

УДК 004.65

МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Ю. Б. Щенёва, старший преподаватель кафедры ВПМ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-6351-0399, e-mail: Shenyova@yandex.ru

А. Н. Пылькин, д.т.н., профессор кафедры ВПМ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-9925-2870, e-mail: pylkin.a.n@rsreu.ru

Е. С. Щенёв, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0005-8438-7445, e-mail: Jheka1235317@gmail.com

Рассматривается задача построения модели многокритериального анализа данных в различных прикладных областях для системы поддержки принятия решений. Целью работы является разработка модели многокритериального анализа данных, на основе которой будут реализованы гибкие и адаптируемые системы поддержки принятия решений для различных областей знаний. Предлагается инновационный подход к построению оптимизационной модели на основе анализа траекторий в многомерных метрических пространствах. Проведенное исследование показало, что, несмотря на единую методику моделирования, реализация многокритериальной системы поддержки принятия решений существенно варьируется в зависимости от прикладной области. Так, в работе представлен сравнительный анализ результатов моделирования образовательного процесса и технической системы. Для формализации задачи выбираются частные показатели, отражающие динамику управления информационным процессом и определяющие размерность соответствующего метрического пространства. Обосновывается выбор методов агрегации этих показателей в единый обобщенный критерий в n -мерном пространстве. На основе полученных результатов описывается принцип построения траекторий в многомерных метрических пространствах, необходимый для повышения эффективности управления информационным процессом в различных приложениях. Практическая значимость исследования заключается в возможности адаптации предлагаемой модели многокритериального анализа данных для различных областей знаний. Научная новизна заключается в автоматизации принятия решений за счет применения современных методов многокритериальной оптимизации.

Ключевые слова: многокритериальный анализ данных, система поддержки принятия решений, многокритериальная оптимизация, многомерные метрические пространства, траектории в метрических пространствах, управление информационным процессом, обобщенный показатель, прикладные области моделирования, автоматизация принятия решений, сравнительный анализ моделей, информационная система.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-124-138

Введение

Современные прикладные области – от образования и медицины до промышленности и телекоммуникаций – сталкиваются со стремительным увеличением количества информации, требующей выполнения математических и программных разработок, способных эффективно решать сложные многокритериальные задачи. Системы поддержки принятия решений (СППР) являются неотъемлемым инструментом в таких сферах, обеспечивая обоснованный и рациональный выбор управленческих решений. При этом методы управления и критерии оценки могут существенно различаться в зависимости от предметной области, хотя сама логика принятия решений зачастую опирается на единые принципы многокритериальной оптимизации.

Важным инструментом моделирования эффективных СППР является многокритериальный анализ данных. Сложность задач принятия решений заключается не столько в количестве критериев, сколько в их разнородной природе: критерии могут быть количественными

или качественными, объективными или субъективными, а также выражаться в различных шкалах измерения. Это создаёт серьёзные трудности при построении согласованных и устойчивых моделей принятия решений.

На сегодняшний день известно множество подходов для оценки эффективности различных процессов. Например, в работе [1] предложен метод анализа траекторий в многомерных метрических пространствах для управления информационными процессами. В исследований [2, 11] рассматриваются модели повышения качества образовательного процесса в вузах; а в трудах [3, 4] предложены алгоритмы многофункционального анализа и модели формирования комплектов оборудования технических систем. Однако, несмотря на многообразие существующих решений, остаётся **актуальной** задача создания универсальной, гибкой модели многофункционального анализа, способной адаптироваться к специфике различных прикладных областей и эффективно обрабатывать разнотипные данные.

Теоретические исследования и анализ современного состояния вопроса показали, что наиболее перспективным направлением является разработка моделей, учитывающих смешанный набор критериев и позволяющих применять единый инструментарий интеллектуального анализа данных в самых разных предметных областях. Вместе с тем из-за противоречивого характера критериев (улучшение по одному может приводить к ухудшению по другому) невозможно найти решение, оптимальное по всем показателям одновременно. В таких условиях целесообразно использовать один или комбинацию многофункциональных методов принятия решений (ММПР) [5, 12].

Предлагаемая в данной статье модель отличается от существующих комплексным подходом к учёту разнородных критериев и внедрением новых автоматизированных алгоритмов, ориентированных на повышение эффективности управления информационным процессом в различных сферах. **Практическая значимость** исследования заключается в том, что применение полученной модели позволяет создать информационную систему для принятия решений на основе многофункционального анализа данных. **Научная новизна и прикладной результат** исследования состоят в разработке уточнённого методического аппарата, обеспечивающего более точную и обоснованную оценку альтернатив и, как следствие, – повышение качества управленческих решений.

Постановка задачи

В условиях современной информационной среды принятие обоснованных управленческих решений напрямую зависит от эффективности обработки и анализа разнородных данных, составляющих основу информационных процессов. Эти процессы включают последовательные этапы сбора, преобразования, интерпретации и оценки информации, на основе которых формируется решение о необходимых воздействиях на исследуемый объект или субъект. Однако из-за высокой размерности, неоднородности и противоречивости критериев оценки такие процессы часто сопровождаются значительными временными и вычислительными затратами, что снижает оперативность и качество принимаемых решений.

Одним из перспективных направлений для повышения эффективности управления информационным процессом является построение модели, основанной на анализе траекторий в многомерных метрических пространствах. При этом наблюдается существенная зависимость результатов моделирования от выбора метрики: применение одинаковых инструментов к одному и тому же набору данных в различных метрических пространствах может приводить к принципиально разным выводам и рекомендациям. Это создаёт проблему несогласованности решений и снижает их надёжность.

В связи с этим возникает необходимость в разработке модели, способной обеспечивать устойчивый и рациональный выбор решений в условиях многофункциональности и метрической неопределённости.

Для решения задачи построения модели, основанной на методах многофункциональной оптимизации, требуется разработка теоретической и методической основы для построения

интеллектуальных систем поддержки принятия решений, обеспечивающих высокую скорость и качество анализа данных в различных прикладных областях.

Теоретическая часть

Информационный процесс, лежащий в основе принятия управленческих решений, формализуется как совокупность **частных показателей** $w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$, которые отражают динамику его изменения и задают размерность метрического пространства, в котором осуществляется моделирование. Эти показатели выступают критериями эффективности в конкретной предметной области, а их количество определяется логикой поставленной задачи и спецификой анализируемого процесса.

Поскольку исходные значения частных показателей могут иметь разные масштабы и размерности, перед построением модели их необходимо **нормализовать**. В настоящей работе используется линейное преобразование, отображающее значения каждого показателя на отрезок [0;1], которое определяется формулой:

$$w_i^* = \frac{w_i^* - w_{i\min}^*}{w_{i\max}^* - w_{i\min}^*}, \quad (1)$$

где w_i^* – текущее значение i -го показателя, $w_{i\max}^*$, $w_{i\min}^*$ – его минимальное и максимальное значения в выборке.

