемы, которую удобно визуализировать в виде графа, иерархии или дерева (все это варианты структуры модели от более сложных к более простым). Вначале выделяются определенные семантические слои или аспекты проблемы (например, экономический, социальный, технический и т. п.), каждый из которых сам по себе может быть весьма сложным и требовать для анализа экспертов отдельного профиля. В рамках

каждого такого слоя или среза проблемы выделяются факторы, ключевые для него. Затем определяются характеристики (свойства, показатели, атрибуты), которые тем или иным образом связаны с каждым фактором либо своей совокупностью и образуют его. Очевидно, что чем более комплексная проблема, тем сложнее будет и система связей между ключевыми факторами и определяющими их характеристиками; при этом, как правило, характеристики связаны не с одним фактором, а с несколькими. Таким образом, построение адекватной семантической модели представляет собой трудноформализуемую задачу, даже если существуют ограничения на количество учитываемых семантических слоев и задаваемую структуру модели, с которой обычно и начинается построение модели. Здесь задача идентификации структуры семантической модели рассматриваться не будет¹; будем полагать, что структура модели уже задана, т. е. определены компоненты модели и ключевые связи между ними.

Следующий этап в создании и развитии семантической модели заключается в идентификации ее ключевых численных параметров, в частности – в установлении характера и силы связей между ее компонентами. Эта задача может быть эффективно решена с помощью метода Саати, который также широко известен под названием «метод анализа иерархий» [4]. Данный метод хорошо формализован, имеет объективные математические основания и несложен в вычислительном плане и изначально был разработан для индивидуального принятия решений, но одна из множества модификаций и адаптаций метода Саати [5] открывает возможность его применения группой экспертов.

При описании этапов методики идентификации весов компонентов и связей модели будем рассматривать семантическую модель иерархического типа (СМИТ), в которой компоненты верхних уровней рассматриваются в виде совокупности (комбинации) компонентов нижних уровней, при этом связи могут быть только между компонентами различных уровней (в любой паре связанных компонентов СМИТ будем называть вышестоящий компонент родителем, а нижестоящий – потомком).

Все компоненты СМИТ можно однозначно проиндексировать с помощью пары переменных (h, k) , $h \in N$, $k \in N$, первая из которых указывает на уровень СМИТ, на котором находится компо-

¹ Возможным подходом к идентификации структуры семантической модели служит построение диаграммы Исикавы [1]–[3].

нент, а вторая – его индекс на этом уровне (система индексации на уровнях может быть лексико-графической или любой иной). Введем следующие обозначения: $c(h, k)$ – k -й компонент h -го уровня СМИТ; $m(h, k)$ – число компонент-потомков у $c(h, k)$; $n(h, k)$ – число компонент-родителей у $c(h, k)$; $c(h, k) \uparrow c(i, j)$ – компонент $c(h, k)$ является потомком компонента $c(i, j)$; $c(h, k) \downarrow c(i, j)$ – компонент $c(h, k)$ является родителем компонента $c(i, j)$; v_h – число компонентов на h -м уровне СМИТ. Как правило, количество компонентов на каждом уровне СМИТ растет вместе с индексом уровня: на первом уровне находится только один компонент – корневой ($v_1 = 1$), а книзу модель расширяется.

Этап 1. Формирование матриц парных сравнений. Для определения того, в какой мере нижестоящие компоненты-потомки влияют на вышестоящий компонент-родитель или определяют его, эксперты должны индивидуально (возможно, после коллективного обсуждения) выразить свое суждение по этому вопросу. Таким образом, в СМИТ итеративно выделяется фокальный компонент² (родительский), а затем – группа компонентов, расположенных на более низких уровнях и связанных с фокальным компонентом (визуально – гроздь компонентов-потомков). Все компоненты из этой группы попарно сравниваются между собой по степени их влияния на фокальный компонент (k -й компонент h -го уровня СМИТ), а затем результаты сравнений, выполненных s -м экспертом, сводятся в квадратную матрицу парных сравнений (МПС):

$$A_s^{(h,k)} = \|a_{ij}\|_{m(h,k) \times m(h,k)},$$

размер которой определяется числом сравниваемых между собой компонентов-потомков у k -го компонента h -го уровня СМИТ. Итоговое число МПС, которые должны быть сформированы каждым экспертом, соответствует количеству возможных фокальных компонентов, т. е. числу компонентов СМИТ, имеющих потомков.

