



Система выбора и ранжирования альтернатив СВИРЬ-М: теоретические основы и практика применения

© 2024, С.В. Микони ✉, Б.В. Соколов, Д.П. Бураков

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (СПб ФИЦ РАН),
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН),
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Рассматриваются системы верхнего уровня принятия решений – выбора вариантов на конечном множестве альтернатив, – названные системами многомерного оценивания объектов. Приводятся примеры таких систем. На основе невозможности установления в общем случае полного и строгого порядка на конечном множестве альтернатив логическими методами даётся теоретическое обоснование универсальности системы, включающей логические и вычислительные методы многомерного оценивания объектов. Приводятся аксиомы, положенные в основу разработки логических и вычислительных моделей многомерного оценивания объектов. На основе принципов системного анализа, применяемых для выбора сущностей по многим показателям на конечном множестве альтернатив, устанавливаются связи между методами многомерного упорядочения и классификации объектов, а также связи внутри групп этих методов. Такие связи воплощены в дереве задач, решаемых в новой редакции системы выбора и ранжирования СВИРЬ-М. Излагаются принципы, положенные в основу разработки этой системы, которая состоит из девяти программ, настраиваемых на требуемую задачу. В интерфейсе настройки на решаемую задачу моделируется дерево задач многомерного оценивания объектов. Исходными данными для СВИРЬ-М является конечное множество объектов, характеризуемое конечной совокупностью показателей и требований к ним. Подготовка исходных данных включает: групповую подготовку, выполняемую в табличном процессоре *MS Excel*, и индивидуальную, выполняемую средствами системы. Создаваемая в системе модель многомерного оценивания объектов может применяться для решения различных задач. Приводятся примеры применения системы для решения практических задач.

Ключевые слова: показатель, предпочтение, критерий, целевое значение, оценочная функция, достижение цели, отклонение от цели, многомерное оценивание, инструментальная система.

Цитирование: Микони С.В., Соколов Б.В., Бураков Д.П. Система выбора и ранжирования альтернатив СВИРЬ-М: теоретические основы и практика применения // Онтология проектирования. 2024. Т.14, №3(53). С.440-456. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-3-440-456.

Финансирование: исследования проводились в рамках бюджетной темы FFZF–2022–0004.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Работа посвящается 90-летнему юбилею научного руководителя СПИИРАН, члена-корреспондента РАН Рафаэля Мидхатовича Юсупова

Введение

Развитие любой предметной области (ПрО) идёт в направлении увеличения количества решаемых задач и разрабатываемых для их решения методов и средств. Этому соответствует и научное направление «Выбор на конечном множестве альтернатив» (выбор на КМА), являющееся одним из разделов теории принятия решений. Для решения задач выбора на КМА в ранних работах были сформулированы два канонических подхода – логический и вычислительный. Логический подход базировался на сопоставлении альтернатив по экспертным оценкам характеризующих их показателей [1, 2]. В основу вычислительного подхода полу-

жен принцип вычисления оценок значений показателей, отражающих предпочтения лица, принимающего решения (ЛПР), с последующим обобщением полученных частных оценок. Основные теоретические результаты в этом подходе в виде теорий ценности и полезности получены во второй половине XX-го века [3-5].

В основу этих теорий положены функции ценности и полезности, отражающие предпочтения ЛПР на шкале показателя. Для создания функций ценности применяются экспертные оценки, отражающие ценность значений показателя на различных отрезках его шкалы [3]. В отличие от функции ценности функция полезности моделирует риски ЛПР при игре в лотерею [4, 5]. Сходство между этими функциями заключается в их нелинейности и монотонности.

В работе [6] достижению максимальной полезности была противопоставлена парадигма достижения поставленной цели (*Reference Objective*), трактуемой точкой в n -мерном пространстве. Утверждалось, что любая точка в целевом пространстве, независимо от того, достижима она или нет, идеальна или нет, может использоваться вместо весовых коэффициентов для получения функций, которые имеют минимумы только в точках Парето. В качестве таковой функции был предложен минимаксный критерий частных отклонений от поставленной цели (точки в пространстве).

На примере отношения доминирования на КМА показано, что логический подход не гарантирует получение полного и строгого порядка на множестве объектов. Он должен дополняться взвешенными оценками, что требует применения вычислительных процедур [7]. В свою очередь, вычислительный подход должен завершаться логическими процедурами со-поставления количественных оценок объектов для установления отношения порядка.

Практические методы включают в разных сочетаниях логические и вычислительные процедуры для достижения полного порядка объектов. Такое сочетание характерно для метода аналитической иерархии (МАИ) Т. Саати [1]. Различие между этими группами методов заключается в том, какой вид процедур положен в основу метода.

По отношению к размерности задач выбора, решаемых логическими и вычислительными методами, в работе [8] предложено делить их на нерейтинговые и рейтинговые методы. К нерейтинговым отнесены логические методы, имеющие ограничения на размерность моделей выбора, а к рейтинговым – вычислительные методы, не имеющие таких ограничений. ЛПР не только предлагалась исходная информация для принятия решений, но и рекомендовались лучшие варианты решения. Размерность решаемых задач побудила специалистов заняться их автоматизацией. С ростом числа методов выбора на КМА множилось число автоматизирующих их систем. Обратной тенденцией является объединение различных методов в рамках одной системы автоматизации. В частности, разработка системы выбора и ранжирования альтернатив (СВИРЬ) была предпринята в Петербургском государственном университете путей сообщения [9]. В настоящее время выявилась потребность в дальнейшем развитии системы. Идеи, положенные в основу обновлённой системы, и практика её применения излагаются в настоящей статье.

1 Краткий обзор систем поддержки принятия решений (СППР)

Информационные системы, рекомендующие лучшие варианты решения, получили название информационно-советующих систем [10] или СППР [11]. Решению задачи выбора предшествуют подготовительные этапы:

- 1) формулирование проблемы;
- 2) постановка цели и формулирование задачи принятия решения;
- 3) сбор информации, требуемой для принятия решения;
- 4) проектирование модели принятия решения;

Выбор предпочтительного варианта завершается оцениванием качества решения и анализом его последствий.

Система, реализующая все перечисленные этапы, относится к классу инструментальных систем (ИС) [12]. Отличительными свойствами ИС являются: проблемно/предметная ориентация, универсальные возможности, независимые от решаемой задачи, обеспечение технологической основы для прикладных систем, комфортная среда разработки, независимость от вычислительной платформы.

Применительно к реализации вычислительных методов многомерного оценивания (ММО) на КМА универсальной можно считать среду табличного процессора *MS Excel* (ТП). В работе [13] показаны примеры использования ТП для решения задач выбора на КМА.

Разработан ряд систем, объединяющих все этапы принятия решения, к которым относятся, например: СППР [14], система «ОЦЕНКА и ВЫБОР» [15] и СВИРЬ [9].

В системе «ОЦЕНКА и ВЫБОР» объединены методы доминантного анализа, многокритериальной оптимизации и оптимизации по ценности. В ней процедура человека-машинного агрегирования информации представляет собой последовательность следующих этапов:

- 1) фильтрация анализируемых объектов по области допустимых значений показателей;
- 2) доминантный анализ Парето с целью исключения доминируемых и выделения доминирующих объектов;
- 3) грубое ранжирование на основе метода Фишберна [5] (с использованием абсолютных оценок);
- 4) определение относительной приоритетности объектов МАИ;
- 5) представление результатов на плоскости типа «выгоды – издержки» и их предъявление ЛПР;
- 6) итоговый выбор наилучшего решения, либо итоговое определение относительных приоритетов объектов.

