

УДК 004.4+ 519.81  
DOI: 10.15827/0236-235X.138.171-183

Дата подачи статьи: 21.12.21, после доработки: 22.03.22  
2022. Т. 35. № 2. С. 171–183

## **Нечеткая многокритериальная система поддержки принятия решений DecernsFMCDА**

С.В. Грицюк<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, s.gritsyuk@gmail.com

А.В. Коробов<sup>1</sup>, аспирант, alexander.korobov.1993@gmail.com

А.В. Радаев<sup>1</sup>, аспирант, alexander.radaev.1994@gmail.com

Б.И. Яцало<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, yatsalo@gmail.com

<sup>1</sup> Обнинский институт атомной энергетики – филиал «Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, 249040, Россия

Управление рисками при решении экологических проблем, задач охраны окружающей среды, реабилитации загрязненных территорий и планирования землепользования требует применения современных компьютерных систем поддержки принятия решений.

В статье представлена компьютерная система поддержки принятия решений DecernsFMCDА, которая включает в себя как широко известные методы многокритериального анализа решений, так и оригинальные подходы к анализу неопределенностей, основанные на применении нечетких множеств и вероятностных методов. Сделан обзор доступных на сегодняшний день компьютерных систем многокритериального анализа решений, детально описаны структуры системы поддержки принятия решений DecernsFMCDА и ее основных компонент, а также отличия от других систем, реализующих методы многокритериального анализа решений. Перечислены классические, вероятностные и оригинальные нечеткие модели многокритериального анализа решений, реализованные в составе системы, приведены схемы и описания общей модульной архитектуры DecernsFMCDА и оригинальных библиотек многокритериального анализа решений, а также библиотеки работы с нечеткими числами.

Практическое применение DecernsFMCDА рассматривается на примере многокритериальной задачи поиска оптимального способа производства одностенных углеродных нанотрубок, при решении которой используются оригинальные нечеткие модели FTOPSIS и FMAVT, реализованные в рамках системы.

В настоящее время DecernsFMCDА является единственной системой, в которой фактически реализованы все основные методы для решения дискретных задач многокритериального анализа решений, в том числе в условиях неопределенности. Система позволяет формировать и исследовать сценарии с применением различных моделей многокритериального анализа решений, в том числе с разными наборами параметров заданных моделей, для последующего сравнения и анализа выходных результатов в рамках процесса поддержки принятия решений.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений, многокритериальный анализ решений, анализ неопределенностей, управление рисками, нечеткое множество, нечеткое число, проект Decerns, система DecernsFMCDА.

Принятие решений в различных областях человеческой деятельности, таких как планирование строительства новых объектов, землепользование, защита окружающей среды и многие другие, зависит, как правило, от множества альтернативных решений и критериев для их оценки. Методы анализа решений используются для поиска компромиссов и определения лучших альтернатив (в рамках выбранной/заданной системы ценностей) из множества рассматриваемых вариантов [1]. Системы поддержки принятия решений (ППР) включают в себя реализации различных методов/подходов и полезны, а часто незаменимы, при реализации комплекса оценок и представления входной/выходной информации в рамках решения

задач выбора, ранжирования и сортировки альтернатив [2].

Среди различных подходов к анализу решений можно выделить классические методы однокритериальной оптимизации (включая методы линейного/нелинейного программирования), методы анализа «затраты–выгода», а также методы многокритериального анализа решений (МКАР) [1, 3, 4].

МКАР – это набор формальных методов, действующих процессу учета различных критериев при анализе альтернатив и помогающих лицу или группе лиц исследовать и обосновывать те или иные решения. Методы МКАР являются основой многих современных систем ППР [2]. МКАР позволяет интегрировать коли-

чественную и качественную информацию, в том числе с учетом неопределенностей объективных данных и/или субъективных суждений.

МКАР представляет собой процесс, в котором можно выделить три ключевые фазы [1, 3].

- *Идентификация проблемы и структурирование.* В начале процесса решения задачи все заинтересованные стороны, включая консультантов по принятию решений (аналитиков, экспертов), вырабатывают общее отношение к рассматриваемой проблеме, ее целям, а также к формированию множества альтернатив и учитываемых критериев, различного рода ограничений и неопределенностей. Структурирование – это идентификация тех факторов и возможных решений, которые должны составить список основных положений для последующего обсуждения и анализа.

- *Построение модели и ее использование.* Исходной и базовой характеристикой МКАР являются формализация и разработка модели (моделей), соответствующей предпочтениям ЛППР/экспертов в рамках рассматриваемых целей, с использованием которой анализ и сравнение альтернатив представляются систематическим и прозрачным процессом.

- *Принятие решения/разработка плана действий.* На основе проведенных оценок, включая анализ неопределенностей, принимается то или иное решение или осуществляется возврат на один из предыдущих этапов МКАР.

Таким образом, корректно организованная на основе системного анализа реализация многокритериального анализа представляется процессом, не только оперирующим набором алгоритмов и различного рода аналитическими возможностями, но и ведущим к всесторонней проработке и пониманию природы рассматриваемой задачи.

По своим целям задачи (и соответствующие методы) МКАР можно разделить на следующие основные группы [1, 3, 4]:

- задачи, направленные на определение наилучшей (компромиссной) альтернативы;
- задачи, предназначенные для ранжирования альтернатив;
- задачи сортировки, позволяющие разбивать альтернативы на предопределенные упорядоченные группы (например, неприемлемые, приемлемые, частично приемлемые альтернативы);
- методы скрининга/фильтрации, направленные на выявление более узкого множества (подмножества) альтернатив для их последующего анализа.

Кроме того, существуют отдельные методы, направленные на генерацию новых альтернатив, декомпозицию проблемы для ее более глубокого понимания, учет несопадающих мнений различных экспертов и др.

Методы МКАР можно также разбить на классы, представленные на рисунке 1.

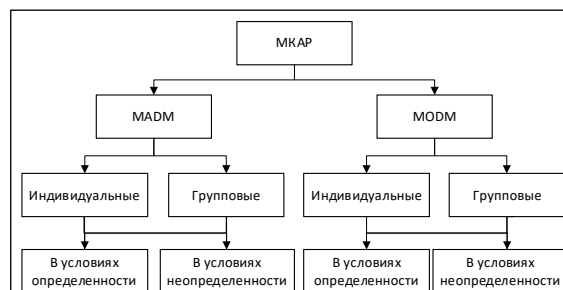


Рис. 1. Классификация методов МКАР по природе решаемых задач

Fig. 1. Classification of methods for multicriteria decision analysis by the nature of the tasks being solved

Дискретные методы (Multi-Attribute Decision Making, MADM) применяются для задач с конечным числом заранее заданных альтернатив, в то время как многоцелевые оптимизационные методы (Multi-Objective Decision Making, MODM) – для задач, в которых число альтернатив бесконечно или достаточно велико, а сами альтернативы задаются, как правило, неявно (например, указываются различного рода ограничения, в том числе в форме математических выражений). И одна, и другая группы методов подразделяются на индивидуальные и групповые. Индивидуальные методы подразумевают их реализацию одним экспертом/ЛППР (или однородной группой экспертов, находящихся в согласии или имеющих согласованный подход к решению многокритериальной задачи); групповые методы включают набор специализированных алгоритмов для учета мнений экспертов (заинтересованных лиц/сторон) в реализации всего процесса МКАР. Кроме того, разработаны методы для реализации МКАР в условиях неопределенности объективных значений критериев и субъективных предпочтений/суждений.

