

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПРОЦЕССАХ УПРАВЛЕНИЯ

Методика ELECTRE и автоматизация ранжирования АЛЬТЕРНАТИВ

Получено 17.07.2022

Доработано после рецензирования 15.08.2022

Принято 26.08.2022

УДК 519.81, 519.862.5

JEL C65, C8

DOI <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2022-5-3-26-37>

Терелянский Павел Васильевич

Д-р экон. наук, канд. техн. наук, зам. директора Центра по реализации проектов развития третьей миссии университета, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация

ORCID: 0000-0003-0642-2901

E-mail: tereliansky@mail.ru

Кузнецов Сергей Юрьевич

Канд. экон. наук, доц. каф. информационных систем в экономике, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация

ORCID: 0000-0002-0046-3190

E-mail: floyd_80@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Авторы рассматривают этапы применения методологии многокритериального ранжирования альтернатив ELECTRE. Этот подход предполагает учет значений признаков, характеризующих оцениваемые альтернативы, и уровней значимости этих признаков. На основе этих оценок, полученных экспертным путем, рассчитываются индексы согласия и несогласия. Их значения определяют состоятельность предположения о превосходстве одной альтернативы над другой. Реализация строго определенных этапов методики позволяет выявить порядок доминирования альтернатив и ранжировать их в соответствии с приоритетами лица, принимающего решение. Методология семейства алгоритмов ELECTRE предлагает детерминированный подход к принятию решений, в котором методы и модели рассматриваются как практические средства тактического и стратегического анализа ситуации. Автоматизированные системы поддержки принятия решений, реализующие эти методы, позволяют документировать понимание фактических предпочтений лиц, принимающих решение. В статье приводится пример решения задачи выбора оптимальной стратегии при наличии множества ограничений, трактуемых как критерии оценки альтернативных стратегий. В методе ELECTRE I используются вербальные утверждения, заявляющие бинарные отношения между альтернативными стратегиями. Бинарные отношения выражают индексы согласия и несогласия. Полученные результаты свидетельствуют о потенциале и эффективности исследуемой методологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Многокритериальный выбор, экспертные оценки, значимость критериев, индексы согласия и несогласия, доминирование альтернатив, матрица превосходства, граф доминирования альтернатив

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность своим научным руководителям: д-ру техн. наук, проф. А.В. Андрейчикову и д-ру техн. наук, проф. О.Н. Андрейчиковой, которые начали разработку проблематики, связанной с созданием автоматизированных систем принятия решений, канд. техн. наук, доц. Д.Е. Декатову, который продолжил работы в области практического применения методов ELECTRE.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Терелянский П.В., Кузнецов С.Ю. Методика ELECTRE и автоматизация ранжирования альтернатив//E-Management. 2022. Т. 5, № 3. С. 26–37.

© Терелянский П.В., Кузнецов С.Ю., 2022.

Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0. всемирная (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



INSTRUMENTAL AND MATHEMATICAL METHODS IN MANAGEMENT PROCESSES

ELECTRE METHODOLOGY AND AUTOMATION OF ALTERNATIVE RANKING

Received 17.07.2022

Revised 15.08.2022

Accepted 26.08.2022

Pavel V. Tereliansky

Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Tech.), Deputy Director of the Center for the Implementation of projects for the development of the University third mission, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0003-0642-2901

E-mail: tereliansky@mail.ru

Sergey Yu. Kuznetsov

Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof. at the Information system in Economics Department, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

ORCID: 0000-0002-0046-3190

E-mail: floyd_80@mail.ru

ABSTRACT

The authors consider the stages of applying the ELECTRE methodology: multi-criteria ranking of alternatives to. This approach assumes taking into account the values of the features characterizing the evaluated alternatives and the significance levels of these features. Based on these expert assessments, the indices of agreement and disagreement are calculated. Their values determine the validity of the assumption of the superiority of alternatives over each other. The implementation of strictly defined stages of the methodology makes it possible to identify the order of dominance of alternatives and rank them in accordance with the priorities of the decision-maker. The algorithms of ELECTRE family offers a deterministic approach to decision-making, in which methods and models are considered as practical means of tactical and strategic analysis of the situation. Automated decision support systems implementing these methods make it possible to document an understanding of the actual preferences of decision makers. The ELECTRE I method uses verbal statements stating binary relationships between alternative strategies. Binary relations are expressed by the indices of agreement and disagreement. The results obtained indicate effectiveness of the methodology under study.

KEYWORDS

Multi-criteria choice, expert assessments, significance of criteria, indices of agreement and disagreement, dominance of alternatives, superiority matrix, dominance of alternatives graph

ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their gratitude to their supervisors: Dr. Sci. (Tech.), Prof. A.V. Andreychikov and Dr. Sci. (Tech.), Prof. O.N. Andreychikova, who began to develop issues related to the creation of automated decision-making systems, and also Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. D.E. Dekatov, who continued their work in the field of ELECTRE methods practical application.