В системе СВИРЬ объединены не только логические и вычислительные методы упорядочения на КМА, но и методы аксиоматической классификации на конечном множестве классов, а также матричные методы сопоставления сущностей. Этим достигнута возможность совмещать методы упорядочения и классификации в рамках решения одной задачи.

Большинство СППР, реализующих методы выбора на КМА, отличаются методами выбора и ПрО. Разнообразие ПрО и решаемых в них задач выбора влечёт большое количество публикаций, в которых уточняются и развиваются разработанные ранее методы. Для их модификации привлекаются средства когнитивной графики, экспертные методы, теория чисел и новые информационные технологии, такие, как эволюционное моделирование и машинное обучение. Неопределенность предпочтений ЛПР моделируется с привлечением средств многозначной (нечёткой или вероятностной) логики.

Из логических методов наибольшую известность и развитие получил МАИ [1, 16-18]. В работе [16] предложено применять нечёткую логику при формировании предпочтений в матрице парных сравнений. В работе [17] предложено заменить средневзвешенную аддитивную обобщающую функцию в МАИ мультиплекативной функцией, значения которой учитывают близость частных оценок показателей. В работе [18] для вычисления объективных весов критериев в МАИ предложено использовать метод *TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity Ideal Solution)*. Неопределенность суждений эксперта моделируется нечёткими числами Пифагора.

Метод многомерного упорядочения (*Simple Multi-Attribute Rating Technique – SMART*) получил развитие в работах [19-24]. В работе [19] описана программа *InDM2* для решения динамических многоцелевых задач оптимизации с использованием эволюционных алгоритмов, которая позволяет учитывать предпочтения пользователя при поиске решений. Пользователь может выражать свои предпочтения с помощью одной или нескольких опорных точек, которые определяют желаемую область. Программа *InDM2* оснащена методами для графического отображения различных приближений области интереса, полученных в процессе оптимизации. Это позволяет пользователю проверять и изменять желаемую область интереса в соответствии с полученной информацией.

В работе [20] предложено использовать рассуждения экспертов при анализе результатов метода многокритериального группового принятия решений. В работе [21] предложен способ, который помогает определить возможное согласие в групповом (многоакторном) многокритериальном анализе (*The Multi-Actor Multi-Criteria Analysis – MAMCA*). Для этого исполь-

зуется модель анализа чувствительности веса, основанная на обратной смешанной линейной оптимизации. Этот подход позволяет найти минимальное изменение веса каждым участником, чтобы улучшить положение данной альтернативы в индивидуальном рейтинге.

В статье [22] представлен анализ доступных объективных методов для определения весов критериев в СППР. Показано, что каждый метод должен обеспечивать уникальные веса с учётом входных данных. Это подтверждает важность правильного выбора метода для конкретной модели поддержки принятия решений с несколькими критериями.

В работах [23-27] последовательно развивалась идея упрощения процедуры нахождения относительной важности частных критериев. Нахождение численных оценок важности предложено выполнять путём деления критериев по важности на группы. Каждая группа нумеруется по важности. Для нахождения значений коэффициентов важности по номеру группы разработаны универсальные таблицы для двух типов свёрток критериев (средневзвешенной – аддитивной и гарантирующей Гермейера).

Общей чертой рассмотренных методов является стремление повысить качество индивидуальных и групповых экспертных оценок с целью более достоверного выбора лучшей альтернативы. Реализация в разных средах моделирования затрудняет сопоставление рассмотренных методов. Поэтому актуальной остаётся задача реализации различных методов в единой среде моделирования.

В системе СВИРЬ имеется возможность программной настройки условий выбора и реализации известных методов на основе ММО объектов для выбора наиболее подходящего метода решения поставленной задачи. К новой редакции системы СВИРЬ-М предъявлены следующие требования:

- системность в решении задач (оценивание модели ПрО разными методами);
- расширяемость состава задач;
- универсальность по отношению к методам ММО альтернатив;
- применимость к любой ПрО
- технологичность процесса оценивания;
- обоснованность результатов за счёт применения средств анализа информации на этапах решения задачи;
- модульно-компонентная архитектура.

2 Теоретические основы обобщения методов ММО объектов

Принципиальным различием логических и вычислительных методов выбора на КМА является использование ими операций логической (булевой или нечёткой) алгебры и алгебры вещественных чисел соответственно. Поскольку логические и алгебраические операции несовместимы, они могут реализовываться только последовательно. В этом плане любая модель выбора неоднородна относительно выполняемых операций. Её относят к логической или вычислительной модели по первичности применения соответствующих операций.

Возможность объединения логических моделей и методов в единую систему обуславливается общностью выполняемых ими операций по *сопоставлению* значений показателей. Теорией, объединяющей эти методы, является исчисление предикатов первого порядка.

Отношение предпочтения удовлетворяет двум аксиомам сопоставления объектов [4]:

1. Аксиома вариантов предпочтения

$$(A \succ B) \Leftrightarrow f(A) > f(B) \vee (B \succ A) \Leftrightarrow f(B) > f(A) \vee (A \equiv B) \Leftrightarrow f(A) = f(B).$$
2. Аксиома транзитивности превосходства

$$f(A) \succ f(B) \wedge f(B) \succ f(C) \Rightarrow f(A) \succ f(C).$$

Первая аксиома утверждает, что либо одна альтернатива *предпочтительнее* другой, либо они *равноценны*, и эти отношения могут быть определены по характеризующему их свойству f . Вторая аксиома устанавливает транзитивность отношений превосходства относительно

свойства f . Согласно первой аксиоме отношение предпочтения $R_{\text{пр}}$ на множестве X следует рассматривать как объединение отношений *превосходства* R_{\succ} и *соответствия* $R_{=}$:

$$R_{\text{пр}} = R_{\succ} \cup R_{=}$$

В явном виде отношение предпочтения $R_{\text{пр}}$ на множестве X выражается через *порядок* мест, присвоенный элементам множества. Этот порядок устанавливается решением задачи ранжирования ациклического направленного (ориентированного) графа (орграфа), выраждающего бинарное отношение $R_{\text{пр}}$. Уровни такого графа являются непустыми множествами, образующими разбиение вершин орграфа в направлении от истоков к стокам. Равенство числа уровней числу вершин орграфа (каждый уровень включает одну вершину) означает *строгий порядок* на конечном множестве X .

В отличие от прямого упорядочения альтернатив, основанного на анализе истинности предикатов, многоцелевая оптимизация выполняет косвенное упорядочение альтернатив на основе их численных оценок. Для получения и обобщения численных оценок применяются вычислительные процедуры. Возможность объединения вычислительных моделей и методов в единую систему регламентируется шестью исходными положениями (аксиомами) [28]:

- 1) шкалирования показателей (*требования к шкале*);
- 2) предпочтений на шкале показателя (*склонность и несклонность ЛПР к риску*);
- 3) отношения к цели (*достижения / отклонения*);
- 4) вида цели (*реальная / идеальная*);
- 5) общности цели (*сопоставимость с ресурсами объектов*);
- 6) согласованности частных оценок (*общая оценка как компромисс частных оценок*).

Следует отметить субъективизм, привносимый ЛПР при создании любой модели многоцелевой оптимизации. Он связан, прежде всего, с заданием границ шкал $[y_{j \text{ min}}, y_{j \text{ max}}]$ и выбором на них целевых значений c_j , $j = 1, n$. Целевое значение c_j , названное *реальной целью* из-за условия $y_{j \text{ min}} < c_j < y_{j \text{ max}}$, моделирует чувство меры человека. Оно означает отказ от экстремизма, соответствующего условию $c_j = y_{j \text{ min}}$ в задаче минимизации и $c_j = y_{j \text{ max}}$ – в задаче максимизации j -го показателя.

