



Анализ и классификация многокритериальных методов принятия решений¹

© 2024, В.Б. Чечнев

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация

Для принятия решений требуется подробная проработка и анализ путём оценки и сравнения различных альтернативных вариантов решений. Такие задачи характеризуются наличием нескольких критериев, по которым происходит сравнение. Вариативность параметров и условий принятия решения послужили причиной создания большого числа методов, способствующих эффективному осуществлению этого процесса. Известно несколько сотен многокритериальных методов принятия решений. При их практическом использовании сложно произвести отбор наиболее подходящего метода. В связи с этим, работы по анализу, классификации и систематизации многокритериальных методов принятия решений являются актуальными и востребованными, так как на них опираются лица, принимающие решения, и разработчики систем поддержки принятия решений. В большинстве классификаций акцентируется внимание на методологиях и целях методов, оставляя без рассмотрения присущие им ограничения. В статье делается попытка систематизировать основные многокритериальные методы принятия решений с учётом их ограничений. В работе проведён анализ наиболее распространённых методов и их классификаций. По результатам выявленных ограничений предложена классификация многокритериальных методов принятия решений и правила для их отбора. Применение данного подхода может позволить повысить обоснованность выбора методов и, как следствие, эффективность принимаемых решений.

Ключевые слова: методы принятия решений, поддержка принятия решений, многокритериальная оценка, многокритериальные задачи, формализация предпочтений.

Цитирование: Чечнев В.Б. Анализ и классификация многокритериальных методов принятия решений. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №4(54). С. 607-624. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-607-624.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Процесс принятия решений (ПР) всегда связан с оценкой большого количества факторов и рассмотрения возможных альтернатив, поэтому его можно определить как сложный интеллектуальный процесс, целью которого является выбор оптимального решения на основе различных критериев, определяемых лицом, принимающим решение (ЛПР). Основной сложностью в выборе одной из альтернатив является то, что критерии оценки зачастую конфликтуют между собой, что в большинстве случаев делает невозможным выбор решения, превосходящего все остальные по каждому из критериев [1]. Поэтому для ПР ЛПР используют один или комбинацию из нескольких многокритериальных методов ПР (ММПР).

ММПР разрабатывались в трудах отечественных и зарубежных авторов в различных областях. Например, среди отечественных исследователей можно отметить: решение многокритериальных задач линейного программирования (академик С.В. Емельянов [2]); задачи

¹ Редакция вновь даёт дорогу молодым авторам, которые смело берутся за обзорные статьи. Во втором номере журнала за этот год был опубликован обзор подходов к автоматизации работ с онтологическими ресурсами, подготовленный молодым научным сотрудником М.А. Шишенковым. Представляемый на суд читателям обзор по методам принятия решений со многими критериями призван повысить эффективность принимаемых решений. Редакция ожидает получить обратную связь от читателей и новые работы в этой области с той же целью, которую для себя обозначил молодой автор. *Прим. ред.*

оптимального управления (академик Н.Н. Моисеев [3]); многокритериальную оптимизацию с ранжированием критериев по важности (профессор Е.С. Вентцель [4]); ММПР при конструировании машин и механизмов (И.М. Соболев и Р.Б. Статников [5]); методы свёртки критериев в многокритериальных задачах оптимизации (профессор Ю.Б. Гермейер [6]); методы сравнения важности неоднородных критериев и групп критериев (профессор В.В. Подиновский [7]) и др. По данным научной электронной библиотеки *elibrary.ru*, а также публикациям [8, 9] в последние годы наблюдается рост статей по ММПР.

Целью данного исследования является систематизация ММПР и разработка их классификации, которая могла бы повысить эффективность выбора ММПР при создании специализированного программного обеспечения (ПО) для систем поддержки ПР (СППР). Для достижения цели необходимо провести анализ существующих ММПР, их основных классификаций и выявить ключевые ограничения ММПР.

1 Основные ММПР

1.1 Определение области исследования

Опыт по созданию ММПР позволил накопить большой объём различных моделей, подходов и целых семейств методов [8]. Известно более 200 ММПР и их количество продолжает расти [9, 10]. Целесообразным является рассмотрение наиболее распространённых на практике ММПР, где измеряемым показателем распространённости принято число научных работ о методе (см. таблицы 1 и 2).

Таблица 1 – Наиболее часто используемые многокритериальные методы принятия решений (согласно [8])

Оригинальное название метода	Перевод	Количество научных статей с методом
<i>Fuzzy sets</i> [11]	Нечёткие множества	1471
<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)</i> [12]	Метод порядка предпочтения по сходству с идеальным решением	939
<i>Analytic Network Process (ANP)</i> [13]	Метод анализа сетей	281
<i>Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL)</i> [14]	Лаборатория испытаний и оценки ПР	227
<i>Best-Worst Method (BWM)</i> [15]	Метод лучшего-худшего	174
<i>Visekriterijumska Kompromisno Rangiranje (VIKOR)</i> [16]	Компромиссный рейтинг по многим критериям	168
<i>Fuzzy AHP</i> [17]	Нечёткий метод анализа иерархий	162
<i>Fuzzy TOPSIS</i> [18]	Нечёткий метод порядка предпочтения по сходству с идеальным решением	162
<i>ENTROPY</i> [19]	Энтропия	122
<i>Grey Relational Analysis (GRA)</i> [20]	Серый реляционный анализ	106

Данные, представленные в таблице 1, являются результатом анализа баз данных (БД) *Web of Science* и *EBSCO Discovery Service engine* с 2018 по 2023 гг. Из таблицы 1 видно, что преобладают *Fuzzy*-методы и метод *TOPSIS*.

Для оценки распространённости методов в научном дискурсе использовались показатели общего количества работ в БД «*ScienceDirect*» в период с 2012 по 2022 гг. (см. таблицу 2).

Основные ММПР, представленные в научных публикациях по степени их практического использования, приведены в таблице 3.

Исходя из представленных результатов исследований [8, 9, 38], можно ограничить круг рассматриваемых ММПР следующими методами: *SAW*, *MAUT*, *MAVT*, *SMART*, *AHP*, *ANP*, *BWM*, *TOPSIS*, *VIKOR*, *CBR*, *DEA*, *ELECTRE*, *PROMETHEE*, *Fuzzy*-методами и *GRA*.

Таблица 2 – Наиболее часто используемые многокритеральные методы принятия решений (согласно [9])

Оригинальное название	Перевод	Количество научных статей с методом
<i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i> [21]	Метод анализа иерархий	15452
<i>Data Envelopment Analysis (DEA)</i> [22]	Анализ охвата данных	9367
<i>Fuzzy sets</i> [11]	Нечёткие множества	8730
<i>TOPSIS</i> [12]	Метод порядка предпочтения по сходству с идеальным решением	8241
<i>Case-Based Reasoning (CBR)</i> [23]	На основе прецедентов	3258
<i>GRA / Grey Relational Model (GRM)</i> [20]	Серый реляционный анализ / Серая реляционная модель	3176
<i>ANP</i> [13]	Метод анализа сетей	3126
<i>Fuzzy AHP</i> [17]	Нечёткий метод анализа иерархий	2804
<i>Élimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE)</i> [24]	Исключение и выбор, преобразующий реальность	2782
<i>Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE)</i> [25]	Метод организации ранжирования предпочтений для обогащения оценок	2715
<i>VIKOR</i> [16]	Компромиссный рейтинг по многим критериям	2691
<i>Fuzzy TOPSIS</i> [18]	Нечёткий метод порядка предпочтения по сходству с идеальным решением	2014
<i>DEMATEL</i> [14]	Лаборатория испытаний и оценки ПР	1378
<i>Preference Ranking Global frequencies in Multicriterion Analysis (PRAGMA)</i> [26]	Ранжирование глобальных частот в многокритериальном анализе	1267
<i>Simple Additive Weighting (SAW)</i> [27]	Простое аддитивное взвешивание	976
<i>Multi-Attribute Utility Theory (MAUT)</i> [28]	Многокритериальная теории полезности	948
<i>BWM</i> [15]	Метод лучшего-худшего	867
<i>Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART)</i> [29]	Простая методика многокритериальной оценки	646
<i>Fuzzy ANP</i> [30]	Нечёткий метод анализа сетей	586
<i>Weighted Sum Model (WSM)</i> [31]	Модель взвешенной суммы	470
<i>COmplex PROportional ASsessment (COPRAS)</i> [32]	Комплексная пропорциональная оценка	445
<i>Multiple-Attribute Value Theory (MAVT)</i> [33]	Многокритериальная теория ценности	315
<i>Dominance-based Rough Set Approach (DRSA)</i> [34]	Подход грубого набора, основанный на доминировании	278
<i>Weighted Aggregated Sum Product ASsessment (WASPAS)</i> [35]	Оценка результата взвешенной агрегированной суммы	270
<i>Weighted Product Model (WPM)</i> [36]	Модель взвешенных результатов	198
<i>Measuring Attractiveness by a Categorical-Based Evaluation TecHnique (MACBETH)</i> [37]	Измерение предпочтительности с помощью категориального метода оценки	162

1.2 Анализ ММПР

Среди ММПР, представленных в таблице 2, первым был разработан метод *SAW*. Несмотря на относительно малое количество упоминаний в научных исследованиях последних лет, *SAW*

является одним из самых востребованных ММПР (см. таблицу 3). Это обусловлено простым алгоритмом расчёта, который можно реализовать без использования специализированных компьютерных инструментов [38]. Основой идеей метода является объединение значений и

Таблица 3 – Частота практического применения многокритеральных методов принятия решений (согласно [38])

Метод	Описанные случаи практического использования
<i>AHP</i> , <i>fuzzy AHP</i> , трапециевидный <i>fuzzy AHP</i> и <i>ANP</i>	70
<i>TOPSIS</i> , <i>fuzzy TOPSIS</i> и модификации <i>TOPSIS</i>	22
<i>SAW</i>	21
Целевое программирование	10
<i>ELECTRE</i>	7
<i>MAUT</i> и <i>MAVT</i>	7
<i>PROMETHEE</i>	5
<i>VIKOR</i> и <i>fuzzy VIKOR</i>	3
Прочие	20

весов критериев в единый критерий. *SAW* обладает характерными для многих ММПП недостатками: невозможно использовать качественные данные без их перевода в количественные, необходимо наличие заранее известных данных, в т.ч. и весов критериев [39, 40].

