

К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ МЕТОДОМ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ИЕРАРХИИ

В.Г. Выскуб, гл. научн. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, д-р техн. наук, проф.,
vyskub08@mail.ru

Рецензент: Потюпкин А.Ю., гл. научн. сотр., АО «Российские космические системы»,
д-р техн. наук, fotin853@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы оценки научно-технических проектов на основе метода аналитической иерархии. Приводятся иерархические модели научно-технической экспертизы, а также необходимые вычислительные процедуры для определения приоритетов проектов. Рассмотрен пример формализации задачи научно-технической экспертизы.

Ключевые слова: аналитическая иерархия, матрица парных сравнений, собственный вектор, собственное значение.

ON THE ISSUE OF AUTOMATION OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL EXPERTISE BY THE METHOD OF ANALYTICAL HIERARCHY

V.G. Vyskub, Chief Researcher, SRI FRCEC, Ph. D., Professor, vyskub08@mail.ru

The article discusses the issues of evaluation of scientific and technological projects based on the analytical hierarchy method. Hierarchical models of scientific and technological expertise are presented, as well as the necessary computational procedures for determining the priorities of projects. An example of the formalization of the task of scientific and technological expertise is considered.

Keywords: analytical hierarchy, matrix of paired comparisons, eigenvector, eigenvalue.

Введение

Для принятия решений, когда исходная информация имеет качественный характер, отсутствуют измерительные шкалы и формальные модели рассматриваемой системы, во многих областях человеческой деятельности привлекаются эксперты. В научно-технической сфере они связаны с выбором направлений приоритетного научно-технического развития, распределения ресурсов, управления сложными системами, задачами оценки конкурсных работ на выделение грантов, субсидий, соискание премий и др. В целях поддержки экспертного оценивания научно-технической деятельности могут быть применены соответствующие математические и вычислительные методы и модели формализации задач экспертизы. Среди различных методов формализации экспертных оценок приобрел популярность метод аналитической иерархии, разработанный Т. Саати [1].

Специфика метода аналитической иерархии

Метод основан на представлении систем в виде иерархий, что позволяет решить вопрос о том, насколько сильно влияют элементы нижнего уровня иерархии на вершину, выражающую цель экспертизы. Определение приоритетов элементов низшего уровня относительно цели может быть сведено к последовательности задач определения приоритетов элементов каждого уровня по отношению к более высокому.

Математически оценка воздействия элементов одного уровня иерархии на соседний верхний уровень выполняется посредством композиции соответствующих вкладов элементов

нижнего уровня по отношению к элементу верхнего уровня. Эта процедура распространяется вверх по иерархии.

Инструментом экспертного оценивания являются матрицы парного сравнения. Роль эксперта состоит в заполнении матрицы путем ответов на вопросы с использованием выбранной числовой шкалы, насколько один из элементов сравниваемой пары более наделен определенным свойством и насколько сильно доминирование.

Матрица парных сравнений между элементами строится в предположении, что ее диагональные элементы должны быть равны 1, а симметричные относительно главной диагонали элементы должны быть взаимно обратными. Значимость элементов матрицы по отношению к элементу вышестоящего уровня в формализованном виде выражают координаты нормализованного собственного вектора этой матрицы. В теоретическом отношении метод основывается на свойствах положительных квадратных матриц. Из теории Перрона – Фробениуса [2] следует, что положительная матрица имеет действительное положительное простое собственное значение λ_{\max} , которое по модулю не меньше любого другого собственного значения матрицы. Собственный вектор, соответствующий λ_{\max} , имеет положительные компоненты и является единственным. Для примитивной матрицы B , для которой положительная матрица является частным случаем, искомым собственным вектором w , соответствующий λ_{\max} , с точностью до постоянного множителя может быть получен из выражения:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{B^k \cdot e}{\|B^k\|} = cw,$$

где $k = 1, 2, \dots$; c – постоянная; B – примитивная матрица; $\|B^k\| = e^T B^k e$; $e = (1, \dots, 1)^T$; T – знак транспонирования.