Введение реальной цели обусловило *двойственность* задачи оптимизации на шкале показателя. Взаимно дополнительными задачами по отношению к реальной цели являются максимизация достижения цели и минимизация отклонения от неё.

С другой стороны, введение реальной цели позволило связать многокритериальную оптимизацию с многомерной оптимизацией объектов по ценности. Эти виды оптимизации связывает униполярная шкала значений нормирующей функции критерия и функции ценности. Значение функции ценности для реальной цели задаётся экспертом. Оно тем ближе к единице, чем в большей степени удовлетворяет запросы ЛПР.

Применительно к теории полезности реальную цель c на шкале показателя можно рассматривать как точку отказа от лотереи [2]. В этой точке доход и потери ЛПР равны нулю. Потери ЛПР отражаются на отрицательной полуоси значений функции полезности. Таким образом, функция полезности, в отличие от функции ценности, является биполярной.

Реальной цели соответствуют особые точки функций ценности и полезности. В функции ценности это аргумент точки перегиба, за которой ЛПР теряет интерес к дальнейшей оптимизации (рисунок 1а). В функции полезности это значение показателя, для которого целесообразен *отказ* от участия в лотерее из-за возможности потерь (рисунок 1б).

Промежуточной функцией между нормирующей функцией критерия и нелинейными функциями ценности и полезности является кусочно-линейная функция с переломом в точке c , отражающая изменение интереса ЛПР к дальнейшей оптимизации значений показателя.

В задачах классификации аналогом реальной цели является норма, оформляемая как некий средний класс, например, среднее (приемлемое) качество в квалиметрии. Отклонения по

обе стороны от нормы моделируется требуемым числом классов, как минимум по одному в каждую из сторон [29].

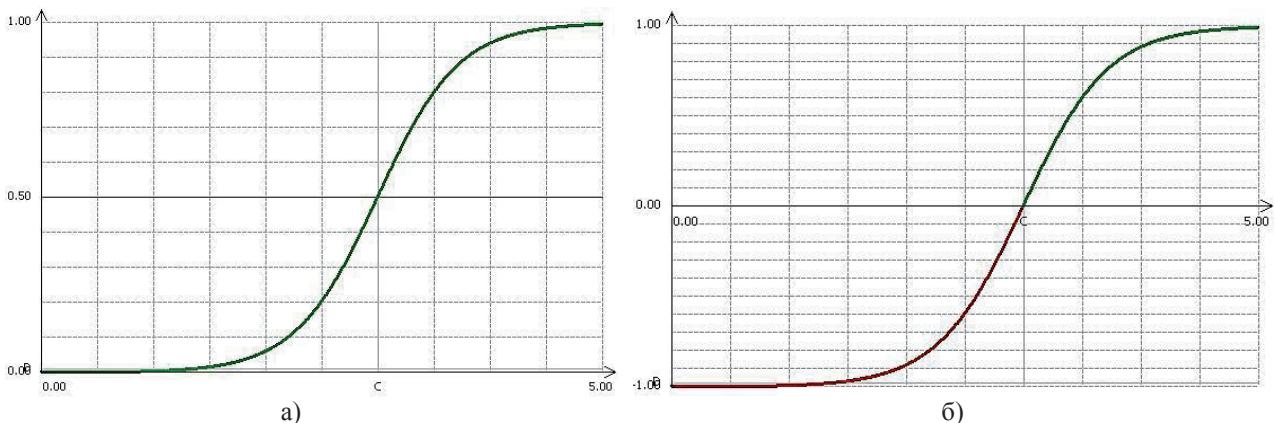


Рисунок 1 – Вид функций ценности а) и полезности б)

3 Системность моделей и методов ММО объектов

Свойство системности проявляется в наличии обоснованных связей между элементами системы. Различие между упорядочением и классификацией заключается в объекте выбора: альтернатива или класс, а сходство между ними при применении логических методов осуществляется через связь между предикатами превосходства и соответствия. Предикат соответствия значения j -го показателя интервалу $y_j \in [c_{j\text{ н}}, c_{j\text{ в}}]$ на его шкале представим как двустороннее превосходство: $\geq (y_j, c_{j\text{ н}}) \& \leq (y_j, c_{j\text{ в}})$. Интервальное ограничение представимо двумя полуинтервальными ограничениями. Эта связь позволяет задавать требования к показателям в задачах упорядочения и классификации объектов в рамках единой системы кодирования предикатов.

Таблица 1 - Правила кодирования требований к значениям показателей

Границы	П1	П2	П3	П4	П5	П6
МинГШ	0	0	0	0	0	0
МаксГШ	10	10	10	10	10	10
НГН	4	4	4			*
ВГН	5	4		5	*	
	[4, 5]	равно 4	≥ 4	≤ 5	$\rightarrow 10$	$\rightarrow 0$
Интервал	Интервал	Равно	Не менее	Не более	Max	Min

нижняя (НГН) и верхняя (ВГН) границы нормы на шкале показателя кодируются как частные случаи ограничения «Интервал» (2-й столбец таблицы).

Связь между логическими методами реализуется через *попарное сравнение* сущностей. Объекты сопоставляются либо по каждому показателю поочерёдно, как в МАИ, либо по всем показателям одновременно, как в доминантном анализе.

Введение реальной цели на шкале показателя породило различные виды связей между вычислительными методами. Приближение значения показателя к реальной цели моделирует принцип достижения цели, а удаление значения показателя в одну из сторон от реальной цели моделирует принцип отклонения. Это отражает принцип двойственности достижения и отклонения от цели. Введение реальной цели соответствует начальному шагу построения функции ценности по точкам, что позволяет связать линейно-кусочную функцию

В таблице 1 приведены примеры кодирования шести вариантов требований к значениям показателей (П1-П6) на основе ограничения «Интервал». Сокращения МинГШ и МаксГШ обозначают границы значений показателя. Две нижние строки таблицы представлены как

Все ограничения таблицы представлены как

(ОцФ) показателя с ограниченным значением с нелинейной функцией ценности, созданной по точкам. Отображение нормирующей функции критерия и функции ценности показателя на униполярную ось ординат позволяет объединить соответствующие методы в рамках решения общей задачи. Это означает возможность применения различных ОцФ для оценивания показателей объекта. В задачах упорядочения объектов они являются монотонными.

В системе СВИРЬ-М имеется библиотека типовых ОцФ, отражающих склонность / не склонность ЛПР к риску [30]. Эти свойства рассматривались с позиции теории полезности. Однако они применимы и к непрерывным функциям ценности. Разница между функциями ценности и полезности заключается в необходимости отрицательной полуоси ординат для последней, что позволяет отразить потери ЛПР на некотором отрезке шкалы показателя.

В отличие от задач упорядочения объектов с ключевым понятием «реальная цель» в задачах классификации ключевым является понятие «норма». В общем случае она представляется отрезком $[c_{j\text{ н}}, c_{j\text{ в}}]$ на шкале j -го показателя. Отклонения от нормы представляются классами в обе стороны от нормы. ОцФ класса называется функцией принадлежности (ФПр) классу. Для промежуточного класса она является немонотонной [29].

С точки зрения соответствия j -го показателя норме отклонения в любую сторону от нормы нежелательны. С точки зрения улучшения значений j -го показателя отклонение в одну из сторон от нормы может оказаться предпочтительным. Отклонения оптимизируемого показателя в предпочтительную сторону от нормы подчиняются правилам порядка, что моделируется применением предикатов «Не менее» и «Не более» и указывает на связь между задачами упорядочения и классификации объектов.