В рамках данной статьи обсуждаются компьютерные системы (КС), реализующие модели/методы MADM в условиях как определенности, так и неопределенности.

### Обзор КС для МКАР

Методы МКАР и соответствующие КС предлагают широкий спектр подходов к ана-

лизу и сравнению альтернатив с использованием объективных и субъективных значений критериев и суждений.

Разработан целый ряд академических и коммерческих КС, реализующих различные модели и дополнительные средства для решения всех основных классов задач МКАР [3, 4]. Далее описаны наиболее известные и востребованные КС, реализующие те или иные модели МКАР.

- **Criterion Decision Plus.** Реализует методы MAVT и АНР, обеспечивает структурирование задачи с использованием дерева критериев, содержит инструменты анализа чувствительности и (ограниченного) учета неопределенности; доступны версии для веб и ППР в группах.

- **Decision Lab.** Реализует метод PROMETHEE, предоставляет средства визуализации и анализа геометрических данных в пространстве критериев с помощью инструмента GAIA, осуществляет анализ чувствительности к весовым коэффициентам, а также позволяет анализ нескольких сценариев и поддержку принятия групповых решений.

- **Visual PROMETHEE.** Реализует метод PROMETHEE и инструмент визуального анализа GAIA; разработана на замену устаревшему пакету Decision Lab.

- **Expert Choice.** Реализует классический метод АНР, позволяет проводить анализ чувствительности к весам и поддержку групповых решений.

- **D-Sight.** Реализует методы MAUT, АНР, PROMETHEE в рамках веб-системы, доступной с различных устройств.

- **HIPRE.** Реализует методы MAVT и АНР с использованием значений интервальных критериев; доступна веб-версия (Web-HIPRE) для поддержки группового анализа.

- **SANNA.** Приложение для MS Excel; включает методы TOPSIS, ELECTRE I, PROMETHEE II.

- **Logical Decisions.** Реализует методы MAUT и АНР, поддерживает групповой анализ решений, распространяется по бесплатной лицензии.

- **Decision Deck.** Проект представляет собой инициативу по созданию ПО с открытым исходным кодом и обеспечивает процесс разработки различных методов и инструментов MCDA.

- **Smart Picker Pro.** Приложение позволяет ЛПР решать задачи ранжирования и сортировки посредством простого пользователь-

ского интерфейса; реализовано как настольное и мобильное приложение; распространяется бесплатно, но опция сохранения проекта приобретается через «встроенные покупки».

- **АНР Software.** Реализует метод АНР, распространяется бесплатно, но регистрация новых пользователей приостановлена (на июль 2021 г.).

- **JSMAA.** Реализует методы SMAA-2 и SMAA-TRI (стохастическая реализация методов MAVT и ELECTRE-TRI на основе концепции приемлемости).

- **FLINTSTONES.** Программный инструмент для решения лингвистических проблем принятия решений в условиях неопределенности; содержит расширения для работы со сложными структурами, такими как многоуровневые лингвистические структуры, разнородные структуры и несбалансированные лингвистические структуры.

- **DecideIT, Helision.** Реализуют средства для моделирования и оценки деревьев критериев, а также деревьев решений для оценки решений в условиях риска; может обрабатывать неточные утверждения с точки зрения интервалов, ранжирования и сравнений посредством метода Delta MCDM; имеет упрощенную веб-версию, доступную под названием Helision.

- **1000minds.** Использует метод PARIKA (оценка относительной важности критериев и альтернатив) для задач ранжирования, приоритизации или выбора альтернатив; реализована как веб-система и может применяться для задач группового анализа решений.

Необходимо отметить, что при всем разнообразии описанных КС определенная их часть устарела и/или не поддерживается разработчиками, другие реализуют специфические методы и фактически могут быть использованы только специалистами, а какие-то применяются для решения определенного круга узкоспециализированных прикладных задач (финансовых, экологических, медицинских и др.). В то же время ряд КС являются востребованными и весьма популярными у широкого круга пользователей. Среди таких систем можно выделить Criterion Decision Plus, Expert Choice и Decision Lab.

Criterion Decision Plus является удобным инструментом как для структурирования многокритериальной задачи с использованием дерева критериев, так и для реализации дальнейшего процесса МКАР с помощью методов (по выбору пользователя) MAVT или АНР [3, 4]; пользователю предоставлены также ограни-

ченные возможности учета неопределенностей значения критериев и проведения анализа чувствительности результатов ранжирования альтернатив к изменению весовых коэффициентов критериев.

Expert Choice представляет собой классический вариант системы, реализующей метод АНР [4] и ряд средств, включая вопросы иерархической структуры целей/критериев многокритериальной задачи и анализа чувствительности результатов к изменению весовых коэффициентов.

В рамках Decision Lab, а также ее наследника Visual PROMETHEE реализован один из наиболее популярных методов МКАР из семейства моделей оценки превосходства – PROMETHEE, включая PROMETHEE I и PROMETHEE II [4]. Гибкий интерфейс системы предоставляет пользователю удобный инструментарий для задания всех параметров модели PROMETHEE, проведения анализа чувствительности к изменению весов критериев, визуального анализа векторных значений моделируемых величин для многокритериальной оценки альтернатив с использованием встроенного инструмента GAIA, а также возможность анализа нескольких сценариев многокритериальной задачи.

Особое место в списке используемых для решения научно-прикладных многокритериальных задач занимает JSMAA. Система представляет собой Java-реализацию методов SMAA (Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis) с применением алгоритмов Монте-Карло для учета неопределенностей значений критериев и весовых коэффициентов и выбора лучших альтернатив (метод SMAA-2, основанный на использовании модели MAVT), а также сортировки альтернатив (метод SMAA-TRI, представляющий собой стохастическую реализацию модели ELECTRE-TRI) [5, 6].

Одной из известных многокритериальных систем ППР является и разработанная авторами данной статьи DecernsMCDA [7], включающая базовые методы МКАР (MAVT, TOPSIS, АНР, PROMETHEE), а также ряд инструментов для анализа чувствительности. Данная КС эффективно используется в рамках университетского образования и решения научно-практических задач [8].

### КС DecernsFMCDА

DecernsFMCDА представляет собой настольную систему ППР, включающую реализации

различных методов МКАР для решения многокритериальных задач выбора, ранжирования и сортировки альтернатив, в том числе моделей *нечеткого МКАР* (НМКАР) и дополнительных инструментов ППР. DecernsFMCDА представляет собой существенную модификацию и дальнейшее развитие КС DecernsMCDA [7].

