

На правах рукописи
УДК 519.816



Разумов Дмитрий Анатольевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ
ПРОЕКТОВ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И СИСТЕМ

Специальность: 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(авиационная и ракетно-космическая техника)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (Московский авиационный институт, МАИ)

Научный руководитель: Малышев Вениамин Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системный анализ и управление» МАИ.

Официальные оппоненты: Присяжнюк Сергей Прокофьевич, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ЗАО «Институт телекоммуникаций».

Ломакин Михаил Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (федеральный центр науки и высоких технологий)» (ФГБУ «ВНИИ ГОЧС (ФЦ)»).

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» АО «НПО Лавочкина», 141402, Ленинградская ул., д. 24, г. Химки, Московская область.

Защита диссертации состоится «14» октября 2021 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (Московский авиационный институт, МАИ по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=122291

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.12,

д.т.н.



А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В космической отрасли важнейшей задачей является обеспечение принятия решений при разработке программы проектов, которые, как правило, предполагают создание космических средств и систем с учётом множества критериев оценки. Подобные задачи обычно имеют многоцелевой характер и требуют оценки каждого проекта по совокупности показателей, оказывающих влияние на проектирование системы, её разработку и функционирование. Существующие подходы, несмотря на широкое применение, не свободны от недостатков, среди которых можно перечислить зависимость решений от субъективизма экспертов и в большинстве случаев от сложной, длительной и неоднозначной процедуры формализации экспертного мнения. Часто возникают проблемы со сходимостью мнений экспертов и обеспечением заданного уровня достоверности результатов экспертизы. В диссертации предложена методика, использующая для многокритериальной оценки процедуру программного моделирования множества суждений специалистов на базе реализации соответствующего множества оценочных функций, на основе которого вычисляются оценки каждого проекта, и осуществляется их ранжирование. Это даёт возможность снизить субъективизм, повысить скорость принятия решений и при необходимости, вносить точечные суждения специалистов для уточнения предпочтений по различным критериям оценки. В качестве примеров применения рассматривается методика для приоритизации (ранжирования) проектов Федеральной космической программы (ФКП), расчёта рисков мультипроектов ФКП и др.

Степень разработанности темы исследования

Анализируя научно-техническую литературу в области принятия многокритериальных решений можно отметить, что в настоящее время создан мощный методологический фундамент, как учёными отечественной школы, так и зарубежными авторами. Среди них следует перечислить: О.И. Ларичева, В.В. Подиновского, Ю.Б. Гемейера, И.Ф. Шахнова, В. Парето, Т. Саати, П. Фишберна и других. Разработанные ими методы дают возможность уйти от вербальных формулировок экспертов к их численным интерпретациям и получать количественные оценки для сравнения альтернатив, что несколько снижает неопределённость в вопросах многокритериального выбора. Общим свойством указанных методов, является то, что они базируются на субъективизме экспертного мнения. Это обстоятельство предъявляет к руководителям или лицам принимающим решение (ЛПР) повышенные требования по вопросам организации и оценки самих экспертных сообществ с точки зрения их компетентности и

субъективизма. Таким образом, проблема снятия неопределённости через формализацию экспертного мнения сама создаёт в значительной степени следующую неопределённость, связанную с субъективизмом экспертов. Поэтому разработка методов многокритериальной оценки принятия решений, их реализация на уровне методик и программного обеспечения остаётся актуальной.

Цели и задачи работы

Целью диссертации является повышение эффективности принятия решений при оценке проектов космических средств и систем.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Проводится анализ существующих методов многокритериальной оценки.
2. Разрабатывается новая методика многокритериальной оценки/приоритизации проектов космических средств и систем для снижения влияния субъективного фактора и снижения времени принятия решений, основанная на вычислении приоритета проекта как вероятности того, что он окажется в выигрыше при всех возможных моделируемых равновероятных и независимых сочетаниях мнений экспертов, реализуемых на множестве различных вариантов предпочтений критериев оценки.
3. Для реализации этой методики разрабатывается программно-математическое обеспечение системы поддержки принятия решений.
4. Подтверждается эффективность предлагаемой методики на основе её сравнительного анализа с используемой в настоящее время методикой.
5. На основе методики решаются задачи приоритизации проектов при балансировке портфеля проектов ФКП, оценки рисков мультипроектов программы и задачи сравнительного анализа космических средств и систем.

Научная новизна работы

1. Разработана новая методика поддержки принятия решений ЛПР для многокритериальной оценки проектов космических средств и систем.
2. Для реализации методики разработано программно-математическое обеспечение (ПМО) системы поддержки принятия решений (СППР) по приоритизации проектов космических средств и систем позволяющее оценивать приоритет проекта как вероятность того, что он окажется в чистом выигрыше при всех возможных равновероятных моделируемых программно экспертных мнениях, в основе которого лежат:
 - рекурсивная процедура формирования множества различных способов учёта неопределённости экспертного мнения, позволяющая генерировать теоретически любое число уникальных вариантов распределения весов линейной свёртки для реализации этого множества;

- применение теоремы комбинаторной теории о числе сочетаний с повторениями для оценки мощности этого множества;
- организация параллельных вычислений, в рамках которых на основе этой оценки рейтинги проектов вычисляются параллельно (на различных процессорах в потоках), что позволяет снижать время решения задачи на порядки и делать его приемлемым для принятия оперативных решений;

3. Методика не применяет искусственных подходов, формализующих задачу за счет отыскания якобы «адекватного ей и единственного» способа учета неопределенности, а учитывает все множество таких способов. От ЛПР лишь требуется отнести частные критерии к той или иной группе важности (если необходимо), задав тем самым конкретную (хотя и размытую с позиций количественного сопоставления значимости различных групп важности) «политику выбора». Это освобождает ЛПР, по крайней мере, на первоначальной стадии осмысления стоящей перед ним задачи принятия решения, от громоздких, запутанных процедур формализации экспертного мнения. Определив политику выбора, он получает для каждого рассматриваемого варианта решений две комплексные числовые оценки: жесткий и мягкий рейтинг.

4. На основе предложенной методики решаются практически значимые задачи многокритериальной оценки: приоритизация проектов ФКП, расчёт рисков мультипроектов ФКП, сравнительный анализ космических средств и систем.

Для решения указанных задач в диссертации использованы следующие **методология и методы исследования**: системного анализа, векторной оптимизации, комбинаторики, теории вероятностей, теории принятия решений, проектирования информационных систем, объектно-ориентированного анализа и проектирования и др. **Объект исследования** – процессы принятия решений при сравнительном анализе космических средств и систем. **Предмет исследования** – методы, методики, математические модели и алгоритмы, используемые при сравнительной оценке космических средств и систем в ходе их проектирования и эксплуатации.

На защиту выносятся:

1. Методика поддержки принятия решений ЛПР для многокритериальной оценки проектов космических средств и систем, разработанная на основе ПМО системы поддержки принятия решений (СППР).

2. Программно-математическое обеспечение СППР, реализующее методику, разработанное на основе использования:

- рекурсивной процедуры формирования множества различных функций учёта неопределённости, позволяющей генерировать достаточное (теоретически любое) число

уникальных вариантов распределения весов линейной свёртки для реализации этого множества;

– теоремы комбинаторной теории о числе сочетаний с повторениями для оценки мощности этого множества, что позволяет управлять распределением параллельных вычислений в потоках на нескольких процессорах и снижать время решения задачи на порядки (делать его приемлемым для ЛПР);

3. Решение практически значимых задач многокритериального выбора для космической отрасли: приоритизация проектов ФКП, расчёт риска мультипроекта ФКП и др.