На основе нормализованных данных формируется **обобщённый показатель**, интерпретируемый как расстояние между точками в n -мерном метрическом пространстве. Способ его расчёта зависит от прикладного контекста решаемой задачи. В данной статье рассматриваются два принципиально различных подхода.

1. Нахождение расстояния от исследуемого до «идеального» объекта – с максимальными характеристиками по всем критериям;
2. Нахождение расстояния от исследуемого до «неидеального» объекта – с минимальными характеристиками по всем критериям.

В первом случае эффективность управления процессом повышается при **уменьшении** расстояния до идеальной траектории, во втором – при **увеличении** расстояния до неидеальной траектории. Такой дуализм позволяет гибко адаптировать модель под специфику решаемой задачи – для оценки состояния технической системы или анализа эффективности образовательного процесса.

Особенностью информационных процессов является их **динамическая природа**: структура и количество частных показателей могут изменяться во времени [8, 9]. Это усложняет применение традиционных методов моделирования и обуславливает необходимость использования **разнообразных метрик**, адаптированных под характер исходных данных и цели анализа. В работе рассматривается множество разнообразных метрик: евклидово расстояние, квадрат евклидова расстояния, метрика Чебышева, расстояние Минковского, расстояние Хаусдорфа и др. [1, 2].

В исследуемых метриках обобщенный показатель выступает как мера в метрическом пространстве, на основании которой происходит построение траекторий и последующий сравнительный анализ текущей траектории, характеризующей некоторый информационный процесс, с оптимальными траекториями, выбранными в ходе исследования [2].

Обозначим через $w(j) = w_1^{(j)}, w_2^{(j)}, \dots, w_n^{(j)}$ вектор частных показателей j -го объекта ($j = 1, \dots, m$, где m – число исследуемых объектов). Тогда в **евклидовой метрике** обобщённый показатель (расстояние между объектами j и k) вычисляется по формуле:

$$d_{jk} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (w_{ji} - w_{ki})^2}. \quad (2)$$

Анализ траекторий объектов относительно идеальной и неидеальной траекторий в этом пространстве позволяет оценить эффективность управления: чем ближе расстояние к «идеальной» траектории (или дальше от «неидеальной» траектории), тем выше качество результата.

В случае, когда критерии имеют **разную значимость**, ранжированы между собой по степени важности, используется **метрика взвешенного евклидова расстояния** [10]. Обобщенный показатель в рассматриваемой метрике вычисляется по формуле:

$$d_{jk} = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i (w_{ji} - w_{ki})^2}, \quad (3)$$

где c_i – вес i -го частного показателя; $c_i > 0$, $\sum_{i=1}^n c_i = 1$. Веса, как правило, определяются эксперты путём или на основе нормативных документов. Эта модификация позволяет точнее отразить приоритеты в задаче и повысить адекватность модели. Однако следует учитывать ситуации, когда веса факторов одинаковы, а одному из них надо повысить вес. В этом случае приходится опираться на опрос экспертов и директивные документы [2].

При работе с относительными показателями, где акцент делается на сильно различающиеся объекты, целесообразно применять **квадрат евклидова расстояния**. Для расчета обобщенного показателя в рассматриваемом метрическом пространстве применяют формулу (4):

$$d_{jk} = \sum_{i=1}^n (w_{ji} - w_{ki})^2. \quad (4)$$

Метрика **Чебышева** фокусируется на максимальном отклонении по одному из критериев. Максимальное расстояние между соответствующими частными показателями определяет обобщенный показатель в данной метрике (формула 5):

$$d_{jk} = \max_{1 \leq i \leq n} |w_{ji} - w_{ki}|. \quad (5)$$

Однако, анализируя полученную модель в рассматриваемой метрике, можно заключить, что происходит игнорирование информации по остальным критериям, что может привести к потере детализации.

Более гибким инструментом выступает **метрика Минковского**, обобщающая целый класс расстояний:

$$d_{jk} = \left(\sum_{i=1}^n (|w_{ji} - w_{ki}|)^p \right)^{\frac{1}{p}}, p \geq 1, \quad (6)$$

где параметр $p \geq 1$. При $p = 1$ может быть получено манхэттенское расстояние (расстояние городских кварталов), при $p = 2$ – простое евклидово расстояние. Экспериментальное исследование показало, что при большинстве практических сценариев поведение траекторий в метрике Минковского близко к евклидову, особенно при $p \approx 2$.

Для задач, требующих сравнения множеств состояний (например, при кластеризации или оценке множества альтернатив), применяется **метрика Хаусдорфа**. Пусть $A, B \subset X$ – компактные подмножества полного метрического пространства (X, d) . Тогда расстояние Хаусдорфа определяется по формуле:

$$d(A, B) = \max_{a \in A} (\min_{b \in B} \|a - b\|). \quad (7)$$

Эта метрика особенно полезна при работе с нечёткими или интервальными данными и играет важную роль в задачах группировки и сегментации.

Проведённый анализ показал, что построение многокритериальной модели в виде **траектории в n -мерном метрическом пространстве** позволяет системно учитывать множественность факторов, минимизировать влияние субъективных оценок и повысить обоснованность принимаемых решений. В качестве примеров в работе рассматриваются две разнородные области – **техническая система и образовательный процесс**. Несмотря на различия в содержании, в обоих случаях применима единая методологическая основа, подтверждающая универсальность предложенного подхода.

Ключевым этапом моделирования является **выбор системы критериев**, частных показателей, которые должны быть репрезентативными, измеримыми и согласованными с целями

анализа, адекватно отражающими суть решаемой задачи в конкретной прикладной области. Именно на их основе формируется многокритериальная модель, лежащая в основе системы поддержки принятия решений, способной адаптироваться к специфике различных прикладных задач.

Общая постановка **задачи принятия решений** (ЗПР) в многокритериальной среде может быть описана следующим образом. Пусть $W = (w_1, w_2, w_3)$ – конечное множество альтернатив (вариантов решений), где каждый элемент w_i интерпретируется как точка в n -мерном метрическом пространстве. В рамках данной работы множество W представляет собой совокупность частных показателей, характеризующих либо техническую систему, либо образовательный процесс.

Пусть также $(J_1(w), J_2(w), \dots, J_m(w))$ – множество возможных исходов, задаваемое вектором значений **целевых функций**, каждая из которых оценивает качество выбранного решения по соответствующему критерию. Между выбором альтернативы $w_i \in W$ и наступлением результата $j_k \in J$ существует **причинно-следственная связь**, а также определённый механизм оценки качества этого результата. Необходимо определить оптимальный вариант, который позволит получить высокий уровень результата.

Качество каждой альтернативы оценивается с помощью **показателей качества решения** – функций $f_k : J \rightarrow R, k = \overline{1, m}$ f_k : где R – множество действительных чисел. При этом каждая функция f_k подлежит либо максимизации, либо минимизации в зависимости от содержательного смысла соответствующего критерия (например, минимизация затрат, максимизация надёжности, минимизация веса оборудования, минимизация времени ремонта для технической системы, максимизация освоения профессиональных компетенций для образовательного процесса и т.д.).

