

В.И. ПИМЕНОВ, И.В. ПИМЕНОВ
**АНАЛИЗ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ
РЕШЕНИЙ**

Пименов В.И., Пименов И.В. Анализ и визуализация данных в задачах многокритериальной оптимизации проектных решений.

Аннотация. Накопление данных о процессах управления проектами и типовых решениях сделало актуальными исследования, связанные с применением методов инженерии знаний для многокритериального поиска вариантов, которые задают оптимальные настройки параметров проектной среды. Цель: разработка методики поиска и визуализации групп проектов, которые могут быть оценены на основе концепции доминирования и интерпретироваться в терминах проектных переменных и показателей эффективности. Методы: обогащение выборки с сохранением неязной связи между проектными переменными и показателями эффективности осуществляется с помощью прогнозирующей нейросетевой модели. Для обнаружения фронта Парето в многомерном критериальном пространстве используется набор генетических алгоритмов. Онтология проектов определяется после кластеризации вариантов в пространстве решений и преобразования кластерной структуры в критериальное пространство. Автоматизация поиска в многомерном пространстве зоны наибольшей кривизны фронта Парето, определяющей равновесные проектные решения, их визуализация и интерпретация осуществляются с помощью плоского дерева решений. Результаты: плоское дерево строится при любой размерности критериального пространства и имеет структуру, которая имеет топологическое соответствие с проекциями разделяемых образов кластеров из многомерного пространства на плоскость. Для различных видов преобразований и корреляций между показателями эффективности и проектными переменными показано, что участки наибольшей кривизны фронта Парето определяются либо содержанием целого кластера, либо частью вариантов, представляющих “лучший” кластер. Если на плоском дереве к правому верхнему углу примыкает неразделенный прямоугольный кластер, то его представители в критериальном пространстве хорошо отделены от остальных кластеров и при максимизации показателей эффективности наиболее приближены к идеальной точке. Все представители такого кластера являются эффективными решениями. Если кластер-победитель содержит внутри дерева решений доминируемые варианты, то “лучший” кластер представляют оставшиеся варианты, которые задают оптимальные настройки проектных переменных. Практическая значимость: предложенная методика поиска и визуализации групп проектов может найти применение при выборе условий ресурсного и организационно-экономического моделирования проектной среды, обеспечивающих оптимизацию рисков, стоимостных, функциональных и временных критериев.

Ключевые слова: управление проектом, многокритериальная классификация, нейронная сеть, генетический алгоритм, фронт Парето, кластерная структура, визуализация, плоское дерево решений.

1. Введение. Отличительное свойство, которое выделяет проект среди существующих экономических, промышленных, коммерческих, информационных процессов, – новизна целей и условий реализации. В основе управления проектами лежит традиционный треугольник

контроля качества, времени и затрат [1], что, однако, не исчерпывает всей многомерности проекта как объекта управления [2]. Агрегированное описание X проектной среды разделяется на две основные группы: группу ресурсного моделирования и группу организационно-экономического моделирования [3]. Кроме того, оценивать эффективность проекта требуется на разных стадиях жизненного цикла [4].

Технологические и технические ресурсы определяют условия реализации производственного процесса: условия труда, время производственного цикла, использование основных и оборотных средств, состояние научно-технического развития и удовлетворение потребностей потребительского рынка. Человеческие ресурсы характеризуют обеспечение производственного процесса требуемой численностью работников соответствующей специальности и квалификации, нормой рационального использования кадров, организацией системы оплаты труда, наличием системы стимулирования и мотивации работников. Информационные ресурсы связаны с необходимостью получения достоверных данных и их обработкой с использованием современных программных средств. Пространственно-временные ресурсы определяются географическими, геологическими, геометрическими и временными переменными.

Группа показателей себестоимости и ценообразования определяется с учетом производственных и рыночных факторов, а также в соответствии с требованиями налоговой системы. Организационные факторы включают в себя все аспекты управления структурой организации, производственным процессом, а также финансовыми и правовыми механизмами. Финансовые показатели раскрывают источники капитала для реализации проекта, а также возможности по предоставлению этого капитала. Показатели экономической эффективности определяют целесообразность инвестирования на каждом этапе реализации проекта на основе нормативных, статистических, методических и экспертных позиций.

Для оценки эффективности проекта обычно выбираются стоимостные, функциональные и временные показатели Y . Управление проектом сводится к организации и направлению ресурсов таким образом, чтобы проект был завершен в рамках бюджетных затрат, достижению заданного уровня качества продукта или услуги, функциональности программно-технической системы, а также к минимизации рисков и потерь. Социальная эффективность проявляется в улучшении среды проживания, доходов и качества жизни населения.

Процесс формирования проектного решения представлен на рисунке 1.

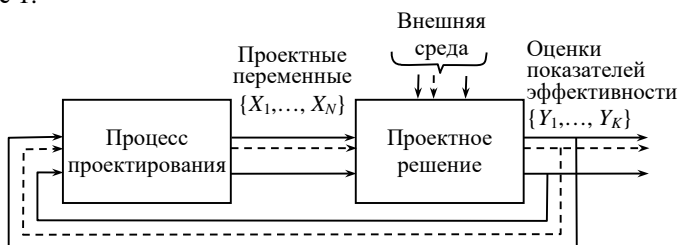


Рис. 1. Формирование проектного решения

На начальном этапе, после рассмотрения конкретного содержания проекта, его причинно-следственных связей, определяются существенные входные переменные $\{X_1, \dots, X_N\}$, оказывающие влияние на состояние проекта, а также набор показателей $\{Y_1, \dots, Y_K\}$, по которым оценивается его эффективность. Примеры содержательного анализа различных прикладных проектов и критериального аппарата, предоставляющего возможность объективного сравнения вариантов их реализации, приведены в [1, 3–10].

Процессы проектирования опираются на методики и инструкции, определяющие диапазоны варьируемых проектных переменных и показателей конфигурации, которые образуют допустимую область решений $\mathbf{X} \in \mathbf{X}$.

Воздействия внешней среды на проект ограничивают проектные процессы под влиянием социальных норм, культуры производства, военно-политической обстановки, рисков, инфляции и пр.

Показатели эффективности проектного решения являются теми выходными характеристиками, которые позволяют классифицировать и интерпретировать проектное решение в критериальном пространстве \mathbf{Y} .

Ключевым этапом при формировании проектного решения является построение модели преобразования $\mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y}$. Его выполнение является трудноформализуемой задачей по ряду признаков: принципиальной невозможности точного описания всех взаимосвязей (часто нелинейных) между проектными переменными и показателями эффективности, большой размерности пространства $\mathbf{X} \times \mathbf{Y}$, динамически изменяющимся информационным потоком на разных стадиях жизненного цикла, ограниченным финансовым ресурсам.

Более того, при наличии альтернативных проектных решений (вариантов реализации проекта), многомерная модель должна предоставлять возможность семантической интерпретации предлагаемых вариантов, формулировать те законы и правила, по которым происходит отнесение проектного решения к определенному уровню эффективности, визуализировать варианты реализации с сохранением топологического соответствия между их образами в многомерных пространствах.

Объектом исследования является процесс моделирования преобразования $X \rightarrow Y$ при формировании проектного решения. Предметом исследования являются методы анализа вариантов проектных решений, их визуализации и интерпретации.

Предполагается, что поиск, оценка и визуализация групп проектов, как сложных многомерных объектов, могут быть осуществлены на основе концепции доминирования и методов машинного обучения, в рамках которых решаются задачи автоматической классификации вариантов, построения модели взаимосвязей $X \rightarrow Y$ и визуализации кластерной структуры с упорядочением групп проектов по уровню эффективности.

2. Оценивание показателей эффективности проекта.

Расчетные методики оценки эффективности научно-технического, организационного, экономического, социального или ИТ-проекта базируются на соотношении затрат (включающих связанные с резервированием и страхованием, а также санкций) и результатов. Расчет статических и динамических показателей Y включает в себя выполнение требуемой нормы доходности проекта, анализ структуры цены и капитала, оценивание значимости рисков, учет инфляции и пр. [11]. Оценки эффективности инвестиций в ИТ-проекты, связанные с электронной формой предоставляемых товаров и услуг, могут быть получены через положительный эффект, достигаемый производственной надсистемой, в интересах которой внедряются информационные технологии [5].