Развитие *SAW* получил в методах *MAUT*, *MAVT* и *SMART*. Эти методы связаны друг с другом, т.к. *MAUT* расширяет *MAVT*, а *SMART* разработан, чтобы обеспечить простой способ реализации метода *MAUT* [41, 42]. Данная группа методов помогает определить наилучшую альтернативу, назначая полезность каждому возможному последствию и вычисляя наилучшую возможную полезность. Метод *MAVT* стал основой данного направления в ММПП. Процедура помощи при ПР, предлагаемая *MAVT*, заключается в выстраивании альтернатив, сравнении их по общему набору критериев, присвоении баллов каждой альтернативе в соответствии с её эффективностью по каждому критерию, взвешивании этих критериев и расчёте общего балла для каждой альтернативы [43]. Ключевым элементом *MAVT* является концепция уровней предпочтений [44]. Основными недостатками *MAVT* являются: полная компенсация критериев и возникающая потребность в концептуальном усложнении при попытках формально определить значение оценок и весов [43, 44].

Метод *MAUT* привнёс нововведение в основную идею *MAVT*. Его главное преимущество – способность учитывать неопределённость, поэтому *MAUT* нашёл широкое применение в экономике, финансах, управлении водными ресурсами и др. сферах, содержащих значительную степень неопределённости и достаточное количество доступных данных [41]. Среди преимуществ метода *MAUT* можно выделить следующие:

- учёт последствий на каждом этапе [39];
- возможность оценки вновь появляющихся альтернатив [40];
- возможность проведения анализа большого количества альтернатив [45].

В развитие метода *MAUT* появился *SMART* – одна из простейших его форм, которая преобразует веса важности в фактические числа [38]. В последствии были созданы методы *SMARTS* и *SMARTER* [42]. Основные преимущества *SMART* в том, что он прост в использовании, допускает любые методы присвоения весов, что требует меньших усилий со стороны ЛПР, чем *MAUT*, и *SMART* хорошо обрабатывает данные по каждому критерию [38]. Метод чувствителен к большому количеству критериев и учёту диапазонов шкал при определении весов критериев [40, 42].

Самая востребованная группа методов (см. таблицы 2, 3) – *AHP* и *ANP*. *AHP* – позволяет принимать сложные решения, разделяя их на иерархические уровни. Его можно использовать для определения относительной важности различных критериев при ПР или для определения того, какой из нескольких вариантов является наилучшим выбором. В *AHP* используется попарное сравнение критериев для определения их относительной важности и объединение оценки для ПР [46]. Среди достоинств метода выделяются [39]:

- иерархическая структура проблем ПР;
- возможность объединения результатов от нескольких экспертов;
- возможность оценивать количественные и качественные показатели.

ANP является развитием метода *AHP*, поэтому унаследовал от него большую часть достоинств и недостатков. *ANP* не требует строгих иерархических отношений, позволяет рассматривать взаимосвязанные критерии и расставлять приоритеты для групп или кластеров элементов [38]. Среди общих для обоих методов ограничений выделяют то, что коэффициент согласованности допускает противоречивые суждения в матрицах сравнения [39].

Среди методов, использующих попарное сравнение, можно выделить – *BWM*. В *BWM* ЛПР определяет лучший и худший критерии с последующим проведением попарных сравнений между каждым из этих критериев [15]. Эти наборы попарных сравнений используются в качестве входных данных для задачи оптимизации, результатами которой являются веса критериев (альтернатив) [15]. В *BWM* используется меньше сравнений, чем в *AHP* за счёт отсут-

ствия попарного сравнения альтернатив по всем критериям, что делает его более надёжным, согласованным и простым в реализации [47]. Возможность оценивать количественные и качественные показатели является важным преимуществом данного метода. *BWM* подходит для индивидуального и группового ПР. Базовый *BWM* включает нелинейную модель, которая иногда приводит к нескольким оптимальным весам, где вес каждого критерия представлен в виде интервала [48].

Наравне с *AHP* и *ANP* востребованным ММПП является метод *TOPSIS* (см. таблицы 1-3). Основной принцип работы *TOPSIS* заключается в измерении сходства альтернатив с идеальным решением, удалённости от худшего решения и последующем ранжировании с учётом весов используемых критериев [49]. Метод прост в использовании и программной реализации, а количество шагов остаётся неизменным независимо от числа атрибутов [38]. Результаты, получаемые данным методом, остаются устойчивыми при добавлении новых альтернатив, а входные данные не требуется преобразовывать перед использованием [39]. Отмечаются следующие слабые стороны метода *TOPSIS* [50]:

- требуется независимость критериев, которую трудно гарантировать;
- может приводить к предвзятому ранжированию;
- могут возникать ситуации, когда не существует альтернативы, одновременно удалённой от отрицательного и близкой к положительному идеальному решению.

Метод *VIKOR*, как и метод *TOPSIS*, основан на агрегирующей функции, где степень нелинейности задаётся параметром [51]. В данном методе наилучшая альтернатива называется компромиссной и определяется по степени близости к идеальному [52]. Метод *VIKOR* подходит в случаях, когда ЛПП не имеет предпочтений в решении или не может выразить свои предпочтения на начальных этапах процесса ПР. Отмечаются следующие преимущества *VIKOR* [39]:

- способность принимать компромиссные решения, решения с максимальной групповой полезностью и минимальным индивидуальным сожалением;
- оценивание веса, которое позволяет проанализировать конечное компромиссное решение;
- компромиссное решение может быть заменено, если мера веса не укладывается в интервал.

Для работы *VIKOR* необходимо назначение весов критериев и конвертация качественных данных в количественные [39].

Среди рассматриваемых ММПП метод *CBR* используется для извлечения новых знаний из уже имеющихся данных [53]. Для работы *CBR* необходимо большое количество данных о различных ситуациях в прошлом, что является существенным ограничением для работы в инновационных проектах.

Методология *DEA* позволяет оценивать границу эффективности путём сравнения альтернатив с наилучшей производительностью с использованием методов математического программирования [54]. Концепция эффективности в *DEA* определяется как отношение полученных результатов к используемым ресурсам [55]. Данный подход позволяет выявить скрытые связи, а также включать в процесс ПР новые альтернативы без изменения порядка ранжирования [38]. *DEA* не подходит для ситуаций, когда невозможно получить точные данные по альтернативам, а также имеет ограничение по количеству альтернатив и критериев [39].

Иной подход к организации процесса ПР базируется на теории отношения превосходства. Известными представителями таких ММПП являются *ELECTRE* и *PROMETHEE*.

ELECTRE – методы, которые развиваются с 60-х годов прошлого века, и известны в нескольких вариантах [56]. Все варианты метода *ELECTRE* имеют схожий принцип работы, но различаются по типам решаемых задач. Схема работы метода *ELECTRE* состоит в сравнении каждой пары альтернатив и обнаружении доминирующей и не доминирующей альтернативы. Из принципа работы следует наличие лишь относительной оценки альтернатив, а не абсолютной. Среди преимуществ данного семейства методов выделяют [40, 56-58]:

- быстроту процедуры решения задач;

- введение понятия «несравнимости альтернатив»;
- наличие встроенного инструмента анализа для ЛПР и поэтапность выявления предпочтений ЛПР.

К ограничениям метода относятся [40, 56-58]:

- использование пороговых значений, которые могут быть произвольными, но при этом способны оказывать существенное влияние на окончательное решение;
- неспособность обрабатывать порядковые шкалы;
- удаление или добавление альтернативы может изменить ранжирование между остальными;
- необходимо наличие заранее известных весов критериев.

PROMETHEE – это семейство методов, которые используют несколько итераций для получения рейтинга среди конечного набора альтернатив. Ограничением метода является отсутствие чёткой методики присвоения весов критериям [38]. В случае большого количества критериев могут появиться сложности с оценкой результатов, а при добавлении новой альтернативы необходимо заново проводить анализ [39]. По целям использования выделяются следующие представители *PROMETHEE*:

- *PROMETHEE I* – частичное ранжирование;
- *PROMETHEE II* – полное ранжирование;
- *PROMETHEE III* – ранжирование на основе интервалов;
- *PROMETHEE IV* – набор решений для частичного и полного ранжирования;
- *PROMETHEE V* – проблемы, связанные с ограничениями сегментации;
- *PROMETHEE VI* – представление человеческого мозга;
- *PROMETHEE GDSS* – групповое ПР;
- *PROMETHEE GAIA* – графическое представление.

Важным общим преимуществом таких подходов является отсутствие компенсации между критериями и любых процессов нормализации, изменяющих исходные данные.

Методы *ELECTRE* и *PROMETHEE* возможно применить для отбрасывания некоторых неприемлемых альтернатив и впоследствии использовать другой ММПП для выбора наилучшего решения.

Значимым для теории принятия многокритериальных решений является использование понятий нечёткой логики и теории нечётких множеств «*Fuzzy set theory*» (*FST*) [11]. Использование теории нечётких множеств создаёт возможность перехода от бинарных категорий обычной логики к множеству альтернатив среди них. Применение методов *FST* позволяет [59, 60]:

- использовать нестрогие рассуждения в системах управления;
- принимать решения в условиях неопределённости;
- моделировать приёмы мышления человека.