Связь между альтернативами и исходами задаётся **детерминистской функцией**, отображающей множество альтернатив во множество исходов: $\varphi : W \xrightarrow{\varphi} J$, которая сопоставляет каждой альтернативе $w_i \in W$ соответствующий вектор исходов $j_k = \varphi(w_i) \in J$. Таким образом, итоговая оценка качества решения выражается через суперпозицию: $J_i(w) = f_i(\varphi(W))$, $i = \overline{1, m}$, что формирует векторное отображение: $J : w_i \rightarrow R^n, J = (J_1, \dots, J_m)$, $J(W) = F \subset R^n$.

В результате получена **многокритериальная модель принятия решений** (задача многокритериальной оптимизации) следующего вида:

$$J_i(w) \rightarrow \max_{w_i \in W}, i = \overline{1, m}, W \subset R^n \text{ или } J_i(w) \rightarrow \min_{w_i \in W}, i = \overline{1, m}, W \subset R^n, \quad (8)$$

где « \max » или « \min » понимается в смысле **Парето-оптимальности**, поскольку в условиях конфликта критериев глобальный максимум (или минимум) по всем показателям одновременно, как правило, недостижим.

Полученная модель может быть интерпретирована как задача **оптимального выбора конфигурации информационной системы или программного комплекса**, эффективность функционирования которой оценивается по нескольким разнородным показателям f_1, \dots, f_m – например, стоимости, надёжности, времени ремонта, адаптивности для технической системы, освоения профессиональных компетенций для образовательного процесса и др.

Однако практическая реализация подобных моделей сопряжена как с **алгоритмическими трудностями** (высокая размерность пространства решений, вычислительная сложность), так и с **концептуальными** – необходимостью учитывать специфику прикладной области, характер взаимодействия критериев и степень допустимого компромисса между ними.

В связи с этим центральную роль при решении многокритериальных задач играют **методы многокритериальной оптимизации**, позволяющие находить обоснованные компромиссные решения. Сравнительный анализ таких методов, а также обоснование выбора наиболее

подходящего подхода для рассматриваемых прикладных случаев (техническая система и образовательный процесс) представлены в разделе «Экспериментальные исследования».

Подводя итог вышесказанному, заключаем, что проведенный теоретический анализ позволил сформулировать обобщённую модель многокритериального принятия решений, основанную на представлении информационного процесса как траектории в n -мерном метрическом пространстве. Показано, что эффективность управления в различных прикладных областях – от технических систем до образовательных процессов – может быть оценена единообразно с использованием системы частных показателей, нормализованных и интерпретируемых как координаты точек в многомерном пространстве. Обоснована необходимость применения различных метрик в зависимости от характера данных и целей анализа. Установлено, что выбор метрики существенно влияет на форму траекторий и, как следствие, на интерпретацию результатов, что требует гибкого подхода к построению модели. Сформулирована задача многокритериальной оптимизации в строгой математической постановке, включающей множество альтернатив, вектор целевых функций и детерминистское отображение между ними. Подчёркнута ключевая роль компромиссных решений в условиях конфликта критериев и невозможности достижения глобального оптимального значения по всем показателям одновременно. Таким образом, теоретические исследования заложили основу для разработки систем поддержки принятия решений, способных адаптироваться к специфике различных предметных областей при сохранении единого математического и концептуального аппарата. Проведенное моделирование открывает возможности для повышения объективности, точности и оперативности управленческих решений в условиях многокритериальной неопределенности.

Экспериментальные исследования

Основной задачей экспериментальных исследований является **практическое применение разработанной многокритериальной модели** для построения систем поддержки принятия решений в двух принципиально различных прикладных областях:

- технической системе (оптимизация комплектации вооружения и военной техники Воздушно-десантных войск (ВДВ);
- образовательном процессе (комплексная оценка освоения профессиональных компетенций студентами, в проведенном исследовании рассматривалась выборка студентов укрупненного направления 09.00.00 «Информатика и вычислительная техника» РГРТУ).

Несмотря на различия предметных областей, использовался единый методологический подход: представление информационного процесса в виде траектории в n -мерном метрическом пространстве, где каждая точка $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ соответствует вектору частных показателей, характеризующих состояние объекта на определённом этапе проводимого исследования.

Для образовательной сферы частные показатели отражают уровень сформированности компетенций на рассматриваемом этапе обучения; для технической системы – параметры, определяющие «коэффициент технической готовности», который показывает эффективность функционирования основных подсистем рассматриваемой системы. Частные показатели w_i , ($i = 1, 2, \dots, n$), имеющие смысл для некоторой точки в пространстве R^n , объединяют *обобщенным показателем эффективности*. В качестве обобщенного выбирается показатель на основе расстояния между точками пространства. При этом выделяются 2 подхода, представленные в теоретической части данной работы. Отмечено, что для повышения эффективности управления процессом необходимо сокращение расстояние между точками многомерного метрического пространства при реализации первого подхода и, наоборот, увеличение расстояния при реализации второго подхода [1, 2].

Выбор количества и содержания критериев осуществлялся с учётом специфики каждой прикладной области и требований к адекватности модели. В экспериментах был рассмотрен ограниченный размер метрического пространства $n = 12$, что обеспечило баланс между детализацией и вычислительной реализуемостью на начальных этапах исследования. Зона возможных значений обобщенного показателя относительно неидеальной траектории представлена на рисунке 1.

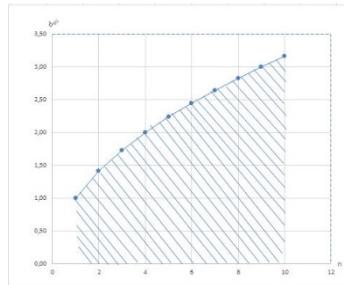


Рисунок 1 – Зона возможных значений обобщенного показателя относительно не-идеальной траектории

Figure 1 – Generalized indicator possible values relative to imperfect trajectory

Расчет обобщенного критерия в евклидовой метрике позволил построить траектории развития объектов и визуализировать их динамику относительно эталонных решений (рисунок 2).