Согласованность матрицы парных сравнений можно рассматривать как степень уверенности эксперта в суждениях, достигается выполнением требований транзитивности и количественной однородности числовых оценок матрицы. При согласованности матрицы B размерности $n \times n$ все собственные значения матрицы должны быть нулями, за исключением одного, равного n . Показатели согласованности матрицы – индекс согласованности (ИС), определяемый согласно выражению $(\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$, и отношение согласованности (ОС) как отношение ИС к среднему случайному индексу (СИ), сгенерированному для матриц различного порядка на базе 100 случайных выборок. Уровень удовлетворительной согласованности определяется значением ОС не более 0,1.

Задачи экспертного оценивания научно-технической деятельности имеют свои особенности в зависимости от приложения и конкретного объекта оценивания. Вместе с тем они имеют много общего, так как используют одинаковые или близкие понятия и характеристики, что позволяет рассматривать типовые задачи экспертного оценивания.

Типовая задача научно-технического экспертного оценивания

Одна из задач научно-технического экспертного оценивания связана с оценкой конкурсных работ, принятием решения относительно предлагаемого набора проектов-альтернатив в части выбора наиболее предпочтительного.

Исходя из заданных условий и ограничений необходимо провести анализ проектов, расположить их в порядке приоритетов и выявить наиболее предпочтительный. Важнейшее место в принятии решений, в том числе в сфере научно-технической экспертизы, отводится выбору критериев. Существенно, чтобы выбранные критерии охватывали все важные аспекты цели выбора, при этом не дублируя друг друга. Критериями выбора являются, например, актуальность, окупаемость проекта, трудности организации производства проектной продукции, наличие спроса на продукцию и др. [3].

Простейшая иерархическая схема для поставленной задачи может содержать три уровня: цель, критерии и альтернативы. Создание более полной модели системы для проводимой экспертизы, учет большего количества атрибутов, влияющих на конечный выбор, сопровождаются расширением числа уровней, связей и числа сравнений. Так, в рамках отбора проектов для финансирования со стороны Фонда развития промышленности (Фонд) [4] осуществляется оценка проектов на соответствие критериям, среди которых: рыночная перспективность и потенциал импортозамещения, экспортный потенциал продукта; научно-техническая перспективность проекта, соответствие принципам наилучшей доступной технологии; производственная обоснованность проекта и стратегическая заинтересованность компании в его реализации; финансово-экономическая эффективность и устойчивость проекта и др. В свою очередь, критерии разбиваются на подкритерии, или частные критерии.

Рассмотрим формализацию задачи оценки заявок, претендующих на выделение субсидий для выполнения проектов, ориентируясь на требования Фонда и практику экспертизы конкурсных работ ФЦП. Так, на основании используемых критериев и подкритериев можно построить вариант схемы иерархии научно-технической экспертизы (рис. 1).