**Пользовательский интерфейс DecernsFMCDА.** В рамках системы DecernsFMCDА реализованы следующие методы МКАР:

- базовые MADM: MAVT [1, 4], АНР [4, 9], TOPSIS [10], PROMETHEE [4] и FlowSort [11];
- MADM на основе вероятностных методов: MAUT [1, 4], ProMAA;
- модели НМКАР, являющиеся нечеткими расширениями базовых методов MADM [12]: FuzzyMAVT (FMAVT), FuzzyTOPSIS (FTOPSIS), FuzzyPROMETHEE (FPROMETHEE);
- нечеткие модели многокритериальной сортировки альтернатив, являющиеся адаптацией НМКАР-моделей для решения задач сортировки в нечеткой среде: FMAVT-Sort, FTOPSIS-Sort, FPROMETHEE-Sort.

Реализация методов MAUT и ProMAA основана на оригинальной библиотеке для вычисления функций от случайной величины (без использования методов Монте-Карло); реализация нечетких методов в DecernsFMCDА основана на оригинальной библиотеке для оценки функций от *нечетких чисел* (НЧ).

Пользователь системы DecernsFMCDА имеет возможность выбрать соответствующий метод МКАР. После исследования задачи различными методами при необходимости может сравнить результаты, что позволяет проводить анализ неопределенностей, связанных с выбранным методом/моделью МКАР/НМКАР [8].

Для эффективной реализации методов МКАР и процесса принятия решений в DecernsFMCDА используются следующие инструменты.

- *Дерево критериев* является инструментом для структурирования многокритериальной задачи путем разработки иерархического набора критериев и альтернатив с возможностью последующего редактирования (рис. 2). Дерево критериев также используется для загрузки, представления и редактирования данных модели (весовые коэффициенты для критериев и значения критериев для альтернатив).
- *Таблица характеристик* предназначена для загрузки, представления и редактирования данных модели рассматриваемой задачи (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-2/2022-2-dop/6.jpg>). В DecernsFMCDА реализо-



Рис. 2. Дерево критериев в системе DecernsFMCD

Fig. 2. A criteria tree in the DecernsFMCD system

вана расширенная таблица характеристик, которая включает не только матрицу оценок по критериям, но и описание критерия, единицы измерения, свойства шкалы и весовые коэффициенты.

- *Путь значений* предоставляет графики значений критериев для альтернатив, а диаграмма рассеяния представляет значения критериев для альтернатив на двумерной плоскости в соответствии с любыми двумя выбранными критериями; также разработан специальный инструмент для анализа доминирования альтернатив по Парето (альтернатива  $a_1$  доминирует  $a_2$  по Парето, если по каждому из заданных критериев  $a_1$  не хуже, чем  $a_2$ , и хотя бы по одному из критериев  $a_1$  превосходит  $a_2$ ).

- *Инструменты* для анализа чувствительности к изменению весовых коэффициентов, а также инструменты для анализа чувствительности к изменению частной функции ценности/полезности (для методов MAVT, MAUT, ProMAA, FMAVT) (рис. 3).

Анализ неопределенности в DecernsFMCD осуществляется на основе анализа чувствительности результатов к изменению весовых коэффициентов и/или функций ценности/полезности, а также принятия во внимание неопределенностей на основе вероятностных методов и нечетких множеств (например, использование различных плотностей вероятности или входных нечетких величин различной формы). Для анализа конкретной многокритериальной задачи пользователи DecernsFMCD могут сравнить выходные результаты нескольких методов МКАР при наличии соответствующих данных. Такой подход также можно рассматривать как анализ неопределенности к

выбору модели МКАР для проведения исследований заданного множества альтернатив.

Дерево критериев для рассматриваемой задачи не зависит от выбранного метода МКАР, а таблица характеристик меняет свой вид в зависимости от выбранного метода. Кроме того, инструменты для выбора конкретного метода МКАР и задания весовых коэффициентов поз-

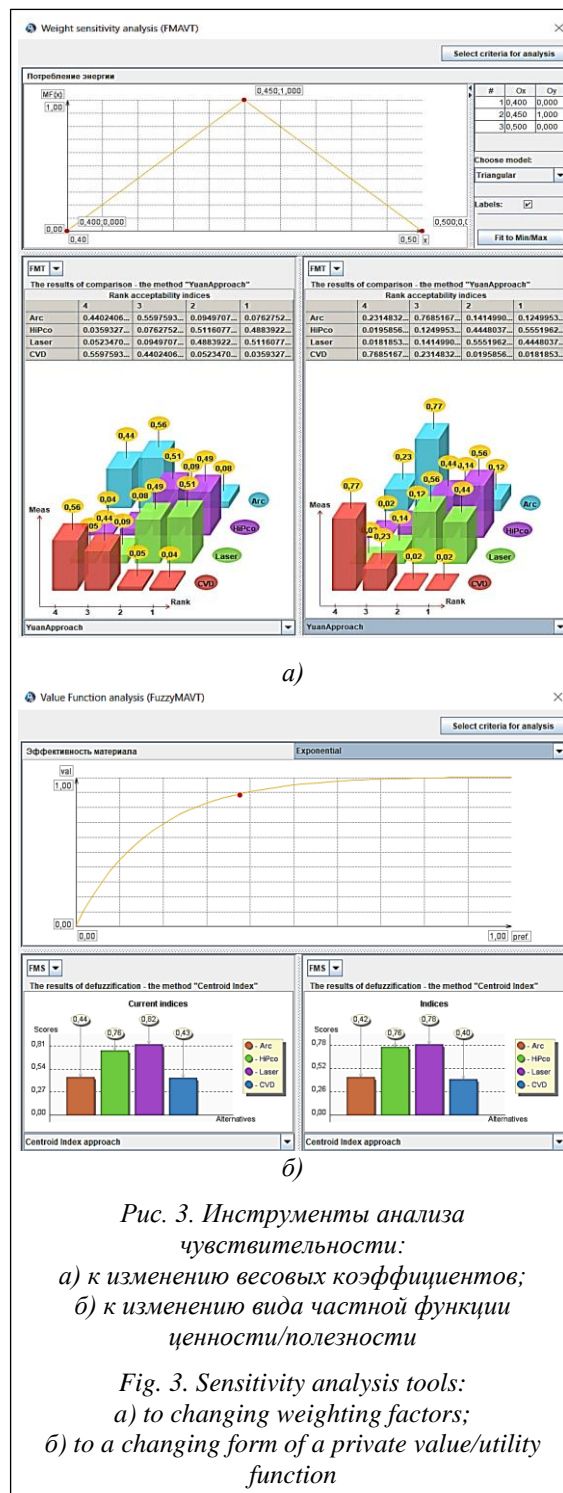


Рис. 3. Инструменты анализа чувствительности:

- а) к изменению весовых коэффициентов;
- б) к изменению вида частной функции ценности/полезности

Fig. 3. Sensitivity analysis tools: a) to changing weighting factors; б) to a changing form of a private value/utility function

воляют создавать различные сценарии для анализа и сравнения. Например, пользователь может создать сценарии с именами MAVT-Ecological-W-S1 и MAVT-Economical-W-S2, назначить метод MAVT для обоих сценариев, но при этом использовать разные наборы весовых коэффициентов (W-S1 и W-S2) и/или другие параметры модели (например, параметры частных функций ценности).