Попарное сравнение компонентов может выполняться различными способами [6]. Оригинальный метод анализа иерархий (МАИ) предполагает использование вербально-семантической

шкалы отношений с диапазоном от 1/9 до 9 [4]. Эксперт выражает свое мнение в виде суждения о приоритете одного компонента над другим, затем с помощью шкалы происходит оцифровка суждения, т. е. получение количественной экспертной оценки. Например, если эксперт решил, что первый компонент из группы подлежащих сравнению компонентов несоизмеримо более значим, чем второй, то в МПС на пересечении первой строки и второго столбца будет стоять число 9, а на пересечении второй строки и первого столбца – 1/9: $a_{ij} = 9$, $a_{ji} = 1/9$. Сформированная таким образом матрица, исходя из ее математических свойств, проверяется на внутреннюю непротиворечивость с помощью индекса согласованности [4], чтобы установить степень логичности и транзитивности суждений эксперта об относительной значимости прошедших сравнение компонентов. В случае высокой внутренней несогласованности элементов МПС нужно либо сформировать ее повторно, либо исключить данную матрицу из последующей обработки.

Этап 2. Определение поуровневых векторов экспертной компетентности. Существуют различные методы оценки компетентности экспертов: самооценка, тестовые методики, подходы на основе учета профессиональных и научных достижений [7]–[10]. Независимо от выбранного метода обычно принято представлять оценку компетентности эксперта в виде численного коэффициента в некоторой шкале или диапазоне, например от 0 до 10 или от 0 до 1 (для рассматриваемой методики ширина шкалы или диапазона изменения оценок компетентности экспертов неважна).

Будем полагать, что базовые коэффициенты компетентности экспертов, отражающие уровень их понимания каждого из аспектов проблемы (компонентов второго уровня СМИТ) уже известны, т. е. для каждого эксперта задан вектор экспертной компетентности (ВЭК) $\mathbf{w}_s^{(2)} = (w_s(2,1), \dots, w_s(2, v_h))$, каждый элемент которого представляет собой численную оценку его компетентности относительно соответствующего компонента второго уровня СМИТ.

Для выполнения следующего этапа методики следует поэлементно определить ВЭК для всех нижележащих уровней СМИТ, начиная с третьего уровня и вплоть до последнего. Расчет коэффициента компетентности s -го эксперта по k -му компоненту h -го уровня СМИТ выполняется по

² Формирование МПС, как правило, проводится начиная с первого уровня СМИТ, т. е. первым фокальным компонентом выбирается корневой компонент СМИТ.

формуле³, представляющей собой среднее геометрическое коэффициентов компетентности этого эксперта по всем компонентам-родителям $c(h, k)$:

$$w_s(h, k) = n(h, k) \sqrt[n(h, k)]{\prod_{\substack{c(h, k) \uparrow c(i, j) \\ j \in [1; v_h]}} w_s^{(i, j)}}, \quad i \in [2; h-1], \quad (1)$$

Расчет коэффициентов компетентности на основе среднего геометрического призван устранить компенсацию низких знаний по одному компоненту СМИТ высокими знаниями по другому. Это особенно целесообразно в тех случаях, когда родительские компоненты крайне разнородны по своему характеру, или, говоря языком математики, очень слабо коррелируют друг с другом. Более строгий по сравнению с (1) вариант расчета коэффициентов компетентности, при котором учитывается только тот родительский компонент, знания о котором у эксперта самые слабые, базируется на использовании формулы

$$w_s(h, k) = \min_{c(h, k) \uparrow c(i, j)} \{w_s^{(i, j)}\}, \quad i \in [2; h-1], \quad (2)$$

$$j \in [1; v_h],$$

в которой минимум ищется на множестве коэффициентов компетентности, задаваемых компонентами-родителями $c(h, k)$. Вариант (2) имеет смысл использовать в тех случаях, когда сравниваемые компоненты СМИТ обладают повышенной сложностью для познания и анализа. Если же речь идет о ситуации, когда родительские компоненты семантически близки (имеют выраженную корреляцию между собой), расчет коэффициентов компетентности можно проводить на основе среднего арифметического:

$$w_s(h, k) = \frac{\sum_{c(h, k) \uparrow c(i, j)} w_s^{(i, j)}}{n(h, k)},$$

$$i \in [2; h-1], \quad j \in [1; v_h].$$

По завершении данного этапа методики каждому эксперту должно соответствовать число ВЭК, равное числу уровней СМИТ за вычетом первого, для которого в рамках данной методики нет необходимости определять ВЭК.