Многие из рассмотренных ММПП были расширены с помощью *FST* (*Fuzzy MAUT*, *Fuzzy ANP*, *Fuzzy PROMETHEE*, *Fuzzy MAVT*, *Fuzzy ELECTRE* и т.д.) [61].

Одним из ведущих ММПП в области работы с неполной информацией является метод *GRA*. Это подход к ПР с частично известной и частично неизвестной информацией в сложных системах со взаимосвязанными критериями [32, 62]. В *GRA* осуществляется анализ отношений сходства между эталонным значением и альтернативой. Избранный альтернативный ряд, имеющий наиболее близкое сходство с эталоном, является лучшим решением. *GRA*, в отличие от *FST*, даёт ЛПР возможность изменения цели в процессе ПР [63]. Одним из типичных недостатков большинства ММПП, способных работать при неполноте информации, является сложность вычислений, что характерно и для *GRA*. Важным ограничением метода является невозможность использования качественных показателей [64].

Большинство рассматриваемых методов могут давать схожие результаты. Несмотря на разные способы нормализации и агрегации данных, при ранжировании альтернатив с помощью ММПП достигается высокая корреляция Спирмена: 0,949 [65], 0,798 [66], 0,88 [67]. Представленные результаты характерны для статичного набора альтернатив и критериев. При сравнении показателей ранговой корреляции Спирмена показано, что с увеличением ко-

личества альтернатив сходство между результатами неизменного набора методов (*TOPSIS*, *SAW*, *AHP*, *ELECTRE*, *VIKOR* и т.д.) увеличивается, а с увеличением количества альтернатив – уменьшается [68]. Таким образом, наиболее остро проблема выбора ММПР стоит в ситуации ПР с большим количеством альтернатив и малым набором критериев, т.к. в данном случае наблюдается существенная разница между различными ММПР.

1.3 Подходы к решению задачи формализации предпочтений

Исходя из обозначенных в подразделе 1.2 проблем, характерных для большинства ММПР, трудно решаемой задачей является формализация предпочтений ЛПР и определения важности критериев. Можно отметить следующие особенности в этой области:

- ЛПР хорошо понимает условность и неопределённость назначаемых коэффициентов, поскольку ни один человек «не в состоянии облечь свои неформализованные предпочтения в точную числовую форму, и поэтому не доверяет полученному результату» [69];
- эксперты, специализирующиеся на технических областях, предпочитают выражать свои предпочтения, используя числовые значения, но в случае с представителями социальных наук чаще всего используются слова или лингвистические модели [70];
- при принятии социально значимых решений проблемы с формализацией предпочтений и неопределённостью результатов усиливаются конфликтами ценностей заинтересованных сторон и неопределённостью их реакции на выбор какой-либо альтернативы [71].

Названные особенности обуславливают необходимость предварительной работы с ЛПР с целью выявления, формулирования, конкретизации и анализа их предпочтений. Данная работа может проводиться как в явном, например, через проведение анкетирования или интервью перед использованием методов, для которых необходимо наличие весов критериев, так и в неявном виде, например, в рамках работы с методами, имеющими встроенный механизм оценки критериев (*MACBETH*, *BWM* и т.п.).

В задаче формализации предпочтений ЛПР существует множество подходов, которые могут применяться в зависимости от конкретной ситуации. В связи с тем, что для работы с большинством ММПР требуется наличие определённого перечня альтернатив и критериев и их изначально определённых весов, необходимым элементом процесса формализации является определение важности критериев путём назначения им весов. Выполнить это позволяют в т.ч. следующие методы:

- парного сравнения критериев [72];
- универсальных коэффициентов важности критериев [69];
- базирующиеся на аналитической взаимосвязи показателей предпочтения критериев [73];
- основанные на формальном подходе [73].

Одна из самых подробных классификаций методов определения коэффициентов важности представлена в работе [74]. В обобщённом формате она представлена на рисунке 1.

2 Классификация ММПР

2.1 Анализ существующих классификаций ММПР

В теории ПР имеются различные подходы к классификации методов многокритериального выбора, как при конечном, так и при бесконечном множестве альтернатив. Это связано с различными способами определения ключевого различительного критерия и с разработкой новейших ММПР. Например, можно выделить появление методов *FST*, которые, благодаря развитию математического аппарата, вышли за рамки большинства существовавших классификаций. Из-за роста количества ММПР становится всё сложнее выбрать наиболее подходящий среди них [75].

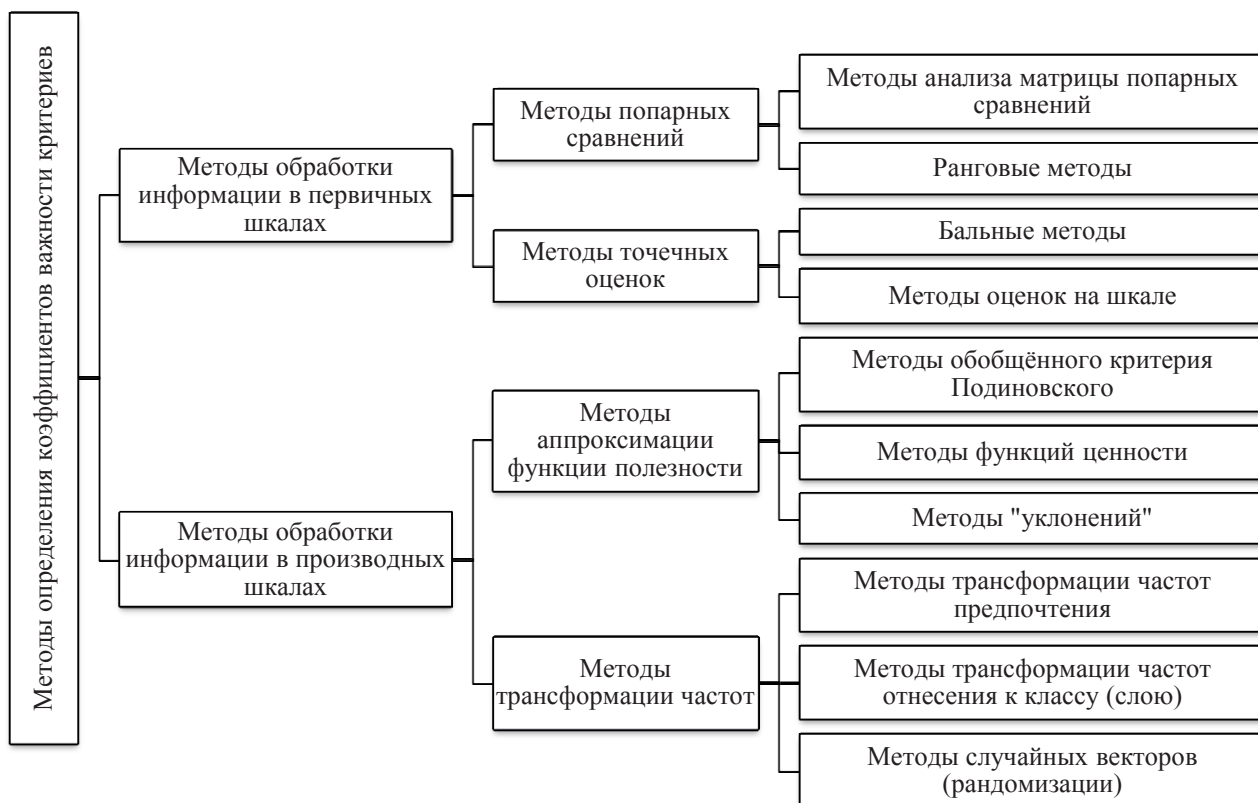


Рисунок 1 – Иерархическая классификация методов определения коэффициентов важности критериев [74]

ММНР можно представить в виде двух категорий [65]:

- *MODM (Multi-Objective Decision-Making)* – многоцелевое НР – используется для определения оптимальной альтернативы с учётом ограничений в условиях наличия большого или бесконечного количества альтернативных решений.
- *MADM (Multi-Attribute Decision-Making)* – НР по множеству атрибутов – используется, когда конечное число предложенных альтернатив оценивается по отношению к различным взвешенным атрибутам для получения рейтинга предпочтений, который описывает эффективность каждой альтернативы для достижения цели в отношении атрибутов.

На основе вышеописанного разделения было создано множество схожих классификаций. Одна из них представлена на рисунке 2.

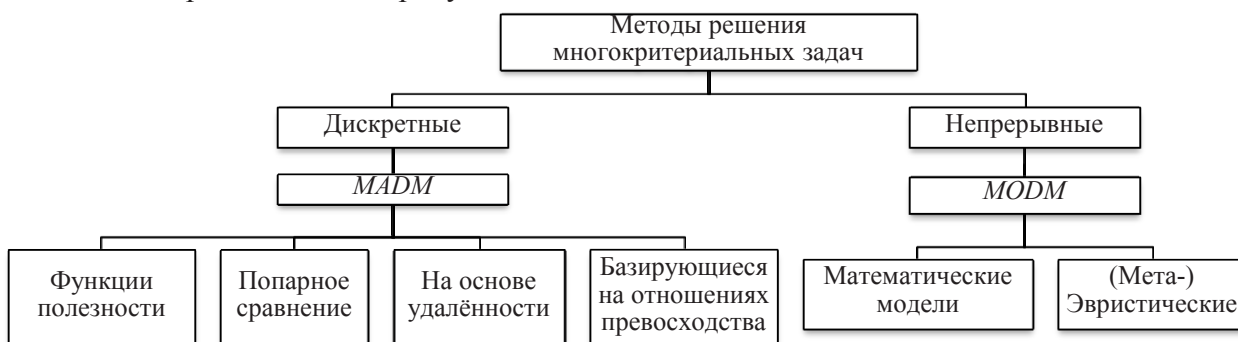


Рисунок 2 – Классификация MADM и MODM методов [76]

Рисунок 2 демонстрирует один из классических подходов к классификации ММНР – разделение на группы, исходя из их принципа анализа альтернатив.