Практическая значимость работы: разработанная методика и ПМО применялись в ходе совместных научно-технических работ с АО «ЦНИИмаш» для решения задач приоритизации проектов Федеральной космической программы (ФКП), расчёта рисков мультипроектов ФКП. Показано, что предложенный подход может применяться для сравнения проектов космических средств и систем. Методика может использоваться для многокритериальной оценки сложных проектов с большим количеством показателей, для тендерных оценок и т.д.

Степень достоверности и апробация результатов: достоверность результатов подтверждается корректным использованием современной теории системного анализа и управления, апробированного математического аппарата и подтверждением правильности выбранных решений на основе отработки программно-математического комплекса на реальных данных. Основные результаты диссертации прошли апробацию на научных семинарах на кафедре «Системного анализа и управления» МАИ, в рамках докладов на научно-технических советах в АО «ЦНИИмаш», а также на международных и российских конференциях: XLIV Королёвские академические чтения по космонавтике (2020 г.), 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (2019 г.), 14-я, 13-я, 12-я Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация» (2019, 2018, 2017 г.г.), 12-я, 10-я Международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» (2019, 2017 г.г.), Пятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (2011 г) и др.

Результаты работы использованы в АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» и на кафедре Системного анализа и управления МАИ, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения, содержит 128 страниц, 21 рисунок, 16 таблиц, 1 приложение. Список литературы состоит из 28 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору методов многокритериального анализа. Сложность заключается в том, что задача многокритериальной оптимизации никогда не имеет единственного оптимального решения, строго математически. Большинство существующих подходов рассматривают её решение как компромисс, и особенность заключается в том, как реализуется этот компромисс. *Принцип Парето* состоит в последовательном исключении из рассмотрения вариантов, заведомо являющихся неудовлетворительными. В итоге остаётся множество «не улучшаемых» векторов или множество Парето (P): если $x^* \in P$ & $f_i(\tilde{x}) \leq f_i(x^*) \Rightarrow \forall i f_i(\tilde{x}) = f_i(x^*)$ Очевидно, что принцип Парето не даёт в результате единственного оптимального выбора, а лишь ограничивает множество допустимых альтернатив, предоставляя экспертам осуществлять окончательный выбор на основе своих т.н. «внутренних» убеждений и опыта. В основе другого метода лежит *выделение одного главного критерия*, и перевод остальных (вспомогательных) критериев в разряд ограничений. Такие решения применяются там, где присутствует один явно доминирующий критерий, например, стоимость проекта. Там где не удаётся идентифицировать один главный критерий, широко применяется *метод линейной свёртки Гермейера*, который предполагает переход скаляризацией от m критериев к одному. В этом случае экспертами определяется ценность каждого критерия за счёт величины коэффициентов линейной свёртки, которые устанавливаются либо напрямую экспертами, либо для их вычисления применяются какие-либо подходы, например, *метод Фишберна*. Однако метод Фишберна не даёт ответа на вопрос как определять важность каждого критерия. Другие методы редукции критериев, *основаны на минимаксной свёртке*, где формируется система контрольных показателей («экспертная оценка сверху») которые представляют собой оценки сверху для соответствующих целевых критериев. В качестве меры приближения к каждому из показателей используют функцию максимума. Тогда задача скалярной оптимизации сводится к следующему функционалу:

$$x^* = \arg \min_x \max_{i=1,m} \left[\frac{f_i(x)}{f_i^*} \right]$$

Метод анализа иерархий базируется на выстраивании иерархий оценки решений в контексте декомпозиции проблемы на все более элементарные компоненты. При этом применяется метод попарных сравнений на основе определённой шкалы баллов для формализации мнений ЛПР. Таким образом, достигается переход от вербальных оценок к их численному эквиваленту.

Общим достоинством рассмотренных методов является то, что они позволяют перейти от расплывчатых вербальных оценок экспертов к числовым значениям. Тем не менее, результат численной интерпретации этих оценок зависит от субъективного мнения экспертов, которое заключается в модели его формализации в каждом методе и носит характер своеобразного «соглашения» между ЛПР и экспертами. Не редко на практике возникают проблемы с обеспечением сходимости мнений экспертов и заданного уровня достоверности в ограниченные сроки. Следовательно, разработка методик, расширяющих

спектр возможностей ЛПР для использования в конкретных условиях приемлемых моделей принятия решений, является актуальной.

Во второй главе даётся описание методики многокритериальной оценки на основе метода уверенных суждений¹. *Математически задача формулируется следующим образом:*

Дано: $X = [x_i]_N$, – дискретное множество проектов (альтернатив), $x_i \in X$, $i = \overline{1N}$
 $f(x) = [f^j(x_i)], j = \overline{1m}$ (1) – вектор-функция m скалярных критериев оптимальности. Будем полагать, что каждый частный критерий должен быть максимизирован.

Необходимо: выбрать из множества альтернатив наиболее предпочтительный или компромиссный вариант $\hat{x} \in X$, который должен удовлетворять условию:

$$\hat{x} \in X : \left(f^j(\hat{x}) \geq f^j(x), j = \overline{1m} \right) \quad (2) \quad \text{Т.е. выбрать из множества допустимых альтернатив (проектов) те, которые по}$$

всем имеющимся критериям сравнения будут предпочтительнее. Следует отметить, что таких вариантов в связи с математической незамкнутостью задачи может быть несколько, так что они составят множество не улучшаемых альтернатив Парето. Чтобы определить один вариант, который должен быть наиболее предпочтительным, необходимо ввести в рассмотрение дополнительные суждения с точки зрения, которых он будет рассматриваться как компромиссное решение. В методе линейной свёртки (3) в качестве этих суждений используются коэффициенты (4), которые определяют ценность каждого критерия, задаваемую экспертами.

$$f(x) = \sum_{j=1}^m a^j f^j(x) \quad (3) \quad \sum_{j=1}^m a^j = 1, a^j \geq 0 \quad (4)$$

В методе уверенных суждений предлагается использовать не одну конкретную свёртку, а множество линейных свёрток, которые моделируют возможные мнения экспертного сообщества или способы учёта этих мнений. В статье² было показано, что линейная свёртка в классе оценочных функций обладает свойством идентифицировать любые Парето - оптимальные решения. Обозначим множество функций, моделирующих мнения экспертов через F_a . Пусть $f(x_i) = f_i$, $i = \overline{1N}$ (N – число проектов), тогда $F_a = [f_{il}]_K$, $l = \overline{1K}$, где K – общее число вариантов коэффициентов, $A = [a_l^j]_K$ – множество коэффициентов оценочных функций, моделирующих экспертные мнения. Таким образом, для программной (инженерной) реализации метода необходимо найти способ, которым можно формировать множество A с помощью генерации уникальных комбинаций коэффициентов линейной свёртки $[a_l^j]_K$.

Теперь для того чтобы оценить каждый проект, следует ввести на множестве A

¹ Малышев В.В., Пиявский С.А. Метод уверенных суждений при выборе многокритериальных решений / В.В. Малышев, С.А. Пиявский // Известия РАН. Теория и системы управления, 2015, № 5, с. 90–101

² Пиявский С.А. Простой и универсальный метод принятия решений в пространстве критериев «стоимость–эффективность»/ С.А. Пиявский // Онтология проектирования. 2014. № 3(10). С. 89–102.