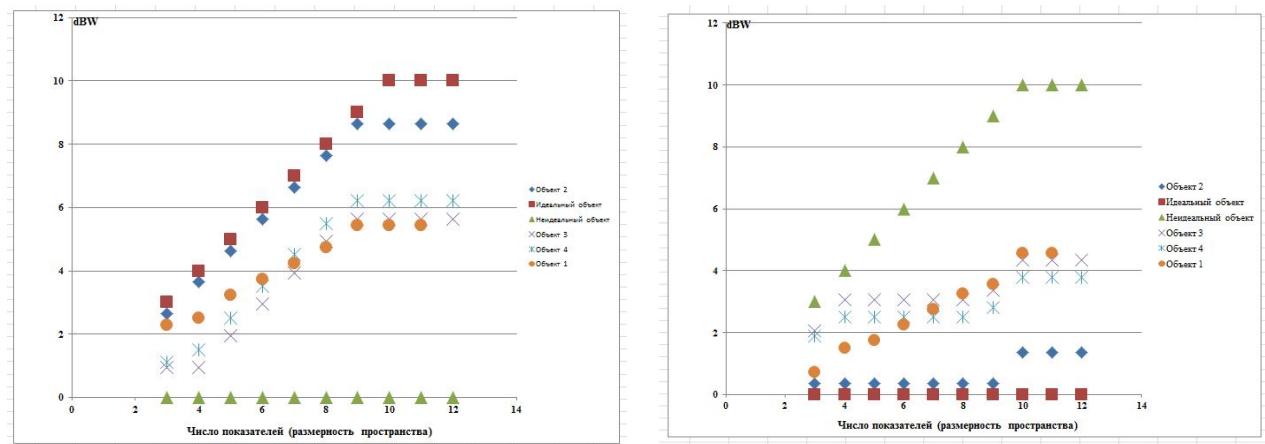


Рисунок 2 – Траектории относительно «неидеального» и «идеального» объектов в Евклидовой метрике

Figure 2 – Trajectories of «non-ideal» and «ideal» objects in the Euclidean metric

Анализ полученных траекторий показал: чем ближе расстояние от исследуемого объекта к «идеальной» траектории, тем эффективнее показатели рассматриваемого объекта, т.е. значение обобщенного показателя на анализируемом участке не увеличивается относительно «идеального» объекта. И чем дальше расстояние от траектории «неидеального» объекта до рассматриваемой траектории исследуемого объекта, тем эффективнее показатели, т.е. значение обобщенного показателя на анализируемом участке увеличивается относительно «неидеального» объекта.

На следующем этапе исследования был применен новый способ анализа информации с использованием звездообразной, радарной диаграммы, отображающей значения всех частных критериев одновременно. На рисунке 3 приведено сечение множества критериев в определенный момент времени с целью группировки основных факторов, влияющих на достижение глобальной цели.

На полученной диаграмме по осям отложены значения частных показателей. Для сравнительного анализа отображены результаты «идеального», «неидеального» и исследуемых объектов. Такой подход обеспечивает интуитивно понятную оценку преимуществ одних решений над другими.

Многокритериальную задачу (8) необходимо свести к однокритериальной версии применением «универсального» критерия, который может быть получен «сверткой» критериев в один комплексный – целевую функцию. Для этой цели проводится ранжирование критериев и последовательное применение методов многокритериальной оптимизации. В данном исследовании применялись последовательно следующие методы: главного критерия, линейной

свертки, идеальной точки. Метод идеальной точки модифицировался в *метод идеальной траектории*, основанный на моделировании эффективности информационных процессов в n -мерном метрическом пространстве. Ранжирование критериев производилось *методом приоритетов*. Для нахождения оптимального (универсального) решения использовался *метод последовательных уступок*.

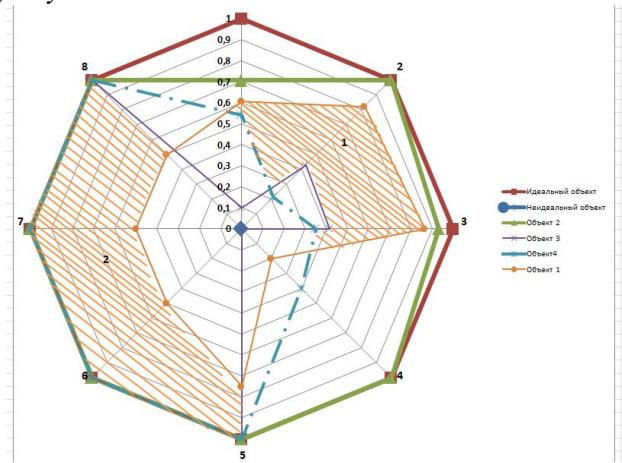


Рисунок 3 – Сравнительный анализ результатов на звездообразной диаграмме
Figure 3 – Comparative analysis of the results on asterisk chart

При помощи метода *главного критерия* выбирается один из функционалов f_i , доминирующий показатель, наиболее полно отражающий цель принятия решения. Накладываются дополнительные ограничения на остальные функционалы, что позволяет учитывать остальные требования к задаче. Благодаря введенным изменениям, задача (8) решается на новом допустимом множестве как однокритериальная задача поиска максимума функционала. Однако возникают трудности в исследуемых прикладных областях, связанные с наличием нескольких равноценных «главных» критериев, которые находятся в противоречии друг с другом. Это ограничивает применимость рассматриваемого метода.

Метод линейной свертки позволил произвести агрегирование критериев с учетом весовых коэффициентов. Для ранжирования критериев используется интегральная оценка. Однако точное определение значимости показателей зависит от экспертного мнения (метод приоритетов), что не позволяет определить окончательные значения весов, особенно при наличии разнородных критериев оптимизации.

Метод идеальной точки позволяет формализовать «универсальный» комплект для технической системы и «оптимальное» освоение компетенций в образовательном процессе как точки, максимально приближенной к идеалу по всем критериям. Расстояние до идеальной точки выступает в роли целевой функции. Метод идеальной точки сводит исходную многокритериальную задачу к решению однокритериальной задачи. Стоит отметить сложность определения относительной важности критериев.

Метод идеальной точки был модифицирован в *метод идеальной траектории*, при помощи которого формируется идеальная траектория, определяемая максимальными значениями частных показателей. В рассматриваемых прикладных областях в качестве идеальной траектории рассматриваются универсальный комплект для технической системы и идеальный набор показателей освоения компетенций для образовательного процесса. По найденному значению обобщенного показателя осуществляется анализ множества критериев на соответствие (степень близости) универсальности, оптимальности и исключение неподходящих вариантов. Данный метод сводит исходную многокритериальную задачу (8) к решению ее однокритериальной версии. Завершающим этапом многокритериальной оптимизации с использованием метода идеальной траектории является оценка полученного оптимального решения.

Для поиска компромиссного решения в условиях противоречивости критериев применялся *метод последовательных уступок*. Основная идея этого метода заключается в пошаго-

вом ослаблении требований к наиболее приоритетному критерию для улучшения параметров остальных критериев. Важным этапом являются оценка полученного результата и расчет значения остальных критериев для оптимального решения. Обязательно определение допустимых пределов изменения критериев, при которых сохраняется приемлемое качество решения. В случае, если достигнуто оптимальное решение или исчерпаны возможности улучшения, процесс останавливается. Однако эффективность метода последовательных уступок зависит от грамотного выбора порядка рассмотрения критериев и способности оценивать последствия изменений каждого шага.