Среди зарубежных классификаций ММПР можно выделить следующие [9]:

- по количеству ЛПР: индивидуальное ПР; групповое ПР.
- по компенсации критериев: компенсаторные; не компенсаторные.
- по отношению к компромиссам: компромиссные подходы; не компромиссные подходы.
- по отношению к типу используемых данных: качественные; количественные.
- по отношению к работе с неопределённостью данных: способные к использованию неопределённых данных; неспособные к использованию неопределённых данных.
- по принципу работы: нефункциональные модели; на основе функциональных моделей; базирующиеся на отношениях превосходства; использующие дискриминантный анализ.

Основным недостатком большинства этих классификаций является отсутствие достаточной информативности при использовании их в СППР. Следует отметить некоторые полезные характеристики для разработки подходящей для СППР классификации – наличие или отсутствие компенсации критериев, типы допустимых для обработки данных, возможность работы с неопределённостью данных.

Среди отечественных классификаций ММПР можно выделить следующие:

- по принципу работы методы [77]: доминантного анализа; многокритериальной оптимизации с ограничениями; многокритериальной оптимизации с взвешенными отклонениями от цели; вычисления приоритетов на основе парных сравнений; многоатрибутной оптимизации по полезности; многокритериальной классификации.
- по основным типам решаемых ими проблем [65]: выбор наилучшего решения из множества; ранжирование и сортировка решений; описание и систематизация решений; описание и систематизация последствий реализации решений.

Самым рассматриваемым видом классификаций являются различные вариации классификаций ММПР по схеме определения наилучшей альтернативы. Данный тип разделения ММПР имеет слабое влияние на выбор того или иного метода как ЛПР, так и программой. При этом использование вышеописанной классификации по наиболее подходящим для них видам задач – важный этап в работе СППР в рамках подбора ММПР, т.к. в первую очередь необходимо подобрать инструмент, способный решать рассматриваемую проблему.

Ещё одной альтернативой представленным выше классификациям по принципу работы может служить классификация, представленная на рисунке 3.

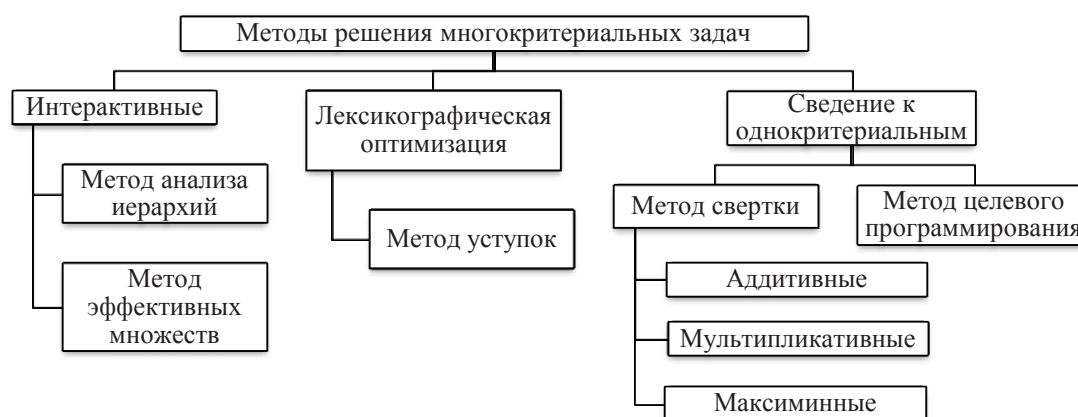


Рисунок 3 – Классификация методов решения многокритериальных задач на основе их принципа работы [78]

Таким образом, анализ имеющихся научных подходов позволяет сделать следующий вывод: существующие классификации достаточно подробно и разносторонне характеризуют ММПР с точки зрения их принципов работы и решаемых ими задач, но в то же время упускают из вида ограничения описываемых ММПР. Такая ситуация не позволяет в полной мере эффективно применять ММПР, т.к. ЛПР и разработчики СППР вынуждены проводить анализ подходящих под их цели ММПР на предмет соответствия этих ММПР требованиям их

задачи. Это подтверждает актуальность систематизации основных ММПР с помощью разработки классификации по ограничениям, характерным для данных методов.

2.2 Разработка классификации ММПР

В СППР существует несколько основных подходов к определению подходящего ММПР: «система правил», «алгоритм», «искусственная нейронная сеть» [45]. Это обосновано тем, что чаще всего ММПР применяются в группе. Поэтому специализированное ПО включает в себя большое количество не взаимодополняющих ММПР. В большинстве случаев такое ПО применяет «систему правил» (78,3%), смысл которой заключается в нахождении ММПР с помощью набора правил формата «если..., то...» [75].

Исходя из базовой концепции отбора ММПР в СППР, с учётом проведённого анализа существующих методов классификация ММПР должна отражать: разделение методов на их возможности работы с неопределённой информацией; учитывать наличие компенсации критериев; учитывать их зависимость от типов данных, с которыми они работают.

Трансформируя обозначенные ключевые элементы и выявленные в подразделе 1.2 ограничения ММПР в формат «системы правил», можно получить следующие правила, которые необходимо отразить в системе:

1. «Если в текущей задаче присутствуют неизвестные или неточные данные, то необходимо выбрать группу методов, способных работать с неопределённостью»;
 - 1.1. «Если неточные данные невозможно представить в виде набора дискретных значений, то необходимо выбрать группу методов, работающих с интервальными значениями данных»;
 - 1.1.1. «Если количество критериев больше семи, то необходимо выбрать группу методов, на которую это не оказывает существенного влияния» (*SMART*);
 - 1.1.2. «Если количество критериев меньше семи, то *следует* выбрать группу методов, чувствительных к количеству критериев» (*MAUT*);
 - 1.2. «Если неточные данные возможно представить в виде набора дискретных значений, то *следует* выбрать группу методов, оперирующих дискретными данными»;
 - 1.2.1. «Если предполагается изменение цели в рамках процесса ПР, то необходимо выбрать группу методов с возможностью изменения целей» (*GRA*);
 - 1.2.2. «Если изменения цели в рамках процесса ПР не предполагается, то *следует* выбрать группу методов со статичной целью» (*FST*);
2. «Если в текущей задаче отсутствуют неизвестные или неточные данные, то *рекомендуется* выбрать группу методов, способных работать только с заранее известными точными данными»;
 - 2.1. «Если в текущей задаче важно отсутствие компенсации критериев, то *следует* выбрать группу методов, без компенсации критериев»;
 - 2.1.1. «Если в текущей задаче присутствуют качественные данные, то *рекомендуется* выбрать группу ММПР, которые могут работать как с качественными, так и с количественными данными»;
 - 2.1.1.1. «Если в текущей задаче присутствуют отрицательные значения, то необходимо выбрать методы, в которых отсутствуют ограничения на использование отрицательных значений» (*MAVT, TOPSIS, VIKOR*);
 - 2.1.1.2. «Если в текущей задаче только положительные значения, то *следует* использовать методы, в которых применяются только положительные значения» (*SAW, DEA*);
 - 2.1.2. «Если в текущей задаче есть только количественные данные, то *рекомендуется* использовать группу методов, которые работают только с количественными данными»;
 - 2.1.2.1. «Если в текущей задаче существуют иерархические отношения между критериями, то необходимо выбрать методы, в которых рассматриваются иерархический вид критериев» (*AHP*);
 - 2.1.2.2. «Если в текущей задаче отсутствуют иерархические отношения между критериями, то необходимо выбрать методы, для которых не является важной иерархия критериев» (*ANP, BWM*);
 - 2.2. «Если в текущей задаче несущественно отсутствие компенсации критериев, то *следует* выбрать группу методов, с компенсацией критериев»;
 - 2.2.1. «Если в СППР существует БД ситуаций и в ней присутствует подобная текущей, то *рекомендуется* выбрать ММПР, использующие БД похожих ситуаций» (*CBR*);

2.2.2. «Если отсутствует БД ситуаций или в ней нет подобной текущей, то необходимо выбрать ММПР, не требующие БД похожих ситуаций» (*ELECTRE, PROMETHEE*);

Одной из особенностей данного набора правил является отсутствие строгих ограничений на выбор определённой группы ММПР (ключевые слова – *рекомендуется* и *следует*). Однако, использование именно указанных групп ММПР позволит ЛПР существенно сократить трудоёмкость процесса ПР и время ПР, что особенно характерно в случае с неопределёнными данными. Зачастую использование ММПР с «излишней функциональностью» может привести к существенному усложнению процесса получения и интерпретации результатов, тем самым нивелируя положительные стороны предлагаемой модели.

На основании изложенного предлагается следующая классификация ММПР по их ограничениям, представленная на рисунке 4. Среди всех 15 рассмотренных в данной статье ММПР лишь 4 позволяют учитывать неточные или неопределённые данные при работе (*GRA, MAUT, SMART, FST*), также большая часть методов обладает компенсацией критериев (*SAW, DEA, MAVT, TOPSIS, VIKOR, AHP, ANP, BWM*).