4 Задачи, решаемые СВИРЬ-М

Связность моделей и методов ММО объектов легла в основу дерева задач, решаемых в ИС СВИРЬ-М. Дерево задач делится на три ветви с именами «Отбор», «Порядок» и «Выбор» (рисунок 2). Отбор является вариантом классификации с одним допустимым классом. Он выделен из классификации (ветвь «Отбор») и поставлен первым в роли предварительного отбора объектов, подлежащих как упорядочению, так и классификации. В задачах отбора отбираются либо объекты, удовлетворяющие некоторой совокупности ограничений на значения показателей (задача 1), либо недоминируемые объекты (задача 2).

Задачи упорядочения по способу сопоставления объектов – сравнительного и прямого – разделены на две подгруппы. Задачи 3-8 первой подгруппы, согласно классификации [8] названные нерейтинговыми методами, основаны на попарном сопоставлении объектов по многим показателям. Индивидуальное сопоставление сущностей по каждому показателю реализуется матрицей парных сравнений (МПС) и её расширением на иерархию показателей – МАИ. При формировании МПС кроме кратности предпочтений, применяемой в МАИ, в системе СВИРЬ-М используются ещё предпочтения трёх типов: фактов предпочтений (качественные оценки 0 и 1), доли единицы при групповой экспертизе и «Выигрыши-Потери» при анализе турнирной таблицы.

На МПС решается распределительная задача (распределение долей целого). Вычисляемый на основе сформированной матрицы вектор весов может отражать как результаты сопоставления каждой сущности с остальными сущностями, так и соотношение сил сущностей по результатам их взаимодействия в любых сочетаниях. Взаимодействие сущностей в любых сочетаниях реализуется нахождением собственного вектора, соответствующего максимальному собственному числу неотрицательной невырожденной неприводимой матрицы [31]. Нормированные компоненты собственного вектора отражают взаимную важность оцениваемых сущностей.

Качество МПС оценивается специальными показателями. Непротиворечивость предпочтений эксперта выражается коэффициентом согласованности, а степень противоборства в матрице «Выигрыши-Потери» – показателем выраженности предпочтений. Коэффициент согласованности характеризует результат работы эксперта, а выраженность предпочтений – соотношение отношений превосходства (побед) и равноценности (ничьих) при использовании предпочтений «Выигрыши-Потери».

Векторное сопоставление объектов по всем показателям реализует отношение Парето-доминирования (задача 5) и его модификации – лексиминной оптимизации (задача 7). Порядок следования значений показателя при лексиминной оптимизации индивидуален для каждого объекта, что соответствует принципу взаимозаменяемости критериев. Получение лексикографического порядка объектов (задача 6) основано на привлечении информации о важности критериев по такому же принципу, который используется при создании библиотечных каталогов.

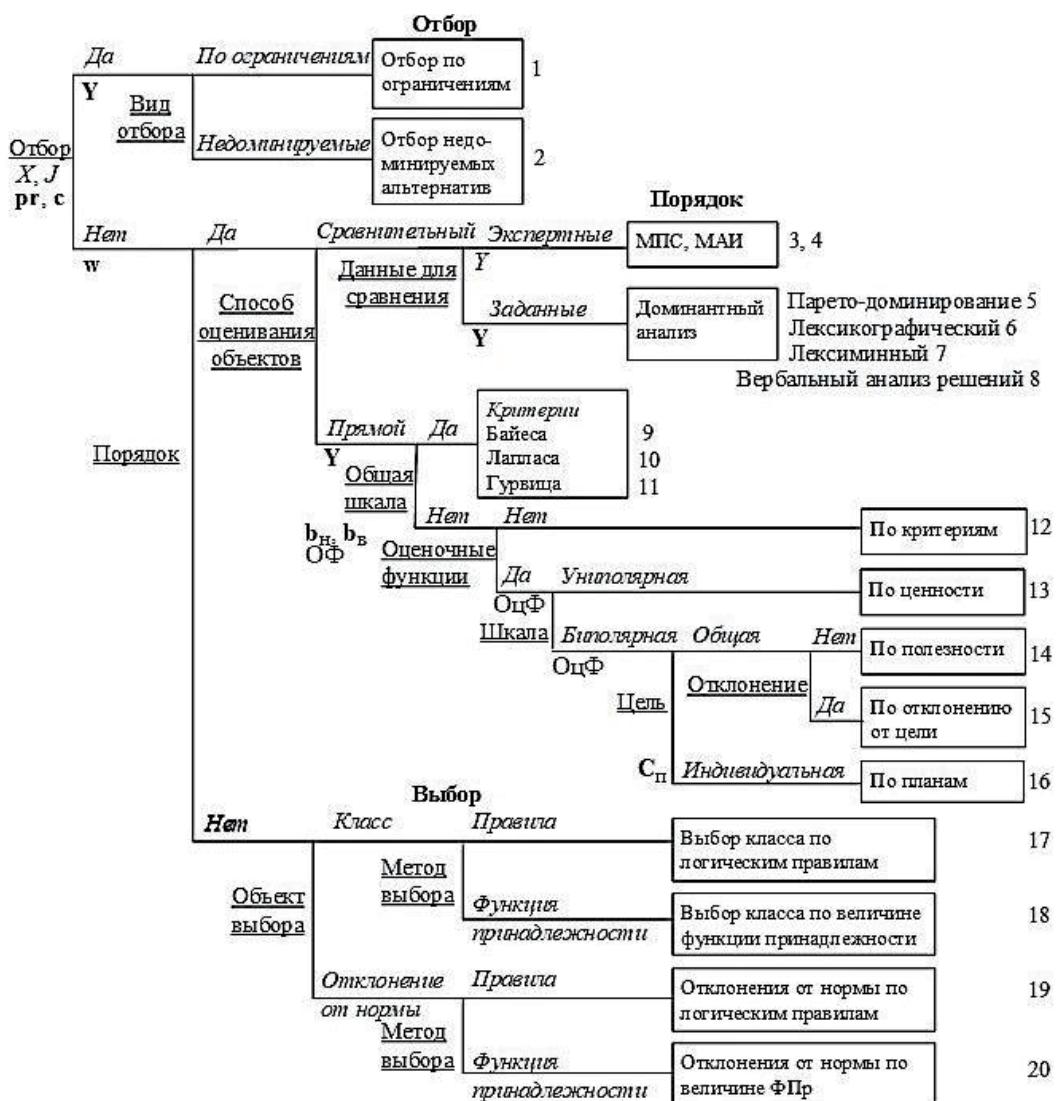


Рисунок 2 – Дерево задач, решаемых в системе СВИРЬ-М

Методы доминантного анализа оперируют векторными оценками объектов. На этой основе они называются также методами векторной оптимизации. Из задач доминантного ана-

лиза наиболее востребована задача Парето-доминирования 5, реализующая минимальный перечень условий [7]:

- каждый показатель измеряется в своей шкале;
- шкала показателя позволяет установить предпочтение между объектами по данному критерию;
- все показатели имеют одинаковую важность.

Выделение недоминируемых объектов позволяет существенно уменьшить число претендентов на лучший объект.

В основу верbalного анализа решений (задача 8) положен принцип сопоставления объектов по качественным значениям показателей с построением единой шкалы изменения качества на множестве показателей [2]. На основе единой шкалы изменения качества с использованием алгоритма последовательного выделения недоминируемых объектов устанавливается отношение частичного порядка между ними.

Задачи 9-11 выбора хода по критериям Байеса, Лапласа, Гурвица решаются в теории статистических игр и характеризуются одинаковой шкалой для всех показателей, измеряющих выгоду i -го хода при j -м состоянии в единицах полезности (например, в деньгах).

Задачи 12-16 упорядочения объектов различаются применяемыми в них ОЦФ. В задаче 12 многокритериальной оптимизации в качестве ОЦФ используются нормирующие функции показателей. Они строятся автоматически нормированием значения показателя диапазоном его шкалы с учётом направленности предпочтения ЛПР.