При оценивании инвестиционных проектов, занимающих значительную часть проектной деятельности современной компании, в силу неопределенности воздействия экзогенных факторов, нет возможности просчитать количественные оценки некоторых финансовых показателей и получить экономическую эффективность проекта.

Оценить потенциальную привлекательность проекта и инвестиционные риски можно на основе методов имитационного моделирования [12–13]. В ряде случаев оценивание вероятности того

или иного решения при различных условиях реализации проекта может произвести проект-менеджер [14]. Однако прогнозирование значений показателей эффективности может быть выполнено экспертом при воздействии на проектную ситуацию не более 3–5 входных переменных, причем слабо зависимых между собой [15]. Кроме того, качество проектного решения определяется набором показателей, что приводит к построению многокритериальных моделей оптимизации.

При создании проекта в технической сфере имеет место значительное количество компромиссных конфигураций выпускаемого промышленного продукта и параметров, оказывающих влияние на эффективность разработки [8], что делает объекты проектирования не только многомерными, но и структурно неопределенными. Особенность многокритериальной оптимизации – в том, что показатели эффективности проектов являются взаимозависимыми и при измерении степени достижения одной или нескольких целей демонстрируют противоречивое влияние [9].

Известный подход к выбору компромиссного варианта, использующий свертывание системы показателей эффективности и оптимизацию интегрального показателя, основан на предпочтениях экспертов [16].

Вместе с тем, энтропия проектной ситуации в условиях изменчивости проектной среды может быть существенно снижена на основе данных, накопленных в ранее реализованных проектах [17–19].

3. Подход к анализу проектных решений на основе концепции доминирования и методов машинного обучения. Непрерывный сбор данных о процессах управления проектами и использование инструментов бенчмаркинга при исследовании лучших практик, типовых решений позволяют выделить отдельные параметры проекта и оценить эффекты их изменения по группе эталонных проектов, например, на основе дисперсионного анализа [2].

Возможность исследовать механизм конкуренции между показателями эффективности и исключить субъективизм при выборе решения дает рассмотрение пространственного распределения репрезентативного набора вариантов из множества Парето [20].

Пусть \mathcal{X} – допустимая область решений (пространство возможных реализаций проекта).

Требуется:

1) найти такое множество векторов P^* , $P^* \in \mathcal{X}$, для которого выполняется условие:

$$Y(X) < Y(X) \forall X \in P^*,$$

при наличии массива накопленных данных:

$$(X^{<1>}, \dots, X^{<N>}, Y^{<1>}, \dots, Y^{<K>})_{n \times (N+K)},$$

в которых в неявном виде представлены ограничения на значения проектных переменных X (задающие пространство возможных реализаций проекта χ) и зависимости $X \rightarrow Y$;

2) выполнить визуализацию множества P^* в критериальном пространстве:

$$FP^* = \{Y(X) = [Y_1(X), Y_2(X), \dots, Y_K(X)] : X \in P^*\},$$

которая дает возможность исследовать распределение элементов множества FP^* при размерности пространства $K > 3$ и выбрать решение X^* , оптимизирующее по Парето вектор показателей эффективности:

$$Y(X) = [Y_1(X), Y_2(X), \dots, Y_K(X)].$$

Каждый вариант представляется в двух векторных пространствах – пространстве решений X и критериальном пространстве Y . Образ допустимой области решений $Y(\chi)$ может быть исследован для выявления множества Парето только при получении знания об отображении пространства X в Y , которое зачастую является нелинейным [21].

При наличии данных требуемые знания фиксируются в обученной нейронной сети. Поскольку числовые, порядковые и номинальные показатели предварительно соответствующим образом нормализуются, интерпретация образов векторов осуществляется с использованием евклидовой метрики, как для количественных признаков, не имеющих разрывов значений. Таким образом, непрерывность отображения $X \rightarrow Y$ между показателями проекта обеспечивает превращение близких точек – N -мерных векторов решения в близкие точки – m -мерные векторы показателей эффективности.

После применения автоматической классификации, которая основана на гипотезе компактности, распределение близких вариантов

по однородным группам должно сохранять в пространствах X и Y топологическое подобие (рисунок 2). При оптимизации показателей эффективности поиск осуществляется в пространстве решений таким образом, что каждый вариант может быть прослежен в критериальном пространстве и оценен на основе концепции доминирования.

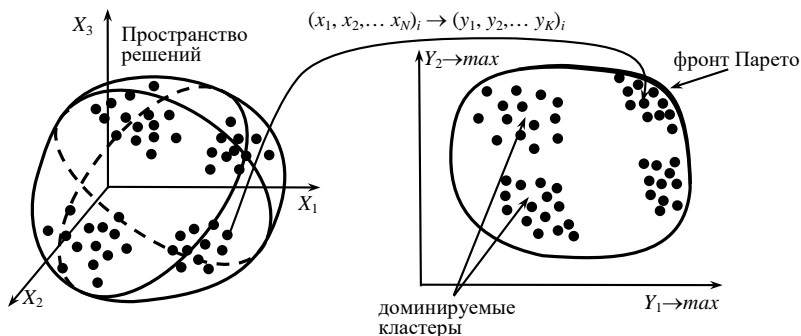


Рис. 2. Преобразование пространства решений в критериальное пространство $X \rightarrow Y$ ($N = 3$, $K = 2$)

В простейшем случае, при одномерной классификации, классы решений упорядочены по оценкам значения заданного показателя эффективности: ценности кредитного проекта, его степени риска, состояния спроса на производимую продукцию, уровня загрузки производственных мощностей, качества ремонта технической системы и т.д.

Многомерная же классификация может осуществляться на основе агрегирования оценок отдельных параметров проектной среды X , например, в случае оценивания кредитов по группам риска, полученных от банковских работников, или на основе экспертной оценки кредитным работником показателей Y .

Процедура классификации, как отнесение исследуемых вариантов к категориям проектов, призвана снизить неопределенность в процессе принятия решений.

4. Методика анализа и визуализации проектных решений с использованием автоматической классификации данных. Основные этапы анализа вариантов проектных решений на основе автоматической классификации данных приведены на рисунке 3.

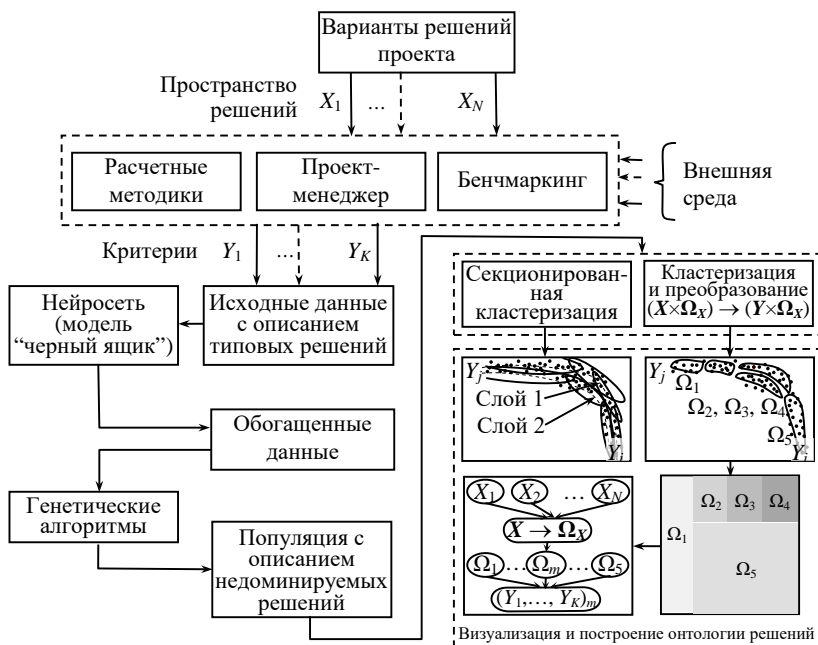


Рис. 3. Анализ и визуализация проектных решений

Автоматическая классификация в пространствах X или Y требует наличия данных значительного объема, отсутствующих, как правило, в проектной практике. Обогащение выборки с сохранением неявной связи между проектными переменными и показателями эффективности может выполняться с помощью прогнозирующей нейросетевой модели, обученной на наборе доступных прецедентов [22].