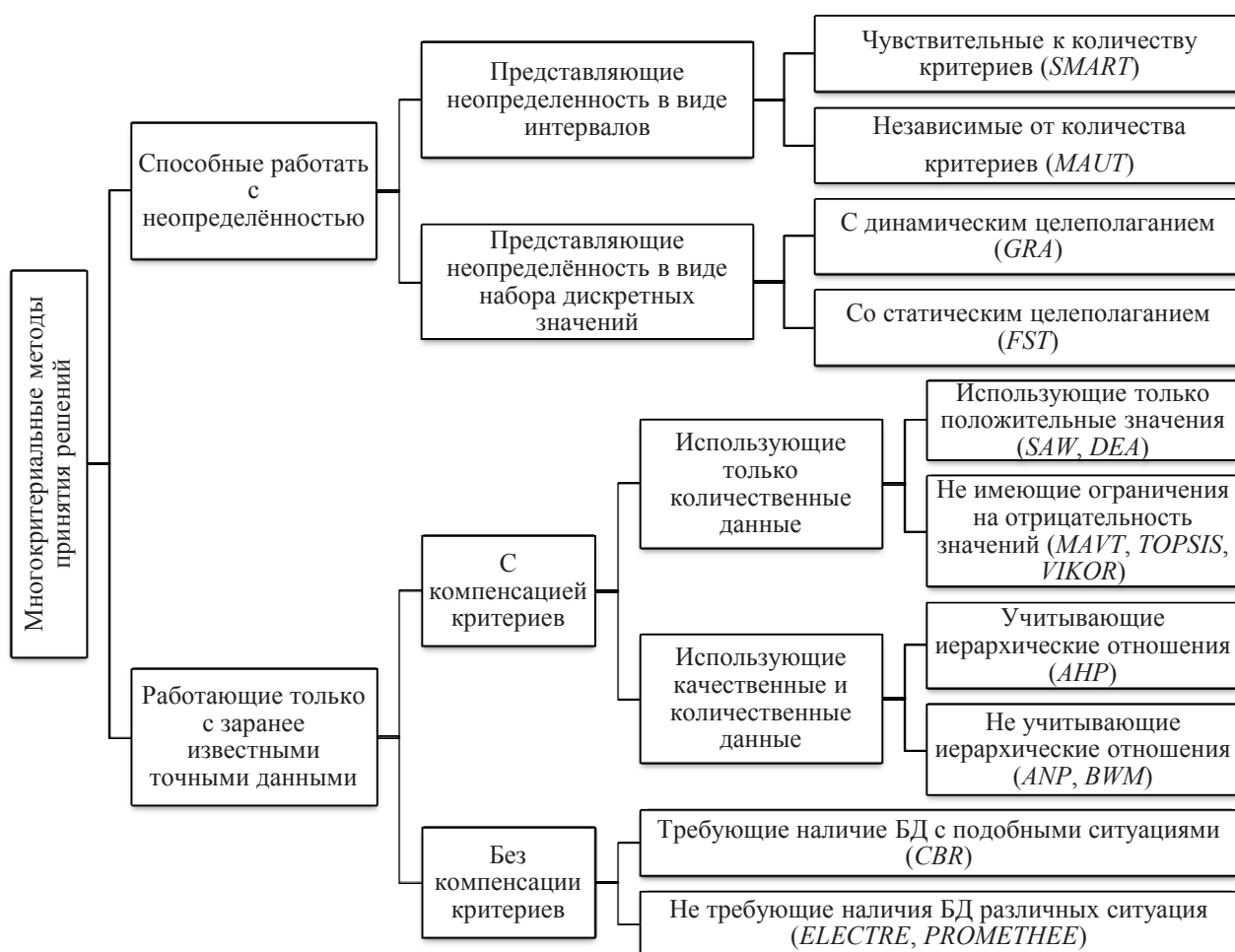


Рисунок 4 – Предлагаемая классификация ММПР по их ограничениям

Важным дополнением к разработанной классификации является классификация ММПР по основным типам решаемых ими проблем. Их комбинация обладает следующими преимуществами относительно имеющихся научных подходов:

- повышение прозрачности процесса ПР, качества принятых решений, удовлетворённости ЛПР полученным решением;
- сокращение времени на выбор подходящего ММПР и работу с выбранным ММПР;

Заключение

Проведённый анализ основных ММПП выявил, что многие методы, несмотря на разнообразие их методологий, обладают схожим набором ограничений и недостатков. Процесс ПР с помощью изученных ММПП связан со сложностью формализации предпочтений ЛПР. В связи с этим приведены список и классификации основных подходов к данной формализации. Ограничения ММПП послужили основой предлагаемой систематизации. Среди них можно выделить: ограничения по типам данных и их точности, а также ограничения по количеству критериев и наличию их компенсации.

Предложенная систематизация ММПП может быть полезна при разработке СППР, использующих рассмотренные в работе методы, а также ЛПР, которые для решения конкретной многокритериальной задачи стоят перед выбором ММПП. Разработанный принцип актуален в ситуациях ПР с большим количеством альтернатив и малым набором критериев. Предложенная в работе классификация позволяет с помощью системы правил отбирать наиболее подходящие методы. Это создаст для ЛПР возможность оказывать непосредственное влияние на процесс выбора ММПП, тем самым повышая его прозрачность и удовлетворённость полученным решением. Данный подход позволит сократить время на отбор ММПП и на его работу путём рекомендации наиболее эффективных ММПП при указываемых данных или ситуации.

Список источников

- [1] Демидовский А.В. Сравнительный анализ методов многокритериального принятия решений: ELECTRE, TOPSIS и ML-LDM // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2020. Т. 1. С.234-237.
- [2] Емельянов С.В., Ларичев О.И. Многокритериальные методы принятия решений // Новое в жизни, науке, технике. 1985. № 10. С. 1-32.
- [3] Моисеев Н.Н., Иванов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. М.: Наука, 1971. 352 с.
- [4] Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1976. 206 с.
- [5] Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 328 с.
- [6] Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. М.: Наука, 1971. 384 с.
- [7] Подиновский В.В. Об относительной важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений // Многокритериальные задачи принятия решений / Под ред. С.В. Емельянова. М.: Машиностроение, 1978. С.48-82.
- [8] Štílić A., Puška A. Integrating Multi-Criteria Decision-Making Methods with Sustainable Engineering: A Comprehensive Review of Current Practices // Eng. 2023. Vol. 4. P.1536-1549. DOI:10.3390/eng4020088.
- [9] Taherdoost H., Madanchian M. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts // Encyclopedia. 2023. Vol.3. P.77-87. DOI:10.3390/encyclopedia3010006.
- [10] Cinelli M., Kadzinski M., Miebs G., Gonzalez M., Slowinski R. Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system // European Journal of Operational Research. 2022. Vol. 302. P.633-651. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.01.011.
- [11] Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Vol. 8. P.338-353. DOI:10.1016/s0019-9958(65)90241-x.
- [12] Hwang C.-L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications—A State-of-the-Art Survey. New York: Springer, 1981. 269 p. DOI:10.1007/978-3-642-48318-9.
- [13] Saaty T.L. Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process. Pittsburgh: RWS Publications, 1996. 370 p.
- [14] Gabus A., Fontela E. World Problems, an Invitation to Further Thought within the Framework of DEMATEL. Geneva: Battelle Geneva Research Center, 1972. P.1-8.
- [15] Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method // Omega. 2015. Vol. 53. P.49-57. DOI:10.1016/j.omega.2014.11.009
- [16] Duckstein L., Opricovic S. Multiobjective Optimization in River Basin Development // Water Resources Research. 1980. Vol. 16. P.14-20 DOI:10.1029/WR016i001p00014
- [17] Van Laarhoven P.J., Pedrycz W. A fuzzy extension of Saaty's priority theory // Fuzzy Sets Systems. 1983. Vol. 11. P.229-241. DOI:10.1016/s0165-0114(83)80082-7.
- [18] Lai Y.-J., Liu T.-Y., Hwang C.-L. Topsis for MODM // European Journal of Operational Research. 1994. Vol. 76. P.486-500. DOI:10.1016/0377-2217(94)90282-8.
- [19] Shannon C. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. P.379-423.
- [20] Ju-Long D. Control problems of grey systems // Systems & Control Letters. 1982. Vol. 1. P.288-294. DOI:10.1016/S0167-6911(82)80025-X.