В рамках решения многокритериальной задачи принятия решений (8) на начальном этапе исследования был применён **метод покоординатного поиска экстремума** – итерационный алгоритм оптимизации нулевого порядка, не требующий вычисления градиента или производных целевой функции. Его выбор обусловлен устойчивостью к некорректным данным, простотой реализации и способностью обеспечивать надёжное начальное приближение даже при сложной структуре пространства решений.

Суть метода заключается в последовательной оптимизации целевой функции (функционала) по одной координате за итерацию, с фиксированными значениями остальных компонент вектора альтернатив $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$. Направление и величина шага по каждой координате адаптируются в ходе поиска в зависимости от поведения функционала.

Алгоритм покоординатного поиска экстремума реализован следующим образом:

1. *Инициализация:* выбор начальной точки $W^{(0)} \in \mathbb{R}^n$ из множества допустимых альтернатив и определение начального шага $h_0 > 0$.
2. *Нахождение* значения целевого функционала $F^{(0)} = J(W^{(0)})$.
3. Для каждой координаты $k = 1, 2, \dots, n$:
 - a. Устанавливается текущий шаг $h_k = h_0$.
 - b. Формируется пробная точка W^k , в которой k -я компонента увеличена на h_k : $w_k = w_k + h_k$.
 - c. Вычисляется значение функционала в пробной точке: $F' = J(W')$.
 - d. Если $F' \leq F$ (в случае минимизации), то шаг увеличивается (например, $h_k := 3h_k$), значение функционала обновляется ($F := F'$), и переход осуществляется к новой пробной точке в том же направлении.
 - e. В противном случае направление поиска меняется на противоположное: $w_k := w_k - h_k$, шаг сокращается ($h_k := -0,5h_k$), и поиск продолжается в обратном направлении.
4. Процесс *повторяется* по всем координатам до завершения полного цикла по вектору W .
5. Итерации *прекращаются* после выполнения заданного числа N вычислений функционала $J(W)$.

Выход из алгоритма осуществляется после достижения заданного числа N вычислений $J(W)$. Программа выполняется таким образом, что позволяет обеспечить возможность продолжения работы с прерванного места после повторных входов в алгоритм.

Важной особенностью реализации является отсутствие встроенных критериев сходимости (например, по изменению функционала или норме градиента). Вместо этого контроль процесса осуществляется внешним управляющим модулем: по достижении лимита N вычислений алгоритм приостанавливается, возвращая текущее приближение. При последующем запуске поиск возобновляется с сохранённого состояния, что позволяет гибко регулировать глубину оптимизации и проводить промежуточный анализ результатов.

Такой подход особенно эффективен на ранних стадиях решения сложных многокритериальных задач, где важна возможность интеграции с другими методами (например, с методом последовательных уступок или идеальной траектории). Благодаря отсутствию требований к дифференцируемости функционала, алгоритм применим к разнородным, дискретным данным, характерным как для технических систем, так и для образовательного процесса.

Разработанный алгоритм нашел свое применение при разработке систем поддержки принятия решений, построенных на основе реляционных баз данных (БД). Отличительной особенностью реализованного подхода по сравнению с ранее опубликованными исследованиями является единая методологическая основа, позволяющая одновременно учитывать разнородные показатели эффективности как технической системы, так и образовательного процесса в рамках общей многокритериальной модели.

Однако стоит отметить, что, несмотря на единую методику моделирования информационных процессов, реализация многокритериальной системы поддержки принятия решений в исследуемых прикладных областях имеет существенное отличие. Так, для технической системы используются классические подходы построения СППР на основе многокритериальной модели данных. В указанной предметной области критерии изменяются случайным образом, стохастически, поэтому необходимо введение дополнительных ограничений для формирования управляющих решений. Для образовательного процесса необходимо изменить подход при проектировании системы поддержки принятия решений, учитывая тот факт, что в определенный момент времени происходит изменение числа частных показателей (динамический процесс), с помощью которых происходит многокритериальное оценивание. Объем и сложность организации данных динамического процесса зачастую не позволяют эффективно применять традиционные методы моделирования СППР, что приводит к необходимости разработки новых решений. Очевидно, возникает необходимость более детального исследования применительно к конкретной предметной области.

Учитывая особенности организации данных для технической системы и образовательного процесса, были спроектированы и реализованы две специализированные системы поддержки принятия решений, которые позволяют решать задачи принятия решений с использованием методов многокритериальной оптимизации. Даталогическая модель данных для программы моделирования технической системы [6,7] представлена на рисунке 4.

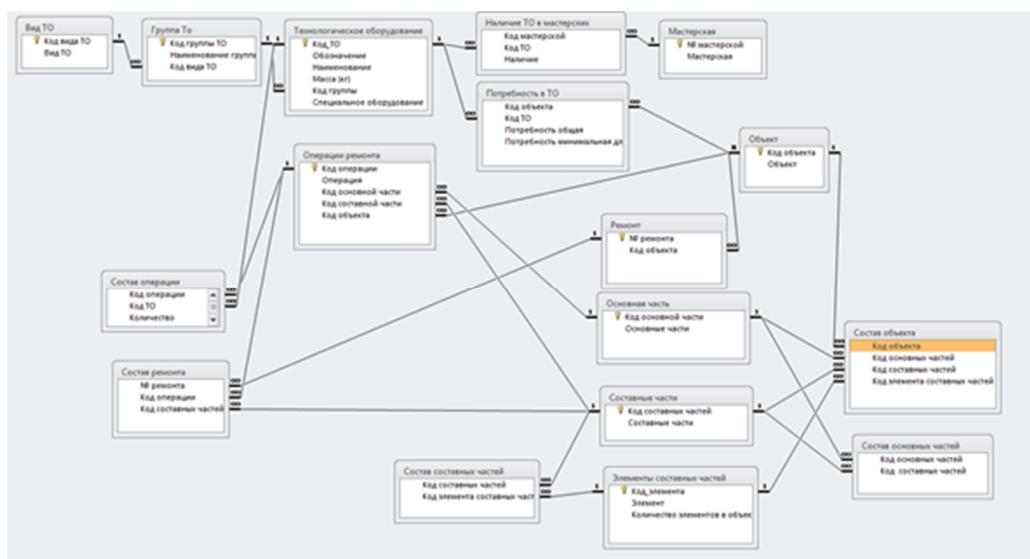


Рисунок 4 – Даталогическая модель данных технической системы
Figure 4 – Datalogical data model of technical system

Инфологическая модель данных для формирования БД образовательного процесса [13] представлена на рисунке 5.

Обе системы интегрированы с реляционными базами данных, поддерживающими накопление, обновление и структурированное хранение информации [14, 15]. Визуализация результатов выполнена в виде диаграмм (рисунки 6, 7), позволяющих оперативно оценивать эффективность компонентов технической системы и уровень освоения компетенций в образовательном процессе. Экспериментальное исследование показало, что применение предложенной методики повышает эффективность решений в среднем на 20 % по сравнению с

традиционными подходами. Эффективность не измеряется субъективно, а оценивается объективно через обобщённый показатель, который строится на основе многоокритериальной оптимизации, рассчитываемый как взвешенная сумма нормализованных критериев. Сравнение показало, что разработанный подход повышает значение обобщённого показателя эффективности с **0,725** до **0,870**, что соответствует **росту на 20 %**. Такой результат достигнут за счёт объективной многоокритериальной оптимизации, исключения избыточности через анализ доминирования строк и учёта вероятностных характеристик объектов исследования.