FOR CITATION

Tereliansky P.V., Kuznetsov S.Yu. (2022) ELECTRE methodology and automation of alternative ranking. *E-Management*, vol. 5, no. 3, pp. 26–37. DOI: 10.26425/2658-3445-2022-5-3-26-37



ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Задача выбора оптимальной альтернативы из множества заданных дискретных альтернатив, способа действия или объекта для экономического или иного взаимодействия постоянно возникает в практической деятельности любого работника и особенно руководителя. Начиная с 1950-х гг. теорией принятия решений выработано значительное количество методов, инструментов и подходов к задачам такого рода, которые складываются в систему поддержки принятия решений (англ. Decision Support Systems, DSS). До начала бума нейросетевых технологий [Коротеев, 2018; Брагина, 2012] в начале XXI в. активно исследовались возможности автоматизированных систем поддержки принятия решений советующего типа [Терелянский, 2009]. От нейросетевых технологий эти системы отличались несколькими характеристиками:

- прозрачностью процесса принятия решений;
- возможностью документирования с последующей расшифровкой последовательности шагов, ведущих к оптимуму;
- возможностью ручной настройки алгоритма решения за счет изменения порядка шагов и весовых коэффициентов с возможностью документирования этого процесса;
- открытостью и обоснованностью (хотя бы на уровне экспертных утверждений) весовых коэффициентов, простотой алгоритмов агрегации.

Недостатками таких систем, которые и привели их в итоге к упадку, были [Гагарин, 2017; Феррейра, 2012]:

- организационные сложности формирования экспертных сессий;
- необходимость ручного ввода оценок;
- громоздкость алгоритмов вывода решений, требующих участия лица, принимающего решения, или квалифицированного операциониста в процессе ветвления алгоритма вывода;
- сложность или полная невозможность процесса самообучения автоматизированных систем.

Развитие нейросетевых технологий, лишенных этих недостатков, со своей стороны, несет большую опасность за счет принципиальной невозможности анализа и контроля матрицы коэффициентов, возможности злонамеренного обучения сети с целью создания «тройных коней» и просто ошибок в обучающих последовательностях.

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ / THEORY AND METHODS

К числу простых в алгоритмизации, прозрачных в процессе вывода и при этом весьма эффективных относятся методы семейства ELECTRE (фр. Élimination Et Choix Traduisant la REalité – исключение и выбор, отражающие реальность) [Roy, 1968; Каргина, 2010]. Методология семейства алгоритмов ELECTRE предлагает детерминированный подход к принятию решений, в котором методы и модели рассматриваются как практические средства тактического и стратегического анализа ситуации. Эти средства позволяют документировать понимание фактических предпочтений лиц, принимающих решение. В работах [Декастов и др., 2008; Декастов, 2010; Roy, 1968; Каргина, 2010] дается компактное описание алгоритма метода ELECTRE. В целом алгоритм предлагает использовать семь этапов подготовки данных с итерационным уточнением результатов на последнем этапе.

Рассмотрим содержание этой методологии, ставя и решая задачу выбора оптимальной стратегии, при наличии множества ограничений, трактуемых как критерии оценки альтернативных стратегий. В методе ELECTRE I используются вербальные утверждения, устанавливающие бинарные отношения между альтернативными стратегиями. Вербальные утверждения в виде бинарного семантического дифференциала «ИСТИНА – ЛОЖЬ» задают индексы согласия и несогласия с некоторыми заявленными гипотезами о превосходстве одной альтернативы над другой. Для формирования индексов используется следующий подход: каждому из критериев (общее множество критериев N) в качестве меры важности (веса) сопоставляется целое положительное число w_n . Сам автор метода В. Roy [1968] предлагал формировать w как сумму единичных простых голосов экспертов (за – 1, нет – 0), проголосовавших за важность данного критерия.

На первом этапе формируется множество альтернатив A мощностью m , множество критериев N мощностью n , по которым будет осуществляться оценка альтернатив. И заявляется первая гипотеза – о превосходстве альтернативы A_i над альтернативой A_j . Множество всех критериев N разбивается на три неравных по мощности подмножества: N^+ , N^- и $\bar{N}$.

Кластеризация по подмножествам осуществляется следующим образом. В подмножество N^+ относят критерии, по которым A_i важнее A_j . В подмножество N^- относят критериев, по которым альтернатива A_i равноважна A_j . В подмножество N^+ относят критерии, по которым альтернатива A_j важнее A_i .

На втором этапе формируется множество индексов согласия эксперта C_{AiAj} с заявленной гипотезой о превосходстве альтернативы A_i над A_j . Индекс согласия подсчитывается на основе весов критериев, полученных экспертным путем. В методе ELECTRE I [Roy, 1968] этот индекс рассчитывается через отношение суммы весов критериев из подмножеств N^+ и N^- к общей сумме весов:

$$C_{AiAj} = \frac{\sum_{n \in N^+ \cup N^-} w_n}{\sum w_n}, \quad (1)$$

где w_n – заявленная экспертами важность (вес) n -го критерия, A_i, A_j – индексы, описывающие заявленную гипотезу о превосходстве i -й альтернативы над j -й, n – количество критериев.

Индекс несогласия d с гипотезой о превосходстве A_i над A_j определяется как отношение числового максимума разницы оценки альтернатив по наиболее значимому из критериев к длине шкалы, по которой оценивают эти две альтернативы. Значимый критерий – критерий, по которому альтернатива A_j превосходит альтернативу A_i (2). Наиболее значимый критерий, очевидно – это обладающий наибольшим весом в системе экспертной оценки:

$$d_{AiAj} = \max_{n \in N} \frac{l_{Aj}^n - l_{Ai}^n}{L_n}, \quad (2)$$

где l_{Ai}^n, l_{Aj}^n – оценки альтернатив по n -му критерию, A_i, A_j – индексы, описывающие заявленную гипотезу о превосходстве i -й альтернативы над j -й, L_n – длина шкалы оценки n -го критерия, n – количество критериев.