- [21] **Saaty T.L.** A scaling method for priorities in hierarchical structures // *Journal of mathematical psychology*. 1977. Vol. 3. P.234-281. DOI:10.1016/0022-2496(77)90033-5.
- [22] **Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.** Measuring the efficiency of decision making units // *European Journal of Operational Research*. 1978. Vol. 2. P.429–444. DOI:10.1016/0377-2217(78)90138-8
- [23] **Kolodner J.L.** An introduction to case-based reasoning // *Artificial intelligence review*. 1992. Vol. 6.1. P.3-34. DOI:10.1007/bf00155578
- [24] **Benayoun R., Roy B., Sussman N.** Manual de Reference du Programme Electre // *Note de Synthese et Formation*. 1966. Vol. 25. 79 p.
- [25] **Brans J.-P.** L'ingénierie de la Décision: L'élaboration D'instruments D'aide a la Décision. Québec: Université Laval, Faculté des Sciences de L'administration, 1982. 256 p.
- [26] **Matarazzo B.** Preference Ranking Global Frequencies in Multicriterion Analysis (PRAGMA) // *European Journal of Operational Research*. 1988. Vol. 36. P.36-49. DOI:10.1016/0377-2217(88)90005-7.
- [27] **Churchman C.W., Ackoff R.L.** An approximate measure of value // *European Journal of Operational Research*. 1954. Vol. 2. P.172–187. <http://doi.org/10.1287/opre.2.2.172>.
- [28] **Keeney R.L., Raiffa H., Mayer R.F.** Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 569 p. DOI:10.1017/CBO9781139174084.
- [29] **Edwards W.** Social utilities // *Engineering Economist*. 1971. Vol. 1. P.119-129.
- [30] **Mikhailov L., Singh M.G.** Fuzzy Analytic network process and its application to the development of decision support systems. // *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society*. 2003. Vol. 33. P.33-41. DOI:10.1109/TSMCC.2003.809354.
- [31] **Fishburn R.C.** Additive Utilities with Incomplete Product Set: Applications to Priorities and Assignments // *Journal of the Operations Research Society of America*. 1967. P.537-542. DOI:10.1287/opre.15.3.537.
- [32] **Zavadskas E.K., Kaklauskas A., Sarka V.** The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects // *Technological and Economic Development of Economy*. 1994. Vol. 1(3). P.131-139.
- [33] **Keeney R.L., Raiffa H.** Decision with Multiple Objectives. New York: J.Wiley & Sons, 1976. 569 p.
- [34] **Greco S., Matarazzo B., Slowinski R.** Rough sets theory for multi-criteria decision analysis // *European Journal of Operational Research*. 2001. Vol. 1(129). P.1-47 DOI:10.1016/S0377-2217(00)00167-3.
- [35] **Zavadskas E.K., Turskis Z., Antucheviciene J., Zakarevicius A.** Optimization of weighted aggregated sum product assessment // *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2012. Vol. (6)122. P.3-6. DOI:10.5755/j01.eee.122.6.1810.
- [36] **Bridgman P.W.** Dimensional Analysis. New Haven: Yale University Press, 1922. 112 p.
- [37] **Bana E., Costa C.A., Vansnick J.C.** The MACBETH Approach: Basic Ideas, Software, and an Application. In: *Advances in Decision Analysis. Mathematical Modelling: Theory and Applications*. Dordrecht: Springer, 1999. P.131-157. DOI:10.1007/978-94-017-0647-6_9.
- [38] **Velasquez M., Hester P.T.** An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods // *International Journal of Operations Research*. 2013. Vol. 10. P.56-66.
- [39] **Kraujalienė L.** Comparative analysis of multicriteria decision-making methods evaluating the efficiency of technology transfer // *Business, Management and Education*. 2019. Vol. 17. P.72-93. DOI:10.3846/bme.2019.11014.
- [40] **Середенко Н.Н., Периков Ю.А., Дружаев А.А.** Сравнительный анализ многокритериальных методов принятия решений // *Актуальные проблемы гуманитарных и архитектурных наук*. 2010. № 1. С.83-86.
- [41] **Brito M.M., Evers M.** Multi-criteria decision-making for flood risk management: a survey of the current state of the art // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2016. Vol. 16(4). P.1019-1033. DOI: 10.5194/nhess-16-1019-2016.
- [42] **Patel M.R., Vashi M.P., Bhatt B.V.** SMART – Multi-criteria decision-making technique for use in planning activities // *Conf. on New Horizons in Civil Engineering* (Surat, Gujarat, India, March, 2017). 2017. P.1-6.
- [43] **Morton A.** Multiattribute Value Elicitation // *Operations Research & Management Science*. 2018. Vol. 261. P.287-311. DOI:10.1007/978-3-319-65052-4_12.
- [44] **Jaffar A. et al.** An Innovative Approach in Decision-making Environments: Assessing Performance by Applying Multi-Attribute Value Theory (MAVT) // *Asian Journal of Multidisciplinary Studies*. 2015. Vol. 3. P.141-150.
- [45] **Артемяева А.Ю., Шакиров В.А., Яковкина Т.Н.** Многокритериальный выбор районов для размещения ветровых электрических станций // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 3. С. 116-122. DOI:10.18324/2077-5415-2016-3-116-122.
- [46] **Esen H.** Analytical Hierarchy Process Problem Solution. In *Analytic Hierarchy Process - Models, Methods, Concepts, and Applications*. IntechOpen. DOI:10.5772/intechopen.1001072.
- [47] **Осинцев Н.А.** Выбор стратегии устойчивого развития транспортной компании комбинированным STEEP-BWM-SAW с интервальными приближительными числами // *Вестник транспорта поволжья*. 2022. № 3(93). С.73-81.
- [48] **Rezaei J.** A Concentration Ratio for Non-Linear Best Worst Method // *International Journal of Information Technology & Decision Making*. 2020. Vol. 3(19). P.891-907. DOI:10.1142/S0219622020500170.
- [49] **Халицкая К.** Выбор технологии с помощью метода TOPSIS // *Форсайт*. 2020. Т. 14. № 1. С.85-96. DOI:10.17323/2500-2597.2020.1.85.96.
- [50] **Ciardiello F., Genovese A.** A comparison between TOPSIS and SAW methods // *Annals of Operations Research*. 2023. Vol. 325. P.967-994. DOI:10.1007/s10479-023-05339-w.
- [51] **Заруцкий С.А.** Система выбора и настройки метода агрегирования как элемент инструментария СПИП в сфере региональной политики // *Управление экономическими системами*. 2013. № 11(59). С.57-73.
- [52] **Родзин С.И., Боженик А.В., Кравченко Ю.А., Родзина О.Н.** Методы нечёткого многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации при чрезвычайных ситуациях // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2023. № 2(232). С.186-200. DOI:10.18522/2311-3103-2023-2-186-200.

- [53] **Вариавский П.Р., Ар Кар Мьо, Шункевич Д.В.** Применение методов классификации и кластеризации для повышения эффективности работы прецедентных систем // *Международный журнал Программные продукты и системы*. 2017. № 4(30). С.625-631.
- [54] **Алимханова А.Н., Мисель А.А.** Оценка эффективности предприятий на основе метода DEA // *Доклады ТУСУР*. 2019. № 2. С.104-108. DOI:10.21293/1818-0442-2019-22-2-104-108.
- [55] **Бикеева М.В., Сысоева Е.А.** DEA-модель для оценки эффективности реализации национального проекта «Демография» на территории Приволжского федерального округа // *Статистика и экономика*. 2023. №20(3). С.4-13. DOI:10.21686/2500-3925-2023-3-4-13.
- [56] **Taherdoost H., Madanchian M.** A comprehensive overview of the ELECTRE method in multi criteria decision-making // *Journal of Management Science & Engineering Research*. 2023. Vol. 6. P.5-16. DOI:10.30564/jmsr.v6i2.5637.
- [57] **Кравченко Т.К., Дружаев А.А.** Адаптация методов семейства ELECTRE для включения в Экспертную систему поддержки принятия решений // *Бизнес-информатика*. 2015. № 2 (32). С.69-78.
- [58] **Терелянский П.В., Кузнецов С.Ю.** Методика ELECTRE и автоматизация ранжирования альтернатив // *E-Management*. 2022. Т.5. №3. С.26-37. DOI:10.26425/2658-3445-2022-5-3-26-37.
- [59] **Лебедева М.Е.** Нечёткая логика в экономике – формирование нового направления // *Идеи и идеалы*. 2019. Т.11. №1. С.197-212. DOI:10.17212/2075-0862-2019-11.1.1-197-212.
- [60] **Савченко Д.В., Резникова К.М., Смышляева А.А.** Нечёткая логика и нечёткие информационные технологии // *Отходы и ресурсы*. 2021. № 1. С.1-12. DOI:10.15862/10ECOR121.
- [61] **Шакиров В.А.** Принятие решений в условиях нечётких предпочтений на основе многокритериальной теории ценности // *Современные технологии*. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3(35). С.48-55.
- [62] **Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н.** Оценка устойчивости цепей поставок на основе серого реляционного анализа. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2023. №3. С.180-196. DOI:10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196.
- [63] **Розенберг И.Н.** Управление в условиях неопределенности // *Современные технологии управления*. 2017. №7(79). С.1-18.
- [64] **Shihab S.K., Khan Z.A., Siddiquee A.N.** Application of Grey Relational Analysis Along with Principal Component Analysis for Multi-Response Optimization of Hard Turning // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2016. Vol.38. P.238-245.
- [65] **Осинцев Н.А.** Многокритериальные методы принятия решений в «зелёной» логистике // *Мир транспорта*. 2021. Т. 19. № 5(96). С.105-114. DOI:10.30932/1992-3252-2021-19-5-13.
- [66] **Клюков С.А.** Сравнение и разработка методов многокритериального анализа принятия решений // *Молодой ученый*. 2021. № 18(360). С.30-33.
- [67] **Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н.** Выбор зелёных технологий в складской логистике – многокритериальный подход // *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2021. Т.11. №1. С.4-17. DOI:10.18503/2222-9396-2021-11-1-4-17.
- [68] **Zamani-Sabzi H., King, J.P., Gard C.C., Abudu S.** Statistical and analytical comparison of multi-criteria decision-making techniques under fuzzy environment // *Operations Research Perspectives*. 2016. Vol.3. P.92-117. DOI:10.1016/j.orp.2016.11.001.
- [69] **Пиявский С.А.** Формулы для вычисления универсальных коэффициентов при принятии многокритериальных решений // *Онтология проектирования*. 2019. Т.9. № 2(32). С.282-298. DOI:10.18287/2223-9537-2019-9-2-282-298.
- [70] **Martinez D.L., Acosta J.S.** Review of modeling preferences for decision models // *European Scientific Journal*. 2015. Vol.11. P.1-18.
- [71] **Khadpe P. et al.** DISCERN: Designing Decision Support Interfaces to Investigate the Complexities of Workplace Social Decision-Making With Line Managers // *arXiv preprint arXiv:2402.19318*. 2024. DOI:10.1145/3613904.3642685.
- [72] **Спиридонов С.Б., Булатова И.Г., Постников В.М.** Анализ подходов к выбору весовых коэффициентов критериев методом парного сравнения критериев // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. 2017. Т.9. №6. С.1-24.
- [73] **Постников В.М., Спиридонов С.Б.** Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2015. №6. С.267-287. DOI:10.7463/0615.0780334.
- [74] **Анохин А.М., Готов В.А., Павельев В.В., Черкашин А.М.** Методы определения коэффициентов важности критериев // *Автоматика и телемеханика*. 1997. №8. С.3-35.
- [75] **Cinelli M., Kadzi'nski M., Gonzalez M., Slowi'nski R.** How to Support the Application of Multiple Criteria Decision Analysis? Let Us Start with a Comprehensive Taxonomy // *Omega*. 2020. Vol.96. P.1-49. DOI:10.1016/j.omega.2020.102261.
- [76] **Gebre S.L., Cattrysse D., Alemayehu E., Orshoven Van J.** Multi-criteria decision making methods to address rural land allocation problems: A systematic review // *International Soil and Water Conservation Research*. 2021. Vol.9. P.490-501. DOI:10.1016/j.iswcr.2021.04.005.
- [77] **Микони С.В.** Системный анализ методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив // *Информатика и автоматизация*. 2015. № 41. С.180-199. DOI:10.15622/sp.41.10.
- [78] **Богданова П.А., Сахаров Д.М., Васильева Т.В.** Обзор методов многокритериальной оптимизации в задачах принятия решений // *Инновационные аспекты развития науки и техники*. 2021. № 6. С.153-157.