Этап 3. Определение матриц экспертной компетентности. Зная все ВЭК каждого из экспертов, необходимо с их помощью определить требуе-

мые для выполнения следующего этапа методики матрицы экспертной компетентности (МЭК):

$$Q_s^{(h, k)} = \|q_{ij}\|_{m(h, k) \times m(h, k)},$$

каждая из которых дополняет соответствующую МПС $A_s^{(h, k)}$. Элементы МЭК представляют собой численную оценку компетентности s -го эксперта при попарном сравнении i -го и j -го компонентов h -го уровня СМИТ, имеющих общего родителя, который выступает в роли фокального компонента, т. е. элементы МЭК отражают уровень надежности соответствующего элемента (экспертной оценки) a_{ij} МПС $A_s^{(h, k)}$ и по аналогии со вторым этапом методики они могут быть вычислены разными способами в зависимости от характера взаимосвязи соответствующих сравниваемых попарно компонентов СМИТ:

$$q_{sij}(h, k) = \begin{cases} \sqrt{w_{si}(h, k) w_{sj}(h, k)}, \\ \min\{w_{si}(h, k), w_{sj}(h, k)\}, \\ (w_{si}(h, k) + w_{sj}(h, k))/2. \end{cases}$$

Этап 4. Получение групповых матриц парных сравнений. Классический МАИ ориентирован на индивидуальное применение, когда для каждого компонента СМИТ (кроме компонентов самого нижнего уровня, у которых нет потомков) формируется единственная МПС. При проведении групповой экспертизы необходимо воспользоваться модификацией метода, которая позволяет комплексировать (объединить) МПС, сформированные разными экспертами для одного и того же компонента СМИТ, посредством их поэлементного произведения⁴ [5], и получить на выходе групповые матрицы парных сравнений (ГМПС):

$$Z^{(h, k)} = \bigotimes_{s=1}^g (A_s^{(h, k)}) \otimes Q_s^{(h, k)} =$$

$$= \|z_{ij}\|_{m(h, k) \times m(h, k)}. \quad (3)$$

Этап 5. Проверка согласованности матриц парных сравнений. Специальная обработка ГМПС позволяет определить искомые весовые коэффициенты компонентов и связей СМИТ. В терминологии МАИ – синтезировать локальные и глобальные приоритеты компонентов СМИТ. Но предварительно следует выполнить проверку корректности получения ГМПС способом (3) с

³ Если у k -го компонента h -го уровня СМИТ имеется только один компонент-родитель, то коэффициент компетентности полностью наследуется от него.

⁴ Другое название такого поэлементного произведения матриц – произведение Адамара.

точки зрения согласованности мнений отдельных экспертов, иначе есть риск получить пресловутую среднюю температуру по больнице.

В [11] был предложен критерий оценки согласованности экспертных оценок (в данном случае – результатов парного сравнения i -го и j -го компонентов СМИТ), полученных от двух разных экспертов (1-го и 2-го) с применением шкалы отношений, с учетом различия в уровне компетентности этих экспертов:

$$d_{ij} = \hat{q}_{ij} \left| \log_r \frac{a_{1ij}}{a_{2ij}} \right| = \min \left\{ \frac{q_{1ij}}{q_{1ij} + q_{2ij}}, \frac{q_{2ij}}{q_{1ij} + q_{2ij}} \right\} \left| \log_r \frac{a_{1ij}}{a_{2ij}} \right|, \quad (4)$$

где $\hat{q}_{ij} \in [0; 0.5]$ – весовой коэффициент, отражающий значимость имеющегося противоречия между оценками 1-го и 2-го экспертов: чем меньше разрыв в компетентности между экспертами, тем более важно противоречие между их мнениями⁵; r – параметр, зависящий от шкалы, используемой для попарного сравнения компонентов СМИТ, и для классического МАИ он равен 9.

В [11] показано, что граничным значением (4) для МАИ со шкалой отношений от 1/9 до 9 служит $\alpha = 0.315$. Если значение критерия (4) превышает α , то оценки экспертов слишком рассогласованы, чтобы их можно было тем или иным образом усреднять.