Отметим, что формула учитывает не только субъективную важность (оценку), но и позиционирует оценку на единичном носителе, чтобы сопоставить между собой оценочные дискретные и непрерывные шкалы разной длины. При этом формула (2) позволяет вводить во время экспертной оценки разные по длине и мощности оценочные шкалы.

На третьем этапе экспертами определяются и вводятся в расчеты критические значения уровней согласия и несогласия с заявленными гипотезами. Если индекс согласия выше заданного экспертами уровня, то гипотеза о превосходстве исследуемой альтернативы над другой признается верной. Понятно, что индекс несогласия при этом должен быть ниже заданного уровня. В противном случае гипотеза о превосходстве отклоняется и альтернативы признаются несравнимыми.

На четвертом этапе из исходного множества рассматриваемых альтернатив механически удаляются «доминируемые альтернативы». «Доминируемыми» называют альтернативы, которые по указанным критериям не превосходят остальные. Из оставшихся альтернатив формируется новое множество, называемое «первым ядром». Альтернативы, попавшие в это ядро, таким образом, могут быть как несравнимыми между собой, так и равноважны (эквивалентны друг другу).

На пятом этапе эксперты уменьшают пороги уровней согласия и, соответственно, увеличивают пороги уровней несогласия. Это позволяет редуцировать исходные множества альтернатив, создавая все более компактные множества-ядра. Процесс повторяется до тех пор, пока последнее ядро не будет содержать наилучшие альтернативы. Последовательное редуцирование множества исходных альтернатив в набор множеств-ядер позволяет упорядочить альтернативы по соответствию максимуму полезности или некоей целевой функции выбора исследуемой задачи принятия решений.

В ходе реализации методов семейства ELECTRE последовательное исполнение каждого этапа позволяет эксперту или лицу, принимающему решение, с одной стороны, жестко и однозначно сформулировать свои предпочтения в попарных оценках альтернатив, с другой, – отметить наличие компромиссных решений во время оценки критериев, что повышает субъективную уверенность эксперта в точности оценки ситуации [Терелянский, 2009b].

Важным достоинством методов семейства ELECTRE является введение понятия «несравнимости альтернатив». Это позволяет эксперту выявить пары альтернатив с противоречивыми или нетранзитивными оценками.

Отбрасывание таких альтернатив позволяет эксперту сформировать некое множество-ядро, попадание альтернатив в которое обосновано только массивом имеющейся оценочной информации. Если оценки альтернатив противоречивы или обладают свойством нетранзитивности, то эти противоречия не могут нивелировать и компенсировать общие оценки. В. Roy [1968] утверждал, что альтернативы с такими «контрастными» оценками должны становиться объектами отдельного анализа. Такое описание отношений предпочтений между альтернативами является способом дополнительной объективизации экспертных оценок, исключающей разночтения, возникающие при субъективном назначении весов.

Расширяя возможности метода ELECTRE I, метод следующего поколения – ELECTRE II – по-прежнему в качестве основы использует бинарные семантические дифференциалы, задающие отношения предпочтений. Точность анализа ситуации в методе ELECTRE II достигается путем усложнения методики подсчета индексов согласия и несогласия.

На шестом этапе исследований с применением метода ELECTRE II вводятся парные понятия «уровней»: два уровня вводятся для индекса согласия $a_i > a_j$, и еще два – для индекса несогласия (вето) $\gamma_i \leq \gamma_j$. Устанавливаются два вида предпочтений – δ_i (сильное предпочтение) и δ_j (слабое предпочтение) между альтернативами. Эти отношения описываются формулой:

$$\begin{aligned} CA_i A_j &\geq a_i, \\ \sum_{n \in N^+} w_n &> \sum_{n \in N^-} w_n, \\ d_{A_i A_j} &< \gamma_i \end{aligned} \quad (3)$$

где a_i – i -й уровень согласия, γ_i – i -й уровень несогласия, C_{AiAj} – индекс согласия, d_{AiAj} – индекс несогласия (вето), w_n – заявленная экспертами важность (вес) n -го критерия, A_i, A_j – индексы, описывающие заявленную гипотезу о превосходстве i -й альтернативы над j -й, n – количество критериев.

В процессе исследования на заданном конечном множестве альтернатив A выявляются альтернативы, находящиеся в сильном (доминирующем) и слабом (доминируемом) отношении предпочтения. При этом формируется «первое ядро», которое представляет собой подмножество недоминируемых альтернатив. Эти альтернативы удаляются из рассмотрения, и процедура итерационно повторяется для оставшихся альтернатив.

На седьмом этапе множество альтернатив, кластеризованных по соответствующим множествам-ядрам, преобразуется в кортеж путем присваивания альтернативам соответствующих рангов. В соответствии с рангами выстраивается полный кортеж множества альтернатив. Второй полный порядок строится аналогично первому, но в обратном порядке – начиная с класса худших альтернатив (доминируемых, недоминирующих другие), переходя к лучшим альтернативам. Если эти две построенные последовательности отранжированных объектов в целом совпадают по порядку кортежа альтернатив (имеют высокий коэффициент конкордации – 0,6 и более), то на их основе строится средний порядок, который и предъявляется лицу, принимающему решение.