Сведения об авторе

Чечнев Василий Борисович, 1999 г. рождения. Окончил Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (2023), направление «Организация и управление наукоёмкими производствами». Аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, специальность «Когнитивное моделирование». В списке научных трудов 3 работы в области информационных систем. Author ID (РИНЦ): 1215414. gegrev@yandex.ru.



Поступила в редакцию 28.05.2024, после рецензирования 22.09.2024. Принята к публикации 30.10.2024.



Review article

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-607-624

Analysis and classification of multi-criteria decision-making methods

© 2024, V.B. Chechnev

Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow, Russia

Abstract

Decision-making requires in-depth analysis through the evaluation and comparison of various alternative solutions. These tasks are characterized by multiple criteria used for comparison. The variability of parameters and conditions in decision-making has led to the development of numerous methods aimed at facilitating this process effectively. Currently, several hundred multi-criteria decision-making methods are known, making it challenging to select the most appropriate one for practical use. Therefore, research on the analysis, classification, and systematization of multi-criteria decision-making methods is relevant and essential for decision-makers and developers of decision support systems. Most classifications emphasize the methodologies and purposes of these methods, often overlooking their inherent limitations. This article attempts to systematize the main multi-criteria decision-making methods, considering their limitations. It analyzes the most widely used methods and their classifications. Based on identified limitations, the paper proposes a classification of multi-criteria decision-making methods and guidelines for selecting them. Applying this approach can enhance the validity of method selection and, consequently, the effectiveness of the decisions made.

Keywords: decision-making methods, decision support, multi-criteria assessment, multi-criteria tasks, formalization of preferences.

For citation: Chechnev V.B. Analysis and classification of multi-criteria decision-making methods [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(4): 607-624. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-4-607-624.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures and tables

Table 1 - Most commonly used multi-criteria decision-making methods (as per [8])

Table 2 - Most commonly used multi-criteria decision-making methods (as per [9])

Table 3 - Frequency of practical application of multi-criteria decision-making methods (as per [38])

Figure 1 - Hierarchical classification of methods for determining criteria importance coefficients [74]

Figure 2 - Classification of MADM and MODM methods [76]

Figure 3 - Classification of methods for solving multi-criteria tasks based on their operating principle [78]

Figure 4 - Proposed classification of multi-criteria decision-making methods according to their limitations

References

- [1] **Demidovsky AV**. Comparative analysis of multi-criteria decision-making methods: ELECTRE, TOPSIS and ML-LDM [In Russian]. *International Conference on Soft Computing and Measurement*. 2020; 1: 234-237.

- [2] **Emelianov SV, Larichev OI.** Multi-criteria decision-making methods [In Russian]. New in life, science, technology. 1985; 10: 1-32.
- [3] **Moiseev NN, Ivanilov YP, Stolyarova EM.** Optimization methods [In Russian]. Moscow: Science, 1971. 352 p.
- [4] **Ventzel ES.** Operations research. Tasks, principles, methodology [In Russian]. Moscow: Science, 1976. 206 p.
- [5] **Sobol IM, Statnikov RB.** Selection of optimal parameters in problems with many criteria [In Russian]. Moscow: Science, 1981. 328 p.
- [6] **Germeier YB.** Introduction to the Theory of Operations Research [In Russian]. Moscow: Science, 1971. 384 p.
- [7] **Podinovskiy VV.** On the relative importance of criteria in multi-criteria decision-making problems. Multi-criteria decision-making problems. Ed. SV. Emelianov [In Russian]. Moscow: Mechanical engineering, 1978. 48-82.
- [8] **Štíli'c A, Puška A.** Integrating Multi-Criteria Decision-Making Methods with Sustainable Engineering: A Comprehensive Review of Current Practices. Eng. 2023; 4: 1536-1549. DOI:10.3390/eng4020088.
- [9] **Taherdoost H, Madanchian M.** Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. Encyclopedia. 2023; 3: 77-87. DOI:10.3390/encyclopedia3010006.
- [10] **Cinelli M, Kadzinski M, Miebs G, Gonzalez M, Slowinski R.** Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system. European Journal of Operational Research. 2022; 302: 633-651. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.01.011.
- [11] **Zadeh LA.** Fuzzy sets. Information and Control. 1965; 8: 338-353. DOI:10.1016/s0019-9958(65)90241-x.
- [12] **Hwang CL, Yoon K.** Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications—A State-of-the-Art Survey. New York: Springer, 1981. 269 p. DOI:10.1007/978-3-642-48318-9.
- [13] **Saaty T.L.** Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process. Pittsburgh: RWS Publications, 1996. 370 p.
- [14] **Gabus A, Fontela E.** World Problems, an Invitation to Further Thought within the Framework of DEMATEL. Geneva: Battelle Geneva Research Center, 1972; 1-8.
- [15] **Rezaei J.** Best-worst multi-criteria decision-making method. Omega. 2015; 53: 49-57. DOI:10.1016/j.omega.2014.11.009
- [16] **Duckstein L, Opricovic S.** Multiobjective Optimization in River Basin Development. Water Resources Research. 1980; 16: 14-20 DOI:10.1029/WR016i001p00014.
- [17] **Van Laarhoven PJ, Pedrycz W.** A fuzzy extension of Saaty's priority theory. Fuzzy Sets Systems. 1983; 11: 229-241. DOI:10.1016/s0165-0114(83)80082-7.
- [18] **Lai YJ, Liu TY, Hwang CL.** Topsis for MODM. European Journal of Operational Research. 1994; 76: 486-500. DOI:10.1016/0377-2217(94)90282-8.
- [19] **Shannon C.** A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal. 1948; 27: 379-423.
- [20] **Ju-Long D.** Control problems of grey systems. Systems & Control Letters. 1982; 1: 288-294. DOI:10.1016/S0167-6911(82)80025-X.
- [21] **Saaty TL.** A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of mathematical psychology. 1977; 3: 234-281. DOI:10.1016/0022-2496(77)90033-5.
- [22] **Charnes A, Cooper WW, Rhodes E.** Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational Research. 1978; 2: 429-444. DOI:10.1016/0377-2217(78)90138-8.
- [23] **Kolodner JL.** An introduction to case-based reasoning. Artificial intelligence review. 1992; 6.1: 3-34. DOI:10.1007/bf00155578
- [24] **Benayoun R, Roy B, Sussman N.** Manual de Reference du Programme Electre. Note de Synthese et Formation. 1966; 25. 79 p.
- [25] **Brans JP.** L'ingénierie de la Décision: L'élaboration D'instruments D'aide a la Décision. Québec: Université Laval, Faculté des Sciences de L'administration, 1982. 256 p.
- [26] **Matarazzo B.** Preference Ranking Global Frequencies in Multicriterion Analysis (PRAGMA). European Journal of Operational Research. 1988; 36: 36-49. DOI:10.1016/0377-2217(88)90005-7.
- [27] **Churchman CW, Ackoff RL.** An approximate measure of value. European Journal of Operational Research. 1954; 2: 172-187. <http://doi.org/10.1287/opre.2.2.172>.
- [28] **Keeney RL, Raiffa H, Mayer RF.** Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 569 p. DOI:10.1017/CBO9781139174084.
- [29] **Edwards W.** Social utilities. Engineering Economist. 1971; 1: 119-129.
- [30] **Mikhailov L, Singh MG.** Fuzzy Analytic network process and its application to the development of decision support systems. IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society. 2003; 33: 33-41. DOI:10.1109/TSMCC.2003.809354.
- [31] **Fishburn PC.** Additive Utilities with Incomplete Product Set: Applications to Priorities and Assignments. Journal of the Operations Research Society of America. 1967; 537-542. DOI:10.1287/opre.15.3.537.
- [32] **Zavadskas EK, Kaklauskas A, Sarka V.** The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects. Technological and Economic Development of Economy. 1994; 1(3): 131-139.
- [33] **Keeney RL, Raiffa H.** Decision with Multiple Objectives. New York: J.Wiley & Sons, 1976. 569 p.
- [34] **Greco S, Matarazzo B, Slowinski R.** Rough sets theory for multi-criteria decision analysis. European Journal of Operational Research. 2001; 1(129): 1-47 DOI:10.1016/S0377-2217(00)00167-3.
- [35] **Zavadskas EK, Turskis Z, Antucheviciene J, Zakarevicius A.** Optimization of weighted aggregated sum product assessment. Elektronika ir Elektrotechnika. 2012; (6)122: 3-6. DOI:10.5755/j01.eee.122.6.1810.
- [36] **Bridgman PW.** Dimensional Analysis. New Haven: Yale University Press, 1922. 112 p.
- [37] **Bana E, Costa CA, Vansnick JC.** The MACBETH Approach: Basic Ideas, Software, and an Application. In: Advances in Decision Analysis. Mathematical Modelling: Theory and Applications. Dordrecht: Springer, 1999: 131-157. DOI:10.1007/978-94-017-0647-6_9