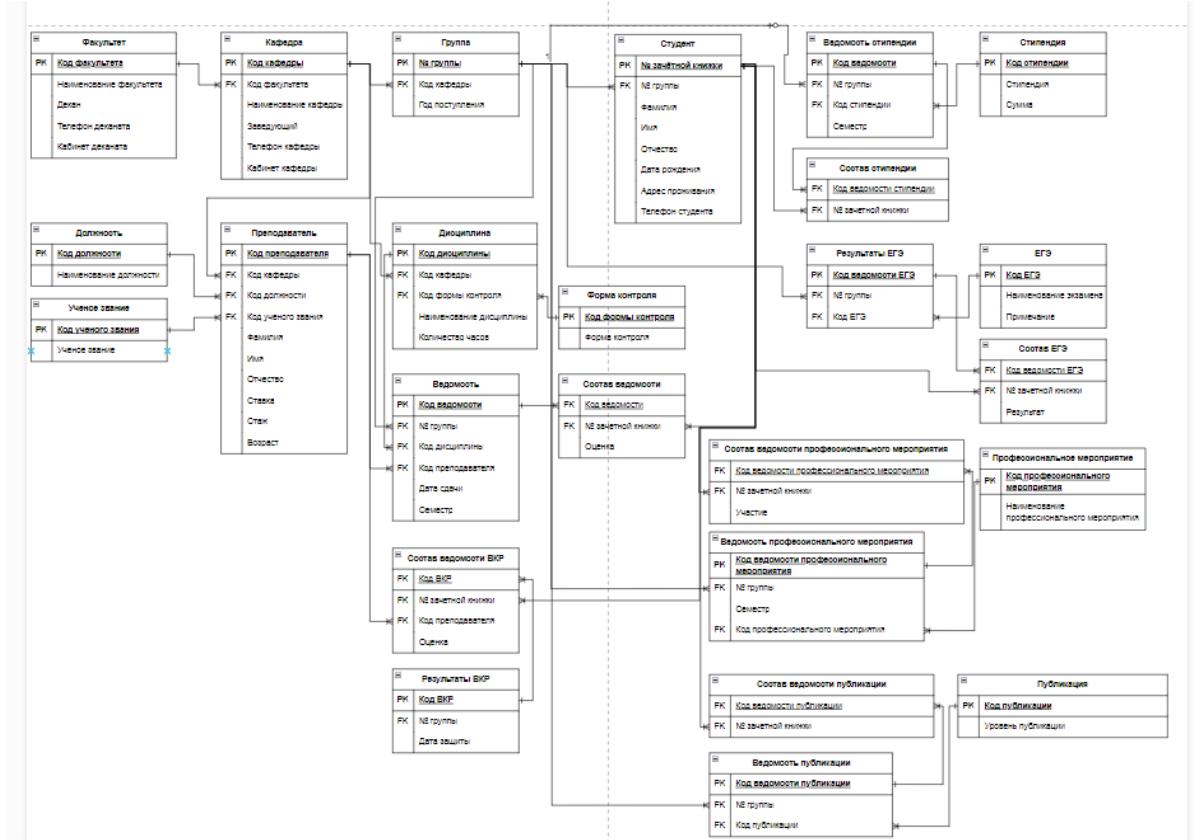


Рисунок 5 – Инфологическая модель данных для формирования
БД образовательного процесса

Figure 5 – Infological data model for creating educational process database

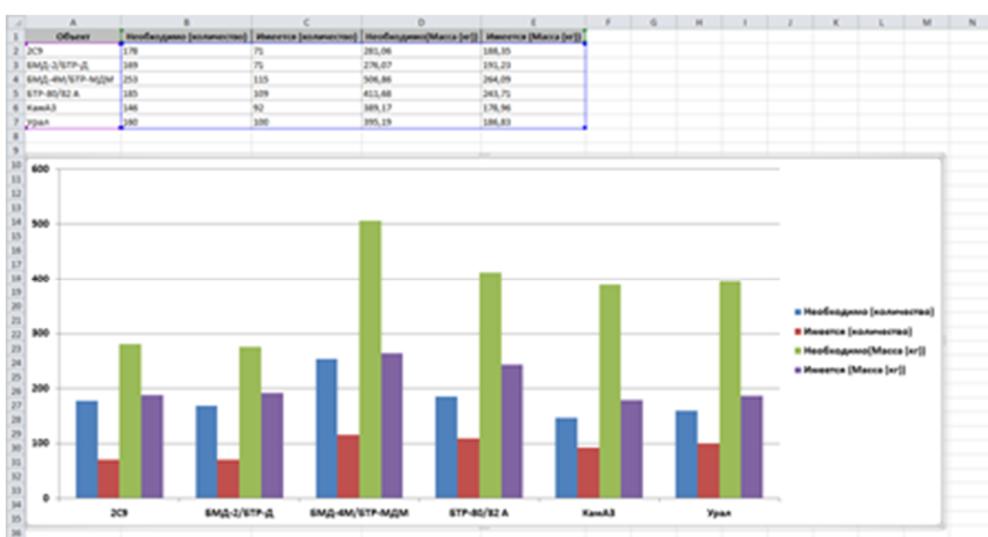


Рисунок 6 – Диаграмма оптимизации компонент технической системы
Figure 6 – Optimization diagram of technical system component

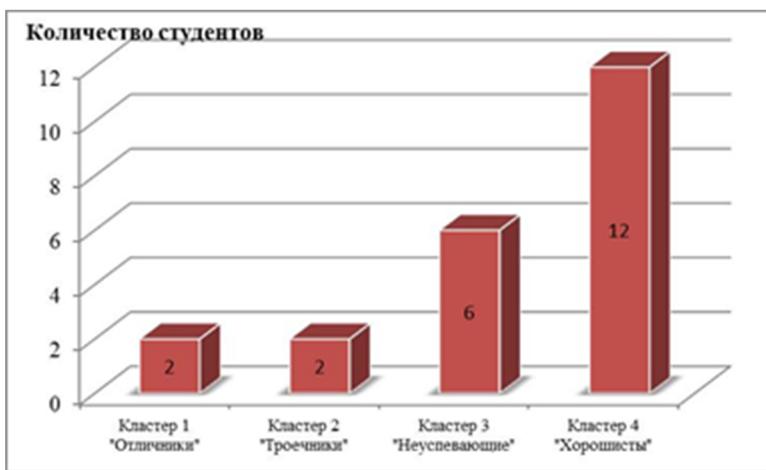


Рисунок 7 – Диаграмма анализа уровня освоения компетенций

Figure 7 – Competence development level analysis chart

Таким образом, проведённые исследования подтвердили универсальность предложенной многокритериальной модели, основанной на анализе траекторий в метрических пространствах. Несмотря на различия в природе данных и динамике процессов, единая методологическая основа позволила успешно решить задачи в обеих предметных областях. Отличительной особенностью исследования являются комплексный учёт разнородных критериев и применение гибридного подхода к оптимизации, сочетающего метрический анализ, экспертное ранжирование и адаптивные алгоритмы поиска оптимального решения. Практическая значимость работы заключается в создании масштабируемой информационной системы, способной на основе многокритериального анализа данных поддерживать принятие качественных, обоснованных решений в условиях неопределённости и противоречий.