**Программная реализация DecernsFMCDА.**

Общая архитектура системы ППР DecernsFMCDА схематично изображена на рисунке 4. Система представляет собой настольное Java-приложение с графическим интерфейсом, который состоит из ряда визуальных интерактивных компонентов, основанных на разработанных авторами библиотеках js-charts (для представления статичных диаграмм) и js-viz (для создания интерактивных интерфейсов/компонентов).

Дерево критериев, матрица решений, диалоги оценок реализованы в виде отдельных графических компонентов. Все компоненты пользовательского интерфейса работают со структурой данных модели ППР, созданием и управлением которой занимается внутренний компонент ProjectManager. В задачи этого компонента входят управление открытыми проектами, создание и сохранение проектов, предоставление доступа к соответствующей проекту модели ППР, которая представлена объектом ClientModel. Данный объект по своей сути является пользовательским/интерфейсным (то есть не содержащим код для расчетов) представлением модели ППР. Посредством объекта

AppConnector и разработанной модели событий (описывает все варианты событий, которые могут происходить в системе) данное клиентское представление модели ППР взаимодействует с реализацией математических алгоритмов, формирующих методы ППР. Такое разделение моделей данных, во-первых, позволяет провести четкую декомпозицию на компоненты с разной сферой ответственности, а во-вторых, в случае необходимости перенести приложение в сетевую среду, разделив на серверную и клиентскую части и разработав специализированную версию AppConnector. Расчеты по методам МКАР реализуются библиотекой mcda-lib4, при этом для работы с вероятностными распределениями и нечеткими числами используются специализированные библиотеки jrandom и fuzzylib соответственно. Использование группового анализа решений возможно благодаря интеграции с внешней системой DecernsMCDA-G. Кроме того, поддерживается интеграция с форматом MS Excel и другими табличными форматами данных.

Библиотека mcda-lib4 по сути является ядром системы ППР DecernsFMCDА, рассмотрим ее структуру более подробно (рис. 5).

Библиотека ППР mcda-lib4 проектировалась таким образом, чтобы разделять данные и реализации (вычисления) методов МКАР. Такой подход позволяет гибко расширять библиотеку новыми методами. В ее структуре можно выделить несколько основных сущностей: Модель ППР, Критерий, Альтернатива, Категория, Значение, Хранилище данных

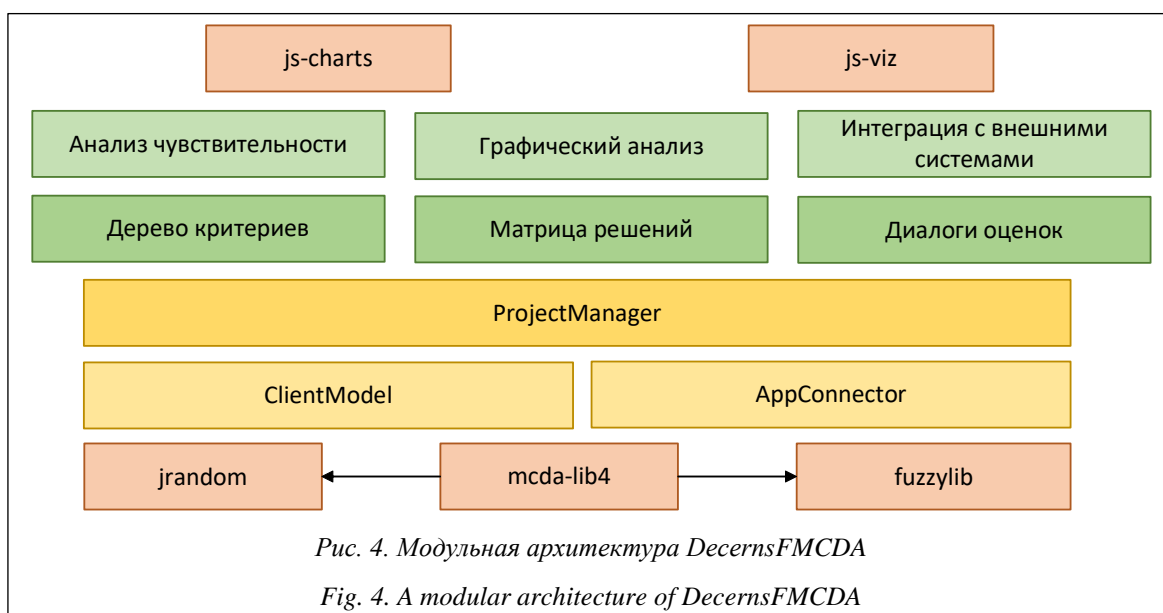


Рис. 4. Модульная архитектура DecernsFMCDА

Fig. 4. A modular architecture of DecernsFMCDА

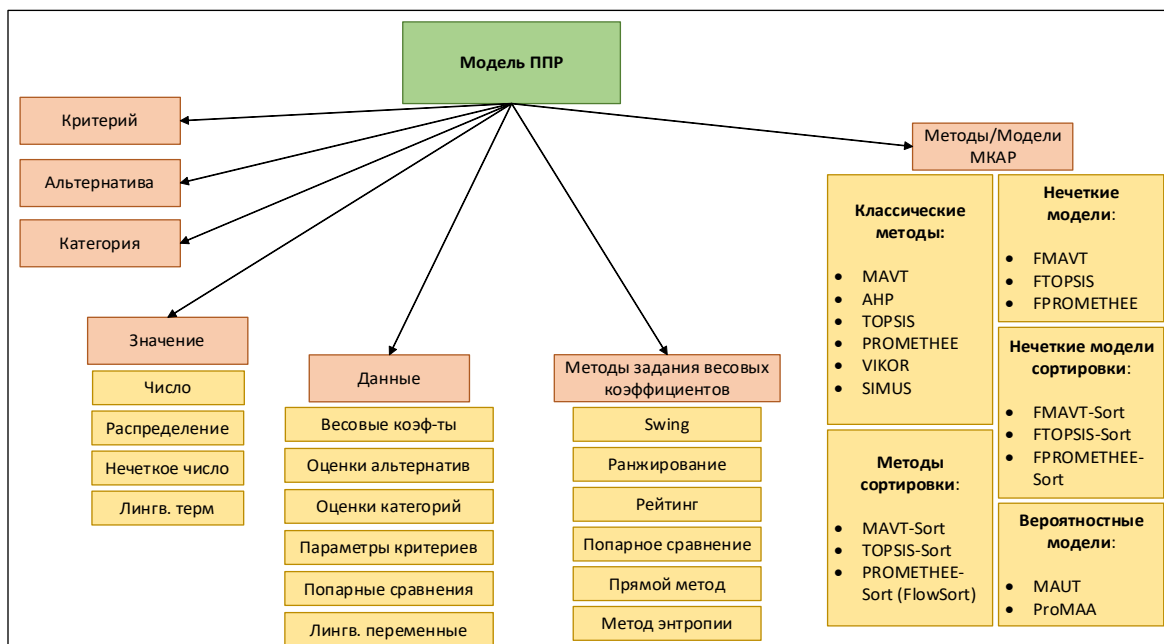


Рис. 5. Схематичное представление структуры библиотеки mcda-lib4 (ядро DecernsFMCDА)

Fig. 5. A schematic representation of the mcda-lib4 library structure (the core of the DecernsFMCDА)

(Данные), Метод задания весовых коэффициентов, Метод/Модель МКАР. Модель ППР является базовым классом и реализует инструменты для структуризации модели – создания критериев, задания связей между ними, создания альтернатив и категорий. С помощью Хранилищ данных Модель ППР реализует хранение весовых коэффициентов, оценок альтернатив по критериям, профилей категорий в задачах сортировки, оценок попарного сравнения, а также глобальных параметров и параметров критериев.