В методе ELECTRE II предлагается использовать три вербальных утверждения порядка (ранга).

Утверждение «Строгое превосходство A_i над A_j » (обозначается как $A_i P A_j$), описывает ситуацию, когда A_i имеет ранг выше, чем A_j в одном из ядер, но не худший или равный в другом.

Утверждение «Альтернативы эквивалентны» (обозначается как $A_i I A_j$), описывает ситуацию, когда альтернативы имеют одинаковые ранги в двух полных порядках.

Утверждение «Альтернативы несравнимы» (обозначается как $A_i N A_j$) справедливо, если альтернативы имеют одну позицию в кортеже одного из порядков, и противоположное – в другом кортеже.

Рассмотрим гипотетическую задачу, которая, с одной стороны, имеет отношение к практике, легко понимаема на субъективном уровне, с другой стороны, является достаточно сложноформализуемой: требуется оценить конкурентные позиции нескольких фирм, действующих на определенном рынке. Деятельность фирм характеризуется набором критериев, имеющих количественное выражение и различную значимость для лиц, принимающих решение. Альтернативами будут являться экспертные системные описания экономических субъектов: *Субъект А, Субъект В, Субъект С, Субъект D, Субъект Е*.

Задача стоит в выделении группы факторов Π_r , которые формируют спрос в определенном секторе рынка. При этом рассматриваются ряд разноформатных и разноразмерных показателей: время работы на рынке,

размер предприятия, используемая рекламная стратегия, широта ассортимента продукции, степень известности фирмы в этом сегменте рынка, общий уровень цен товарного ряда, усредненное представление потребителя о качестве реализуемых фирмой товаров, уровень доверия (надежности) как поставщика, квалификация персонала, предоставляемое сервисное обслуживание. Список можно расширять или редуцировать в зависимости от имеющихся целей и возможности получения соответствующей информации.

Конкурентоспособность является сложным, комплексным показателем [Каргина, 2010; Кац, 2006], а главное – слабоформализуемым. С точки зрения системного анализа, следует разбить исследуемую систему на ряд простых и за счет этого более однозначно формализуемых подсистем, которые можно было бы выразить параметрически (табл. 1). Под параметрическими значениями авторы понимают числовое выражение показателей в системе СИ (фр. *Système international d'unités*, SI – Международная система единиц), в денежных единицах, процентных пунктах, в количественных показателях (штуки, единицы товара и прочее). Под непараметрическими показателями понимается любая информация, которая может быть выражена вербальными оценками, относительными оценочными суждениями, расположением оценок на семантических дифференциалах и в пределах оценочных шкал (от шкал номинальных до шкал отношений), рангами, элементами кортежей, нечеткими оценками в теории нечетких множеств (англ. *fuzzy sets*), важностью, относительными весами и другими [Орлов, 1979; Орлов, 2004]. О способах представления непараметрической информации и преобразовании ее к параметрическому виду через приведение к относительным весам на единичном носителе подробно рассказано в монографии «Непараметрическая экспертиза объектов сложной структуры» [Терелянский, 2009a]. Фундаментальные исследования в области исчисления качества продукции и способах его оценки следует смотреть в работах Г.Г. Азгальдова [1973; 1982; 1989].

Таблица 1. Параметрическая и непараметрическая информация

Table 1. Parametric and nonparametric information

Обозначение	Показатель (критерий)	Параметрическое значение	Непараметрическое значение	Способ перевода
П1	Время работы на рынке	Срок, временной интервал, месяцы, годы	Вербальные дискретные оценки, расположение на семантическом дифференциале «Малое» – «Долгое»	Нечеткие переходные коэффициенты, отображение семантического дифференциала на единичный носитель [0..1]
П2	Размер предприятия	Количество сотрудников, филиалов, денежный оборот	Вербальные дискретные оценки, расположение на семантическом дифференциале «Большое» – «Малое»	
П3	Рекламная стратегия	Нет	Ранги, вербальные дискретные оценки, расположение на семантическом дифференциале «Хорошо» – «Плохо», принадлежность к нечеткому множеству	Нормированные веса рангов, отображение семантического дифференциала на единичный носитель [0..1]
П4	Ассортимент продукции	Количество наименований	Интегральное качество продукции, выраженное числом [0..1]	Не требуется
П5	Степень известности на рынке	Нет	Ранги, расположение на семантическом дифференциале «Хорошо» – «Плохо», принадлежность к нечеткому множеству	Нечеткие переходные коэффициенты, отображение семантического дифференциала на единичный носитель [0..1]