Указанный критерий можно использовать для оценки не только согласованности отдельных результатов парных сравнений, но и в целом МПС, составленных двумя разными экспертами. Пусть $\mathbf{A}_1$ и $\mathbf{A}_2$ – МПС, сформированные для фокального компонента $c(h, k)$ 1-м и 2-м экспертом соответственно. Рассчитаем на основе (4) матрицу рассогласованности парных сравнений (МРПС) этих двух экспертов:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{1|2}^{(h,k)} &= \|d_{ij}\|_{m(h,k) \times m(h,k)} = \\ &= \left\| \min \left\{ \frac{q_{1ij}}{q_{1ij} + q_{2ij}}, \frac{q_{2ij}}{q_{1ij} + q_{2ij}} \right\} \times \right. \\ &\quad \left. \times \left| \log_r \frac{a_{1ij}}{a_{2ij}} \right| \right\|_{m(h,k) \times m(h,k)}. \end{aligned} \quad (5)$$

⁵ При комплексировании экспертных оценок на основе (3) несогласованность между экспертами разрешается в пользу более компетентного эксперта тем надежнее, чем больше разница в их компетентности, и чем меньше расхождение между их оценками.

Если для МРПС (5) двух экспертов выполняется условие

$$\forall j \in [1; m(h, k)]: \sum_{i=1, i \neq j}^{m(h, k)} d_{ij} \leq (m(h, k) - 1)\alpha,$$

то согласованность оценок экспертов на уровне МПС высокая, следовательно, матрицы $\mathbf{A}_1$ и $\mathbf{A}_2$ можно корректно комплексировать по формуле (3); в противном случае комплексировать матрицы $\mathbf{A}_1$ и $\mathbf{A}_2$ нельзя. Столбцы матрицы (5), для которых приведенное условие не выполняется, указывают на то, по каким именно компонентам СМИТ мнения 1-го и 2-го экспертов существенно расходятся.

Нужно заметить, что попарная оценка согласованности с помощью (5) для группы, включающей g экспертов, для одного любого компонента СМИТ $c(h, k)$ потребует выполнения $g(g-1)/2$ процедур анализа, если предварительно попарно проверять возможность комплексирования МПС отдельных экспертов, а лишь затем, с учетом результатов анализа согласованности, выполнять само комплексирование. Если же действовать в обратном порядке, т. е. сначала выполнить комплексирование МПС всех экспертов и получить ГМПС для $c(h, k)$, а уже затем проверять согласованность индивидуальных МПС с полученной ГМПС, то число процедур анализа согласованности можно сократить до g .

Для проведения анализа согласованности индивидуальных МПС с полученной ГМПС требуется построить МРПС между группой и отдельным s -м экспертом⁶:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{\Omega|s} &= \|d_{ij}\|_{m(h,k) \times m(h,k)} = \\ &= \left\| \min \left\{ \frac{\sum_{l=1, l \neq s}^g q_{lij}}{\sum_{l=1, l \neq s}^g q_{lij} + q_{sij}}, \frac{q_{sij}}{\sum_{l=1, l \neq s}^g q_{lij} + q_{sij}} \right\} \times \right. \\ &\quad \left. \times \left| \log_r \frac{z_{ij}}{a_{sij}} \right| \right\|_{m(h,k) \times m(h,k)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Если для s -го эксперта была выявлена низкая согласованность с ГПМС, т. е. не выполняется условие

⁶ На данном шаге целесообразно перебирать экспертов в соответствии с их уровнем компетентности – начиная с более компетентных и заканчивая менее компетентными.

$$\mathbf{D}_{\Omega|s} = \|d_{ij}\| : \forall j \in [1; m(h, k)] : \\ \sum_{i=1, i \neq j}^{m(h, k)} d_{ij} \leq (m(h, k) - 1)\alpha,$$

то этому эксперту может быть предоставлена возможность откорректировать свою МПС, которая затем вновь проверяется на согласованность с ГМПС. Если эксперт не воспользовался предоставленной возможностью или откорректированная им МПС вновь не согласуется с ГМПС, то ГМПС пересчитывается без учета МПС данного эксперта. Если организатор экспертизы или глава рабочей группы, отвечающей за проведение экспертизы, имеет необходимые ресурсы и считает это необходимым, то проверка согласованности индивидуальных МПС с ГМПС может итеративно проводиться заново после каждого пересчета ГМПС. В том случае, когда описанная процедура не позволяет получить ГМПС, с которой согласуются мнения большинства экспертов, то это может потребовать реорганизации экспертной группы: нужно либо пригласить дополнительных экспертов, чтобы разрешить сложившуюся ситуацию, либо разделить экспертов на отдельные подгруппы (коалиции) и провести экспертизу отдельно с каждой из них. Другой вариант решения проблемы несогласованности экспертов заключается в перестройке или адаптации СМИТ. Необходимо выявить конкретные компоненты СМИТ, по которым эксперты не могут прийти к согласию, и либо исключить их из онтологической модели, что проще всего, либо изменить ее таким образом, чтобы попытаться уйти от ситуации несогласованности.