критерии оценки альтернатив, позволяющие выбирать наиболее предпочтительные из них. В качестве относительной меры (к мере всего множества A) предпочтительности альтернативы при этом будем рассматривать подмножество, на котором эта альтернатива оказалась наилучшей по значению оценочной функции в сравнении с другими альтернативами. Эту меру назовём жёстким рейтингом (HR). В данном случае значение показателя проекта i по j -тому критерию оценки $f^j(x_i) = x_{ij}$, т.к. мы имеем дело с дискретными величинами, получаемыми, как правило, из паспортов проектов. Оценочная функция для l -того варианта коэффициентов \bar{a}_l i -того проекта будет определяться по формуле (5):

$$f_{il} = \sum_{j=1}^m x_{ij} a_l^j \quad (5) \quad HR_i = \frac{\sum_{l=1}^K \sum_{i=1}^N B_{il}}{K}, \quad (6)$$

Тогда жёсткий рейтинг для каждого проекта будем вычислять по формуле (6),

где $l = \overline{1, K}$, $i = \overline{1, N}$, N – число проектов/альтернатив, K – число вариантов реализации вектора коэффициентов линейной свёртки \bar{a}_l . $B_{il} = 1$, если при l -том варианте моделируемого мнения i -тый проект оказался наилучшим ($f_{il} > f_{kl}$, $k = \overline{1, N} \wedge i \neq k$). Если при каком-либо l лучшими оказываются несколько (например, q) проектов, то для жесткого рейтинга каждого проекта в числителе (6) добавляется не 1, а $1/q$ ($B = 1/q$). Иными словами, рассматривают отношение суммы всех случаев для тех реализаций оценочной функции, когда альтернатива (проект) оказалась лучшей к числу всех реализаций (частота «выигрышей альтернативы»). Если придерживаться аналогий с теорией вероятности, то можно заметить, что жёсткий рейтинг есть не что иное, как *вероятность того, что при всех возможных равновероятных и независимых сочетаниях моделируемых мнений экспертов, альтернатива окажется наилучшей*.

Иногда может возникнуть ситуация, когда требуется оценить не только «вероятность» того, что какая-либо из альтернатив будет предпочтительнее на множестве моделируемых экспертных мнений, но среднюю сравнительную предпочтительность альтернативы (проекта) по сравнению с другими проектами. Это также бывает важно, если жёсткие рейтинги каких-либо вариантов оказались почти одинаковыми или равными нулю. Поэтому в методе уверенных суждений вводится так называемый мягкий (SR) рейтинг, который рассчитывается по формуле (7).

$$SR_i = \frac{\sum_{l=1}^K \frac{f_{il}}{\max_{il} f_{il}}}{K} \quad (7)$$

где $\max_{il} f_{il} > f_{kl}$ для $\forall k = \overline{1, N} \wedge i \neq k$.

Рассмотрим пример для иллюстрации работы метода (Таблица 1).

Дано: 3 проекта с 2-мя показателями, оба показателя имеют тренд на максимум, например («скорость» и «производительность»). Шаг перебора для вычисления коэффициентов линейных свёрток $h = 0,25$. Нормализация исходных физических значений показателей выполнена по формуле: $x_{ij}^{norm} = (x_{ij} - \min_j(x_{ij})) / (\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij}))$, где i – номер, строки, j – номер столбца матрицы показателей.

Необходимо: определить наиболее предпочтительный проект.

Таблица 1. – Иллюстративный пример

l	Проекты	x_{i1}^{norm}	x_{i2}^{norm}	a^1_l	a^2_l	$f_{il} = \sum_{j=1}^m x_{ij} a^j_l$	Лучший
1	Стрела	0,58	0,2	0	1	0,2	
	Куб	0,25	0,4	0	1	0,4	X
	Контур	0,42	0,28	0	1	0,28	
2	Стрела	0,58	0,2	0,25	0,75	0,295	
	Куб	0,25	0,4	0,25	0,75	0,3625	X
	Контур	0,42	0,28	0,25	0,75	0,315	
3	Стрела	0,58	0,2	0,5	0,5	0,39	X
	Куб	0,25	0,4	0,5	0,5	0,325	
	Контур	0,42	0,28	0,5	0,5	0,35	
4	Стрела	0,58	0,2	0,75	0,25	0,485	X
	Куб	0,25	0,4	0,75	0,25	0,2875	
	Контур	0,42	0,28	0,75	0,25	0,385	
5	Стрела	0,58	0,2	1	0	0,58	X
	Куб	0,25	0,4	1	0	0,25	
	Контур	0,42	0,28	1	0	0,42	

В Таблица 1 демонстрируется ход решения задачи. В последнем столбце отмечены проекты «X», у которых оценочная функция при данной комбинации \bar{a}_l оказалась максимальной. Таким образом, ответ: жёсткие рейтинги проектов $Стрела = 3/5 = 0,6$; $Куб = 2/5 = 0,4$; $Контур = 0/5 = 0$. Следовательно, наиболее предпочтительным оказался проект *Стрела*, т.к. вероятность того, что при всех возможных моделируемых экспертных мнениях он окажется в выигрыше у него наивысшая.

Рассмотрим ситуации, когда бывает необходимо учитывать изначально известные условия о том, что какие-либо критерии имеют преимущество в оценке общего решения, чем другие, т.е. «уверенные суждения ЛПР». Например, пусть при сравнительном анализе проектов космических аппаратов различных производителей, необходимо формировать полезную нагрузку вывода на орбиту максимальным числом КА, так что в любом случае критерий оценки массы всегда более предпочтителен, чем критерий мощности системы электро-питания (СЭП). Для реализации много-критериального анализа на множество допустимых альтернатив накладывается отношение предпочтения. Пусть $A^M \subset A$ – это подмножество коэффициентов линейной свёртки который получает показатель массы КА, $A^M = [a_i^M]_K, l = \overline{1, K}$, где K – число вариантов коэффициентов линейной свёртки (3). $A^{сэп} \subset A$ – это подмножество коэффициентов, которые будет получать показатель системы электропитания КА, соответственно, $a_i^{сэп} \in A^{сэп} = [a_i^{сэп}]_K$. Таким образом, при формировании множества A из него следует исключить те

комбинации a_i^j , в которых не выполняется отношение: $\forall a_i^j \in A: a_i^m > a_i^{c^n}$, $j = \overline{1m}$, m – число показателей. Таким образом, реальное число наборов $[a_i^j]$, формирующее итоговое множество F_a , может быть меньше оценки K (8). Если вернуться к рассмотренному уже примеру (Таблица 1) и добавить суждение ЛПР о том, что $a_i^2 > a_i^1$, то из рассмотрения будут исключены варианты, где $l = 3, 4, 5$. Следовательно, в данном случае в чистом выигрыше окажется проект *Куб*.

Таблица 2. - Пример множества неповторяющихся комбинаций весовых коэффициентов a^j при $m = 3$ и для числа дискретных значений коэффициентов 6.