Заключение

Подводя итог вышесказанному, можно заключить следующее: проведенное теоретическое исследование позволило разработать и обосновать универсальную модель многокритериального анализа данных, основанную на представлении информационного процесса в виде траектории в n -мерном метрическом пространстве. Теоретический анализ подтвердил возможность единообразной оценки эффективности управления в разнородных прикладных областях – от технической системы до образовательного процесса – за счёт нормализации частных показателей и их интерпретации как координат точек в многомерном пространстве. Установлено, что выбор метрики существенно влияет на форму траекторий и интерпретацию результатов, что требует гибкого подхода к построению модели. Сформулирована математическая постановка задачи многокритериальной оптимизации, включающая множество альтернатив, вектор целевых функций и детерминистское отображение между ними. Обозначена необходимость поиска компромиссных (Парето–оптимальных) решений в условиях несогласованности и конфликтности критериев.

Экспериментальные исследования подтвердили универсальность предложенного подхода: несмотря на различия в динамике и структуре данных (стохастическая изменчивость в технической системе и динамическая смена размерности критериев в образовательном процессе), единая методологическая основа обеспечила успешное решение прикладных задач в рассматриваемых сферах.

Отличительной особенностью проведенного исследования является комплексный подход, сочетающий метрический анализ, экспертное ранжирование и адаптивные алгоритмы оптимизации, включая методы идеальной точки, идеальной траектории, последовательных уступок и покоординатного спуска. Это позволило создать масштабируемую информационную систему поддержки принятия решений, повышающую качество управлеченческих решений в условиях многокритериальной неопределенности.

Практическая значимость выполненной разработки заключается в том, что представленная методика обеспечивает повышение эффективности принятия решений на 20 % по сравнению с традиционными подходами, открывая перспективы для её применения в других предметных областях, где требуется обоснованный выбор в условиях множественности и противоречивости критериев.

Библиографический список

1. Shcheneva Yu.B., Pylkin A.N., Bubnov S.A., Bubnov A.A., Shchenev E.S. Information process management based on trajectory Analysis in multidimensional metric spaces. 8th Computational Methods in Systems and Software 2024. System Design in Software Engineering // Proceedings of 8th Computational Methods in Systems and Software 2024, Artificial Intelligence for System Oriented Design. CoMeSySo 2024. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 1489. Springer, Cham (Scopus).
2. Щенёва Ю.Б., Пылькин А.Н., Щенёв Е.С., Бодров О.А. Модель освоения образовательных компетенций с использованием инструментария интеллектуального анализа данных // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. С. 119-132.
3. Щенёва Ю.Б. Алгоритм многокритериального анализа данных для систем поддержки принятия решений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 92. С. 203-213.
4. Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С., Пылькин А.Н., Майков К.А. Модель процесса формирования специального комплекта оборудования технической системы с использованием многокритериальной оптимизации. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 93. С. 130-142.
5. Щенёва Ю.Б., Гавзов В.В., Щенёв Е.С., Арешин Г.В. Программный алгоритм моделирования комплектации технологического оборудования в подвижных мастерских // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 309-316.
6. **База данных** для программ моделирования комплектации технологического оборудования в подвижных средствах восстановления вооружения и военной техники Воздушно-десантных войск [Текст]: Свидетельство о гос. регистрации базы данных 2020621425 Рос. Федерация / Гавзов В.В., Щенёва Ю.Б. [и др.]; Правообладатель РВВДКУ (RU); заявл. 2020621309 04.08.2020; опубл. 13.08.2020, Бюл. № 8 – 1 с.
7. **Программа** моделирования рационального комплекта технологического оборудования для вооружения и военной техники Воздушно-десантных войск в подвижных мастерских технического обслуживания и ремонта. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020662864 Рос. Федерация / Гавзов В.В., Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С. [и др.]; Правообладатель РВВДКУ (RU); заявл. № 2020662241 13.10.2020; опубл. 20.10.2020, Бюл. № 10. 1 с.
8. Демидова Л.А. Соколова Ю.С. Разработка двухуровневого классификатора сложноорганизованных многомерных данных больших объемов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 56. С. 71-82.
9. Демидова Л.А., Тиштин Р.В., Юдаков А.А. Разработка ансамбля алгоритмов кластеризации на основе матриц подобия меток кластеров и алгоритма спектральной факторизации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 46-1. С. 9-17.
10. Майков К.А., Пылькин А.Н., Кузьменко С.Н., Теплов А.А. Алгебраические особенности композиции алгоритмов вычисления фрактальных структур // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 76. С. 117-127.
11. Яндыбаева Н.В., Кушников В.А. Математические модели, алгоритмы и комплексы программ для мониторинга эффективности образовательной деятельности вуза // Проблемы управления. 2015. № 1. С. 53-63. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22958726> (дата обращения: 12.09.2025).
12. Подиновский В.В. Идеи и методы теории важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. М.: Наука. 2019. 103 с.
13. Проектирование и разработка клиент-серверных приложений. Часть 1: учеб. пособие/ Ю.Б. Щенёва; Рязанский государственный радиотехнический университет. – Рязань, 2024. 124 с.
14. **База данных** для формирования специального комплекта оборудования технической системы методами многокритериальной оптимизации [Текст]: Свидетельство о гос. регистрации базы данных 2025623893 Рос. Федерация / Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С.; Правообладатель ФГБОУ ВО РГРТУ им. В.Ф. Уткина (RU); заявл. 2025623530 14.08.2025; опубл. 18.09.2025, Бюл. № 8. 1 с.

15. Модель формирования специального комплекта оборудования технической системы с использованием многокритериальной оптимизации. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025685660 Рос. Федерации / Щенёва Ю.Б., Щенёв Е.С.; Правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ им. В.Ф. Уткина» (RU); заявл. № 2025683643 14.08.2025; опубл. 25.09.2025.