Чтобы прогнозирующая нейросетевая модель была повторяемой и согласованной во всем пространстве проектирования, обучение следует проводить с привлечением методов активного планирования эксперимента, когда обучающая выборка представляет объекты, распределенные по всем диапазонам значений переменных $\{X_1, \dots, X_N\}$ для заполнения пространства проектирования. Сгенерированные таким образом варианты будут заполнять как области с низкими значениями показателей эффективности, так и области с высокими значениями показателей.

Исследование вариантов выполняется среди недоминируемых решений, которые образуют множество Парето P^* . В нем каждый вариант может быть улучшен альтернативным решением как минимум по одному показателю эффективности без ухудшения других показателей.

Образ множества Парето в критериальном пространстве определяет фронт Парето FP^* . При максимизации показателей $Y_j, j = \overline{1, K}$, фронт Парето находится в многомерном критериальном гиперпространстве над облаком вариантов со стороны идеальной точки, координаты которой определяются оптимальными значениями локальных показателей эффективности.

Для уплотнения ядра Парето-оптимальных проектов, представляющих в многомерном пространстве Y фронт Парето, используется набор генетических алгоритмов [23–25]. В качестве начальной популяции используется обогащенная выборка. В хромосоме особи зашифровывается комбинация значений проектных переменных. В каждом поколении с помощью обученной нейросетевой модели находят оценки показателей эффективности и уточняется фронт Парето.

Дальнейшее сужение пространства поиска связано со структуризацией недоминируемых решений.

В ситуациях, когда множество эффективных решений оказывается незначительным, обосновано применение нескольких слоев Парето. Например, при оценке акций по нескольким критериям [26].

В первый слой попадают Парето-оптимальные варианты. Варианты, полученные после исключения попавших в слой 1 объектов, принадлежат слою 2, затем слою 3 и так далее. Варианты, отнесенные ко второму и третьему слоям, хотя и доминируются элементами предшествующего слоя, как правило, имеют достаточно высокие значения показателей эффективности, и их целесообразно рассматривать наряду с Парето-оптимальными вариантами слоя 1, если число объектов во множестве Парето недостаточно.

При максимизации двух показателей первые слои располагаются в правой верхней части диаграммы размещения вариантов в пространстве критериев. Последующие слои располагаются ниже и левее. Включение каждого дополнительного слоя означает добавление вариантов с худшими значениями показателей, чем в предыдущих слоях. Поэтому, с одной стороны, увеличение количества слоев приводит к снижению среднего значения

каждого показателя по всем отобраннным вариантам. Однако, с другой стороны, коэффициент вариации (отношение стандартного отклонения показателя к его среднему) также имеет тенденцию к падению с увеличением количества слоев. В экономических приложениях это означает снижение риска создаваемого портфеля инвестиционных решений. Поэтому количество используемых слоев определяется компромиссом между средней прибыльностью решений и риском.

Другой подход к структуризации фронта Парето заключается в кластеризации данных. В этом случае осуществляется выделение кластера, из которого выбирается образ желаемого решения [27, 28], либо представитель выбирается в каждом кластере [10], а образ желаемого решения выбирается среди установленного подмножества вариантов – представителей от каждого кластера.

Методология секционированной кластеризации множества Парето в критериальном пространстве [8] позволяет найти группы проектов, имеющих общий профиль по показателям эффективности $\{Y_1, \dots, Y_K\}$. Например, один кластер будет включать проекты, которые имеют высокое качество по одному показателю, и низкое качество по другим. Другой кластер может включать усредненные проекты, которые не являются лидерами ни по одному показателю. На практике проекты, реализующие экстремальные конфигурации промышленных изделий, не превосходят варианты, основанные на более сбалансированных конструкциях. Подобная неиерархическая кластеризация [29], основанная на заданном числе кластеров, игнорирует сходство вариантов в пространстве проектных переменных X .

Вместе с тем, на ранней стадии проектирования гораздо легче реализовать процедуры оценки схожести различных решений на основе обработки данных о проектных переменных. Дальнейшая интерпретация проектных решений возможна при наличии значимой связи между данными в пространствах X и Y . Степень влияния пространства решений X на критериальное пространство Y устанавливается с помощью канонического корреляционного анализа [30].

Для выбора окончательного решения требуется интерпретация фронта Парето. Предпочтения эксперта, зачастую используемые на практике, дают субъективно наилучшее решение. Переход в режим автоматического выбора решения возможен на основе минимизации расстояния до идеальной точки, координаты которой определяются оптимальными значениями показателей [31, 32]. При вычислении расстояний используют простейшую евклидову метрику. Образ

полученного таким методом решения находится в зоне наибольшей кривизны кривой, аппроксимирующей фронт Парето [33, 27].

Геометрия фронта Парето, сформированного при пополнении популяции на основе генетической мутации особей, определяет распределение компромиссных (равновесных) решений между так называемыми якорными точками. Такие точки соответствуют образам асимптотических решений задач однокритериальной оптимизации и задают диапазоны изменения каждого показателя на Парето-фронте [25]. В случае исследования проектов в технической сфере, точки, лежащие в окрестности якорных точек, характеризуют узкоспециальные варианты с большими значениями одного из показателей эффективности. Варианты со средними значениями показателей являются более универсальными.

Набор наиболее эффективных решений позволяет сформировать выделение зоны максимальной кривизны кривой, аппроксимирующей фронт Парето [34]. Поиск и исследование данной зоны возможны при использовании специальных средств визуализации данных.

Разработанный в Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» РАН визуализатор Pareto Front Viewer [35] позволяет выполнять ортографическое построение фронта Парето для ограниченного числа показателей эффективности. Например, фронт Парето строится на плоскости $Y_1 - Y_2$ с использованием цветовой шкалы для третьего показателя Y_3 .

Для выявления зоны наибольшей кривизны фронта Парето в многомерном критериальном пространстве неограниченной размерности предлагается использовать результаты кластеризации данных в области решений. Далее, группы проектов, имеющих близкий профиль $\Omega_m, m = \overline{1, M}$, восстанавливаются в критериальном пространстве с помощью обученной нейросети. На заключительном этапе дискретизированное ортографическое представление и интерпретация эффективных вариантов осуществляются с помощью плоского дерева решений.

Преобразование кластерной структуры $\Omega_x = \{\Omega_1, \dots, \Omega_M\}$ в критериальное пространство Y :

$$(X \times \Omega_x) \rightarrow (Y \times \Omega_x),$$

позволяет построить плоское дерево решений $Y \rightarrow \Omega_x$, которое дает возможность выбрать кластер эффективных проектов Ω_m^* и указать

для него интервалы значений проектных переменных и показателей эффективности.

5. Проверка методики при визуализации и интерпретации проектных решений с помощью плоского дерева. В рамках определенного проекта можно зафиксировать знания лишь о конкретном преобразовании $X \rightarrow Y$. Поэтому, чтобы продемонстрировать возможности ортографического представления и интерпретации эффективных вариантов при различных преобразованиях, сформируем набор данных (датасет) и выполним имитацию различных отображений $X \rightarrow Y$ линейного и нелинейного вида, включая парные зависимости $X_j - Y_j$ как с положительной, так и отрицательной корреляциями. Пусть допустимая область решений X определена в пространстве трех числовых входных переменных, с разделением данных на 4 кластера (рисунок 4). Расстояние до центра кластера кодируется размером символа – большая метка означает, что вариант находится ближе к центру кластера.