№ набора	Коэффициенты	№ набора	Коэффициенты	№ набора	Коэффициенты
1	0; 0; 1	8	0.2; 0.2; 0.6	15	0.4; 0.6; 0
2	0; 0.2; 0.8	9	0.2; 0.4; 0.4	16	0.6; 0; 0.4
3	0; 0.4; 0.6	10	0.2; 0.6; 0.2	17	0.6; 0.2; 0.2
4	0; 0.6; 0.4	11	0.2; 0.8; 0	18	0.6; 0.4; 0
5	0; 0.8; 0.2	12	0.4; 0; 0.6	19	0.8; 0; 0.2
6	0; 1; 0	13	0.4; 0.2; 0.4	20	0.8; 0.2; 0
7	0.2; 0; 0.8	14	0.4; 0.4; 0.2	21	1; 0; 0

Для программной реализации метода необходимо алгоритмически реализовать множество оценочных функций F_a на множестве $A = [a_i^j]_K$. В работе³ показано, как можно вычислять варианты a_i^j при $j = 2$. Однако реальные задачи, как правило, требуют на много большего числа критериев оценки, поэтому возникает проблема реализации алгоритма равномерно возрастающего распределения весов (4) в диапазоне $[0,1]$ и получения всех возможных уникальных комбинаций из этого распределения. В Таблица 2 представлен пример, в котором шаг перебора $h = 0,2$, число показателей $m = 3$ и получается набор вариантов a^j , содержащий 21 комбинацию. Мощность множества A можно увеличить за счёт уменьшения шага дробления интервала, в котором могут располагаться коэффициенты линейной свёртки (3). Чем меньше шаг дробления, и чем больше показателей, и тем большее число функций f_{il} , моделирующих мнения экспертов мы получим, соответственно согласно закону больших чисел решение будет устойчивее. В работе проблема реализации таких распределений при теоретически любом числе показателей равном m (maxN - Рисунок 1) решена за счёт программно-алгоритмической рекурсии, т.е. использования в теле процедуры вызова её самой.

Важной проблемой является вычисление оценки числа наборов $[a_i^j]_K$, т.к. от этого напрямую зависит время решения задачи. Воспользуемся теоретическими положениями комбинаторики. Всякое сочетание с повторениями k -го порядка, составленное из множества, содержащего n элементов, называется также сочетанием с повторением из n элементов по k . Согласно теореме из комбинаторной теории о том, что число сочетаний с повторениями из k элементов по n выражается формулой:

$$\overline{C}_n^k = \frac{(n+k-1)!}{k!(n-1)!} = C_{n+k-1}^k,$$

³ Пиявский С.А. Два новых понятия верхнего уровня в онтологии многокритериальной оптимизации / С.А. Пиявский // Онтология проектирования. – 2013. - №1(7). – С. 65-85.

Если каждому a^j в формуле (3) поставить в соответствие число $h*k_j$, то k_j и будет соответствовать кратности повторений шага дробления при реализации: $a^j = h*k_j$

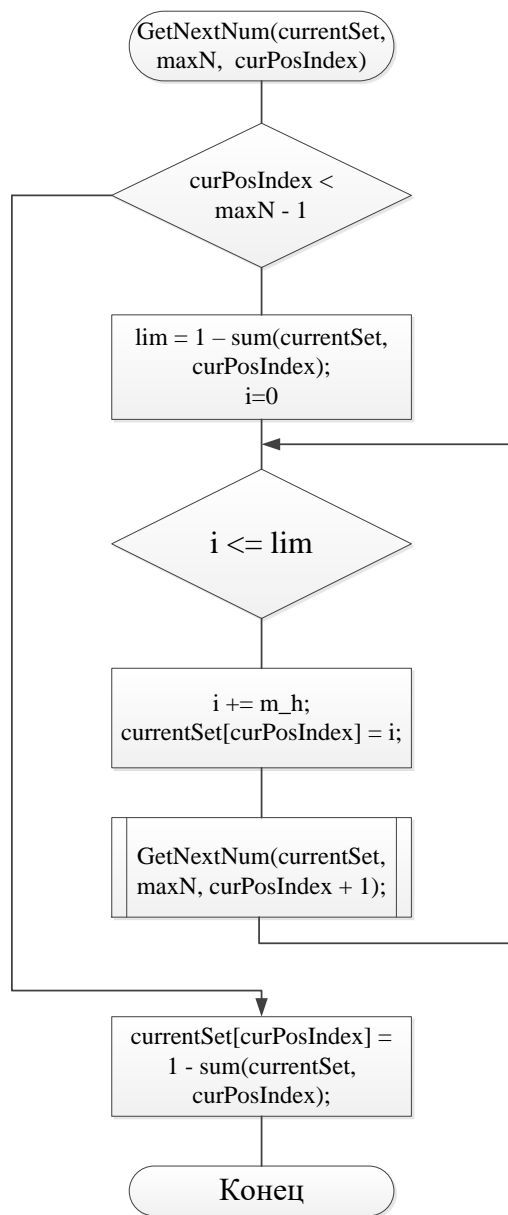


Рисунок 1. Схема программной реализации алгоритма распределения весов методики и предлагаемой в работе (Таблица 3):

- снижается зависимость от субъективного экспертного мнения привлекаемых групп специалистов или ЛПР;
- получено новое качество - предложенная методика позволяет оценить приоритет проекта по множеству показателей как вероятность того, что проект окажется

Способы, которыми можно представить число суммой, составленной из комбинации k слагаемых, располагаемых в m позициях можно вычислить как количество сочетаний с повторениями, где k – число слагаемых, из которых комбинируются суммы. Поэтому потенциально возможное максимальное количество вариантов наборов коэффициентов линейной свёртки без учёта уверенных суждений можно оценить заранее по формуле:

$$K = \frac{(m + 1/h - 1)!}{(1/h)!(m - 1)!} \quad (8) \quad \text{где } m - \text{число показателей}$$

лей (критериев сравнения). При $m \geq 20$ и $h = 0,01$ время вычислений может составить несколько часов.

Проблема сокращения времени работы алгоритма решается с помощью применения технологии параллельных вычислений посредством использования потоков (Thread), реализуемых в языках высокого уровня типа C++. Это позволило разбить вычисления сумм для формул (6), (7) на несколько интервалов и затем разнести их в параллельные нити на разных процессорах, что снизило время решения задачи на несколько порядков (Рисунок 2).

Для понимания преимуществ решения приведём сравнительный анализ существующей

- наилучшем при всех возможных моделируемых мнениях экспертов по предпочтениям критериев оценки;

- новая методика позволяет вводить предпочтения между критериями оценки проектов выборочно например, $a_1 > a_2$ или $a_1 > a_4$ и a_5 , в существующей методике всегда надо выстроить полный последовательный ряд предпочтений ($a_1 > a_3 > \dots > a_m$) с помощью экспертов, при чём критерии в начале этого ряда окажутся на много более

значимыми, чем в конце, даже если этого не требуется;

- повышается скорость принятия решения за счёт снижения времени на мероприятия, связанные с организацией обработки экспертного мнения, например, действующая методика использует для расчёта приоритетов правило Фишберна, что требует многодневной процедуры согласования экспертного мнения на основе анкетирования, а предложенный подход исключает этот этап.