Этап 6. Вычисление локальных и глобальных приоритетов. Каждая ГМПС, полученная после выполнения предыдущего этапа, подвергается обработке в соответствии с алгоритмом МАИ [4]: вычисляется вектор локальных приоритетов, т. е. вектор весов связей фокального компонента с его компонентами-потомками

$$\mathbf{x}^{(h, k)} = (x_1(h, k), \dots, x_{m(h, k)}(h, k)), \\ x_i(h, k) = \frac{m(h, k) \sqrt{z_{i1} z_{i2} \dots z_{im(h, k)}}}{\sum_{j=1}^{m(h, k)} m(h, k) \sqrt{z_{j1} z_{j2} \dots z_{jm(h, k)}}}, \quad (7) \\ i \in [1, m(h, k)].$$

Элементы этого вектора как раз и отражают относительную важность компонентов-потомков с точки зрения влияния на фокальный компонент-родитель.

Локальные приоритеты синтезируются сверху вниз для всех компонентов СМИТ начиная со второго уровня. При этом сумма локальных приоритетов компонентов для любого фокального компонента СМИТ равна единице, т. е. в рассматриваемой СМИТ фокальный компонент полностью определяется своими компонентами-потомками.

После нахождения локальных приоритетов выполняется расчет глобальных приоритетов, т. е. весов компонентов СМИТ, сумма которых на каждом уровне должна быть равна единице. Процедура расчета выполняется от корневой вершины СМИТ к ее нижнему уровню, вычисляя составляющие приоритета (веса) корневого компонента, которые перешли в отдельные компоненты второго уровня, а от них – в компоненты третьего уровня, и т. д. Таким образом, глобальный приоритет любого некорневого компонента СМИТ $c(h, k)$ определяется как сумма перешедших к нему долей глобальных приоритетов вышестоящих компонентов, с которыми этот компонент связан. При этом вес каждой связи (локальный приоритет) умножается на вес компонента-родителя (глобальный приоритет), а затем вычисляется сумма таких произведений по всем родительским компонентам):

$$y(h, k) = \sum_{c(h, k) \uparrow c(i, j)} x(i, j) y(i, j), \quad i \in [1; h-1], \\ j \in [1; v_h], \quad y(1, 1) = 1.$$

С получением на шестом этапе (6) и (7) цель применения методики по идентификации весовых коэффициентов связей и компонентов можно считать достигнутой. Для этого в качестве входных данных должны быть использованы:

- семантическая модель иерархического типа (СМИТ);
- МПС компонентов модели, сформированные в результате опроса группы экспертов;
- коэффициенты компетентности экспертов по каждому аспекту проблемы (в СМИТ аспекты расположены на втором уровне).

Использование методики. Ввиду появления достаточно большого числа задач, связанных с необходимостью слабоформализованного выбора некоторой альтернативы (объекта, технологии и др.) из числа имеющихся, которую различные

группы пользователей могут применять по-разному, использование предложенной методики позволит в полной мере учитывать мнения практически всех заинтересованных групп пользователей, сформулированные в виде оценок различных групп экспертов.

Наиболее часто такие задачи возникают:

– при выборе (приобретении) многофункционального программного или технического продукта, который может применяться различными пользователями по-разному;

– при проектировании перспективных информационных технологий с включением элементов искусственного интеллекта (ИИ) – при отборе материала для обучения, в том числе и при формировании групп экспертов, ответственных за этот отбор.

Закключение. Разработанная методика может стать методологической основой для развития направления, связанного с использованием экспертных оценок. При этом методика позволяет практически в полной мере учитывать взгляды и, следовательно, мнения различных групп экспертов. Достаточно четкая формализация всех аспектов оценки значимости элементов иерархии позволяет однозначно алгоритмизировать весь процесс и, следовательно, служит основой для создания соответствующего программного инструмента, применение которого может упростить корректное решение практических задач, связанных с обоснованным выбором альтернатив.