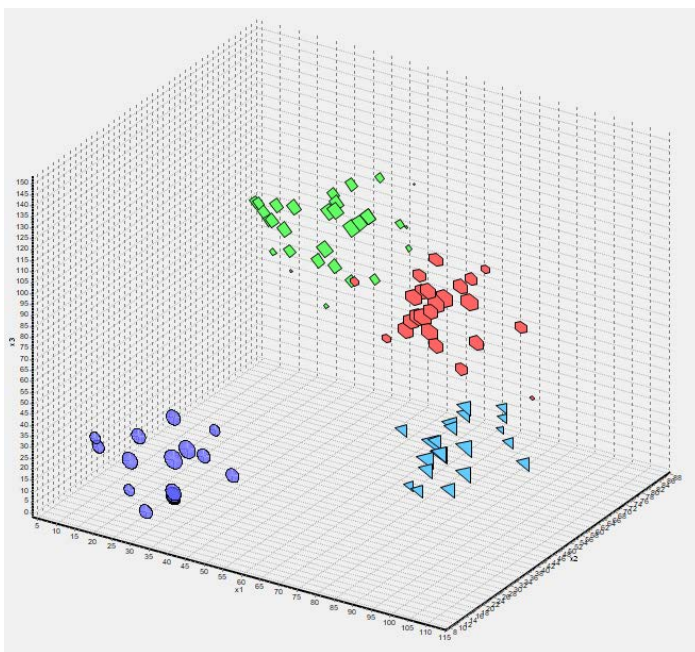


Рис. 4. Кластеризация набора данных в пространстве решений X

Будем считать, что улучшению качества решения соответствует увеличение значений числовых показателей. Чтобы продемонстрировать соответствие найденных с помощью плоского дерева решений зоне наибольшей кривизны фронта Парето, ограничимся мощностью $|Y| = 2$.

Покажем, как с помощью канонического корреляционного анализа устанавливается влияние пространства решений на критериальное пространство. Выполним моделирование нелинейного преобразования трехмерного пространства X в двумерное пространство Y с помощью системы уравнений:

$$\begin{aligned} y_1 &= 92 - (x_1 + 10x_2 + 0,1x_3^2)/32, \\ y_2 &= 92 - 4(50/x_1 + 50/x_2 + 50/x_3). \end{aligned}$$

В статистическом приложении найдем линейные комбинации двух групп $\{X_i\}$, $i = \overline{1,3}$, и $\{Y_j\}$, $j = \overline{1,2}$, которые имеют наибольшую корреляцию. Первая каноническая переменная представлена линейной комбинацией трех стандартизированных входных переменных:

$$L_1 = -0,009x_1 - 0,174x_2 - 0,953x_3,$$

вторая – комбинацией двух стандартизированных показателей эффективности:

$$L_2 = 0,91y_1 - 0,15y_2.$$

Графическое отображение набора данных на плоскости $L_1 - L_2$ подтверждает наличие влияния группы переменных $\{X_1, X_2, X_3\}$ на группу показателей $\{Y_1, Y_2\}$ (рисунок 5).

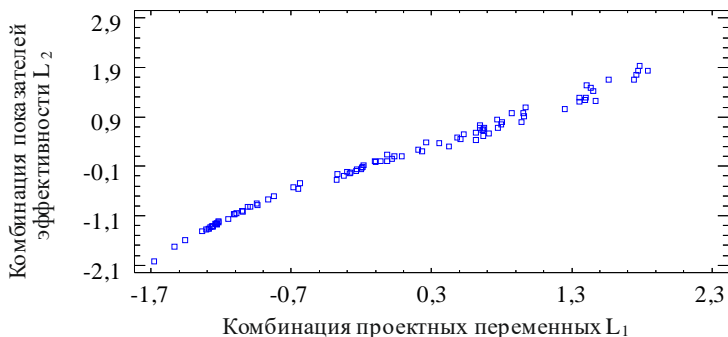


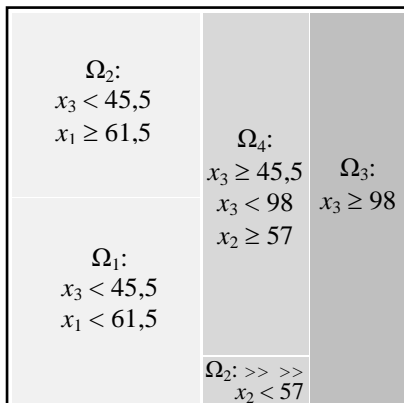
Рис. 5. Диаграмма рассеяния на плоскости канонических переменных (нелинейные преобразования $X \rightarrow Y$)

Установив наличие значимой связи между данными в пространствах X и Y , выполним дальнейшую визуализацию вариантов решений и их образов в критериальном пространстве, с помощью которых осуществляется выделение кластера наиболее эффективных проектов.

Выполним визуализацию набора данных в пространстве решений (рисунок 4) с помощью плоского дерева [36]. В общем случае такое ортографическое представление может быть построено при любой размерности пространства решений.

Чтобы плоское дерево имело дискретную структуру, которая имеет топологическое соответствие с проекциями разделяемых образов кластеров из многомерного пространства решений на плоскость, используется адаптивное квантование пространства X с помощью генетического алгоритма [37].

Для данных рассматриваемого тестового примера дискретная модель $X \rightarrow \Omega_X$ представлена плоским деревом, осуществляющим преобразование комбинации значений трех проектных переменных в один из четырех кластеров (рисунок 6). Каждая ветвь традиционного решающего дерева соответствует прямоугольнику, внутри которого могут находиться дочерние ветви или листья. Количество объектов, попавших в узел, определяет размеры прямоугольников.

Рис. 6. Плоское дерево решений $X \rightarrow \Omega_X$

Для поиска наиболее эффективных проектов используем плоское дерево решений, которое визуализирует кластерную структуру Ω_X в критериальном пространстве Y .

Соответствие зоны наибольшей кривизны фронта Парето найденному на дереве кластеру проверим при различных преобразованиях пространств $X \rightarrow Y$ линейного и нелинейного вида, моделируя парные зависимости “вход–выход” как с положительной, так и с отрицательной корреляциями. При использовании методики анализа и визуализации проектных решений преобразование данных $X \rightarrow Y$ фиксируется в обученной нейросетевой модели.

Распределение кластеризованных вариантов в критериальном пространстве после линейного преобразования $X \rightarrow Y$, при наличии корреляций одного знака между показателями эффективности и проектными переменными, приведено на рисунке 7.

Компромиссные решения со средними значениями показателей лежат в зоне наложения кластеров Ω_2 и Ω_4 . При максимизации показателей Y_1, Y_2 доминирующими будут решения, ассоциированные с кластером Ω_2 .

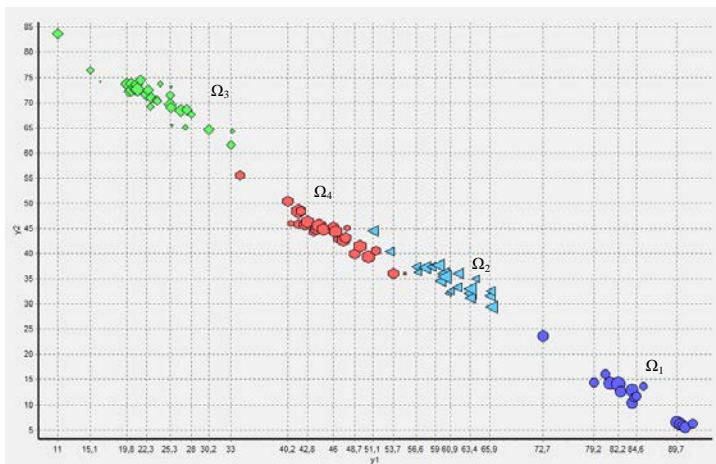


Рис. 7. Представление кластерной структуры Ω_X в критериальном пространстве Y при линейном отображении $(X_1, X_2, X_3) \rightarrow (Y_1, Y_2)$

Соответствующее плоское дерево решений $Y \rightarrow \Omega_X$ представлено на рисунке 8. Образ идеальной точки расположен в правом верхнем углу. Эффективными будут проекты, относящиеся ко второму кластеру, прямоугольный образ которого примыкает к идеальной точке. Таким образом, решение на основе плоского дерева совпадает с результатами анализа фронта Парето.



Рис. 8. Плоское дерево решений $Y \times \Omega_X$ при линейном преобразовании $X \rightarrow Y$

Распределение кластеризованных вариантов в критериальном пространстве после нелинейного преобразования $X \rightarrow Y$, при наличии

корреляций одного знака между показателями эффективности и проектными переменными, приведено на рисунке 9.