Все методы МКАР, представленные в библиотеке mcda-lib4, реализуются через расширение базового класса Метод и должны представлять специальный набор заранее определенных функций (например, расчет модели, проверка весовых коэффициентов и т.д.). В процессе расчетов Методы обращаются за данными напрямую к Модели ППР, а также используют ряд специализированных классов, например, таких как Метод задания весовых коэффициентов, который реализуют все классы методов взвешивания (задания относительной важности) критериев, поддерживаемых системой: Swing, ранжирование, рейтинг, попарное сравнение, прямой метод, метод энтропии. Оригинальные библиотеки jrandom и fuzzylib предоставляют реализации концепции вероятностного распределения и НЧ соответственно, которые используются для представления не-

определенностей в вероятностных и нечетких моделях (рис. 5).

Анализ чувствительности реализуется за рамками библиотеки mcda-lib4 и может быть представлен как специализированная надстройка/модуль над библиотекой (рис. 4), которая использует встроенные функции сохранения и восстановления состояния модели и многократные расчеты с различными данными для анализа.

Методы сортировки, реализованные в библиотеке mcda-lib4, представляют собой специализированные версии классических методов, адаптированных для решения задач сортировки. При этом метод FlowSort [11] можно рассматривать как соответствующую адаптацию метода PROMETHEE к решению задач многокритериальной сортировки.

**Классические, нечеткие и вероятностные модели МКАР.** Классические методы МКАР, реализованные в DecernsFMCDА (рис. 5), описаны в [1, 3, 4], а также в работах авторов данного исследования, например [7]. Вероятностные модели представлены в [4].

В рамках DecernsFMCDА особое внимание уделяется подходам к анализу неопределенностей входных величин при решении прикладных задач.

Вероятностные модели (MAUT, ProMAA) [4] (рис. 5), использующие распределенные значения критериев или/и весовых коэффициентов и

входящие в состав DecernsMCDA [7], были модернизированы (внесены соответствующие изменения в библиотеку mcda-lib4 для оптимизации вычислений разности зависимых случайных величин).

Модели НМКАР (FMAVT, FTOPSIS, FPROMETHEE, а также их адаптация к моделям нечеткой многокритериальной сортировки) (рис. 5) являются оригинальными и представлены в работе [12]. Особенности данных моделей являются возможность использования различных подходов к вычислению функций от НЧ: приближенных методов, основанных на последовательной реализации функций в классе треугольных/трапециевидных НЧ (данный подход используется практически во всех известных приложениях в рамках НМКАР), использование стандартной нечеткой арифметики (вычисления проводятся с использованием заданного количества альфа-срезов, при этом все НЧ рассматриваются как независимые) [14], а также реализация методов трансформации (учитывающих наличие зависимых переменных).

В рамках DecernsFMCDА реализованы также основные методы ранжирования НЧ: Centroid Index (CI), Integral of Means (IM), Yuan’s ranking (Y) и их модификации [14].

Для реализации функций от НЧ, включая методы их ранжирования, разработана оригинальная библиотека fuzzylib. Структура библиотеки fuzzylib представлена на рисунке 6.

### Применение DecernsFMCDА

Рассмотрим пример практического применения DecernsFMCDА с использованием нечетких моделей FTOPSIS и FMAVT.

В [8] рассмотрена задача поиска оптимального способа производства одностенных углеродных нанотрубок (4 альтернативы и 5 критериев). Одностенные углеродные нанотрубки выдерживают значительные физические воздействия (имеют высокий относительно других доступных материалов предел прочности) и обладают полезными в промышленности электрическими свойствами. Нанотрубки применяются в литий-ионных аккумуляторах, сенсорах, суперконденсаторах и т.д. Так, в кислотно-свинцовых аккумуляторах добавление одностенных нанотрубок значительно увеличивает число циклов перезарядки, что делает нанотрубки очень востребованным материалом.

Для решения задачи рассматриваются четыре популярных способа (альтернативы) производства одностенных углеродных нанотрубок [8]:

- Arc (A<sub>1</sub>) – статичный катод и подвижный анод – электрическая дуга, возникающая между катодом и анодом, испаряет анод;
- HiPco (A<sub>2</sub>) – с помощью высокого давления и температур монооксид углерода напыляется на железо (данный метод требует высокой степени очистки);
- CVD (A<sub>3</sub>) – нагретые газы (водород, аргон и метан) используются вместе с катализатором из железа;
- Laser (A<sub>4</sub>) – материал испаряется посредством использования лазера.

Критерии, приведенные в таблице 1, наиболее важны с точки зрения принятия решений в подобных задачах и разрабатывались совместно с заинтересованными группами,