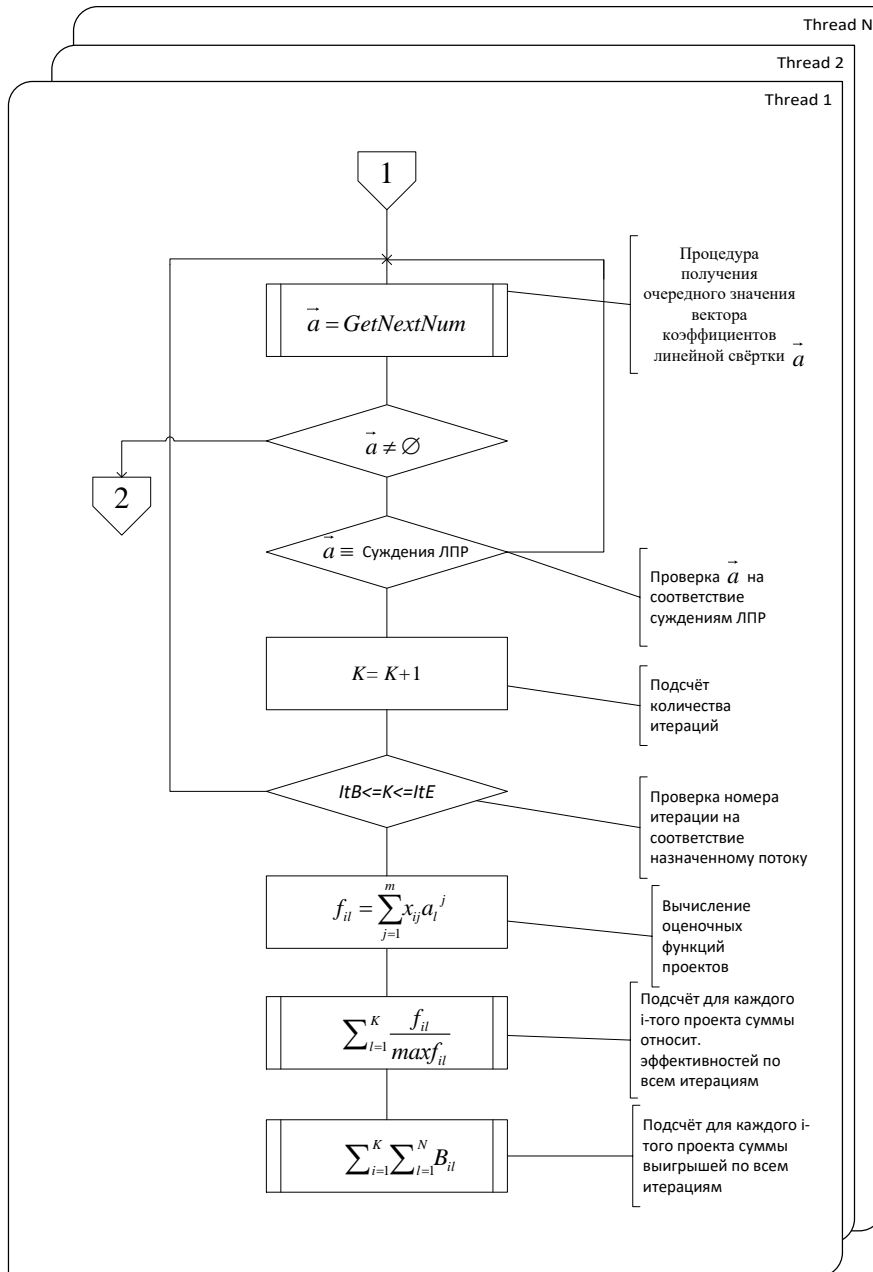


Рисунок 2. Реализация параллельных многопоточных вычислений рейтингов

Таблица 3. Сравнительный анализ методик

№ шага	Существующая методика	Предлагаемая методика
Шаг 1 – обоснование рационального множества	Исходные числовые значения показателей приоритета проектов берутся из	Совпадает с существующей методикой

№ шага	Существующая методика	Предлагаемая методика
показателей приоритета и способов оценки их значений.	паспортов этих проектов или рассчитываются на основе данных, содержащихся в паспортах проектов.	
Шаг 2. – определение значений показателей приоритета проектов.	Обычно используются паспорта проектов	Совпадает с существующей методикой
Шаг 3 – нормирование значений показателей приоритета.	Осуществляется вручную или автоматизировано	Введение уверенных суждений ЛПР, если они есть. Нормирование показателей осуществляется автоматически на шаге 4. (Рисунок 5)
Шаг 4 – ранжирование (приоритизация) проектов.	Осуществляется с использованием линейной свёртки, коэффициенты которой определяются по правилу Фишберна с использованием анкетирования экспертов (дни, иногда месяцы)	Осуществляется автоматически в разработанном ПМО СППР DSS_Studio (секунды-минуты). При этом приоритет/ценность проекта определяется как вероятность его чистого выигрыша при всех возможных моделируемых мнениях экспертов. (Рисунок 3, Рисунок 4).
Шаг 5 – ранжирование проектов и определение наиболее ценных из них при заданных ресурсных ограничениях	Осуществляется методом ватерлинии по таблице ранжированных по приоритету проектов (Рисунок 6 - зелёный цвет)	Совпадает с существующей методикой (Рисунок 6 - зелёный цвет) Определяются номенклатура наиболее перспективных проектов, интегральное финансирование которых не превышает квоты финансовых затрат или иных ресурсов доступной на учётный период.

В третьей главе для подтверждения эффективности методики приводятся результаты её применения на примерах, расчёта приоритетов Федеральной космической программы для балансировки портфеля проектов ФКП, расчёта рисков мультипроектов ФКП и др.

Балансировка портфеля проектов ФКП.

Дано:

- обоснованный перечень критериев оценки приоритетов проектов ФКП (Таблица 4);
- исходные значения показателей приоритетов проектов (Рисунок 3, в верхней таблице);

Таблица 4. Обоснованный перечень показателей приоритета

Показатель приоритета	Определение показателя приоритета	Тренд приоритизации	Значение показателя приоритета
Стратегичность (a_1)	Вклад в реализацию важнейших задач государственной политики в области космической деятельности	Максимум	Количество важнейших задач государственной политики в области космической деятельности, на реализацию которых направлен данный проект (содержится в паспорте проекта)

Показатель приоритета	Определение показателя приоритета	Тренд приоритизации	Значение показателя приоритета
Масштабность (a_2)	Степень влияния на другие проекты	Максимум	Количество других проектов, на реализацию которых влияет данный проект (содержится в паспорте проекта)
Целеустремленность (a_3)	Степень влияния на решение задач подпрограммы	Максимум	Количество целевых индикаторов и показателей подпрограммы, на значения которых влияют результаты проекта (содержится в паспорте проекта)
Эскалационность (a_4)	Величина вклада в развитие новых технологий, направленных на создание научно-технического задела	Максимум	Количество добавленных уровней готовности новых технологий при реализации ОКР, входящих в состав проекта (рассчитывается на основе данных, содержащихся в паспорте проекта). Перечень указанных технологий определен в «Системном проекте развития космических средств социально-экономического, научного и двойного назначения, как единой системы на период до 2030 года», разработанном специалистами АО «ЦНИИмаш» в ходе выполнения НИР «Авангард»
Задельность (a_5)	Степень реализованности проекта	Максимум	Среднее количество завершённых типовых этапов ОКР (в соответствии с Положением РК-11-КТ), входящих в состав проекта, на момент формирования подпрограммы (рассчитывается на основе данных, содержащихся в паспорте проекта)
Полнота (a_6)	Уровень готовности конечного продукта, достигаемый к концу программного периода	Максимум	Среднее количество завершённых типовых этапов ОКР (в соответствии с Положением РК-11-КТ), входящих в состав проекта, к концу программного периода (рассчитывается на основе данных, содержащихся в паспорте проекта)
Прогрессивность (a_7)	Уровень соответствия создаваемых образцов ракетно-космической техники лучшим мировым аналогам	Максимум	Доля создаваемых проектом образцов ракетно-космической техники, уровень которых соответствует лучшим мировым аналогам (содержится в паспорте проекта)
Импортонезависимость (a_8)	Уровень импортонезависимости создаваемых образцов ракетно-космической техники	Максимум	Доля импортозамещения электронной компонентной базы в составе образцов ракетно-космической техники, создаваемой в ходе реализации проекта (содержится в паспорте проекта)
Рискованность (a_9)	Уровень риска реализации проекта	Минимум	Содержится в паспорте проекта и рассчитывается по отдельной методике, разработанной специалистами АО «ЦНИИмаш» в ходе выполнения НИР «Авангард»
Имиджевость (a_{10})	Степень участия проекта в выполнении международных обязательств России в области космической деятельности	Максимум	Число международных обязательств России в области космической деятельности, на выполнение которых направлен проект (содержится в паспорте проекта)
Затратность (a_{11})	Уровень затрат на реализацию проекта	Минимум	Процент стоимости проекта в суммарной стоимости подпрограммы (рассчитывается на основе данных,