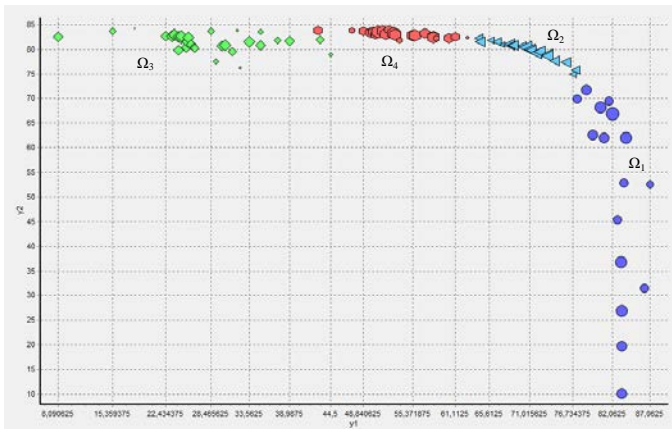


Рис. 9. Представление кластерной структуры Ω_X в пространстве целей Y при нелинейном отображении $(X_1, X_2, X_3) \rightarrow (Y_1, Y_2)$

Компромиссные решения распределены в зоне максимальной кривизны фронта Парето и полностью ассоциируются в данном случае с кластером Ω_2 . Решение на основе плоского дерева также совпадает с результатами анализа фронта Парето: возле идеальной точки размещается единственный прямоугольник второго кластера (рисунок 10).

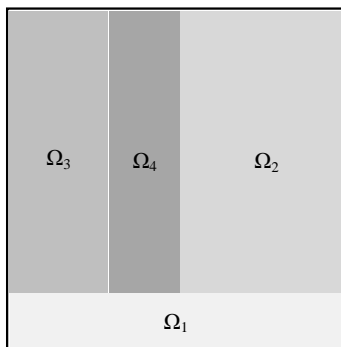


Рис. 10. Плоское дерево решений $Y \times \Omega_X$ при нелинейном преобразовании $X \rightarrow Y$

Распределение кластеризованных вариантов в критериальном пространстве после линейного преобразования $X \rightarrow Y$, при наличии корреляций разного знака между показателями эффективности и проектными переменными, приведено на рисунке 11.

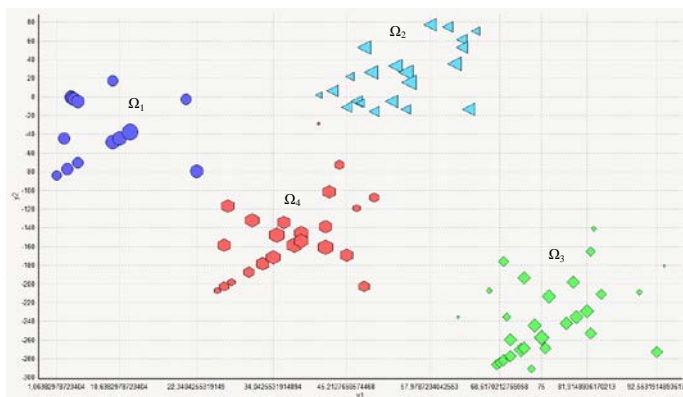


Рис. 11. Представление кластерной структуры Ω_X в пространстве целей Y при линейном отображении $(X_1, X_2, X_3) \rightarrow (Y_1, Y_2)$ и “смешанной” корреляции

Компромиссные решения в данном случае распределены в нескольких слоях Парето и полностью ассоциируются с кластером Ω_2 . Решение на основе плоского дерева также совпадает с результатами анализа фронта Парето: возле идеальной точки размещается единственный прямоугольник второго кластера (рисунок 12).

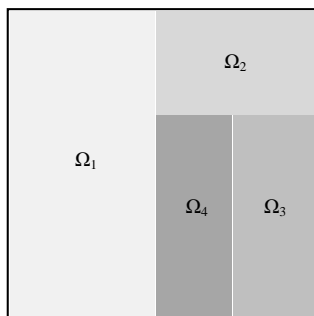


Рис. 12. Плоское дерево решений $Y \times \Omega_X$ при линейном преобразовании $X \rightarrow Y$ и “смешанной” корреляции

Распределение кластеризованных вариантов в критериальном пространстве после нелинейного преобразования $X \rightarrow Y$, при наличии корреляций разного знака между показателями эффективности и проектными переменными, приведено на рисунке 13.

Компромиссные решения в данном случае распределены в нескольких слоях Парето. Доминирующими являются решения, ассоциированные с кластером Ω_3 .

Существующая методология секционированной кластеризации в критериальном пространстве и выбор кластера, попавшего в зону перегиба [8], не позволяют дифференцировать решения по группам Ω_1, Ω_2 и Ω_3 , имеющим сходство в пространстве X .

Предложенная, с использованием нейронной сети, методика переноса кластерной структуры из пространства проектных переменных в критериальное пространство и визуализация кластеров с помощью плоского дерева дают решение, которое совпадает с результатами анализа фронта Парето: возле идеальной точки размещаются прямоугольники кластера Ω_3 (рисунок 14).

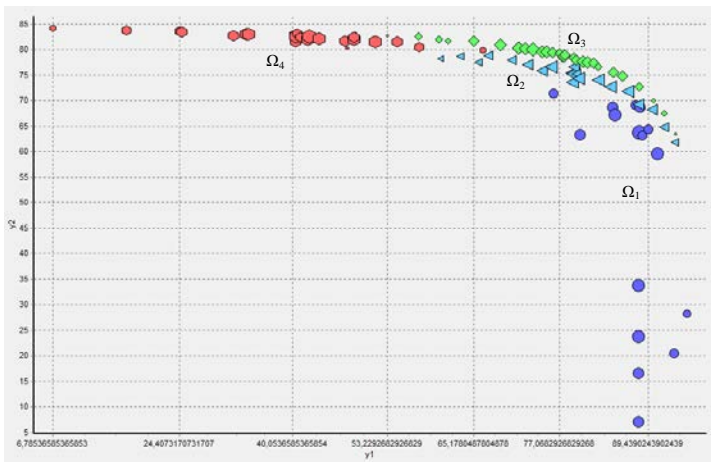


Рис. 13. Представление кластерной структуры Ω_X в пространстве целей Y при нелинейном отображении $(X_1, X_2, X_3) \rightarrow (Y_1, Y_2)$ и “смешанной” корреляции

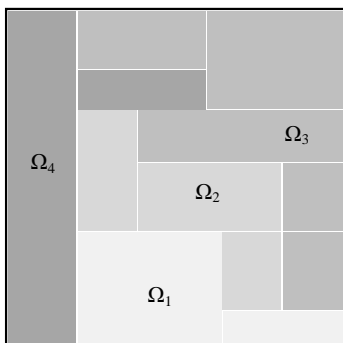


Рис. 14. Плоское дерево решений $Y \times \Omega_x$ при нелинейном преобразовании $X \rightarrow Y$ и “смешанной” корреляции

Как видно из диаграмм рассеяния, участки перегиба фронта Парето определяются либо содержимым целого кластера (рисунки 9, 13), либо частью вариантов, представляющих “лучший” кластер (рисунки 7, 11).

Решение об отборе всех или части представителей кластера принимается после анализа плоского дерева решений $Y \rightarrow \Omega_x$. Если на плоском дереве к правому верхнему углу примыкает неразделенный прямоугольник кластера (рисунок 12), то его представители в критериальном пространстве хорошо отделены от остальных кластеров и, при максимизации показателей $Y_j, j = \overline{1, K}$, наиболее приближены к идеальной точке. Все представители такого кластера являются эффективными решениями. Если на плоском дереве кластер-победитель разделяется на несколько прямоугольников, то недоминируемые образы решений с лучшими значениями проектных переменных определяются примыкающим к правому верхнему углу прямоугольником. Подгруппы доминируемых вариантов кластера определяются прямоугольниками, которые находятся внутри дерева решений – как прямоугольники кластера Ω_2 на рисунке 8.

Построенная в критериальном пространстве на обогащенной выборке модель регрессионной гиперповерхности показывает внутреннюю зависимость между показателями эффективности $Y_j, j = \overline{1, K}$.

6. Заключение. Многомерность проекта как объекта управления включает агрегированное описание ресурсных и организационно-экономических показателей проектной среды, а также

стоимостные, функциональные и временные показатели эффективности. Данные о процессах управления проектами и использование инструментов бенчмаркинга при исследовании типовых решений позволяют установить взаимосвязь показателей эффективности и исключить субъективизм при выборе решения. При многокритериальной оптимизации поиск осуществляется в пространстве решений таким образом, что каждый вариант может быть прослежен в критериальном пространстве и оценен на основе концепции доминирования.