- [38] **Velasquez M, Hester PT.** An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. *International Journal of Operations Research*. 2013; 10: 56-66.
- [39] **Kraujalienė L.** Comparative analysis of multicriteria decision-making methods evaluating the efficiency of technology transfer. *Business, Management and Education*. 2019; 17: 72-93. DOI:10.3846/bme.2019.11014.
- [40] **Seredenko NN, Perikov YuA, Druzhaev AA.** Comparative analysis of multi-criteria methods of decision making [In Russian]. *Actual problems of humanitarian and architectural sciences*. 2010; 1: 83-86.
- [41] **Brito MM, Evers M.** Multi-criteria decision-making for flood risk management: a survey of the current state of the art. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2016; 16(4): 1019-1033. DOI: 10.5194/nhess-16-1019-2016.
- [42] **Patel MR, Vashi MP, Bhatt BV.** SMART – Multi-criteria decision-making technique for use in planning activities. *Conf. on New Horizons in Civil Engineering (Surat, Gujarat, India, March, 2017)*. 2017: 1-6.
- [43] **Morton A.** Multiattribute Value Elicitation. *Operations Research & Management Science*. 2018; 261: 287-311. DOI:10.1007/978-3-319-65052-4_12.
- [44] **Jaffar A. et al.** An Innovative Approach in Decision-making Environments: Assessing Performance by Applying Multi-Attribute Value Theory (MAVT). *Asian Journal of Multidisciplinary Studies*. 2015; 3: 141-150.
- [45] **[13] Artemyeva AY., Shakirov VA, Yakovkina TN** Multi-criteria selection of areas for location of wind power stations [In Russian]. *Systems. Methods. Technologies*. 2016; 3: 116-122. DOI:10.18324/2077-5415-2016-3-116-122.
- [46] **Esen H.** Analytical Hierarchy Process Problem Solution. In *Analytic Hierarchy Process - Models, Methods, Concepts, and Applications*. IntechOpen. DOI:10.5772/intechopen.1001072.
- [47] **Osintsev NA.** Selecting a sustainable development strategy for a transport company using a combined STEEP-BWM-SAW with interval approximate numbers [In Russian]. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2022; 3(93). C.73-81.
- [48] **Rezaei J.** A Concentration Ratio for Non-Linear Best Worst Method. *International Journal of Information Technology & Decision Making*. 2020; 3(19): 891-907. DOI:10.1142/S0219622020500170.
- [49] **Khalitskaya K.** Technology selection using the TOPSIS method [In Russian]. *Forsyth*. 2020; 14; 1: 85-96. DOI:10.17323/2500-2597.2020.1.85.96.
- [50] **Ciardiello F, Genovese A.** A comparison between TOPSIS and SAW methods. *Annals of Operations Research*. 2023; 325: 967-994. DOI:10.1007/s10479-023-05339-w.
- [51] **Zarutsky SA.** A system for selecting and setting an aggregation method as an element of the DSS toolkit in the field of regional policy [In Russian]. *Management of economic systems*. 2013; 11(59): 57-73.
- [52] **Rodzin SI, Bozhenyuk AV, Kravchenko YA, Rodzina ON.** Fuzzy multicriteria group decision-making methods for evacuation problems in emergency situations [In Russian]. *News of the Southern Federal University. Technical science*. 2023; 2(232): 186-200. DOI:10.18522/2311-3103-2023-2-186-200.
- [53] **Varshavsky PR, Ar Kar Mio, Shunkevich DV.** Application of classification and clustering methods to improve the efficiency of precedent systems [In Russian]. *International Journal of Software Products and Systems*. 2017; 4(30): 625-631.
- [54] **Alimkhanova AN, Misel AA.** Assessing the efficiency of enterprises based on the DEA method [In Russian]. *TUSUR reports*. 2019; 2: 104-108. DOI:10.21293/1818-0442-2019-22-2-104-108.
- [55] **Bikeyeva MV, Sysoeva EA.** DEA model for assessing the effectiveness of the implementation of the national project “Demography” in the Volga Federal District [In Russian]. *Statistics and economics*. 2023; 20(3): 4-13. DOI:10.21686/2500-3925-2023-3-4-13.
- [56] **Taherdoost H, Madanchian M.** A comprehensive overview of the ELECTRE method in multi criteria decision-making. *Journal of Management Science & Engineering Research*. 2023; 6: 5-16. DOI:10.30564/jmser.v6i2.5637.
- [57] **Kravchenko TK, Druzhaev AA.** Adaptation of ELECTRE family methods for inclusion in the Expert Decision Support System [In Russian]. *Business Informatics*. 2015; 2 (32): 69-78.
- [58] **Terehlyansky PV, Kuznetsov SY.** ELECTRE methodology and automation of ranking of alternatives [In Russian]. *E-Management*. 2022; 5; 3: 26-37. DOI:10.26425/2658-3445-2022-5-3-26-37.
- [59] **Lebedeva ME.** Fuzzy logic in economics – the formation of a new direction [In Russian]. *Ideas and ideals*. 2019; 11; 1: 197-212. DOI:10.17212/2075-0862-2019-11.1.1-197-212.
- [60] **Savchenko DV, Reznikova KM, Smyshlyaeva AA.** Fuzzy logic and fuzzy information technology [In Russian]. *Waste and resources*. 2021; 1: 1-12. DOI:10.15862/10ECOR121.
- [61] **Shakirov VA.** Decision-making under conditions of fuzzy preferences based on multi-criteria value theory [In Russian]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2012; 3(35): 48-55.
- [62] **Osintsev NA, Rakhmangulov AN.** Assessing supply chain resilience based on gray relational analysis [In Russian]. *Bulletin of MSTU G.I. Nosova*. 2023; 3: 180-196. DOI:10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196.
- [63] **Rosenberg IN.** Management under conditions of uncertainty [In Russian]. *Modern control technologies*. 2017; 7(79): 1-18.
- [64] **Shihab SK, Khan ZA, Siddiquee AN.** Application of Grey Relational Analysis Along with Principal Component Analysis for Multi-Response Optimization of Hard Turning. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2016; 38: 238-245.
- [65] **Osintsev NA.** Multi-criteria decision-making methods in green logistics [In Russian]. *World of transport*. 2021; 19; 5(96): 105-114. DOI:10.30932/1992-3252-2021-19-5-13.
- [66] **Klovov SA.** Comparison and development of multicriteria decision analysis methods [In Russian]. *Young scientist*. 2021; 18(360): 30-33.
- [67] **Osintsev NA, Rakhmangulov AN.** Selection of green technologies in warehouse logistics – a multi-criteria approach [In Russian]. *Modern problems of the Russian transport complex*. 2021; 11; 1: 4-17. DOI:10.18503/2222-9396-2021-11-1-4-17.
- [68] **Zamani-Sabzi H, King J, Gard CC, Abudu S.** Statistical and analytical comparison of multi-criteria decision-making techniques under fuzzy environment. *Operations Research Perspectives*. 2016; 3: 92-117. DOI:10.1016/j.orp.2016.11.001.

- [69] **Piyavsky SA.** Formulas for calculating universal coefficients when making multicriteria decisions [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9; 2(32): 282-298. DOI:10.18287/2223-9537-2019-9-2-282-298.
 - [70] **Martinez DL, Acosta JS.** Review of modeling preferences for decision models. *European Scientific Journal*. 2015; 11: 1-18.
 - [71] **Khadpe P. et al.** DISCERN: Designing Decision Support Interfaces to Investigate the Complexities of Workplace Social Decision-Making With Line Managers. arXiv preprint arXiv:2402.19318. 2024. DOI:10.1145/3613904.3642685.
 - [72] **Spiridonov SB, Bulatova IG, Postnikov VM.** Analysis of approaches to the selection of weight coefficients of criteria using the method of paired comparison of criteria [In Russian]. *Internet journal "SCIENCE"*. 2017; 9; 6: 1-24.
 - [73] **Postnikov VM, Spiridonov SB.** Methods for selecting weight coefficients of local criteria [In Russian]. *Science and education: scientific publication of MSTU. N.E. Bauman*. 2015; 6: 267-287. DOI:10.7463/0615.0780334.
 - [74] **Anokhin AM, Glotov VA, Pavelev VV, Cherkashin AM.** Methods for determining the importance coefficients of criteria [In Russian]. *Automation and telemechanics*. 1997; 8: 3-35.
 - [75] **Cinelli M, Kadziński M, Gonzalez M, Slowiński R.** How to Support the Application of Multiple Criteria Decision Analysis? Let Us Start with a Comprehensive Taxonomy. *Omega*. 2020; 96: 1-49. DOI:10.1016/j.omega.2020.102261.
 - [76] **Gebre SL, Catrysse D, Alemayehu E, Orshoven Van J.** Multi-criteria decision making methods to address rural land allocation problems: A systematic review. *International Soil and Water Conservation Research*. 2021; 9: 490-501. DOI:10.1016/j.iswcr.2021.04.005.
 - [77] **Mikoni SV.** System analysis of multicriteria optimization methods on a finite set of alternatives [In Russian]. *Computer science and automation*. 2015; 41: 180-199. DOI:10.15622/sp.41.10.
 - [78] **Bogdanova PA, Sakharov DM, Vasilyeva TV.** Review of multicriteria optimization methods in decision-making problems [In Russian]. *Innovative aspects of the development of science and technology*. 2021; 6: 153-157.
-

About the author

Vasily Borisovich Chechnev (b. 1999) graduated from the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman in 2023 with a degree in "Organization and management of knowledge-intensive industries". Postgraduate student at the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, in the «Cognitive modeling» specialty. He is a co-author of 3 scientific articles in the field of information systems. Author ID (RSCI): 1215414. gegrev@yandex.ru.

Received May 28, 2024. Revised September 22, 2024. Accepted October 30, 2024.