Показатель приоритета	Определение показателя приоритета	Тренд приоритизации	Значение показателя приоритета
			содержащихся в паспорте проекта)
Выгодность (a ₁₂)	Степень участия частного капитала	Максимум	Процент частных инвестиций в суммарной стоимости проекта (рассчитывается на основе данных, содержащихся в паспорте)

Необходимо:

- рассчитать приоритеты проектов по предложенной методике с учётом уверенных суждений ЛПР – «рискованность» значительнее «затратности»
- провести балансировку портфеля проектов ФКП по нарастающей итогом сумме финансового обеспечения проектов с учётом приоритета проекта и стоимости каждого проекта при этом общая сумма отобранных на реализацию в периоде проектов не должна превышать 1500 млн. руб.

Проекты	(a1)Стратегичность	(a2)Масштабность	(a3)Целеустремленность	(a4)Эскалационность	(a5)Задельность	(a6)Полнота	(a7)П...
Астро	4	1	3	0	3.16	1.83	
Био	3	0	2	0	0.5	4	
Гео-гелио	3	0	2	0	2	4	
Гонец	1	0	3	0	1	6	
Грузопоток	5	2	0	2	0.5	4	
Дозор	2	7	1	2	0	6	
Енисей	2	1	1	10	0	4	
Импортозамещение	0	0	1	5	0	0	

Проекты	Мягкий рейтинг	Жёсткий рейтинг	(a1)Стратегичность	(a2)Масштабность	(a3)Целеустремленность	(a4)Эскалационность
Партнерство	0.722964	0.209929	0.142857	0.000000	0.500000	0.000000
Федерация	0.765172	0.151426	1.000000	0.000000	0.500000	0.176471
Сотрудничество-КОСПАС	0.694723	0.135476	0.000000	0.074074	0.250000	0.000000
Общего назначения	0.631536	0.126499	0.714286	1.000000	0.250000	0.000000
Перспектива	0.629898	0.104408	0.142857	0.000000	0.250000	1.000000
Радар	0.695100	0.052809	0.857143	0.000000	1.000000	0.000000
Метео-Глоб	0.665346	0.051963	0.142857	0.037037	1.000000	0.000000
Сервис	0.445321	0.043573	0.285714	0.185185	0.250000	0.000000
Луна	0.707255	0.037472	0.857143	0.037037	0.750000	0.529412

Рисунок 3. Оценка приоритетов проектов ФКП с помощью ПМО СППР

Ответ: На Рисунок 3 представлен расчёт приоритетов проектов с помощью ПМО СППР с учётом уверенных суждений ЛПР – «рискованность» значительнее «затратности», наиболее предпочтительными оказались проекты, у которых получилась наибольшая вероятность выигрыша при всех возможных моделируемых экспертных мнениях; на Рисунок 5 – интерфейс ввода уверенных суждений; На Рисунок 6 – балансировка портфеля проектов ФКП с итоговой суммой ≤ 1500 млн. руб.

В настоящее время методики, предложенные для комплексной оценки рисков ФКП предполагают, что показатель риска выполнения m -ого мультипроекта рассчитывается как аддитивная свертка рисков по всем проектам данного мультипроекта с учетом приоритетов каждого (9):

$$R^m = \sum_{l=1}^{N^m} W^{ml} * R^{ml}, \quad (9)$$

ого мультипроекта.

где: R^m – обобщённый риск m – го мультипроекта программы; W^{ml} – приоритет l – ого проекта m – ого мультипроекта; R^{ml} – частный риск l – ого проекта m –

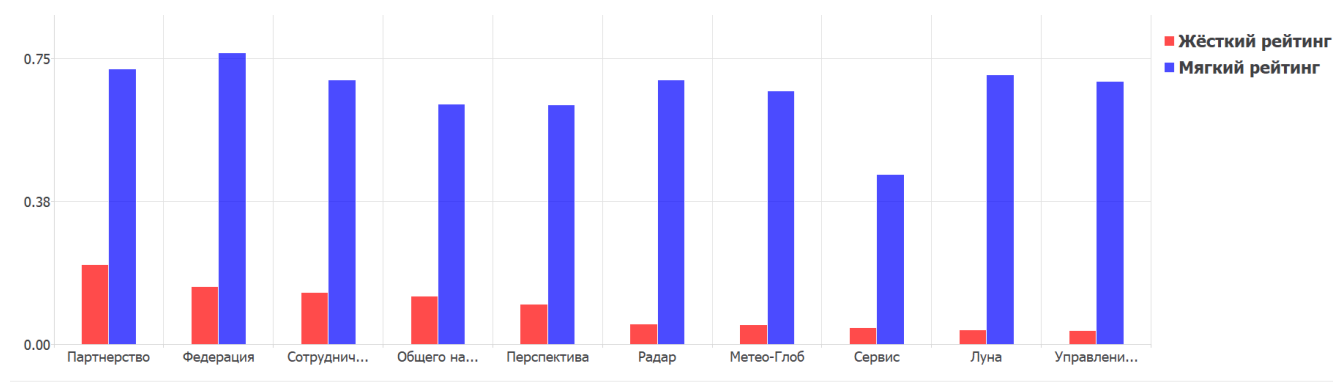


Рисунок 4. Графики рейтингов проектов ФКП

Проекты	Ж. Рейтинг	Объём финансирования	Сумма с нарастающим итогом
Партнерство	0,20992	100	100
Федерация	0,15142	300	400
Сотрудничество-КОСПАС	0,13547	120	520
Общего	0,12649	20	540
Перспектива	0,10440	150	690
Радар	0,05280	350	1040
Метео-Глоб	0,05196	120	1160
Сервис	0,04357	200	1360
Луна	0,03747	160	1520
Управление	0,03576	100	1620
Сотрудничество-Марс	0,01955	130	1750
МКС	0,01326	20	1770

Рисунок 5. Введение уверенных суждений ЛПР («Рискованность предпочтительнее Затратности»)

Рисунок 6. Определение наиболее перспективных проектов методом ватерлинии

Для вычисления W^{ml} применяются экспертные методы многокритериальной оценки, основанные на известных методиках (методы коэффициентов Фишберна, Саати др.) при этом задействуется многодневная процедура анкетирования экспертов. В работе предложено оптимизировать процесс принятия решения на основе применения разработанной методики и ПМО. При этом в качестве W^{ml} использовать приоритет проекта, рассчитанного по предложенной методике (Рисунок 3, Рисунок 4).