При решении данной задачи получены следующие результаты.

Предложен подход к анализу проектных решений на основе методов машинного обучения.

Поскольку, согласно гипотезе компактности, близкие варианты проектов чаще располагаются в одном кластере, то множество наилучших решений в критериальном пространстве чаще всего соответствует определенному кластеру в пространстве решений.

Так как в проектной практике, как правило, отсутствуют выборки достаточного объема, обогащение данных с сохранением неявной связи между проектными переменными и показателями эффективности может выполняться с помощью прогнозирующей нейросетевой модели, обученной на наборе доступных прецедентов.

Разработана методика анализа, визуализации и интерпретации проектов с помощью плоского дерева решений.

Для обнаружения фронта Парето в многомерном критериальном пространстве используется набор генетических алгоритмов. Наилучший компромисс определяется теми решениями, образы которых распределены в зоне максимальной кривизны кривой, аппроксимирующей фронт Парето. Существующая методология секционированной кластеризации множества Парето в критериальном пространстве позволяет найти группы проектов, имеющих общий профиль по значениям показателей эффективности, однако игнорирует сходство вариантов в пространстве проектных переменных.

Для интерпретации проектных решений при наличии значимой связи между данными в проектном и критериальном пространствах и автоматизации поиска в многомерном пространстве зоны наибольшей кривизны фронта Парето, предложено использовать плоское дерево решений, визуализирующее в критериальном пространстве Y кластерную структуру Ω_x , установленную в пространстве проектных переменных X .

Плоское дерево может быть построено после преобразования $X \rightarrow Y$ при любой размерности критериального пространства и иметь

структуру, которая имеет топологическое соответствие с проекциями разделяемых образов кластеров из многомерного пространства на плоскость.

На тестовом наборе данных показано, что участки наибольшей кривизны фронта Парето определяются либо содержимым целого кластера, либо частью вариантов, представляющих “лучший” кластер. Решение об отборе представителей кластера принимается после анализа плоского дерева решений. Если на плоском дереве к правому верхнему углу примыкает неразделенный прямоугольник кластера, то его представители в критериальном пространстве хорошо отделены от остальных кластеров и, при максимизации показателей $Y_j, j = \overline{1, K}$, наиболее приближены к идеальной точке. Все представители такого кластера являются эффективными решениями. Если кластер-победитель содержит внутри дерева решений подгруппу доминируемых вариантов, то “лучший” кластер представляют оставшиеся варианты, которые задают оптимальные настройки проектных переменных $X_j, j = \overline{1, N}$.

Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с оцениванием эффективности проекта на разных стадиях жизненного цикла, когда на первый план выходит задача прогнозирования и проактивного управления. Поскольку цели, определяющие развитие каждого i -го этапа жизненного цикла, корректируются, на разных этапах развития проекта используются различные пространства $X^{<i>} \times Y^{<i>}$. Прогнозная аналитика опирается как на текущие, так и ретроспективные большие данные. В этом случае многофакторное прогнозирование показателей $Y^{<i>}$ может быть осуществлено привлечением методов снижения размерности подаваемых на вход динамически меняющихся данных и рекуррентных нейронных сетей глубокого обучения, не имеющих ограничений по характеру входных данных и способных решать задачи практически любой сложности.

Литература

1. Perrier N., Benbrahim S.-E., Pellerin R. The core processes of project control: A network analysis // *Procedia Computer Science*. 2018. vol. 138. pp. 697–704.
2. Laursen Markus, Svejvig Per, Gerstrøm Rode Anna Le. Four Approaches to Project Evaluation // *The 24th Nordic Academy of Management Conference (NFF-2017)*. 2017. pp. 1–25.
3. Makeev Vladimir, Isaev Albert, Kulikov Sergey, Stratan Dmitry, Shevkunov Nikolay. Modeling and assessing the effectiveness of investment projects in the agricultural sector // *XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry*. 2019. 10–13 September. vol. 403: 012077.

4. Budeli Lalamani, Wichers J.H. Evaluating aspects of power plant performance using Project Success Life Cycle Model (PSLCM) // *PM World Journal*. 2018, vol. VII. iss. XI. pp. 1–25.
5. Юсупов Р.М., Мусаев А.А. Особенности оценивания эффективности информационных систем и технологий // *Труды СПИИРАН*. 2017. Вып. 2(51), С. 5–34.
6. Chereshtin D., Rozenzon G., Britkov V. Multidimensional classifier of risk analysis methods // 11th World Conference «Intelligent Systems for Industrial Automation» (WCIS-2020). 2020. vol. 1323. pp. 529–536.
7. Koledina K.F., Koledin S.N., Karpenko A.P., Gubaydullin I.M., Vovdenko M.K. Multi-objective optimization of chemical reaction conditions based on a kinetic model // *Journal of Mathematical Chemistry*. 2019. vol. 57, p.p. 484–493.
8. Serafini Marco, Furini Francesco, Colombo Giorgio, Rizzi Caterina. Optimized development: defining design rules through product optimization techniques // *Computer-Aided Design & Applications*. 2016. vol. 13. no. 5. pp. 600–609.
9. Zhao Menglong, Huang Shengzhi, Huang Qiang, Wang Hao, Leng Guoyong, Liu Siyuan, Wang Lu. Copula-Based Research on the Multi-Objective Competition Mechanism in Cascade Reservoirs Optimal Operation // *Water*. 2019. vol. 11. iss. 995. pp. 1–19.
10. Wicaksono Albert, Jeong Gimoon, Kang Doosun. Water–Energy–Food Nexus Simulation: An Optimization Approach for Resource Security // *Water*. 2019. vol. 11. iss. 4: 667. pp. 1–19.
11. Akhanova M.A., Eropkina A.S., Ovchinnikova S.V., Skifskaya A.L. Methodology of estimating an IT project efficiency // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. 2018. vol. 9. iss. 13. pp. 803–809.
12. Орехова Н.Ю. Построение математической модели инвестиционного проекта // *Труды СПИИРАН*. 2003. Вып. 1. Т. 3, С. 187–195.
13. Kharchenko Volodymyr, Kharchenko Hanna. Simulation Modeling in Assessing the Effectiveness and Risk of Investment Projects // *Modern Economics*. 2020. vol. 22(1). pp. 119–124.
14. Glukhikh I.N., Pisarev M.O., Nonieva K.Z. Developing an Automated System for Assessing an Innovative Project's Economic Efficiency for an Oil and Gas Industry Case // *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, IEEE. 2020. October 6–9. access. no. 20256255.
15. Мусаев А.А., Нозик А.А., Русинов Л.А. Прогностический анализ безопасности промышленного предприятия // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2016. № 34(60). С. 87–93.
16. Aliyev Elchin, Rzayev Ramin, Ali Adila. Multi-criteria Evaluation of Investment Projects Using the Fuzzy Method of Weighted Maximin Convolution // 11th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions and Artificial Intelligence (ICSCCW–2021). 2022. pp. 671–679.
17. Vanhoucke Mario, Batselier Jordy. A Statistical Method for Estimating Activity Uncertainty Parameters to Improve Project Forecasting // *Entropy*. 2019. vol. 21. iss. 952. pp. 1–28.
18. Chernyakhovskaya Liliya, Nizamutdinov Marsel. Development of Knowledge Base for Intellectual Decision Support in the Process of Innovative Project Management // *IEEE XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*. 2019. access. no. 19318924.
19. Piterska Varvara, Shakhov Anatoliy, Lohinov Oleh, Lohinova Liliia. The Method of Transfer of Research Project Results of Institution of Higher Education // *IEEE 14th*