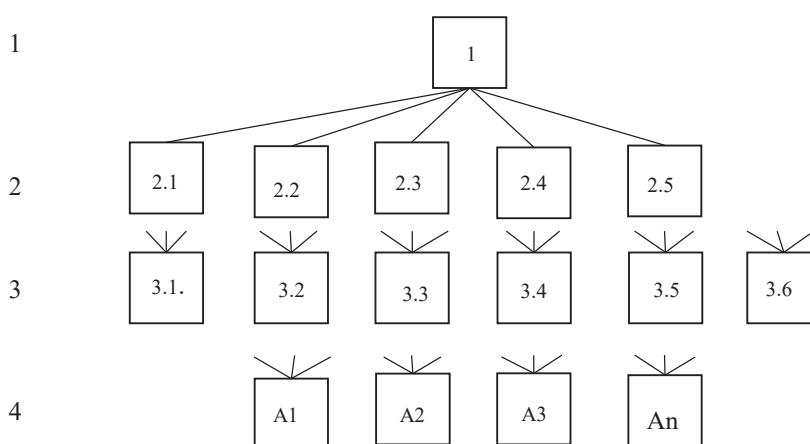


Рис. 1. Иерархическая схема научно-технической экспертизы

На схеме рис. 1 выделены 4 уровня. Уровень 1 – выявление лучшей альтернативы, фокус иерархии. Уровень 2 характеризует критерии достижения конечной цели: 2.1 – конкурентоспособность, коммерческая перспектива, экспортный потенциал; 2.2 – потенциал импортозамещения; 2.3 – новизна решений относительно российского и мирового уровня; 2.4 – решение задач экологии и охраны окружающей среды; 2.5 – степень рисков проекта. Уровень 3 характеризует подкритерии: 3.1 – профессиональный уровень, опыт проектной команды; 3.2 – производственная обоснованность, наличие сырья, материалов, достаточность ресурсов; 3.3 – наличие научно-технического и технологического задела и его существенность для реализации проекта (идеи, НИОКР, технические и технологические решения, опытные образцы и др.); 3.4 – обоснованность плана-графика проекта, сроков выхода на серийное производство, окупаемости; 3.5 – роль финансовой поддержки выполнения проекта, обоснованность и достаточность запрашиваемой субсидии; 3.6 – охраноспособность проекта и патентная чистота. Уровень 4 определяется заявленными проектами-альтернативами A_i ($i = 1, 2, \dots, n$), которые представлены на экспертизу по установленной форме.

Необходимо отметить, что критерии, да и вся иерархическая схема, определяющая результат выбора, должны быть заданы организатором экспертизы в соответствии с условиями

конкурсного мероприятия. Перечень элементов каждого уровня может быть более детализован и расширен при соблюдении их независимости. Некоторые подкритерии уровня 3 могли бы выступать в качестве критериев, и наоборот. Так, могли быть критериями: 3.2 – производственная обоснованность, наличие сырья, материалов, достаточность ресурсов; 3.3 – наличие научно-технического и технологического задела и его существенность для реализации проекта. Элементы структуры: 2.3 – новизна решений относительно российского и мирового уровня; 2.5 – степень рисков проекта – могли выступать в качестве подкритериев.

Оценка рисков при выполнении проекта относится к оценке значимости различных видов рисков, которые могут повлиять на достижение поставленной цели в намеченные сроки. Выбор по данному критерию означает выбор лучшего варианта с точки зрения меньшего риска. Среди учитываемых рисков – научно-технические, финансовые, коммерческие и прочие. Помимо учета дополнительных факторов, в иерархической схеме ее развитию мог бы послужить учет наличия обратных связей. Так, конкурентоспособность, коммерческая перспектива, экспортный потенциал могут влиять на план-график проекта, на сроки выхода на серийное производство, окупаемость, финансовую поддержку выполнения проекта и др. Учет таких связей усложняет схему иерархии.

Для сравнения критериев и определения их приоритетности по схеме рис. 1 должна быть построена обратно-симметричная матрица парных сравнений по выбранной шкале (от 1 до 9 градаций), которая продиктована выявленным учеными психологическим пределом способностей человека производить качественные разграничения. По данной матрице находится собственный вектор – вектор приоритетов второго уровня относительно первого. Влияние элементов третьего уровня на второй отражается построением аналогичных матриц парного сравнения влияния элементов третьего уровня на каждый из элементов второго уровня. В результате для выбранной схемы иерархии образуются 5 матриц размерностью 6×6 и 5 соответствующих собственных векторов.

Сравнение альтернатив A_i относительно влияния на третий уровень иерархии приводит к построению 6 матриц попарного сравнения размером $n \times n$ и 6 собственных векторов. Заключительный составной вектор ранжирования альтернатив равен произведению матриц, составленных из векторов каждого уровня.

Рассмотрим применение метода по упрощенной иерархии (рис. 2).