Дадим постановку задачи, дано:

- обоснованный перечень критериев оценки приоритетов проектов ФКП (Таблица 4);
- исходные значения показателей приоритетов проектов - таблица в верхней части Рисунок 3;

Таблица 5. - Расчёт риска мультипроекта ФКП

Проекты	Ж. Рейтинг	Рискованность	$R*HR$
Астро	0,0001809840	0,49	0,0000886822
Био	0,0000000000	0,05	0,0000000000
Гео-гелио	0,0000000000	0,86	0,0000000000
Гонец	0,0002568851	0,56	0,0001438557
Грузопоток	0,0000003826	0,5	0,0000001913
Дозор	0,0017054590	0,21	0,0003581464
Енисей	0,0000003826	0,44	0,0000001684
Импортозамещение	0,0000393152	0,26	0,0000102220
Качество	0,0000003826	0,25	0,0000000957
Линза	0,0000000000	0,22	0,0000000000
Луна	0,0374721158	0,41	0,0153635675
Мегаватт	0,0000003826	0,43	0,0000001645
Метео-Глоб	0,0519631157	0,03	0,0015588935
Метео-ССО	0,0034951667	0,12	0,0004194200
МКС	0,0132634268	0,45	0,0059685421
МКСР	0,0029715055	0,05	0,0001485753
Общего назначения	0,1264987622	0,05	0,0063249381
Партнерство	0,2099290094	0,4	0,0839716037
Перспектива	0,1044081860	0,14	0,0146171460
Производство	0,0000000000	0,15	0,0000000000
Радар	0,0528094617	0,03	0,0015842839
Сервис	0,0435726111	0,03	0,0013071783
Система	0,0000000000	0,2	0,0000000000
Сотрудничество-КОСПАС	0,1354756794	0,05	0,0067737840
Сотрудничество-Марс	0,0195501354	0,57	0,0111435772
Союз-Восток	0,0092166796	0,03	0,0002765004
Управление КА	0,0357636723	0,26	0,0092985548
Федерация	0,1514262984	0,14	0,0211996818

Ответ: $R^m = 0,1593580908$

Необходимо: используя разработанную методику и ПМО рассчитать приоритеты проектов и далее обобщённый риск m -го мультипроекта, состоящего из представленных проектов, по формуле (9). Ответ - Таблица 5.

Рассмотрим задачу сравнения ракетносителей (РКН) сверхтяжёлого класса.

Дано:

- обоснованный перечень критериев оценки приоритетов проектов РКН (Рисунок 7): НОО (вывод груза на низкую околоземную орбиту тонны), ГПО (вывод груза на геопереходную орбиту тонны), ГСО (вывод груза на геостационарную орбиту тонны), тяга (меганьютоны на уровне моря), длина (метры), масса (тонны), общее число пусков, надёжность (отношение числа удачных пусков к общему числу пусков), цена запуска в млн. \$.
- исходные значения показателей приоритетов проектов (Рисунок 7);

Необходимо: рассчитать предпочтительность проектов РКН по предложенной методике;

Проекты	НОО т	ГПО т	ГСО т	Тяга МН	Длина м	Масса т	Всего запусков	Надёжность	Цена запуска млн \$
Атлас-5 551	18.8	8.9	3.85	12.2	58.3	546	83	0.987952	200
Протон-М	23	7.1	3.7	10	58.2	705	424	0.936321	65
Ангага-А5	24.5	5.4	4	8.7	55.23	773	1	1	100
Чанджен-5	25	14	4.5	10.6	57	867	5	0.8	250
Delta IV heavy	28.7	14.2	6.75	9.4	70.7	733	40	0.975	400

Проекты	ягкий рейти	ёсткий рейти	НОО т	ГПО т	ГСО т	Тяга МН	Длина м	Масса т	исего запуско	Надёжность	Цена запуска млн \$
Атлас-5 551	0.827322	0.314343	0.000000	0.397727	0.049180	1.000000	0.801551	1.000000			
Delta IV heavy	0.768367	0.304443	1.000000	1.000000	1.000000	0.200000	0.000000	0.417445			
Протон-М	0.831472	0.296504	0.424242	0.193182	0.000000	0.371429	0.808016	0.504673			
Чандже...	0.629598	0.042627	0.626263	0.977273	0.262295	0.542857	0.885585	0.000000			
Ангага-А5	0.640797	0.042084	0.575758	0.000000	0.098361	0.000000	1.000000	0.292835			

Рисунок 7. Многокритериальный анализ РКН сверхтяжёлого класса

Ответ: наиболее предпочтительным проектом РКН оказался по выбранным критериям сравнения носитель сверхтяжёлого класса Атлас 5 - 551, т.к. вероятность того, что при всех возможных моделируемых равновероятных и независимых сочетаниях мнений экспертов (1916797311) проект окажется в выигрыше у него наивысшая (0,314343) - Рисунок 7. Если же задать суждение о том, что число пусков важнее чем масса носителя и тяга, то Протон-М уверенно выходит на первое место. Необходимо отметить, что американский РКН Атлас в первой ступени использует двигатели РД-180 производства НПО «Энергомаш».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационных исследований получены следующие результаты:

1. Проанализированы возможности существующих математических методов многокритериального анализа (Саати, Фишберна, Гермейера и др.), сделаны выводы о необходимости разработки методики, позволяющей снизить влияние субъективного фактора и ускорить принятие решений.

2. Разработана новая методика многокритериальной оценки/приоритизации проектов космических средств и систем для снижения влияния субъективного фактора и снижения времени принятия решений, основанная на вычислении приоритета проекта как вероятности того, что он окажется в выигрыше при всех возможных моделируемых равновероятных и независимых сочетаниях мнений экспертов, реализуемых на

множестве различных вариантов предпочтений критериев оценки.

3. Для реализации методики разработано программно-математическое обеспечение (ПМО) системы поддержки принятия решений по оценке проектов космических средств и систем позволяющее оценивать приоритет проекта как вероятность того, что он окажется в чистом выигрыше при всех возможных моделируемых программно экспертных мнениях, в основе которого лежат:

- рекурсивная процедура формирования множества различных способов учёта экспертного мнения, позволяющая генерировать теоретически любое число уникальных вариантов распределения весов линейной свёртки для реализации этого множества;

- применение теоремы комбинаторной теории о числе сочетаний с повторениями для оценки мощности этого множества;

- организация параллельных вычислений, в рамках которых на основе этой оценки рейтинги проектов вычисляются параллельно (на различных процессорах в потоках), что позволяет снижать время решения задачи на порядки (делать его приемлемым для принятия оперативных решений);

4. Подтверждена эффективность предлагаемой методики на основе её сравнительного анализа с используемой в настоящее время методикой:

- 1) Снижается зависимость от субъективного экспертного мнения привлекаемых групп специалистов или ЛПР.

- 2) Получено новое качество: предложенная методика позволяет оценить приоритет проекта по множеству показателей как вероятность того, что проект окажется в чистом выигрыше на множестве комбинаций экспертных мнений, моделируемых на множестве различных вариантов предпочтений критериев оценки.

- 3) В существующей методике приоритизации (оценки) проектов, использующей метод Фишберна, экспертам необходимо определять однозначно и сразу все предпочтения между критериями оценки на всём векторе, который может содержать более 20 показателей, т.е. надо выстроить однозначно иерархию критериев по отношению друг к другу в виде: $a_1 > a_3 > \dots > a_m$, при этом непреднамеренно критерии оказавшиеся в начале списка будут значительно важнее, чем в конце. Нет возможности избежать этого сильного дисбаланса в оценках между критериями в начале списка и в конце его. Никак нельзя оставить «за скобками» те показатели, по которым мнений вообще не существует или они трудно формализуемы или неопределённые. Поэтому возникает труднопреодолимая проблема численной оценки этих предпочтений. Как правило, если критериев много (более 10), эксперты могут более или менее точно определить ценность нескольких критериев по отношению друг к другу в терминах: « a_1 предпочтительней a_2 и a_3 предпочтительней a_5 », оставляя все

остальные оценки на уровне «не определено» или «неточно», «может быть». Новая методика не только даёт возможность экспертам вносить свои предпочтения точно и гибко, для нескольких показателей, оставляя большинство на уровне «не определено», но и моделировать возможные варианты этой неопределённости. Причём неопределённость в оценках предпочтений их возможные вариации закладывается в модель оценки альтернативы (проекта) как получение частоты его выигрыша на моделируемом множестве оценочных функций, что также важно, т.к. реальные мнения экспертов чаще всего сложно идентифицировать однозначно, и они могут быть распределены в рамках широкого спектра оценок.