Список литературы

1. Исикава К. Японские методы управления качеством. М.: Экономика, 1988. 215 с.
2. Пищулина Т. А. Проектирование схемы системы поддержки принятия решений на основе онтологии перекомпонованного производства // Онтология проектирования. 2022. Т. 12, № 2(44). С. 231–244. doi: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-231-244.
3. Кульбида О. О., Ищенко А. Л. Использование метода Исикавы при проектировании технологического процесса сборки // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2010. № 2 (40). С. 94–98.
4. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / пер. с англ. д. т. н., проф. О. Н. Андрейчиковой. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 357 с.
5. Падерно П. И. Комплексирование мнений экспертов при экспертной оценке с применением метода анализа иерархий // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. 2007. № 3-2. С. 122–127.
6. Миркин Б. Г. Проблема группового выбора. М.: Наука, 1974. 256 с.
7. Литвак Б. Г. Экспертные оценки и принятие решений. М.: Патент, 1996. 371 с.
8. Мельник П. Б. Математическая модель эксперта // Инноватика и экспертиза: науч. тр. 2020. № 2(30). С. 40–64.
9. Бухарин С. Н., Дивуева Н. А. Проблема оценки компетентности с учетом психологических свойств эксперта // Инноватика и экспертиза: науч. тр. 2013. № 1(10). С. 108–115.
10. Моделирование процесса формирования экспертной группы по заданной тематике / В. Т. Еременко, М. А. Сазонов, С. И. Фомин, В. А. Петров // Информационные системы и технологии. 2012. № 3(71). С. 23–31.
11. Падерно П. И., Бурков Е. А., Евграфов В. Г. Критерий согласованности парных сравнений // Информационно-управляющие системы. 2011. № 3(52). С. 57–60.

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

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

References

1. Isikava K. Japonskie metody upravlenija kachestvom. M.: Jekonomika, 1988. 215 s. (In Russ.).
2. Pishhuhina T. A. Proektirovanie shemy sistemy podderzhki prinjatija reshenij na osnove ontologii perekomponuemogo proizvodstva // Ontologija proektirovanija. 2022. T. 12, № 2(44). S. 231–244. doi: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-231-244. (In Russ.).

3 Kul'bida O. O., Ishhenko A. L. Ispol'zovanie metoda Isikavy pri proektirovanii tehnologicheskogo processa sborki // Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroenija. 2010. № 2 (40). S. 94–98. (In Russ.).

4. Saati T. Prinjatie reshenij pri zavisimostjah i obratnyh svyazjah: Analiticheskie seti / per. s angl. d. t. n., prof. O. N. Andrejchikovej. M.: Izd-vo LKI, 2008. 357 s. (In Russ.).

5. Paderno P. I. Kompleksirovanie mnenij jekspertov pri jekspertnoj ocenke s primeneniem metoda analiza ierarhij // Chelovecheskij faktor: problemy psihologii i jergonomiki. 2007. № 3–2. S. 122–127. (In Russ.).

6. Mirkin B. G. Problema gruppovogo vybora. M.: Nauka, 1974. 256 s. (In Russ.).

7. Litvak B. G. Jekspertnye ocenki i prinjatie reshenij. M.: Patent, 1996. 371 s. (In Russ.).

8. Mel'nik P. B. Matematicheskaja model' jeksperta // Innovatika i jekspertiza: nauch. tr. 2020. № 2(30). S. 40–64. (In Russ.).

9. Buharin S. N., Divueva N. A. Problema ocenki kompetentnosti s uchetom psihologicheskikh svojstv jeksperta // Innovatika i jekspertiza: nauch. tr. 2013. № 1(10). S. 108–115. (In Russ.).

10. Modelirovanie processa formirovanija jekspertnoj gruppy po zadannoj tematike / V. T. Eremenko, M. A. Sazonov, S. I. Fomin, V. A. Petrov // Informacionnye sistemy i tehnologii. 2012. № 3(71). S. 23–31. (In Russ.).

11. Paderno P. I., Burkov E. A., Evgrafov V. G. Kriterij soglasovannosti parnyh sravnenij // Informacionno-upravljajushhie sistemy. 2011. № 3(52). S. 57–60. (In Russ.).

Information about the authors

Evgeniy A. Burkov – Cand. Sci. (Eng.), assistant professor of the Departments of Information Systems of 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 Departments of Information Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University, Honored Scientist of the Russian Federation.

E-mail: pipaderno@list.ru

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

Статья поступила в редакцию 17.04.2025; принята к публикации после рецензирования 30.06.2025; опубликована онлайн 30.10.2025.

Submitted 17.04.2025; accepted 30.06.2025; published online 30.10.2025.