Окончание табл. 1

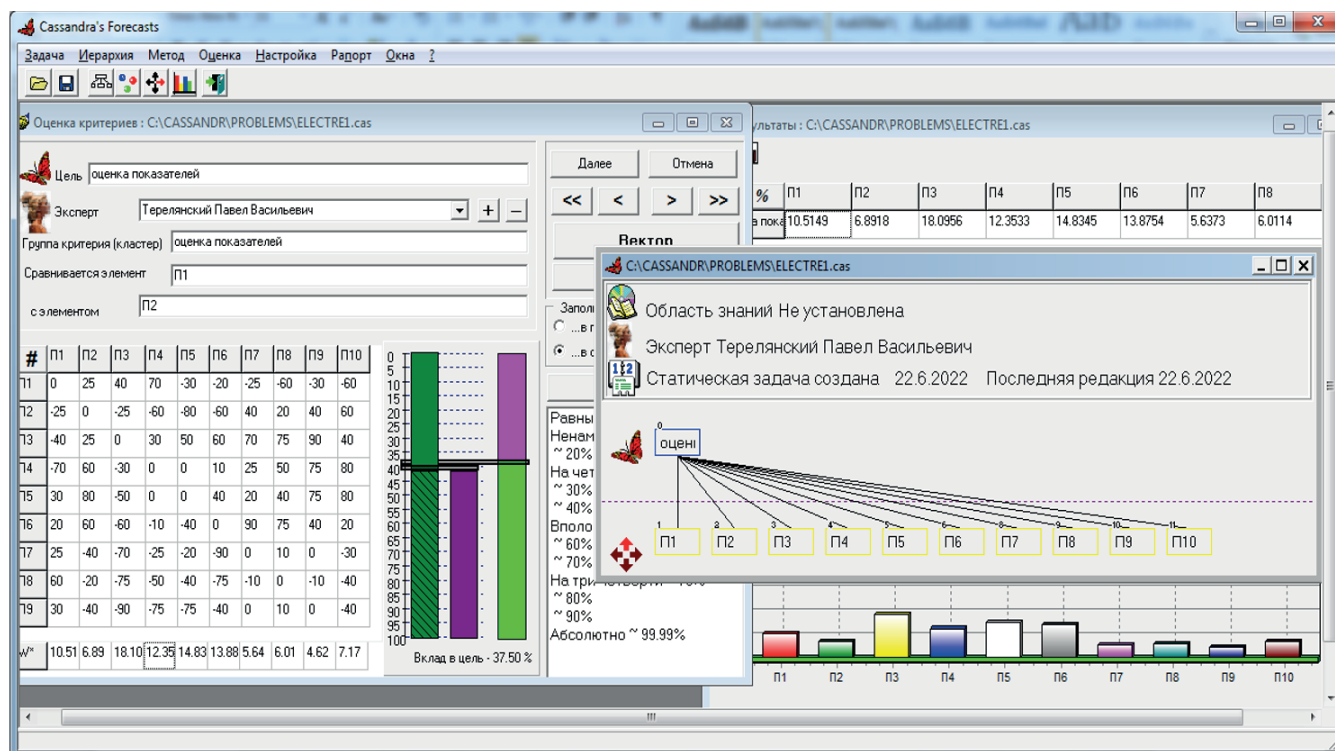
Обозначение	Показатель (критерий)	Параметрическое значение	Непараметрическое значение	Способ перевода
П6	Уровень цен	Денежные единицы	Вербальные дискретные оценки, принадлежность к нечеткому множеству	Нечеткие переходные коэффициенты
П7	Качество реализуемых товаров	Отдельные измеримые показатели – ремонтпригодность, надежность, срок эксплуатации и прочие	Вербальные дискретные оценки, расположение на семантическом дифференциале «Хорошее» – «Плохое», принадлежность к нечеткому множеству	Нечеткие переходные коэффициенты, отображение семантического дифференциала на единичный носитель [0..1]
П8	Уровень надежности как поставщика	Нет	Вербальные дискретные оценки, расположение на семантическом дифференциале «Абсолютно надежный» – «Абсолютно ненадежный», принадлежность к нечеткому множеству	
П9	Квалификация персонала	Бинарные оценки наличия/отсутствия требуемой сертификации	Вербальные дискретные оценки, расположение на семантическом дифференциале «Низкая» – «Высокая», принадлежность к нечеткому множеству	
П10	Сервисное обслуживание	Срок сервисного обслуживания, количество сервисных центров, количество сервисных инженеров, стоимость нормо-часа, стоимость дополнительных работ	Вербальные дискретные оценки, расположение на семантическом дифференциале «Хорошее» – «Плохое», принадлежность к нечеткому множеству	

Составлено авторами по материалам источника [Терелянский, 2009b] / Compiled by the authors on the materials of the source [Tereliensky, 2009b]

Очевидно, что для лица, принимающего решения, степень важности (весомости) этих показателей неравнозначна. Значения показателей можно определить экспертным путем по 100-балльной шкале [Терелянский, 2009а; Терелянский, 2009b] вручную или же с помощью автоматизированных систем (рис. 1). Авторами разработаны программные системы, реализующие функции советующих систем поддержки принятия решений с прогнозированием динамики экспертных предпочтений: свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009611494, № 2009611495, № 2009612167, № 2009611487, № 2009611489, № 2009611488, № 2009611492, № 2009611490, № 2009611493 и ряд других. Программные системы позволяют сохранять в своих базах данных описание задачи, наименования и ранги критериев, создавать, использовать и настраивать различные шкалы, привязывать задачи к группам экспертов, осуществлять кластеризацию задач по типам, темам, отображать полученные решения в виде графиков, гистограмм и текстовых описаний.

В соответствии с поставленной задачей сформулирован набор показателей (табл. 1) – критериев оценки, по которым осуществляется ранжирование альтернатив. В частности, были включены такие критерии, как срок оперативной деятельности фирмы на рынке, широта ассортимента продукции фирмы, средний уровень цен, надежность этой организации как поставщика, уровень сервисного обслуживания. Оценки альтернатив по каждому критерию выставляются экспертами, по 100-балльной шкале. Значимости критериев-показателей

были определены с помощью указанной выше системы на основе метода процентных оценок. 100-балльная шкала используется здесь как предпочтительная с точки зрения удобства восприятия и последующей автоматизированной обработки.