В задачах 13 и 14 оптимизации объектов по ценности и полезности соответствующие ОЦФ показателей строятся экспертом. В задаче 13 оптимизации объектов по ценности применяются униполярные ОЦФ, а в задаче 14 оптимизации по полезности – биполярные ОЦФ. При использовании библиотеки ОЦФ форма выбранной ОЦФ настраивается параметрами функции.

Учитывая одинаковую полярность нормирующей функции критерия и функции ценности, имеется возможность выполнять многомерную оптимизацию по критериям и функциям ценности в рамках общей задачи.

В задаче 15 упорядочения объектов по отклонению от цели в качестве ОЦФ используются биполярные кусочно-линейные функции. Одна полуось функции фиксирует штраф за не достижение целевого значения показателя, а другая полуось – поощрение за его превышение.

В задаче 16 оптимизации объектов по индивидуальным планам линейные плановые функции строятся относительно планового значения показателя.

Задачи 17-20 классификации объектов различаются назначением (выбором класса без учёта и с учётом отклонений от нормы) и способами их решения – логическим или вычислительным. Выбор класса по логическим правилам (задача 17) выполняется нахождением класса, отвечающего совокупности заданных ограничений на значения показателей. Выбор класса по величине ФПр (задача 18) выполняется нахождением класса с наибольшей мерой принадлежности по всем показателям. Задача 19 отклонения от нормы по логическим правилам определяет наличие и направленность отклонения значения показателя за границы нормы. Задача 20 отклонения от нормы по ФПр определяет направление и величину отклонения значения показателя за пределы нижней или верхней границы интервальной нормы.

5 Характеристика СВИРЬ-М

5.1 Этапы и принципы работы системы

В основу работы системы положены следующие этапы и принципы.

1. Первый этап подготовки исходных данных и требований к показателям выполняется в ТП. Для задач небольшой размерности он может выполняться средствами самой системы.

2. Второй этап подготовки исходных данных и уточнения требований к показателям в рамках создания модели ММО выполняется средствами самой системы.
3. Настройка системы на решаемую задачу выполняется через контекстно-управляемый интерфейс, моделирующий дерево задач ММО объектов.
4. Редактирование иерархической модели ПрО выполняется путём перемещения показателей объекта между таблицами.
5. Сигналом завершения создания модели ПрО и настройки её на требуемую задачу является активация кнопки «Решить задачу».
6. Результаты решения задачи выводятся на экран в табличной и графической форме.
7. Исходные данные и результаты решения задачи анализируются с применением средств статистического и логического анализа и когнитивной графики.
8. Для дальнейшего использования результаты решения задачи пересыпаются в ТП.
9. Создаваемая в системе модель ММО объектов может применяться для решения различных задач. Вместе с решаемыми задачами она сохраняется в именуемом пакете ПрО.
10. Допускается работа с несколькими пакетами задач.

5.2 Исходные данные

Для выполнения ММО объекта необходимо знать:

- характеристику оцениваемого объекта;
- требования к показателям, характеризующим объект.

Характеристика оцениваемого объекта включает списки:

- оцениваемых объектов;
- показателей, отражающих свойства объекта.

Списки оцениваемых объектов и показателей объединяются в таблицу «Объекты/Показатели» размерностью $N \times n$, где N – число объектов, n – число показателей.

Показатели, характеризующие объект, делятся на первичные и составные. Первичные показатели могут представляться в символьном и численном виде. Символьные показатели подлежат кодированию. Численные показатели могут служить аргументами для вычисления вторичных (вычисляемых) показателей. Составные показатели отражают показатели, объединённые по назначению в группы.

5.3 Создание модели исходных данных

Моделью исходных данных является таблица «Объекты / Показатели». Она может создаваться средствами системы, либо вводиться из ТП.

Табличные данные подвергаются содержательному, логическому и корреляционному анализу. Содержательный анализ альтернатив на осуществимость предполагает проверку на доступность альтернативы в текущий период времени. Логический анализ альтернатив на противоречивость заключается в проверке их соответствия поставленной цели. Корреляционный анализ показывает степень взаимозависимостей показателей. Существенно зависимые показатели исключаются из оценивания.

В задачах упорядочения объектов определяется выпуклая оболочка множества этих объектов в пространстве показателей [32]. Любая точка выпуклой оболочки является кандидатом на лучший вариант в задачах оптимизации. При группировании показателей по назначению выполняется их структурирование путём переноса из исходной таблицы в дочерние таблицы иерархии. Полученная после указанных операций модель исходных данных применима для решения любых задач ММО объектов.

5.4 Создание модели ММО объектов

Создание модели ММО объектов имеет целью настройку модели исходных данных на решаемую задачу, которая заключается в последовательном уточнении требований к модели

ММО, следуя по дереву задач. Например, выбор задачи «Многоцелевая оптимизация» в окне «Настройка задачи» СВИРЬ-М выполняется в следующей последовательности:

- 1) В меню «Основная задача» выбирается опция «Упорядочение»;
- 2) В меню «Метод решения» выбирается опция «Многоцелевая оптимизация»;
- 3) В меню «Способ оценивания» выбирается опция «Прямой» способ (в отличие от сравнительного способа в матрицах парных сравнений);
- 4) При условии различных шкал показателей, используемых в качестве критерииев, и/или востребованности ОФ показателей задаётся требование «Использовать ОцФ»;
- 5) В меню «Область значений ОцФ» при выполнении многокритериальной оптимизации и оптимизации по ценности выбирается опция «Униполярная» шкала функции;
- 6) В меню «Обобщающая функция» выбирается любая типовая либо произвольная функция.

При выборе задачи, решаемой на основе вычисляемых оценок показателей, формируются требования к показателям такие, как границы шкалы, важность (вес), реальная цель или норма. Они задаются средствами системы, либо могут вводиться из ТП. Многообразие ОцФ показателей затрудняет их задание в ТП. Поэтому за базовый вариант принята настройка ОцФ и их параметров средствами системы. Завершающим этапом создания вычислительной модели ММО является выбор обобщающей функции, реализующей компромисс между противоречивыми оценками показателей. Для выбора и настройки ОцФ в СВИРЬ-М используется библиотека типовых ОцФ.

5.5 Вывод и анализ результатов решения задачи

Результаты решения задач ММО объектов выводятся в табличной форме. В задачах упорядочения выводятся ранги оцениваемых объектов, а в задачах классификации – классы, которым объекты принадлежат в наибольшей степени. В задачах с вычисляемыми оценками объектов помимо рангов и классов выводятся частные и общие оценки объектов, а также диапазоны возможных рангов каждого объекта, получаемых при варьировании предпочтений ЛПР. В задачах классификации таблица результатов дополняется таблицей принадлежности классам.

Таблицы оценок окрашиваются цветами, разделяющими высокие, средние и низкие оценки. Цветовая гамма облегчает анализ оценок в таблице. Анализ результатов облегчается применением когнитивной графики с раскрашенными графиками [33]. В задачах доминантного анализа таковым является граф доминирования с показателями качества порядка: доминирования, несравнимости, неразличимости и строгости порядка вершин многоуровневого графа.

В задачах с вычисляемыми оценками выводится график оценок составных показателей и объектов. В задачах классификации выводится таблица принадлежности каждого объекта к заданным классам, как по составным, так и по первичным показателям. Круговые и линейные диаграммы вкладов оценок показателей в общую оценку помогают оценить меру её зависимости от каждого показателя с учётом его веса.

Важную роль в анализе результатов оценивания играет сопоставление результатов, получаемых по разным показателям, и при изменении параметров модели ММО [34].