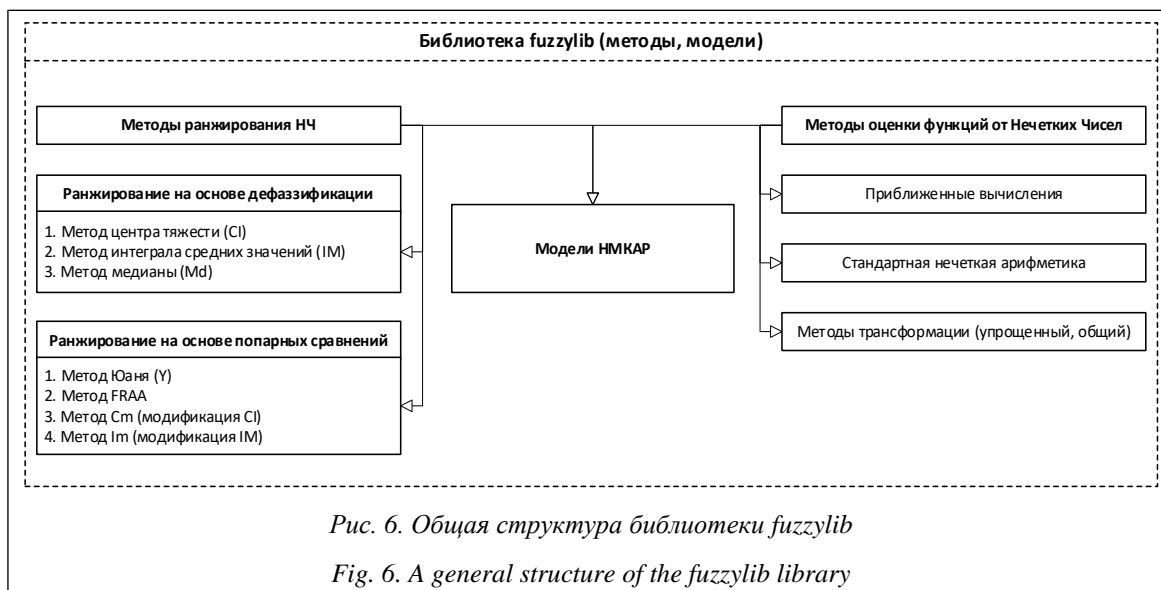


Рис. 6. Общая структура библиотеки fuzzylib

Fig. 6. A general structure of the fuzzylib library



Таблица 1

## Описание критериев

Table 1

## A criteria description

Сценарий	Критерий	Описание	Размерность и характеристика критерия
C <sub>1</sub>	Потребление энергии	Использованная при производстве энергия	GWh/kg; минимизация
C <sub>2</sub>	Эффективность материала	Оценка количества использованного материала по отношению ко всему затраченному	% массы; максимизация
C <sub>3</sub>	Оценка LCIA	Оценка влияния агрегированного жизненного цикла; аналог углеродного следа	EcoPoints; минимизация
C <sub>4</sub>	Цена	Цена производственного процесса	\$/g; минимизация
C <sub>5</sub>	Риски для здоровья	Риски для здоровья человека	Высокие, средние, низкие; минимизация

Таблица 2

## Весовые коэффициенты по сценариям/разным группам экспертов (ТрНЧ)

Table 2

## Weight coefficients for scenario/different expert groups (ТрНЧ)

Сценарий	Критерий	Производители	Потребители	Экологи
C <sub>1</sub>	Потребление энергии	(0.1, 0.15, 0.2)	(0, 0, 0.05)	(0.25, 0.3, 0.35)
C <sub>2</sub>	Эффективность материала	(0.1, 0.15, 0.2)	(0, 0, 0.05)	(0.25, 0.3, 0.35)
C <sub>3</sub>	Оценка LCIA	(0, 0, 0.05)	(0.05, 0.1, 0.15)	(0.05, 0.1, 0.15)
C <sub>4</sub>	Цена	(0.6, 0.65, 0.7)	(0.45, 0.5, 0.55)	(0, 0, 0.05)
C <sub>5</sub>	Риски для здоровья	(0, 0.05, 0.1)	(0.35, 0.4, 0.45)	(0.25, 0.3, 0.35)

производителями и учеными. После определения критериев каждая заинтересованная сторона оценила важность критериев, назначив им весовые коэффициенты.

Назначение весовых коэффициентов с использованием *треугольных НЧ* (ТрНЧ) проводилось следующими группами экспертов: производители, потребители, экологи и управляющие [8] (табл. 2).

Оценки альтернатив по критериям представлены в таблице 3 согласно [8].

Для решения рассматриваемой задачи выбраны следующие варианты нечетких моделей FMAVT и FTOPSIS: FMSI (FM обозначает модель FMAVT, S – использование стандартной нечеткой арифметики при вычислении всех функций в модели [14], I – используемый метод ранжирования НЧ), FTRI (FT – модель FTOPSIS, R – редуцированный метод трансформации, применяемый для вычисления функций от НЧ [15], I – используемый метод ранжирования НЧ), I = CI, IM, Y. Таким образом, для решения рассматриваемой многокритериальной задачи с нечеткими данными используются модели FMAVT – FMSCI и FMSIM, а также модели FTOPSIS – FTRCI, FTRIM и FTRY для всех сценариев весовых коэффициентов, указанных в таблице 2.

Для моделей FMAVT, согласно полученным оценкам (табл. 4), лучшей (компромиссной) альтернативой является альтернатива A<sub>3</sub> для сценариев весовых коэффициентов, заданных производителями и экологами, в то время как для сценария «потребители» ранг 1 имеет альтернатива A<sub>2</sub>. Для сценария «экологи» ранги 2 и 3 зависят от выбора метода ранжирования.

Для моделей FTOPSIS (табл. 5) лучшей альтернативой является A<sub>2</sub> для сценариев «производители» и «потребители» и альтернатива A<sub>3</sub> для сценария «экологи». При этом выбор метода ранжирования не влияет на ранг альтернативы для конкретного сценария.

Таким образом, использование различных моделей, в том числе различных методов ранжирования, может приводить к разным результатам для задач как выбора, так и ранжирования.

Методы/модели МКАР/НМКАР могут приводить к различным результатам [3, 7, 13]. Влияние выбора метода ранжирования и/или подхода к оценке функций от НЧ в рамках моделей НМКАР исследуется в работе [13].

При наличии отличий в ранжировании альтернатив различными моделями проводятся детальный анализ чувствительности/неопреде-

Таблица 3

**Оценки альтернатив по критериям (ТрНЧ/ТпНЧ)**

Table 3

**Evaluation of alternatives by criteria (ТрНЧ/ТпНЧ)**

Альтернатива/сценарий	Способ производства/ критерий	Форма оценки	Значения
A <sub>1</sub> /C <sub>1</sub>	Arc/потребление энергии	ТрНЧ	(0.16, 0.23, 0.3)
A <sub>1</sub> /C <sub>2</sub>	Arc/эффективность материала		(0.02, 0.05, 0.07)
A <sub>1</sub> /C <sub>3</sub>	Arc/оценка LCIA		(0.03, 0.1, 0.17)
A <sub>1</sub> /C <sub>4</sub>	Arc/цена		(0.27, 0.64, 1)
A <sub>1</sub> /C <sub>5</sub>	Arc/риски для здоровья	ТпНЧ	(0, 0, 1, 1)
A <sub>2</sub> /C <sub>1</sub>	HiPco/потребление энергии	ТрНЧ	(0, 0.04, 0.7)
A <sub>2</sub> /C <sub>2</sub>	HiPco/эффективность материала		(0, 0.0008, 0.0016)
A <sub>2</sub> /C <sub>3</sub>	HiPco/оценка LCIA		(0, 0.04, 0.08)
A <sub>2</sub> /C <sub>4</sub>	HiPco/цена		(0, 0.09, 0.19)
A <sub>2</sub> /C <sub>5</sub>	HiPco/риски для здоровья	ТпНЧ	(0, 0, 1, 1)
A <sub>3</sub> /C <sub>1</sub>	Laser/потребление энергии	ТрНЧ	(0.25, 0.35, 0.44)
A <sub>3</sub> /C <sub>2</sub>	Laser/эффективность материала		(0.33, 0.67, 1)
A <sub>3</sub> /C <sub>3</sub>	Laser/оценка LCIA	ТпНЧ	(0, 0, 1, 1)
A <sub>3</sub> /C <sub>4</sub>	Laser/цена	ТрНЧ	(0.06, 0.21, 0.37)
A <sub>3</sub> /C <sub>5</sub>	Laser/риски для здоровья	ТпНЧ	(0, 0, 1, 1)
A <sub>4</sub> /C <sub>1</sub>	CVD/потребление энергии	ТрНЧ	(0.65, 0.82, 1)
A <sub>4</sub> /C <sub>2</sub>	CVD/эффективность материала		(0.03, 0.07, 0.1)
A <sub>4</sub> /C <sub>3</sub>	CVD/оценка LCIA		(0.31, 0.65, 1)
A <sub>4</sub> /C <sub>4</sub>	CVD/цена		(0.23, 0.56, 0.89)
A <sub>4</sub> /C <sub>5</sub>	CVD/риски для здоровья	ТпНЧ	(0, 0, 1, 1)

ленности, реструктурирование многокритериальной задачи, выбор более обоснованной модели для анализа конкретной задачи МКАР/НМКАР или ряд других подходов. Единственно верного подхода для решения проблем

такого рода в общем случае не существует.