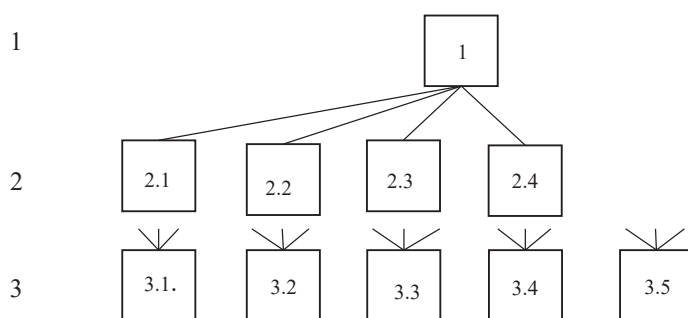


Рис. 2. Упрощенная схема иерархии

Здесь 2.1 – конкурентоспособность, потенциал импортозамещения проектной продукции; 2.2 – степень рисков проекта; 2.3 – новизна решений относительно российского и мирового уровня; 2.4 – решение задач экологии и охраны окружающей среды; 3.1 – профес-

сиональный уровень, опыт проектной команды; 3.2 – производственная обоснованность, наличие сырья, материалов, достаточность ресурсов; 3.3 – наличие научно-технического и технологического задела и его существенность для реализации проекта; 3.4 – обоснованность плана-графика проекта, сроков выхода на серийное производство, окупаемости; 3.5 – обоснованность и достаточность запрашиваемой субсидии.

Требуется определить приоритеты средств достижения цели для выявления лучших альтернатив. Матрица парных сравнений критериев (уровень 2), приведенных на рис. 2 для выявления лучшего проекта, имеет вид табл. 1.

Таблица 1

Матрица парных сравнений критериев

	Конкурентоспособность, потенциал импортозамещения	Степень рисков проекта	Новизна решений относительно российского и мирового уровня	Решение задач экологии и охраны окружающей среды
Конкурентоспособность, потенциал импортозамещения	1	3	2	1
Степень рисков проекта	1/3	1	1/2	1/3
Новизна решений относительно российского и мирового уровня	1/2	2	1	2
Решение задач экологии и охраны окружающей среды	1	3	1/2	1

Собственный вектор матрицы: $(0,36; 0,111; 0,273; 0,254)^T$. Собственное значение $\lambda_{\max} = 4,2$. Индекс согласованности: 0,066. Отношение согласованности: 0,073.

Проведя парные сравнения согласно рис. 2, можно построить соответствующие матрицы влияния подкритериев на критерий.

Влияние подкритериев на критерий «Конкурентоспособность, потенциал импортозамещения проектной продукции» определяет матрица (табл. 2).

Собственный вектор матрицы: $(0,112; 0,348; 0,17; 0,139; 0,229)^T$.

Собственное значение матрицы: $\lambda_{\max} = 5,27$. Индекс согласованности: 0,067. Отношение согласованности: 0,06.

Влияние подкритериев на критерий «Степень рисков проекта» определяет матрица (табл. 3).

Собственный вектор матрицы: $(0,106; 0,205; 0,271; 0,25; 0,165)^T$.

Собственное значение матрицы: $\lambda_{\max} = 5,2$. Индекс согласованности: 0,05. Отношение согласованности: 0,044.

Влияние подкритериев на критерий «Новизна решений относительно российского и мирового уровней» определяет матрица (табл. 4).

Собственный вектор матрицы: $(0,311; 0,143; 0,143; 0,151; 0,249)^T$.

Собственное значение матрицы: $\lambda_{\max} = 5,1$. Индекс согласованности: 0,025. Отношение согласованности: 0,022.

Влияние подкритериев на критерий «Решение задач экологии и охраны окружающей среды» определяет матрица (табл. 5).

Собственный вектор матрицы: $(0,203; 0,326; 0,141; 0,113; 0,215)^T$.

Собственное значение матрицы: $\lambda_{\max} = 5,48$. Индекс согласованности: 0,12. Отношение согласованности: 0,107. «Подтянуть» индекс согласованности до нормы можно уточнением коэффициентов матрицы.