Источник¹ / Source¹

Рис. 1. Система поддержки принятия решений и прогнозирования экспертных предпочтений на основе метода процентных оценок

Figure 1. Decision support and expert preferences forecasting system based on the percentage estimates method

Веса показателей и оценки альтернатив по данным критериям представлены в таблице 2.

Таблица 2. Экспертная оценка показателей конкурентоспособности

Table 2. Expert assessment of competitiveness indicators

Показатель	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10
Вес показателя	50	20	15	40	60	30	55	50	60	20
Субъект А	80	60	70	85	30	85	50	40	80	70
Субъект В	60	90	65	70	80	45	60	65	85	45
Субъект С	45	55	80	70	70	50	85	80	30	95
Субъект D	80	40	90	80	60	65	40	70	75	80
Субъект E	35	80	50	90	85	30	70	55	90	60

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Для дальнейших расчетов определим разницу L_i между максимальным l_{max}^n и минимальным l_{min}^n значениями каждого критерия у альтернатив. Например, для первого показателя разница составит:

¹ Терелянский П.В. (2009). Система поддержки принятия решений и прогнозирования экспертных предпочтений на основе метода процентных оценок. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2009611491 от 18 марта 2009 г.

$$L_1 = l_{\max}^n - l_{\min}^n = 80 - 35 = 45.$$

Для второго:

$$L_2 = l_{\max}^n - l_{\min}^n = 90 - 40 = 50.$$

Значение разниц L_i приведены в таблице 3.

Таблица 3. Разница между максимальным и минимальным значениями каждого критерия

Table 3. Difference between the maximum and minimum values of each criterion

Разница	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_{10}
Значение	45	50	40	20	55	55	45	40	65	50

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Далее проводится расчет значений индекса согласия, основываясь на данных таблицы 2, по формуле (1). Значение индекса в ячейке рассчитывается как отношение суммы весов критериев, по которым i -я альтернатива (в соответствующей строке матрицы) не уступает j -ой альтернативе (в соответствующем столбце), к сумме весов всех критериев.

Автоматизированный расчет в электронном процессоре MS Excel дает следующие результаты (табл. 4).

Таблица 4. Расчет матрицы индексов согласия

Table 4. Matrix of consent indices calculation

	Субъект А	Субъект В	Субъект С	Субъект D	Субъект Е
Субъект А	-	0,39	0,50	0,64	0,29
Субъект В	0,61	-	0,58	0,49	0,41
Субъект С	0,50	0,43	-	0,51	0,41
Субъект D	0,36	0,51	0,49	-	0,41
Субъект Е	0,71	0,59	0,59	0,59	-

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Отметим, что достаточно рассчитать по формуле (1) верхнюю правую часть матрицы (над главной диагональю), а нижняя левая часть рассчитывается как разность единицы и «зеркального» значения индекса:

$$c_{ji} = 1 - c_{ij}. \quad (4)$$

Далее, в соответствии с формулой (2), осуществим расчет матрицы несогласия. При этом в знаменателе формулы располагается значение максимальной разницы между альтернативами по этому критерию. Рассчитанная матрица представлена в таблице 5.

Таблица 5. Расчет матрицы индексов несогласия

Table 5. Matrix of disagreement indices Calculation

	Субъект А	Субъект В	Субъект С	Субъект D	Субъект Е
Субъект А	-	0,91	0,73	0,55	1,00
Субъект В	0,73	-	1,00	0,70	1,00
Субъект С	0,77	0,85	-	0,69	1,00
Субъект D	0,36	1,00	1,00	-	0,80
Субъект Е	1,00	0,56	0,70	1,00	-

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Значение в ячейке этой матрицы определяет меру несогласия с предположением о том, что альтернатива в i -ой строке матрицы превосходит альтернативу j -ом столбце. В частности, мы видим, что не подтверждается предположение о превосходстве А над В, В над С, В над Е.

На следующем этапе решения формируется матрица превосходства альтернатив на основе рассчитанных выше критериев согласия и несогласия. При этом, в соответствии с методикой анализа, значения этих критериев сравниваются с установленными заранее пороговыми значениями. Представим результат расчетов ниже (табл. 6).

Таблица 6. Матрица превосходства альтернатив

Table 6. Matrix of alternatives superiority

	Субъект А	Субъект В	Субъект С	Субъект D	Субъект Е
Субъект А	-	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ЛОЖЬ
Субъект В	ЛОЖЬ	-	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ
Субъект С	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	-	ИСТИНА	ЛОЖЬ
Субъект D	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	-	ЛОЖЬ
Субъект Е	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	-

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

В таблице 6 значение ИСТИНА в ячейке означает признание превосходства альтернативы, находящейся в соответствующей строке, над альтернативой, находящейся в соответствующем столбце. Значение ЛОЖЬ означает признание отсутствия превосходства. Полученные значения рассчитаны исходя из принятого критического уровня коэффициента согласия 0,5, а коэффициента несогласия – 0,8.

Доминирование альтернатив можно представить в виде графа (рис. 2). Как видно, альтернатива Е доминирует В, С, и D, и не доминируется А. Альтернатива С доминирует D, и не доминируется А.