- International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). 2019. access. no. 19250579.
20. Ayaz Ahsan, Rasheed Ashhad. Multi-Objective Design Optimization of Multicopter using Genetic Algorithm // IEEE International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST). 2021. access. no. 20633290.
 21. Sanjeev Kumar Dash, Ajit Kumar Behera, Satchidananda Dehuri, Sung-Bae Cho. Radial basis function neural networks: a topical state-of-the-art survey // Open Computer Science. 2016. vol. 6. iss. 1. pp. 33–63.
 22. Пименов В.И., Кофнов О.В., Пименов И.В. Оценка эффективности проектов на основе применения моделей машинного обучения и методов многокритериальной оптимизации // Совершенствование математического образования – 2020: состояние и перспективы развития: Материалы XI междунар. науч.-методич. конф. Тирасполь. 2020. С. 115–119.
 23. Pimenov V.I., Pimenov I.V. Interpretation of a trained neural network based on genetic algorithms // Информационно-управляющие системы. 2020. № 6. С. 12–20.
 24. Qin Shufen, Sun Chaoli, Jin Yaochu, Tan Ying, Fieldsend Jonathan. Large-Scale Evolutionary Multiobjective Optimization Assisted by Directed Sampling // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2021. vol. 25. iss. 4. pp. 724–738.
 25. Li Yuping, Petrov D.A., Sherlock Gavin. Single nucleotide mapping of trait space reveals Pareto fronts that constrain adaptation // Nature Ecology & Evolution. 2019. vol. 3. pp. 1539–1551.
 26. Израйлевич С.В., Цудикман В.Я. Опционы: системный подход к инвестициям. Критерии оценки и методы анализа торговых возможностей // М.: Альпина Паблишер. 2008. 280 с.
 27. Handl Julia, Knowles Joshua. Modes of Problem Solving with Multiple Objectives: Implications for Interpreting the Pareto Set and for Decision Making // Multiobjective Problem Solving from Nature. 2008. pp.131–151.
 28. Chikumbo Oliver, Granville Vincent. Optimal Clustering and Cluster Identity in Understanding High-Dimensional Data Spaces with Tightly Distributed Points // Machine learning & knowledge extraction. 2019. vol. 1. iss. 2. pp. 715–744.
 29. Mercioni Marina Adriana, Holban Ștefan. Evaluating hierarchical and non-hierarchical grouping for develop a smart system // IEEE International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC). 2018. access. no. 18326471.
 30. Ida Masaaki. Consideration on the variation of financial data of institutions for canonical correlation analysis // IEEE 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). 2019. access. no. 18636837.
 31. Georgioudakis Manolis, Fragiadakis Michalis. Selection and Scaling of Ground Motions Using Multicriteria Optimization // Journal of Structural Engineering (ASCE). 2020. vol. 146. iss. 11: 04020241.
 32. Zhu Yun, Wang Jun, Liang Shuang. Multi-Objective Optimization Based Multi-Bernoulli Sensor Selection for Multi-Target Tracking // Sensors. 2019. vol. 19. iss. 4: 980. pp. 1–18.
 33. Титов В.Г., Залазинский А.Г., Крючков Д.И., Нестеренко А.В. Многокритериальная оптимизация методом «идеальной точки» состава сырья для изготовления композиционной заготовки // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2019. №2. С. 49–56.
 34. Xiaoping Fang, Yaoming Cai, Zhihua Cai, Xinwei Jiang, Zhikun Chen. Sparse Feature Learning of Hyperspectral Imagery via Multiobjective-Based Extreme Learning Machine // Sensors. 2020. vol. 20. iss. 5: 1262. pp. 1–19.
 35. Березкин В.Е., Каменев Г.К., Лотов А.В. Программа для визуализации многомерной границы Парето в невыпуклых задачах многокритериальной

- оптимизации (PFV-II). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2019664809 от 13.11.2019.
36. Long Lim Kian, Hui Lim Chien, Fook Gim Yeong, Wan Zainon Wan Mohd Nazmee. A Study on the Effectiveness of Tree-Maps as Tree Visualization Techniques // *Procedia Computer Science*. 2017. iss. 124. pp. 108–115.
37. Пименов В.И., Пименов И.В. Применение генетического алгоритма для оптимизации дискретной структуры решающего дерева // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки*. 2020. № 3. С. 55–60.

Пименов Виктор Игоревич — д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой, кафедра информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. Область научных интересов: распознавание образов, интеллектуальный анализ данных, когнитивные технологии. Число научных публикаций — 200. v_rim@mail.ru; Вознесенский проспект, 46, 190068, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)312-2567.

Пименов Илья Викторович — канд. техн. наук, доцент, кафедра вычислительных систем и информатики, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. Область научных интересов: моделирование процессов принятия решений, интеллектуальные системы, распознающие базы знаний, многомерный анализ данных. Число научных публикаций — 56. i-rim@mail.ru; Двинская улица, 5/7, 198035, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)748-9635.

V. PIMENOV, I. PIMENOV

DATA ANALYSIS AND VISUALIZATION IN THE TASKS OF THE PROJECT SOLUTIONS MULTICRITERIA OPTIMIZATION

Pimenov V., Pimenov I. Data Analysis and Visualization in the Tasks of the Project Solutions Multicriteria Optimization.

Abstract. The accumulation of data on project management processes and standard solutions has made relevant research related to the use of knowledge engineering methods for a multi-criteria search for options that set optimal settings for project environment parameters. Purpose: Development of a method for searching and visualizing groups of projects that can be evaluated based on the concept of dominance and interpreted in terms of project variables and performance indicators. Methods: The enrichment of the sample while maintaining an implicit link between the project variables and performance indicators is carried out using a predictive neural network model. A set of genetic algorithms is used to detect the Pareto front in the multidimensional criterion space. The ontology of projects is determined after clustering options in the solution space and transforming the cluster structure into the criterion space. Automation of the search in the multidimensional space of the Pareto front greatest curvature zone, which determines the equilibrium design solutions, their visualization and interpretation are carried out using a tree map. Results: A tree map is constructed at any dimension of the criterion space and has a structure that has a topological correspondence with projections of shared cluster images from a multidimensional space onto a plane. For various types of transformations and correlations between performance indicators and project variables, it is shown that the areas of the Pareto front greatest curvature are determined either by the contents of the whole cluster or by part of the variants representing the "best" cluster. If an undivided rectangle of a cluster is adjacent to the upper right corner of a tree map, then its representatives in the criterion space are well separated from the rest of the clusters and, when maximizing performance indicators, are closest to the ideal point. All representatives of such a cluster are effective solutions. If the winning cluster contains dominant options inside the decision tree, then the "best" cluster is represented by the remaining options that set the optimal settings for the project variables. Practical relevance: The proposed methods of searching and visualizing groups of projects can be used when choosing the conditions of resource and organizational and economic modeling of the project environment, ensuring the optimization of risks, cost, functional, and time criteria.

Keywords: project management, multi-criteria classification, neural network, genetic algorithm, Pareto front, cluster structure, visualization, tree map.

Pimenov Viktor — Ph.D., Dr.Sci., Senior researcher, head of the department, Department of information technologies, Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Research interests: image recognition, data mining, cognitive technologies. The number of publications — 200. v_pim@mail.ru; 46, Voznesensky Av., 190068, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)312-2567.

Pimenov Ilya — Ph.D., Associate professor, Department of computer systems and computer science, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. Research interests: data mining, decision-making modelling, intelligent system, knowledge base, multivariate data analysis. The number of publications — 56. i-pim@mail.ru; 5/7, Dvinskaya St., 198035, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)748-9635.