Таблица 2

**Влияние подкритериев на критерий
«Конкурентоспособность, потенциал импортозамещения проектной продукции»**

	Профессиональный уровень, опыт проектной команды	Производственное обоснование, наличие сырья, материалов	Наличие научно-технического и технологического задела и его существенность	Обоснованность плана-графика, сроков выхода на серийное производство и окупаемости	Обоснованность и достаточность запрашиваемой субсидии
Профессиональный уровень, опыт проектной команды	1	1/2	1/2	1	1/3
Производственное обоснование, наличие сырья, материалов	2	1	3	2	2
Наличие научно-технического и технологического задела и его существенность	2	1/3	1	2	1/2
Обоснованность плана-графика, сроков выхода на серийное производство и окупаемости	1	1/2	1/2	1	1
Обоснованность и достаточность запрашиваемой субсидии	3	1/2	2	1	1

Таблица 3

Влияние подкритериев на критерий «Степень рисков проекта»

	Профессиональный уровень, опыт проектной команды	Производственное обоснование, наличие сырья, материалов	Наличие научно-технического и технологического задела и его существенность	Обоснованность плана-графика, сроков выхода на серийное производство и окупаемости	Обоснованность и достаточность запрашиваемой субсидии
Профессиональный уровень, опыт проектной команды	1	1/3	1/3	1/2	1
Производственное обоснование, наличие сырья, материалов	3	1	1/2	1	1
Наличие научно-технического и технологического задела и его существенность	3	2	1	1	1
Обоснованность плана-графика, сроков выхода на серийное производство и окупаемости	2	1	1	1	2
Обоснованность и достаточность запрашиваемой субсидии	1	1	1	1/2	1

Таблица 4

**Влияние подкритериев на критерий
«Новизна решений относительно российского и мирового уровней»**

	Профессиональный уровень, опыт проектной команды	Производственное обоснование, наличие сырья, материалов	Наличие научно-технического и технологического задела и его существенность	Обоснованность плана-графика, сроков выхода на серийное производство и окупаемости	Обоснованность и достаточность запрашиваемой субсидии
Профессиональный уровень, опыт проектной команды	1	2	2	3	1
Производственное обоснование, наличие сырья, материалов	1/2	1	1	1	1/2
Наличие научно-технического и технологического задела и его существенность	1/2	1	1	1	1/2
Обоснованность плана-графика, сроков выхода на серийное производство и окупаемости	1/3	1	1	1	1
Обоснованность и достаточность запрашиваемой субсидии	1	2	2	1	1

Таблица 5

Влияние подкритериев на критерий «Решение задач экологии и охраны окружающей среды»

	Профессиональный уровень, опыт проектной команды	Производственное обоснование, наличие сырья, материалов	Наличие научно-технического и технологического задела и его существенность	Обоснованность плана-графика, сроков выхода на серийное производство и окупаемости	Обоснованность и достаточность запрашиваемой субсидии
Профессиональный уровень, опыт проектной команды	1	1/2	2	3	1/2
Производственное обоснование, наличие сырья, материалов	2	1	4	2	1
Наличие научно-технического и технологического задела и его существенность	1/2	1/4	1	2	1
Обоснованность плана-графика, сроков выхода на серийное производство и окупаемости	1/3	1/2	1/2	1	1
Обоснованность и достаточность запрашиваемой субсидии	2	1	1	1	1

Выполнив объединение полученных векторов приоритетов в матрицы приоритетов, определяют один окончательный вектор приоритетов для нижнего уровня относительно вершины иерархии в виде матричного произведения. Искомый результирующий вектор приоритетов подкритериев: $(0,188; 0,269; 0,166; 0,147; 0,223)^T$. Первые три места по значимости подкритериев проекта распределились так: производственная обоснованность, наличие сырья, материалов; обоснованность запрашиваемой субсидии для реализации проекта; профессиональный уровень, опыт проектной команды. Найденные коэффициенты могут быть затем применены для дальнейшей оценки конкретных альтернатив.

Усилим значимость критерия рисков проекта согласно следующей матрице парных сравнений критериев (табл. 6).

Таблица 6

Матрица парных сравнений критериев

	Конкурентоспособность, потенциал импортозамещения	Степень рисков проекта	Новизна решений относительно российского и мирового уровня	Решение задач экологии и охраны окружающей среды
Конкурентоспособность, потенциал импортозамещения	1	1/2	2	1
Степень рисков проекта	2	1	4	2
Новизна решений относительно российского и мирового уровня	1/2	1/4	1	1/2
Решение задач экологии и охраны окружающей среды	1	1/2	2	1

Собственный вектор матрицы: $(0,222; 0,444; 0,111; 0,222)^T$.