Альтернатива, получившая максимальное число значений ЛОЖЬ, является доминируемой, ей присваивается минимальный ранг. Как видно и по рисунку 2, таковой является D; исключим ее из списка альтернатив, и пересчитаем матрицу превосходства, при этом изменим граничные значения индексов согласия и несогласия. Результат расчетов представлен в таблице 7.

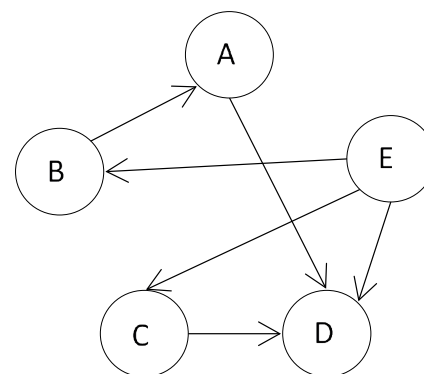
Таблица 7. Матрица превосходства для сокращенного множества альтернатив

Table 7. Superiority matrix for a reduced set of alternatives

	Субъект А	Субъект В	Субъект С	Субъект Е
Субъект А	-	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ
Субъект В	ИСТИНА	-	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ
Субъект С	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	-	ЛОЖЬ
Субъект Е	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ИСТИНА	-

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

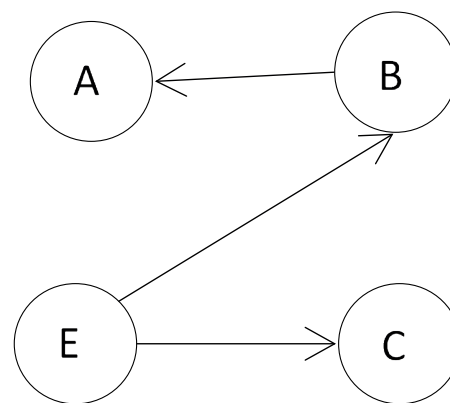
Как видно по значениям данной матрицы, недоминируемой остается альтернатива – Субъект Е. Графически ситуация представлена ниже (см. рис. 3).



Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Рис. 2. Граф превосходства альтернатив

Figure 2. Superiority of alternatives graph



Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Рис. 3. Граф превосходства альтернатив

Figure 3. Superiority of alternatives graph

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS

Построенный по результатам следования методике расчетов граф иллюстрирует, что однозначно доминируемой является альтернатива А. Утверждение о превосходстве альтернативы В над С должно быть сформулировано в ходе дополнительного исследования экспертом. Применение методики ELECTRE показывает, что альтернатива Е находится в безусловной доминирующей позиции, составляя ядро лучших альтернатив.

В итоге, ранжирование рассматриваемых объектов выглядит следующим образом:

- 1 ранг – Субъект Е;
- 2 ранг – Субъект В;
- 3 ранг – Субъект С;
- 4 ранг – Субъект А;
- 5 ранг – Субъект D.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

Приведенная методика позволяет выстроить непротиворечивый порядок альтернативных вариантов, учитывая различие как в самих экспертных оценках альтернатив по критериям, так и различный уровень значимости самих критериев. Методика позволяет выделить для дальнейшего анализа множество (финальное ядро) лучших альтернатив, худшую альтернативу и максимально доминируемую альтернативу. Набор этих данных, как правило, является достаточным для большинства практических задач в условиях неопределенности и неустойчивости данных об окружении задачи. Простейшая автоматизация этапов ELECTRE I с помощью средств Microsoft Excel или подобных табличных процессоров, а также разработанных авторами программных систем позволяет эффективно решать задачи ранжирования альтернатив, выделения лучших вариантов в условиях многокритериальной оценки экспертами. Возможность автоматизации расчетных процедур позволяет проводить альтернативные расчеты с изменяющимися входными параметрами, что придает методу значительную гибкость и адаптивность, позволяя учесть интересы различных акторов, имеющих отношение к решаемой задаче.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Азгальдов Г.Г. (1982). Теория и практика оценки качества товаров. Основы квалиметрии. М.: Экономика. 256 с.
- Азгальдов Г.Г. (1989). Квалиметрия в архитектурно-строительном проектировании. М.: Стройиздат. 264 с.
- Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. (1973). О квалиметрии. М.: Изд-во стандартов. 172 с.
- Брагина Е.И. (2012). История развития нейронных сетей и их перспективы // Современное общество, образование и наука: сборник научных трудов по материалам Международной заочной научно-практической конференции в 3 частях, Тамбов, 25 июня 2012 г. Ч. 3. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком». С. 18–19.
- Гагарин А.Г., Костикова А.В. (2017). Методические подходы к компьютерному моделированию сложных систем с использованием нечеткой логики // Эколого-мелиоративные аспекты рационального природопользования: материалы Международной научно-практической конференции, г. Волгоград, 31 января – 3 февраля 2017 г.; гл. ред. Овчинников А.С. Волгоград: Изд-во Волгоградского государственного аграрного университета. Т. 3. С. 442–447.
- Декатов Д.Е., Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. (2008). Многокритериальная оценка конкурентоспособности инновационных организаций автоматизированными методами семейства ELECTRE // Менеджмент инноваций. № 3. С. 180–186.
- Декатов Д.Е. (2010). Прогнозирование и анализ конкурентоспособности организаций на основе процедур методов теории принятия решений // Экономическое прогнозирование: модели и методы: материалы VI Международной научно-практической конференции, Воронеж, 6 апреля 2010 г. В 2 ч. Ч. 1. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета. С. 125–130.
- Каргина Л.А. (2010). Реализация методов ELECTRE для оценки конкурентоспособности компьютерных фирм // Вестник Академии. № 1. С. 55–61.
- Кац А.М. (2006). Об оценке конкурентоспособности техники // Экономист. № 3. С. 58–63.
- Коротеев М.В. (2018). Обзор некоторых современных тенденций в технологии машинного обучения // E-Management. № 1. С. 26–35. <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2018-1-26-35>
- Орлов А.И. (2004). Нечисловая статистика. М.: МЗ-Пресс. 513 с.