На рисунке 7 приведен пример графического отображения в DecernsFMCDА применения модели FTR с методом ранжирования FRAAY [12], результат которого совпадает

Таблица 4

**Ранжирование альтернатив моделями FMAVT**

Table 4

**Ranking alternatives by FMAVT models**

Модель	A <sub>1</sub> /Arc	A <sub>2</sub> /HiPco	A <sub>3</sub> /Laser	A <sub>4</sub> /CVD
<b>«производители»</b>				
FMTIM	3	2	1	4
FMTCI	3	2	1	4
<b>«потребители»</b>				
FMTIM	3	1	2	4
FMTCI	3	1	2	4
<b>«экологи»</b>				
FMTIM	3	2	1	4
FMTCI	2	3	1	4

Таблица 5

**Ранжирование альтернатив моделями FTOPSIS**

Table 5

**Ranking alternatives by FTOPSIS models**

Модель	A <sub>1</sub> /Arc	A <sub>2</sub> /HiPco	A <sub>3</sub> /Laser	A <sub>4</sub> /CVD
<b>«производители»</b>				
FTRCI	4	1-2	1-2	3
FTRIM	4	1	2	3
FTRY	4	1	2	3
<b>«потребители»</b>				
FTRCI	4	1	2	3
FTRIM	4	1	2	3
FTRY	4	1	2	3
<b>«экологи»</b>				
FTRCI	2	3	1	4
FTRIM	2	3	1	4
FTRY	2	3	1	4

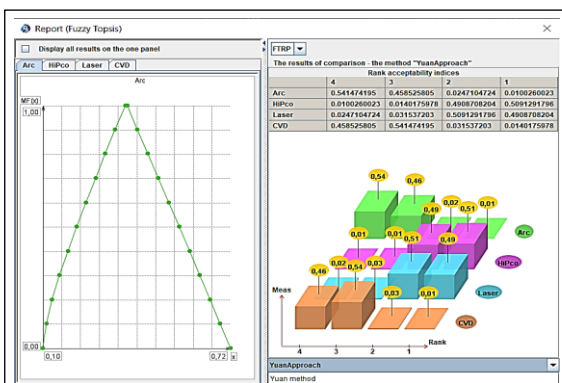


Рис. 7. Результаты модели FTRY для весовых коэффициентов, заданных производителями

Fig. 7. The results of the FTRY model for weight coefficients given by manufacturers

с Y-ранжированием, однако ранжирование FRAA указывает нечеткую меру приемлемости того, что альтернатива  $A_i$  имеет ранг  $k$ ,  $i, k = 1, \dots, 4$ .

Выбор модели МКАР/НМКАР зависит от конкретной многокритериальной задачи, а также опыта и мнений экспертов, решающих ее. Для реализации такого выбора авторы данной работы предлагают использовать комплекс моделей и средств анализа многокритериальных задач, входящих в систему Decerns-FMCDA.

### Заключение

Представленная в данной работе система ППР DecernsFMCDA является оригинальной и не имеет аналогов как по набору методов/моделей МКАР, так и по широкому спектру инстру-

ментов многокритериального анализа, реализованных в рамках единой программной платформы.

Ключевое отличие DecernsFMCDA от других систем МКАР заключается в том, что в настоящее время DecernsFMCDA – единственная система, в которой фактически реализованы все основные методы для решения дискретных задач МКАР, в том числе в условиях неопределенности; гибкая архитектура системы позволяет переходить от одного метода МКАР к другому и после выполнения соответствующих процедур анализа сравнивать полученные результаты для последующего принятия решений.

В рамках системы DecernsFMCDA реализован ряд оригинальных моделей нечеткого МКАР (FMAVT, FTOPSIS, FPROMETHEE) для решения многокритериальных задач выбора, ранжирования и сортировки в условиях неопределенности/нечеткости объективных значений критериев и субъективных суждений. Инструментарий DecernsFMCDA позволяет анализировать влияние неопределенностей при задании весовых коэффициентов и частных функций ценности/полезности.

DecernsFMCDA зарекомендовала себя как эффективный инструмент ППР при анализе широкого спектра многокритериальных проблем в области управления рисками, экологии, охраны окружающей среды, реабилитации загрязненных территорий, планирования землепользования, экономики и в других сферах. DecernsFMCDA может также эффективно использоваться в рамках целого ряда университетских курсов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-01039.*

### Литература

1. Edwards W., Miles R.F., von Winterfeldt D. *Advances in Decision Analysis: From Foundations to Applications*. NY: Cambridge University Press, 2007. DOI: 10.1017/CBO9780511611308.
2. Marcomini A., Suter G.W., Critto A. *Decision Support Systems for Risk-Based Management of Contaminated Sites*. NY, Springer Publ., 2009, 436 p.
3. Belton V., Stewart T. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. MA, Boston, Springer Publ., 2002, 372 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-1495-4.
4. Greco S., Ehrgott M., Figueira J.R. *Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys*. NY, Springer Publ., 2016, 1048 p.
5. Lahdelma R., Salminen P. SMAA-2: Stochastic multicriteria acceptability analysis for group decision making. *Operations Research*, 2001, vol. 49, no. 3, pp. 444–454. DOI: 10.1287/OPRE.49.3.444.11220.
6. Tervonen T., Figueira J.R. A survey on stochastic multicriteria acceptability analysis methods. *JMCDA*, 2008, vol. 15, pp. 1–14. DOI: 10.1002/MCDA.407.
7. Яцало Б.И., Грицюк С.В., Диденко В.И., Мирзеабасов О.А. Система многокритериального анализа решений DecernsMCDA и ее практическое применение // Программные продукты и системы. 2014. № 2. С. 73–84.