UDC 004.65

MULTI-CRITERIA DATA ANALYSIS MODEL FOR DECISION SUPPORT SYSTEM

Y. B. Shcheneva, senior lecturer of CAM department, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-6351-0399, e-mail: Shenyova@yandex.ru

A. N. Pylkin, Ph.D. (Engineering), professor of CAM department, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-9925-2870, e-mail: pylkin.a.n@rsreu.ru

E. S. Shchenev, graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0005-8438-7445, e-mail: Jheka1235317@gmail.com

The problem of constructing a multi-criteria data analysis model in various applied fields for a decision support system is considered. The aim of the work is to develop a multi-criteria data analysis model on the basis of which flexible and adaptable decision support systems for various fields of knowledge will be implemented. An innovative approach to optimization model construction based on trajectories analysis in multidimensional metric spaces is proposed. The conducted research has shown that the implementation of a multi-criteria decision support system varies significantly. It depends on application area and occurs despite the uniform modeling methodology. Thus, the paper presents a comparative analysis of educational process and technical system modeling results. Particular indicators are selected that reflect information process management dynamics and determine corresponding metric space dimension to formalize the task. The choice of methods for aggregating these indicators into a single generalized criterion in n-dimensional space is substantiated. Based on the results obtained, the principle of constructing trajectories in multidimensional metric spaces is described. This is necessary to increase information process management efficiency in various applications. The research practical significance lies in the possibility of adapting the proposed multi-criteria data analysis model for various fields of knowledge. The scientific novelty lies in the automation of decision-making through the usage of modern multi-criteria optimization methods.

Keywords: multi-criteria data analysis, decision support system, multi-criteria optimization, multidimensional metric spaces, trajectories in metric spaces, information process management, generalized indicator, applied areas of modeling, decision automation, comparative analysis of models, information system.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-124-138

References

1. **Shcheneva Yu.B., Pylkin A.N., Bubnov S.A., Bubnov A.A., Shchenev E.S.** Information process management based on trajectory Analysis in multidimensional metric spaces. 8th Computational Methods in Systems and Software 2024. System Design in Software Engineering // Proceedings of 8th Computational Methods in Systems and Software 2024, Artificial Intelligence for System Oriented Design. CoMeSySo 2024. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 1489. Springer, Cham (Scopus).
2. **Shchenyova Yu.B., Pylkin A.N., Shchenyov E.S., Bodrov O.A.** Model' osvoeniya obrazovatel'nyh kompetencij s ispol'zovaniem instrumentariya intellektual'nogo analiza dannyh. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2023, no. 84, pp. 119-132. (in Russian).
3. **Shcheneva Yu.B.** Algoritm mnogokriterial'nogo analiza dannyh dlya sistem podderzhki prinyatiya reshenij. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2025, no. 92, pp. 203-213. (in Russian).
4. **Shcheneva Yu.B., Shchenev E.S., Pylkin A.N., Maikov K.A.** Model' processa formirovaniya spesial'nogo komplekta oborudovaniya tekhnicheskoy sistemy s ispol'zovaniem mnogokriterial'noj optimizacii.

Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2025, no. 93, pp. 130-142. (in Russian).

5. **Shcheneva Yu.B., Gavzov V.V., Shchenev E.S., Areshin G.V.** Programmnyj algoritm modelirovaniya komplektacii tekhnologicheskogo oborudovaniya v podvizhnyh masterskih. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* 2021, no. 5, pp. 309-316. (in Russian).

6. *Baza dannyh dlya programm modelirovaniya komplektacii tekhnologicheskogo oborudovaniya v podvizhnyh sredstvah vosstanovleniya vooruzheniya i voennoj tekhniki Vozdushno-desantnyh vojsk [Tekst]: Svidetel'stvo o gos. registraci bazy dannyh 2020621425 Ros. Federaciya / Gavzov V.V., Shcheneva Yu.B. [i dr.]; Pravoobladatel' RVVDKU (RU); zayavl. 2020621309 04.08.2020; opubl. 13.08.2020, Byul, no. 8, 1 p.* (in Russian).

7. *Programma modelirovaniya racional'nogo komplekta tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya vooruzheniya i voennoj tekhniki Vozdushno-desantnyh vojsk v podvizhnyh masterskih tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta.* Svidetel'stvo o gos. registraci programmy dlya EVM № 2020662864 Ros. Federaciya / Gavzov V.V., Shchenyova Yu.B., Shchenyov E.S. [i dr.]; Pravoobladatel' RVVDKU (RU); zayavl. no. 2020662241 13.10.2020; opubl. 20.10.2020, Byul. no. 10. 1 p. (in Russian).

8. **Demidova L.A. Sokolova Yu.S.** Razrabotka dvuhurovnevogo klassifikatora slozhnoorganizovannyh mnogomernyh dannyh bol'shih ob"emov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2016, no. 56, pp. 71-82. (in Russian).

9. **Demidova L.A., Tishkin R.V., Yudakov A.A.** Razrabotka ansambla algoritmov klasterizacii na osnove matric podobiya metok klasterov i algoritma spektral'noj faktorizacii. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2013, no. 46-1, pp. 9-17. (in Russian).

10. **Majkov K.A., Pyl'kin A.N., Kuz'menko S.N., Teplov A.A.** Algebraicheskie osobennosti kompozicii algoritmov vychisleniya fraktal'nyh struktur. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2020, no. 76, pp. 117-127. (in Russian).

11. **Yandybaeva N.V., Kushnikov V.A.** Matematicheskie modeli, algoritmy i kompleksy programm dlya monitoringa effektivnosti obrazovatel'noj deyatel'nosti vuza. *Problemy upravleniya.* 2015, no. 1, pp. 53-63. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22958726> (date of request: 09/12/2025). (in Russian).

12. **Podinovsky V.V.** *Idei i metody teorii vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'nyh zadachah prinyatiya reshenij.* Moscow: Nauka. 2019, 103 p. (in Russian).

13. *Projektirovanie i razrabotka klient-servernyh prilozhenij. Chast' 1: ucheb. posobie/ Yu.B. Shchenyova; Ryazanskij gosudarstvennyj radiotekhnicheskij universitet.* Ryazan. 2024, 124 p. (in Russian).

14. *Baza dannyh dlya formirovaniya special'nogo komplekta oborudovaniya tekhnicheskoy sistemy metodami mnogokriterial'noj optimizacii:* Svidetel'stvo o gos. registraci bazy dannyh 2025623893 Ros. Federaciya / Shchenyova Yu.B., Shchenyov E.S.; Pravoobladatel' FGBOU VO RGRTU im. V.F. Utkina (RU); zayavl. 2025623530 14.08.2025; opubl. 18.09.2025, no. 8, 1 p. (in Russian).

15. *Model' formirovaniya special'nogo komplekta oborudovaniya tekhnicheskoy sistemy s ispol'zovaniem mnogokriterial'noj optimizacii.* Svidetel'stvo o gos. registraci programmy dlya EVM no. 2025685660 Ros. Federaciya / Shchenyova Yu.B., Shchenyov E.S.; Pravoobladatel' FGBOU VO «RGRTU im. V.F. Utkina» (RU); zayavl. № 2025683643 14.08.2025; opubl. 25.09.2025.