6 Примеры применения СВИРЬ-М

6.1 Определение рейтинга объектов

По заказу городского управления инвентаризации и оценки недвижимого и движимого имущества Санкт-Петербурга проведён эксперимент на предмет соотношения рыночной стоимости и стоимости одного квадратного метра городских квартир [34]. Для решения этой задачи сопоставлены рейтинги выборки из 50-ти однокомнатных квартир, определённые по

этим показателям. Сделан вывод о существенном влиянии состава оцениваемых показателей на определение рейтинга квартир по рыночной стоимости и стоимости одного квадратного метра.

6.2 Оперативное управление беспилотным летательным аппаратом (БПЛА)

В [35] приведён пример управления БПЛА, характеризуемого иерархической системой показателей. На основании границ норм строится матрица одиночных отклонений показателей от нормы. Текущее состояние объекта сравнивается с номинальным. В случае их несовпадения формируется вектор отклонения от нормы. Осуществляется поиск строки матрицы отклонений, совпадающей с вектором отклонения. Найденная строка инициирует действие, парирующее отклонение. Если вектор фиксирует более одного отклонения, выбирается строка матрицы с наибольшим приоритетом показателя, имеющего отклонение от нормы, и инициируется действие, соответствующее этой строке. К преимуществам табличной модели управления БПЛА относятся удобство и простота создания и изменения модели и её отладки, что важно в полевых условиях применения БПЛА.

Заключение

Сходство и различия, выявленные между методами оптимизации и классификации по многим показателям, позволило объединить их в рамках одной программной системы. Это даёт возможность решать задачи выбора на КМА различными методами и сопоставлять полученные результаты.

СВИРЬ-М представляет собой универсальный инструмент для создания моделей и реализации как логических, так и вычислительных методов ММО объектов в различных ПрО. Технологичность системы обеспечивает групповой ввод данных и настроек показателей объектов, совместное хранение модели и решаемых на ней задач, быстрый переход от одной задачи к другой, оперативное реструктурирование показателей, работу с несколькими ПрО. Достоверность результатов обеспечивается применением логического и статистического анализа, средств когнитивной графики. Архитектура системы рассчитана на встраивание программных модулей во внешние системы управления. Приведены примеры применения системы для решения практических задач, подтверждающие универсальный характер СВИРЬ-М.

Отмеченные свойства системы делают её удобной средой моделирования различных вариантов выбора на КМА и обеспечивают широкий спектр применения в исследованиях, решении практических задач и при обучении студентов [36].

Список источников

- [1] *Saaty T.L.* The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation // New York, McGraw-Hill. 1980.
- [2] *Ларичев О.И.* Вербальный анализ решений. М.: Наука, 2006, 181 с.
- [3] *Keeney R.L., Raiffa H.* Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. New York, Wiley. 1976. 569 р.
- [4] *Нейман Д., Моргенштерн О.* Теория игр и экономическое поведение. Пер. с англ. Н.Н. Воробьева. М.: Наука, 1970. 708 с.
- [5] *Фишберн П.С.* Теория полезности для принятия решений / Пер. с англ. В.Н. Воробьевой, А.Я. Кируты; Под ред. Н.Н. Воробьева. М.: Наука, 1978. 352 с.
- [6] *Wierzbicki A. P.* The Use of Reference Objectives in Multiobjective Optimization. In: G. Fandel and T. Gal, Eds., Multiple Criteria Decision Making Theory and Applications, Springer-Verlag, Berlin, 1980. P.468-486.

- [7] **Подиновский В.В.** Идеи и методы теории важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. М.: Наука, 2019. 103 с.
- [8] **Velasquez M., Hester P.T.** An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods // International Journal of Operations Research. 2013. Vol.10, No.2. P.56-66.
- [9] **Микони С.В.** Система выбора и ранжирования «СВИРЬ» // Труды международного конгресса «Искусственный интеллект в XXI веке». Дивноморское 3–8.09.2001. М.: Физматгиз, 2001. Том 1. С.500-507.
- [10] **Избачков С.Ю., Петров В.Н.** Информационные системы. СПб.: Питер, 2008. 655 с.
- [11] **Sprague R.** A Framework for the Development of Decision Support Systems. MIS Quarterly. 1980. Vol.4, No.4, P.1–25. DOI: 10.2307/248957.
- [12] **Ипамова Э.Р., Ипамов Ю.В.** Методологии и технологии системного проектирования информационных систем. 2-е изд., стер. М.: Флинта, 2016. 257 с.
- [13] **Курицкий Б.Я.** Поиск оптимальных решений средствами Excel 7.0. СПб.: BHV, 1997. 384 с.
- [14] **Jimenez A., Rios-Insua S., Mateos A.** Decision support system for multiattribute utility evaluation based on imprecise assignments // Decision Support Systems 36. 2003. P.65- 79. DOI: 10.1016/s0167-9236(02)00137-9.
- [15] Информационно-аналитическая система "ОЦЕНКА и ВЫБОР" // СОФТЕЛЬ: Сто компьютерных программ для бизнеса (каталог 1997-98). М.: "Хамтек Паблишер". 1997. С.156-165.
- [16] **Krejčí J.** Pairwise Comparison Matrices and their Fuzzy Extension: Multi-criteria Decision Making with a New Fuzzy Approach, in Series Studies in Fuzziness and Soft Computing, 366, Springer, 2018. 273 p. DOI: 10.1007/978-3-319-77715-3.
- [17] **Krejčí J., Stoklasa J.** Aggregation in the Analytic Hierarchy Process: Why weighted geometric mean should be used instead of weighted arithmetic mean, Expert Systems with Applications 114: 97-106, 2018. DOI: 10.1016/j.eswa.2018.06.060.
- [18] **Sarkar B., Biswas A.** Pythagorean fuzzy AHP-TOPSIS integrated approach for transportation management through a new distance measure. Soft Computing. 2021 Mar; 25(5): 4073-89. DOI: 10.1007/s00500-020-05433-2.
- [19] **Nebro A.J., Ruiz A.B., Barba-González C., García-Nieto J.M., Luque M., Aldana-Montes J.F.**, InDM2: Interactive Dynamic Multi-Objective Decision Making using evolutionary algorithms, Swarm and Evolutionary Computation, 40:184-195, 2018. DOI: 10.1016/j.swevo.2018.02.004.
- [20] **Morente-Molinera JA, Kou G, Samuylov K, Cabrerizo FJ, Herrera-Viedma E.** Using argumentation in expert's debate to analyze multi-criteria group decision making method results. Information Sciences. 2021 Sep 1;573:433-52. DOI: 10.1016/j.ins.2021.05.086.
- [21] **Huang H, De Smet Y, Macharis C, Doan NA.** Collaborative decision-making in sustainable mobility: identifying possible consensuses in the multi-actor multi-criteria analysis based on inverse mixed-integer linear optimization. International Journal of Sustainable Development & World Ecology. 2021 Jan 2;28(1): 64-74. DOI: 10.1080/13504509.2020.1795005.
- [22] **Paradowski B, Shekhovtsov A, Bączkiewicz A, Kizielewicz B, Salabun W.** Similarity Analysis of Methods for Objective Determination of Weights in Multi-Criteria Decision Support Systems. Symmetry. 2021 Oct;13(10):1874. DOI: 10.3390/sym13101874.
- [23] **Пиявский С.А.** Два новых понятия верхнего уровня в онтологии многокритериальной оптимизации // Онтология проектирования. 2013. №1. С.65-85.
- [24] **Пиявский С.А.** Прогрессивность многокритериальных альтернатив // Онтология проектирования. 2013. №4. С.53-59.
- [25] **Пиявский С.А.** Оптимизация обобщённых многоцелевых систем // Онтология проектирования. 2015. Т.5. №4(18). С.411-428. DOI: 10.18287/2223-9537-2015-5-4-411-428.
- [26] **Пиявский С.А.** Как «нумеризовать» понятие «важнее» // Онтология проектирования. 2016. Т.6, №4(22). С.414-435. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-4-414-435.
- [27] **Пиявский С.А.** Метод универсальных коэффициентов при принятии многокритериальных решений // Онтология проектирования. 2018. Т.8, №3(29). С.449-468. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-449-468.
- [28] **Микони С.В.** Аксиоматика методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 44. DOI: 10.15622/sp.44.12. С.198-214.
- [29] **Микони С.В.** Моделирование отклонений показателей качества объекта от нормы // Онтология проектирования. 2024. Т.14, №2(52). DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180. С.167-180.
- [30] **Микони С.В., Бураков Д.П.** Обоснование и классификация оценочных функций, применяемых в рейтинговых методах многокритериального выбора // Информатика и автоматизация, Вып. 19 (6), 2020. С.1131-1165. DOI: 10.15622/ia.2020.19.6.1.
- [31] **Ильин В.А., Поздняк Э.Г.** Линейная алгебра. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 280 с.
- [32] **Магарил-Ильяев Г.Г., Тихомиров В.М.** Выпуклый анализ и его приложения. Изд. 2-е, испр. М.: Едиториал УРСС. 2003. 176 с.
- [33] **Зенкин А.А.** Когнитивная компьютерная графика / ред. Поспелов Д.А. М.: Наука, 1991. 192 с.