References

1. Perrier Nathalie, Benbrahim Salah-Eddine, Pellerin Robert. The core processes of project control: A network analysis. *Procedia Computer Science*. 2018. vol. 138. pp. 697–704.
2. Laursen Markus, Svejvig Per, Gerstrøm Rode Anna Le. Four Approaches to Project Evaluation. The 24th Nordic Academy of Management Conference (NFF-2017). 2017. pp. 1–25.
3. Makeev Vladimir, Isaev Albert, Kulikov Sergey, Stratan Dmitry, Shevkunov Nikolay. Modeling and assessing the effectiveness of investment projects in the agricultural sector. XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. 2019. vol. 403: 012077.
4. Budeli Lalamani, Wichers J.H. Evaluating aspects of power plant performance using Project Success Life Cycle Model (PSLCM). *PM World Journal*. 2018. vol. VII, iss. XI, pp. 1–25.
5. Yusupov R.M., Musaev A.A. [Efficiency of Information Systems and Technologies: Features of Estimation]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2017. iss. 2(51). pp. 5–34. (In Russ.).
6. Chereskin D., Royzenon G., Britkov V. Multidimensional classifier of risk analysis methods. 11th World Conference «Intelligent Systems for Industrial Automation» (WCIS-2020). 2020. vol. 1323. pp. 529–536.
7. Koledina K.F., Koledin S.N., Karpenko A.P., Gubaydullin I.M., Vovdenko M.K. Multi-objective optimization of chemical reaction conditions based on a kinetic model. *Journal of Mathematical Chemistry*. 2019. vol. 57, pp. 484–493.
8. Serafini Marco, Furini Francesco, Colombo Giorgio, Rizzi Caterina. Optimized development: defining design rules through product optimization techniques. *Computer-Aided Design & Applications*. 2016. vol. 13. no. 5. pp. 600–609.
9. Zhao Menglong, Huang Shengzhi, Huang Qiang, Wang Hao, Leng Guoyong, Liu Siyuan, Wang Lu. Copula-Based Research on the Multi-Objective Competition Mechanism in Cascade Reservoirs Optimal Operation. *Water*. 2019. vol. 11. iss. 995. pp. 1–19.
10. Wicaksono Albert, Jeong Gimoon, Kang Doosun. Water–Energy–Food Nexus Simulation: An Optimization Approach for Resource Security. *Water*. 2019. vol. 11. iss. 4: 667. pp. 1–19.
11. Akhanova M.A., Eropkina A.S., Ovchinnikova S.V., Skifskaya A.L. Methodology of estimating an IT project efficiency. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. 2018. vol. 9. iss. 13. pp. 803–809.
12. Orekhova N.U. [Mathematical simulation of investment project in base of algorithmic networks]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2003. iss. 1. vol. 3. pp. 187–195. (In Russ.).
13. Kharchenko Volodymyr, Kharchenko Hanna. Simulation Modeling in Assessing the Effectiveness and Risk of Investment Projects. *Modern Economics*. 2020. vol. 22(1). pp. 119–124.
14. Glukhikh I.N., Pisarev M.O., Nonieva K.Z. Developing an Automated System for Assessing an Innovative Project's Economic Efficiency for an Oil and Gas Industry Case. *IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020. access. no. 20256255.
15. Musaev A.A., Nozick A.A., Rusinov L.A. [Predictive analysis of safety of an industrial enterprise]. *Izvestiya SPbGTU(TU) – Bulletin of St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*. 2016, no. 34(60). pp. 87–93. (In Russ.).
16. Aliyev Elchin, Rzayev Ramin, Ali Adila. Multi-criteria Evaluation of Investment Projects Using the Fuzzy Method of Weighted Maximin Convolution. 11th

- International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions and Artificial Intelligence (ICSCCW–2021), 2022. pp. 671–679.
17. Vanhoucke Mario, Batselier Jordy. A Statistical Method for Estimating Activity Uncertainty Parameters to Improve Project Forecasting. *Entropy*. 2019. vol. 21. iss. 952. pp. 1–28.
 18. Chernyakhovskaya Liliya, Nizamutdinov Marsel. Development of Knowledge Base for Intellectual Decision Support in the Process of Innovative Project Management. *IEEE XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*. 2019. access. no. 19318924.
 19. Piterska Varvara, Shakhov Anatoliy, Lohinov Oleh, Lohinova Liliia. The Method of Transfer of Research Project Results of Institution of Higher Education. *IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. 2019. access. no. 19250579.
 20. Ayaz Ahsan, Rasheed Ashhad. Multi-Objective Design Optimization of Multi-copter using Genetic Algorithm. *IEEE International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST)*. 2021. access. no. 20633290.
 21. Sanjeev Kumar Dash, Ajit Kumar Behera, Satchidananda Dehuri, Sung-Bae Cho. Radial basis function neural networks: a topical state-of-the-art survey. *Open Computer Science*. 2016. vol. 6. iss. 1. pp. 33–63.
 22. Pimenov V.I., Kofnov O.V., Pimenov I.V. [Evaluating the effectiveness of projects based on the use of machine learning models and multi-criteria optimization methods]. *Sovershenstvovanie matematicheskogo obrazovanija – 2020: sostojanie i perspektivy razvitiija: Materialy XI mezhdunar. nauch.-metodich. konf. [Improvement of mathematical education – 2020: state and prospects of development: Materials of the XI Int. Sc. and Meth. Conf.]*. Tiraspol. 2020. pp. 115– 119. (In Russ.).
 23. Pimenov V.I., Pimenov I.V. Interpretation of a trained neural network based on genetic algorithms. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and Control Systems*. 2020. no. 6. pp. 12–20.
 24. Qin Shufen, Sun Chaoli, Jin Yaochu, Tan Ying, Fieldsend Jonathan. Large-Scale Evolutionary Multiobjective Optimization Assisted by Directed Sampling. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2021. vol. 25. iss. 4. pp. 724–738.
 25. Li Yuping, Petrov D.A., Sherlock Gavin. Single nucleotide mapping of trait space reveals Pareto fronts that constrain adaptation. *Nature Ecology & Evolution*. 2019. vol. 3. pp. 1539–1551.
 26. Izrajlevich S. V., Cudikman V. Ja. Opciony: sistemnyj podhod k investicijam. Kriterii ocenki i metody analiza torgovyh vozmozhnostej [Options: a systematic approach to investment. Evaluation criteria and methods for analyzing trading opportunities]. M.: Alpina Publ. 2008. 280 p. (In Russ.).
 27. Handl Julia, Knowles Joshua. Modes of Problem Solving with Multiple Objectives: Implications for Interpreting the Pareto Set and for Decision Making. *Multiobjective Problem Solving from Nature*. 2008. pp.131–151.
 28. Chikumbo Oliver, Granville Vincent. Optimal Clustering and Cluster Identity in Understanding High-Dimensional Data Spaces with Tightly Distributed Points. *Machine learning & knowledge extraction*. 2019. vol. 1. iss. 2. pp. 715–744.
 29. Mercioni Marina Adriana, Holban Ștefan. Evaluating hierarchical and non-hierarchical grouping for develop a smart system. *IEEE International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*. 2018. access. no. 18326471.
 30. Ida Masaaki. Consideration on the variation of financial data of institutions for canonical correlation analysis. *IEEE 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. 2019. access. no. 18636837.

31. Georgioudakis Manolis, Fragiadakis Michalis. Selection and Scaling of Ground Motions Using Multicriteria Optimization. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*. 2020. vol. 146. iss. 11: 04020241.
32. Zhu Yun, Wang Jun, Liang Shuang. Multi-Objective Optimization Based Multi-Bernoulli Sensor Selection for Multi-Target Tracking. *Sensors*. 2019. vol. 19. iss. 4: 980. pp. 1–18.
33. Titov V.G., Zalazinsky A.G., Kryuchkov D.I., Nesterenko A.V. [Multi-criteria optimization by the «ideal point» method of raw material composition for composite blank manufacturing]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya – News of universities. Powder metallurgy and functional coatings*. 2019. no. 2. pp. 49–56. (In Russ.).
34. Xiaoping Fang, Yaoming Cai, Zhihua Cai, Xinwei Jiang, Zhikun Chen. Sparse Feature Learning of Hyperspectral Imagery via Multiobjective-Based Extreme Learning Machine. *Sensors*. 2020. vol. 20. iss. 5: 1262. pp. 1–19.
35. Berezkin V.E., Kamenev G.K., Lotov A.V. [A program for visualizing the multidimensional Pareto boundary in nonconvex multicriteria optimization problems (PFV-II)]. *Programma dlja vizualizacii mnogomernoj granicy Pareto v nevyuklykh zadachah mnogokriterial'noj optimizacii. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM*. 2019. no. RU 2019664809. (In Russ.).
36. Long Lim Kian, Hui Lim Chien, Fook Gim Yeong, Wan Zainon Wan Mohd Nazmee. A Study on the Effectiveness of Tree-Maps as Tree Visualization Techniques. *Procedia Computer Science*. 2017. iss. 124. pp. 108–115.
37. Pimenov V.I., Pimenov I.V. [Applying a genetic algorithm to optimize the discrete structure of a decision tree]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna. Seriya 1. Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Saint Petersburg state University of technology and design. Series 1. Natural and technical Sciences*. 2020. no. 3. pp. 55– 60. (In Russ.).