8. Linkov I., Moberg E., Trump B.D., Yatsalo B., Keisler J.M. Multi-Criteria Decision Analysis. Case Studies in Engineering and the Environment. Environmental Assessment and Management. USA, CRC Press Publ., 2021, 420 p.
9. Saaty T.L. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In: Multiple Criteria Decision Analysis, 2016, pp. 363–419. DOI: 10.1007/978-1-4939-3094-4\_10.
10. Opricovic S., Tzeng G.-H. Compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. European J. of Operational Research, 2004, vol. 156, pp. 445–455. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00020-1.
11. Nemery P., Lamboray C. FLOWSORT: A flow-based sorting method with limiting or central proles. TOP, 2008, vol. 16, pp. 90–113. DOI: 10.1007/s11750-007-0036-x.
12. Yatsalo B., Korobov A., Martinez L. Fuzzy multi-criteria acceptability analysis: A new approach to multi-criteria decision analysis under fuzzy environment. Expert Systems with Applications, 2017, no. 84, pp. 262–271. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.05.005.
13. Yatsalo B., Korobov A., Radaev A., Qin J., Martinez L. Ranking of independent and dependent fuzzy numbers and intransitivity in fuzzy MCDA. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021. DOI: 10.1109/tfuzz.2021.3058613.
14. Dubois D., Prade H. Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. Mathematics in Science and Engineering. Academic Press, 1980, 393 p.
15. Hanss M. Applied fuzzy arithmetic: An introduction with engineering applications. Choice Reviews Online, 2005, vol. 43, no. 4, pp. 43–2258. DOI: 10.5860/choice.43-2258.

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.138.171-183

Received 21.12.21, Revised 22.03.22  
2022, vol. 35, no. 2, pp. 171–183

### The DecernsFMCD fuzzy multi-criteria decision support system

*S.V. Gritsyuk*<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, *s.gritsyuk@gmail.com*

*A.V. Korobov*<sup>1</sup>, Postgraduate Student, *alexander.korobov.1993@gmail.com*

*A.V. Radaev*<sup>1</sup>, Postgraduate Student, *alexander.radaev.1994@gmail.com*

*B.I. Yatsalo*<sup>1</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Professor, *yatsalo@gmail.com*

<sup>1</sup> *Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of the National Research Nuclear University "MEPhI", Obninsk, 249040, Russian Federation*

**Abstract.** Risk management in the field of environmental protection, remediation of contaminated sites and land use planning requires using modern decision support systems.

This paper presents a DecernsFMCD fuzzy decision support system, which includes both well-known ordinary multicriteria decision analysis methods and original methods for dealing with uncertainties based on fuzzy sets and probabilistic approaches. There is an overview of the available computer systems for multi-criteria decision analysis, as well as a detailed description of the structure of DecernsFMCD, its main components and differences from other multi-criteria analysis systems. The paper includes the list of classical, probabilistic and original fuzzy models of multicriteria decision analysis implemented as part of the system, as well as diagrams and descriptions of the general modular architecture of DecernsFMCD and the original libraries of multicriteria decision analysis (mcdalib4) and a library for working with fuzzy numbers (fuzzylib).

A practical application of the DecernsFMCD system is shown on the case of the multicriteria problem of finding the optimal method for producing single-wall carbon nanotubes. The problem analysis involves the original fuzzy models FTOPSIS and FMAVT implemented within the framework of the system. The DecernsFMCD fuzzy decision support system is currently the only system that actually implements all the main methods for solving discrete MADM problems, including dealing with uncertainties. The system allows forming and exploring scenarios using various models of multicriteria decision analysis, including those with different sets of parameters of specified models, for subsequent comparison and analysis of the output results as a part of the decision support process.

**Keywords:** decision support system, multi-criteria decision analysis, uncertainty analysis, risk management, fuzzy set, fuzzy number, Decerns project, DecernsFMCD system.

*Acknowledgements.* This work is supported by the Russian National research project RFBR-19-07-01039.

### References

1. Edwards W., Miles R.F., von Winterfeldt D. *Advances in Decision Analysis: From Foundations to Applications*. NY: Cambridge University Press, 2007. DOI: 10.1017/CBO9780511611308.
2. Marcomini A., Suter G.W., Critto A. *Decision Support Systems for Risk-Based Management of Contaminated Sites*. NY, Springer Publ., 2009, 436 p.
3. Belton V., Stewart T. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. MA, Boston, Springer Publ., 2002, 372 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-1495-4.
4. Greco S., Ehrgott M., Figueira J.R. *Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys*. NY, Springer Publ., 2016, 1048 p.
5. Lahdelma R., Salminen P. SMAA-2: Stochastic multicriteria acceptability analysis for group decision making. *Operations Research*, 2001, vol. 49, no. 3, pp. 444–454. DOI: 10.1287/OPRE.49.3.444.11220.
6. Tervonen T., Figueira J.R. A survey on stochastic multicriteria acceptability analysis methods. *JMCDA*, 2008, vol. 15, pp. 1–14. DOI: 10.1002/MCDA.407.
7. Yatsalo B., Didenko V., Gritsyuk S., Sullivan T. Decerns: A framework for multicriteria decision analysis. *Int. J. of Computational Intelligence Systems*, 2015, vol. 8, no. 3, pp. 467–489. DOI: 10.1080/18756891.2015.1023586.
8. Linkov I., Moberg E., Trump B.D., Yatsalo B., Keisler J.M. *Multi-Criteria Decision Analysis. Case Studies in Engineering and the Environment. Environmental Assessment and Management*. USA, CRC Press Publ., 2021, 420 p.
9. Saaty T.L. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In: *Multiple Criteria Decision Analysis*, 2016, pp. 363–419. DOI: 10.1007/978-1-4939-3094-4\_10.
10. Opricovic S., Tzeng G.-H. Compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European J. of Operational Research*, 2004, vol. 156, pp. 445–455. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00020-1.
11. Nemery P., Lamboray C. FLOWSORT: A flow-based sorting method with limiting or central proles. *TOP*, 2008, vol. 16, pp. 90–113. DOI: 10.1007/s11750-007-0036-x.
12. Yatsalo B., Korobov A., Martinez L. Fuzzy multi-criteria acceptability analysis: A new approach to multi-criteria decision analysis under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 2017, no. 84, pp. 262–271. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.05.005.
13. Yatsalo B., Korobov A., Radaev A., Qin J., Martinez L. Ranking of independent and dependent fuzzy numbers and intransitivity in fuzzy MCDA. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021. DOI: 10.1109/tfuzz.2021.3058613.
14. Dubois D., Prade H. *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. Mathematics in Science and Engineering*. Academic Press, 1980, 393 p.
15. Hanss M. Applied fuzzy arithmetic: An introduction with engineering applications. *Choice Reviews Online*, 2005, vol. 43, no. 4, pp. 43–2258. DOI: 10.5860/choice.43-2258.

### Для цитирования

Грицюк С.В., Коробов А.В., Радаев А.В., Яцало Б.И. Нечеткая многокритериальная система поддержки принятия решений DecernsFMCDА // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 2. С. 171–183. DOI: 10.15827/0236-235X.138.171-183.

### For citation

Gritsyuk S.V., Korobov A.V., Radaev A.V., Yatsalo B.I. The DecernsFMCDА fuzzy multi-criteria decision support system. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 2, pp. 171–183 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.138.171-183.