-
- [34] **Mikoni S.V.** Application of the Universal Decision Support System SVIR to Solving Urban Problems // Springer International Publishing AG 2016. A.V. Chugunov et al. (Eds.): DTGS 2016, CCIS 674, pp.1-14. DOI: 10.1007/978-3-319-49700-6_48.
 - [35] **Микони С.В.** Табличная модель принятия оперативных решений беспилотным летательным аппаратом // Аэрокосмическое приборостроение, 2023, №8. С.3-12. DOI: 10.25791/aviakosmos.8.2023.1353.
 - [36] **Микони С.В., Бураков Д.П., Захаров В.В.** Применение новой редакции системы выбора и ранжирования СВИРЬ-М в учебном процессе // ИНФОРИНО-2024. Материалы VII международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования», (16-19.04. 2024, Москва) М: Изд-во МЭИ, 2024. С.44-48.
-

Сведения об авторах



Микони Станислав Витальевич, 1936 г. рождения. Окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта им. Образцова в 1963 г., д.т.н. (1992), профессор (1994), ведущий научный сотрудник СПИИРАН. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта (1998). В списке публикаций 360 работ, из них 2 монографии и 7 учебных пособий в области технической диагностики, дискретной математики, системного анализа, теории принятия решений, искусственного интеллекта. AuthorID (РИНЦ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; <https://orcid.org/0000-0001-7153-6804>. *smikoni@mail.ru.* ☐

Соколов Борис Владимирович, 1951 г. рождения. Окончил Военно-космическую академию им. А.Ф. Можайского в 1974 г., д.т.н. (1993), профессор (1994), главный научный сотрудник СПб ФИЦ РАН. В списке публикаций более 750 работ, из них 31 монография и учебные пособия в области управления сложными организационно-техническими объектами, системного анализа, теории принятия решений, искусственного интеллекта. AuthorID (РИНЦ): 118026; Author ID (Scopus): 7101767324; Researcher ID (WoS): S-1946-2016; <https://orcid.org/0000-0002-2295-7570>. *sokolov_boris@inbox.ru.*



Бураков Дмитрий Петрович, 1981 г. рождения. Окончил Петербургский государственный университет путей сообщения в 2003 г., к.т.н. (2008). Индивидуальный исследователь. В списке публикаций 60 работ, из них 4 учебных пособия в области дискретной математики, теории принятия решений, искусственного интеллекта. AuthorID (РИНЦ): 159925; Author ID (Scopus): 57218189157; Researcher ID (WoS): AAE-4602-2022; <https://orcid.org/0000-0001-7488-1689>. *burakovdmitry8@gmail.com.*

Поступила в редакцию 5.06.2024, после рецензирования 13.07.2024. Принята к публикации 20.07.2024.



SVIR-M, selection and ranking alternatives system: theoretical foundations and practice of application

© 2024, S.V. Mikoni , B.V. Sokolov, D.P. Burakov

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract

The article examines upper-level decision-making systems that involve selecting from a finite set of alternatives, known as multidimensional object assessment systems. Examples of such systems are provided. Given the general impossibility of establishing a complete and strict order on a finite set of alternatives using logical methods alone, we offer a theoretical justification for the universality of these systems, which integrate both logical and computational methods for multidimensional evaluation. The work presents the axioms that underpin the development of logical and computational models for multidimensional object assessment. By applying system analysis principles for selecting entities based on multiple indicators from a finite set of alternatives, we establish connections between multidimensional ordering and classification methods, as well as within groups of these methods. These connections are represented in a task tree of the updated SVIR-M selection and ranking system. The principles of this system, consisting of nine programs tailored to specific tasks, are outlined. In the problem setup interface, a task tree of multidimensional object assessment is modeled. SVIR-M's initial data comprises a finite set of objects, each characterized by a set of indicators and requirements. Data preparation involves group preparation using MS Excel and individual preparation through system tools. The multidimensional object assessment model developed within the system can address various problems. Examples of practical applications of the system are provided.

Keywords: *indicator, preference, criterion, target value, evaluation function, goal achievement, deviation from the goal, multidimensional assessment, instrumental system.*

Citation: Mikoni SV, Sokolov BV, Burakov DP. SVIR-M, selection and ranking alternatives system: theoretical foundations and practice of application [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(3): 440-456. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-3-440-456.

Financial support: The research was carried out under the budget topic FFZF-2022-0004.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and table

Figure 1 - Type of functions of value a) and utility b)

Figure 2 - Tree of tasks solved in the SVIR-M system

Table 1 - Rules for coding requirements for indicator values

References

- [1] **Saaty TL.** The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation // New York, McGraw-Hill. 1980.
- [2] **Larichev OI.** Verbal analysis of decisions [In Russian]. Moscow: Nauka, 2006, 181 p.
- [3] **Keeney RL, Raiffa H.** Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. New York, Wiley. 1976. 569 p.
- [4] **Neumann JV, Morgenstern O.** Theory of Games and Economic Behavior. Princeton, NJ. Princeton University Press. 1953.
- [5] **Fishburne PS.** Utility theory for decision making [In Russian]. Transl. from English V.N. Vorobyova, A.Ya. Kiruti; Ed. N.N. Vorobyova. Moscow: Nauka, 1978. 352 p.
- [6] **Wierzbicki AP.** The Use of Reference Objectives in Multiobjective Optimization. In: G. Fandel and T. Gal, Eds., Multiple Criteria Decision Making Theory and Applications, Springer-Verlag, Berlin, 1980. P.468-486.