- Орлов А.И. (1979). Статистика объектов нечисловой природы и экспертные оценки // Экспертные оценки. Вопросы кибернетики: сборник. Вып.58. М.: Научный Совет АН СССР по комплексной проблеме «Кибернетика». С.17–33.
- Терелянский П.В. (2009а). Непараметрическая экспертиза объектов сложной структуры: монография. М.: Дашков и К°. 220 с.
- Терелянский П.В. (2009б). Системы поддержки принятия решений. Опыт проектирования: монография. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ. 126 с.
- Феррейра Орасо Е.В. (2012). Современные интерактивные интерфейсы // Теоретические и практические аспекты развития современной науки: материалы V Международной научно-практической конференции, г. Москва, 2–3 октября 2012 г. М.: Институт стратегических исследований. С. 129–134.
- Roy. B. (1968). Classement et choix en presence de points de vue multiples (la methode ELECTRE) [Ранжирование и выбор при наличии нескольких точек зрения (метод ELECTRE)] // Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle [Французский журнал компьютерных наук и операционных исследований]. Т. 2, № 8. С. 57–75. (Фр. яз.). <https://doi.org/10.1051/RO%2F196802V100571>

REFERENCES

- Azgal'dov G.G. (1982), *Theory and practice of assessing the quality of goods. Fundamentals of Qualimetry*, Economics, Moscow, USSR (in Russian).
- Azgal'dov G.G. (1989), *Qualimetry in architectural and construction design*, Strojizdat, Moscow, USSR (in Russian).
- Azgal'dov G.G., Raikhman E.P. (1973), *About Qualimetry*, Publishing house of standards, Moscow, USSR (in Russian).
- Bragina E.I. (2012), “The history of the development of neural networks and their prospects”, In: *Modern society, education and science: Proceedings of the International scientific-practical conference in 3 parts, Tambov 25 June 2012*, part 3, Yucom Consulting Company LLC, Tambov, Russia, pp. 18–19.
- Gagarin A.G., Kostikova A.V. (2017), “Methodical approaches to computer modeling of complex systems using fuzzy logic”, In: Ovchinnikov A.S. (ed.) *Ecological and reclamation aspects of rational nature management: Proceedings of International scientific practical conference, Volgograd 31 January–3 February 2017*, Volgograd State Agrarian University Publ. House, Volgograd, Russia, vol. 3, pp. 442–447.
- Dekatov D.E., Andreichikov A.V., Andreichikova O.N. (2008), “Multi-criteria assessment of the competitiveness of innovative organizations by automated methods of the ELECTRE family”, *Innovation Management*, no. 3, pp. 180–186.
- Dekatov D.E. (2010), “Forecasting and analysis of the competitiveness of organizations based on the procedures of decision theory methods”, In: *Economic forecasting: models and methods: Proceedings of VI International scientific practical conference, Voronezh, 6 April 2010*, in 2 parts, part 1, Voronezh state university Publ. House, Voronezh, Russia, pp. 125–130.
- Ferreira Opaso E.V. (2012), “Modern interactive interfaces”, In: *Theoretical and practical aspects of the development of modern science: Proceedings of the V International scientific practical conference, Moscow, 2–3 October 2012*, Institute for Strategic Studies, Moscow, Russia, pp. 129–134.
- Kargina L.A. (2010), “Implementation of ELECTRE methods for assessing the competitiveness of computer firms”, *Vestnik Akademii*, no. 1, pp. 55–61.
- Kats A.M. (2006), “On assessing the competitiveness of technology”, *Ekonomist*, no. 3, pp. 58–63.
- Koroteev M.V. (2018), “Review of some modern trends in machine learning technology”, *E-Management*, no. 1, pp. 26–35, <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2018-1-26-35>
- Orlov A.I. (2004), *Non-numerical statistics*, MZ-Press, Moscow, Russia (in Russian).
- Orlov A.I. (1979), “Statistics of objects of non-numerical nature and expert assessments”, In: *Expert assessments. Issues of cybernetics*, issue 58, Scientific Council of the Academy of Sciences of the USSR on the cybernetics complex problem, Moscow, USSR, pp. 17–33.
- Roy B. (1968), “Classification and choice in the presence of multiple points of view (the ELECTRICAL method)” [Classement et choix en presence de points de vue multiples (la methode ELECTRE)], *French journal of computer science and operational research* [Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle], vol. 2, no. 8, pp. 57–75 (in French), <https://doi.org/10.1051/RO%2F196802V100571>
- Tereliansky P.V. (2009а), *Non-parametric examination of objects of complex structure: monograph*, Dashkov and Co., Moscow, Russia (in Russian).
- Tereliansky P.V. (2009б), *Decision support systems. Design experience: monograph*, Volgograd State technical university Publ. House, Volgograd, Russia (in Russian).