Собственное значение матрицы: $\lambda_{\max} = 4$. Результирующий вектор приоритетов подкритериев достижения цели: $(0,151; 0,256; 0,205; 0,183; 0,199)^T$. Первые три места по значимости подкритериев распределились так: производственная обоснованность, наличие сырья, материалов; наличие научно-технического и технологического задела и его существенность для реализации проекта; обоснованность и достаточность запрашиваемой субсидии. Можно предположить, что полученное распределение отвечает в большей мере цели реализации проекта с меньшим риском. Приведенные конкретные оценки являются специфическими для каждого эксперта.

Заключение

Метод аналитической иерархии позволяет выполнить формализацию научно-технической экспертизы и получить числовые оценки важности сравниваемых альтернатив. Результат формализации определяется выстроенной иерархией экспертизы и суждениями эксперта по парным сравнениям. Сравнимые элементы иерархии при оценке альтернатив научно-технической экспертизы являются неоднородными и трудносопоставимыми. Для повышения качества суждений формулировки элементов иерархии должны позволить эксперту адекватно и точно выразить свое мнение в отношении сравниваемых элементов.

Результирующий вектор приоритетов позволяет ранжировать альтернативы, а также судить о разбросе интегральных оценок альтернатив. Задача оценки облегчается тем, что эксперту предлагается сосредоточить внимание на попарном сравнении, а не на множествах в целом, и тем самым выразить силу предпочтений сравниваемых объектов и элементов сравнения по принятой шкале измерений. Это существенно при увеличении числа сравниваемых объектов.

Матричный анализ позволяет проследить логику рассуждений эксперта, оценить влияние отдельных оценок на конечный результат и их согласованность и при необходимости внести коррекцию. Выполнение требований транзитивности и количественной однородности числовых оценок матриц парных сравнений достигается путем «механического» согласования по известным методикам, однако при этом возникает опасность искажения результатов сравнения. Конечный результат экспертной оценки проявляет чувствительность как к изменениям этой схемы, так и к изменениям в попарных сравнениях. Как показано в работе [1], обратнo-симметричные матрицы в случае согласованности создают устойчивые собственные векторы при малых возмущениях.

Применению метода способствует уже отработанная на практике система научно-технической экспертизы, которая в значительной степени отвечает требованию независимости элементов в каждой группе иерархии. В пользу метода также говорят сложившиеся подходы к выбору критериев, разработанные компьютерные реализации метода. Метод может быть использован для поддержки принятия решений по отбору научно-технических проектов, в частности путем установления «проходного балла» и создания тем самым своеобразного фильтра для поступающих заявок. При необходимости учета мнений нескольких экспертов могут быть использованы геометрические средние как на уровне собственных векторов, так и на уровне матриц парных сравнений. В целом метод может способствовать автоматизации научно-технической экспертизы.

Статья выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания на 2022 г. № 075-01615-22-05.

Список литературы

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 315 с.
2. Хорн. Р., Джонсон Ч. Матричный анализ / пер. с англ. М.: Мир, 1989. 655 с.
3. Ларичев О.И., Мошкoвич Е.М. Качественные методы принятия решений. М.: Наука, 1996. 208 с.
4. Сайт Фонда развития промышленности РФ. URL: <http://frprf.ru> (дата обращения: 19.09.2022).

Reference

1. Saati T. (1993) *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision-making. The Analytic Hierarchy Process] *Radio i svyaz'* [Radio and Communications]. Moscow: P. 315.
2. Horn. R., Johnson Ch. (1989) *Matrichnyy analiz* [Matrix analysis] *Per. s angl.* [Translation from English] *Mir* [Mir]. Moscow. P. 655.
3. Larichev O.I., Moshkovich E.M. (1996) *Kachestvennyye metody prinyatiya resheniy* [Qualitative methods of decision-making] *Nauka* [Nauka]. Moscow. P. 208.
4. *Sayt Fonda razvitiya promyshlennosti RF* [Website of the Industrial Development Fund of the Russian Federation]. Available at: <http://frprf.ru> (date of access: 19.09.2022).