- [7] **Podinovsky VV.** Ideas and methods from the theory of criteria importance in multi-criteria decision-making problems [In Russian]. Moscow: Nauka, 2019. 103 p.
- [8] **Velasquez M, Hester PT.** An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. *International Journal of Operations Research.* 2013; 10(2): 56-66.
- [9] **Mikoni SV.** "SVIR" selection and ranking system [In Russian]. Proceedings of the international congress "Artificial Intelligence in the 21st Century". Divnomorskoe 3–8.09.2001. Moscow: Fizmatgiz, 2001; 1: 500-507.
- [10] **Izbachkov SYu, Petrov VN.** Information systems [In Russian]. St. Petersburg: Peter, 2008. 655 p.
- [11] **Sprague R.** A Framework for the Development of Decision Support Systems. *MIS Quarterly.* 1980; 4(4): 1-25. DOI: 10.2307/248957.
- [12] **Ipatova ER, Ipatov YuV.** Methodologies and technologies for system design of information systems: textbook [In Russian]. 2nd ed., erased. Moscow: Flint, 2016. 257 p.
- [13] **Kuritsky BY.** Search for optimal solutions using Excel 7.0 [In Russian]. St. Petersburg: BHV, 1997. 384 p.
- [14] **Jimenez A, Rios-Insua S, Mateos A.** Decision support system for multiattribute utility evaluation based on imprecise assignments // *Decision Support Systems* 36. 2003. P.65- 79. DOI: 10.1016/s0167-9236(02)00137-9.
- [15] Information and analytical system "ASSESSMENT and SELECTION" // SOFTEL: One hundred computer programs for business (catalog 1997-98). M.: "Khamtek Publisher". 1997. p.156-165.
- [16] **Krejčí J.** Pairwise Comparison Matrices and their Fuzzy Extension: Multi-criteria Decision Making with a New Fuzzy Approach, in Series Studies in Fuzziness and Soft Computing, 366, Springer, 2018. 273 p. DOI: 10.1007/978-3-319-77715-3.
- [17] **Krejčí J, Stoklasa J.** Aggregation in the Analytic Hierarchy Process: Why weighted geometric mean should be used instead of weighted arithmetic mean, *Expert Systems with Applications* 2018; 114: 97-106. DOI: 10.1016/j.eswa.2018.06.060.
- [18] **Sarkar B, Biswas A.** Pythagorean fuzzy AHP-TOPSIS integrated approach for transportation management through a new distance measure. *Soft Computing.* 2021 Mar; 25(5): 4073-89. DOI: 10.1007/s00500-020-05433-2.
- [19] **Nebro AJ, Ruiz AB, Barba-González C, García-Nieto JM, Luque M, Aldana-Montes JF.** InDM2: Interactive Dynamic Multi-Objective Decision Making using evolutionary algorithms, *Swarm and Evolutionary Computation*, 2018; 40: 184-195. DOI: 10.1016/j.swevo.2018.02.004.
- [20] **Morente-Moliner JA, Kou G, Samuylov K, Cabrerizo FJ, Herrera-Viedma E.** Using argumentation in expert's debate to analyze multi-criteria group decision making method results. *Information Sciences.* 2021 Sep 1; 573: 433-52. DOI: 10.1016/j.ins.2021.05.086.
- [21] **Huang H, De Smet Y, Macharis C, Doan NA.** Collaborative decision-making in sustainable mobility: identifying possible consensuses in the multi-actor multi-criteria analysis based on inverse mixed-integer linear optimization. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology.* 2021 Jan 2;28(1): 64-74. DOI: 10.1080/13504509.2020.1795005.
- [22] **Paradowski B, Shekhtovtsov A, Bączkiewicz A, Kizielewicz B, Salabun W.** Similarity Analysis of Methods for Objective Determination of Weights in Multi-Criteria Decision Support Systems. *Symmetry.* 2021 Oct;13(10): 1874. DOI: 10.3390/sym13101874.
- [23] **Piyavsky SA.** Two new top-level concepts for the multicriteria optimization ontology [In Russian]. *Ontology of designing.* 2013; 1: 65-85.
- [24] **Piyavsky SA.** Progressivity of multicriteria alternatives [In Russian]. *Ontology of designing.* 2013; 4: 53-59.
- [25] **Piyavsky SA.** Optimization of generalized multi-purpose systems [In Russian]. *Ontology of designing.* 2015; 5(4): 411-428. DOI: 10.18287/2223-9537-2015-5-4-411-428.
- [26] **Piyavsky SA.** How to "number" the concept of "more important" [In Russian]. *Ontology of designing.* 2016; 6(4): 414-435. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-4-414-435.
- [27] **Piyavsky SA.** Method of universal coefficients for the multicriteria decision-making [In Russian]. *Ontology of designing.* 2018; 8(3): 449-468. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-449-468.
- [28] **Mikoni SV.** Axiomatics of multicriteria optimization methods on a finite set of alternatives [In Russian]. Proceedings of SPIIRAS. 2016; 44: 198-214. DOI:10.15622/sp.44.12.
- [29] **Mikoni SV.** Modeling deviations of object quality indicators from the norm [In Russian]. *Ontology of designing.* 2024; 14(2): 167-180. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180.
- [30] **Mikoni SV, Burakov DP.** Justification and classification of evaluation functions used in rating methods of multi-criteria choice [In Russian]. *Computer Science and Automation,* 2020; 19(6): 1131-1165. DOI: 10.15622/ia.2020.19.6.1.
- [31] **Ilyin VA, Pozdnyak EG.** Linear algebra [In Russian]. Moscow: FIZMATLIT, 2005. 280 p.
- [32] **Magaril-Ilyaev GG, Tikhomirov VM.** Convex analysis and its applications [In Russian]. Ed. 2nd, corrected. Moscow: Editorial URSS. 2003. 176 p.
- [33] **Zenkin AA.** Cognitive computer graphics [In Russian]. Ed. D.A. Pospelov. Moscow: Nauka, 1991. P.192.

- [34] **Mikoni SV.** Application of the Universal Decision Support System SVIR to Solving Urban Problems // Springer International Publishing AG 2016. A.V. Chugunov et al. (Eds.): DTGS 2016, CCIS 674, p.1-14. DOI: 10.1007/978-3-319-49700-6_48.
 - [35] **Mikoni SV.** Tabular model of making operational decisions by an unmanned aerial vehicle [In Russian]. *Aerospace instrumentation*, 2023; 8: 3-12. DOI: 10.25791/aviakosmos.8.2023.1353.
 - [36] **Mikoni SV, Burakov DP, Zakharov VV.** Application of the new edition of the SVIR-M selection and ranking system in the educational process [In Russian]. INFORINO-2024. Materials of the VII International Scientific and Practical Conference “Informatization of Engineering Education”, (16-19.04. 2024, Moscow) Moscow: MPEI Publishing House, 2024. p.44-48.
-

About the author

Stanislav Vitalievich Mikoni (b. 1936) graduated from the Obraztsov Institute of Engineers of Railway Transport (Leningrad) in 1963, D. Sc. Eng. (1992), Professor (1994), Leading Researcher at the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. He is a member of the Russian Association of Artificial Intelligence (1998). He is the author and a co-author of 360 publications, including 2 monographs and 7 textbooks in the field of technical diagnostic, discrete mathematics, system analyses, artificial intelligence, and decision making theory. AuthorID (РИНЦ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; <https://orcid.org/0000-0001-7153-6804>. smikoni@mail.ru. 

Boris Vladimirovich Sokolov, (b.1951) graduated from the Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky in 1974, D. Sc. Eng. (1993), Professor (1994), Cheaf Researcher at the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. He is the author and a co-author more than 750 publications, including 31 monographs and textbooks in the field of management of complex organizational and technical objects, system analysis, decision theory, and artificial intelligence. AuthorID (РИНЦ): 118026; Author ID (Scopus): 7101767324; Researcher ID (WoS): S-1946-2016; <https://orcid.org/0000-0002-2295-7570>. sokolov_boris@inbox.ru.

Dmitry Petrovich Burakov, (b.1981) graduated from Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university in 2003, PhD (2008), an individual researcher. He is the author and a co-author of 60 publications, including 4 textbooks in the field of discrete mathematics, decision theory, and artificial intelligence. AuthorID (РИНЦ): 159925; Author ID (Scopus): 57218189157; Researcher ID (WoS): AAE-4602-2022; <https://orcid.org/0000-0001-7488-1689>. burakovdmitry8@gmail.com.

Received June 5, 2024, Revised July 13, 2024. Accepted July 20, 2024.