4) Повышается скорость принятия решения за счёт снижения времени на мероприятия, связанные с организацией обработки экспертного мнения. Например, действующая методика использует для расчёта приоритетов правило Фишберна, что требует многодневной процедуры согласования и сведения экспертного мнения на основе анкетирования. Предложенный подход исключает этот этап.

5. Методика не использует искусственных приемов, направленных на формализацию задачи за счет отыскания якобы адекватного ей единственного способа учета неопределенности, а учитывает все множество таких способов. От ЛПР лишь требуется отнести каждый частный критерий к той или иной группе важности, задав тем самым конкретную (хотя и размытую с позиций количественного сопоставления значимости различных групп важности) «политику выбора». Это позволяет ЛПР не зависеть, по крайней мере, на первоначальной стадии осмысления стоящей перед ним задачи принятия решения, от громоздких процедур привлечения экспертов. Задав политику выбора, он получает для каждого рассматриваемого варианта решений две комплексные числовые оценки: жесткий и мягкий рейтинг.

6. Эффективность применения методики продемонстрирована на основе решения задачи приоритизации проектов при балансировке портфеля проектов ФКП, оценки рисков проектов ФКП, сравнении проектов РКН: снижается влияние субъективного фактора и сокращается время принятия решения на несколько дней.

Разработанная методика и ПМО отработывалась с использованием реальных данных в ходе совместных научно-технических работ с АО «ЦНИИмаш» для решения задач приоритизации проектов Федеральной космической программы расчёта рисков мультипроектов ФКП. Показано, что предложенный подход может применяться для многокритериальной оценки проектов космических средств и систем, а также использоваться для других практических задач многокритериального анализа.

Основные публикации по теме работы

Статьи, опубликованные в научных журналах входящих в текущий перечень ВАК России:

1. Малышев В.В. Разумов Д.А. Решение задачи многокритериальной оценки проектных решений АСУ космодрома методом уверенных суждений. //Информация и Космос. - 2019. - №. 4(11), стр. 78-82 (4 стр. авт., № 1111 из перечня ВАК от 31.10.2019)

2. Малышев В.В. Разумов Д.А. Концепция применения системно-ориентированного проектирования и виртуальных испытаний изделий в космической промышленности. //Вестник НПО им. Лавочкина. - 2019. № 4(46), стр. 41-44. (3 стр. авт., № 442 из перечня ВАК от 31.10.2019) DOI: 10.26162/LS.2019.46.4.006

3. Малышев В.В. Разумов Д.А. Концепция имитационной модели для проектирования автоматизированной системы управления космодромом. // Информация и Космос. - 2019. - №. 2(9). - с. 57-67. (10 стр. авт., № 1079 из перечня ВАК от 30.05.2019).

4. Малышев В.В. Разумов Д.А. Концепция проектирования автоматизированной системы управления космодрома. Имитационная модель для оптимизации проектных параметров. ч 1. // Космонавтика и ракетостроение 2019. - № 2(107), стр. 146-154 (9 стр. авт., № 1164 из перечня ВАК от 19.04.2019)

5. Малышев В.В. Разумов Д.А. Концепция проектирования автоматизированной системы управления космодрома. Имитационная модель для оптимизации проектных параметров. ч.2. // Космонавтика и ракетостроение 2019. - № 2(107), стр. 155-163 (7 стр. авт., № 1164 из перечня ВАК от 19.04.2019).

6. Разумов Д.А., Алёшин В.Д. Прикладная информатика. Моделирование в жизненном цикле автоматизированных систем управления в кризисных и чрезвычайных ситуациях. 2014г. № 6 (54); стр. 102-117 (14 стр. авт., № 1569 из перечня ВАК до 30.11.2015).

7. Бадалов А.Ю., Разумов Д.А. Методика моделирования в жизненном цикле большой автоматизированной системы космодрома уровня Smart City. // Труды МАИ. 2018 г. № 100. (30 стр. авт., № 2017 из перечня ВАК до 22.05.2018).

Авторские свидетельства

1. Авторское свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2020614916 «Система поддержки принятия решений для многофакторного анализа DSS Studio». Роспатент 29.04.2020. Авторы/правообладатели: Разумов. Д.А., Малышев В.В. и др.

2. Авторское свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2019619066. Имитационная модель для оптимизации проектных параметров АСУ космодрома. Роспатент 10.07.2019. Правообладатель/автор: Разумов Д.А.

Статьи в научных журналах, индексируемых в Library of Congress of U.S.A. and is abstracted/indexed in SCOPUS, Google Scholar, ResearchGate, SCImago, eLIBRARY, EBSCO:

1. Dmitri Razumov, Vladimir Aleshin. Simulation Modelling as a Tool for Design and Development in Large-Scale Automated Systems Smart City Application in Terms of Lack of Statistical Information. *Advances in Systems Science and Applications (ASSA)*. ISSN (Online) 1078-6236. 2018; № 03; 79-89 p., Published online at <http://ijassa.ipu.ru/index.php/ijassa/article/view/653>

Статьи в журналах, индексируемых в РИНЦ, eLibrary и/или, опубликованные в прочих научных журналах и изданиях:

1. Разумов Д.А. Алёшин В.Д. Использование имитационного моделирования при разработке больших АСУ. // Издательство: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Труды десятой международной конференции в двух томах. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. Москва, 02-04 октября 2017 г. стр. 258-266. РИНЦ URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32527730>

2. Разумов Д.А. Алёшин В. Д. Имитационное моделирование как инструмент построения и развития крупномасштабных автоматизированных систем в условиях недостатка статистической информации. // Труды Десятой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2017). Москва. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2-4 октября 2017 г. стр.352-355. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32598742> Разумов Д.А., Алёшин В.Д. Information Management; Модель жизненного цикла автоматизированных систем управления в кризисных и чрезвычайных ситуациях. 2013г. №7; стр.63-70.

3. Разумов Д.А., Алёшин В.Д. Имитационное моделирование в жизненном цикле автоматизированных систем управления в кризисных и чрезвычайных ситуациях. // Пятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. Труды конференции, том 1. - С-Петербург. Ноябрь 2011 г, стр. 244-249.

4. Разумов Д.А., Алёшин В.Д. Процессная модель региональной системы управления в кризисных и чрезвычайных ситуациях. // Шестой международный научный конгресс «Роль бизнеса в трансформации российского общества» - Москва: Сборник материалов; 2011 г, стр. 286-288.

5. Разумов Д.А., Алёшин В.Д. Ролевая функциональная модель жизненного цикла АСУ в кризисных и чрезвычайных ситуациях. // РАНХ и ГС Журнал школы IT менеджмента. Февраль 2010 г. URL: <http://journal.itmane.ru/node/1104>

Монографии:

1. Разумов Д.А., Алёшин В.Д. Моделирование при проектировании больших систем. -. Saarbrücken. Lambert Academic Publishing. 2016 г., 85 стр. ISBN: 978-3-659-87331-7. URL: <https://portal.dnb.de/opac.htm?query=978-3-659-87331-7&method=simpleSearch>