

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)» (МАИ)

На правах рукописи
УДК 519.816



РАЗУМОВ ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ
ПРОЕКТОВ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И СИСТЕМ

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Малышев Вениамин Васильевич

Город – Москва
2021 год

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и условных обозначений	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1 Обзор существующих методов многокритериального анализа	20
1.1 Принцип Парето.....	20
1.2 Скаляризация критериев	23
1.2.1 Выделение одного основного критерия и перевод остальных критериев в разряд ограничений	23
1.2.2 Метод линейной свёртки (Гермейера).....	24
1.2.3 Метод коэффициентов Фишберна	25
1.2.4 Минимаксная свёртка.....	27
1.2.5 Квадратичная свертка.....	28
1.2.6 Использование «абсолютного минимума».....	28
1.3 Метод анализа иерархий	29
1.4 Метод МАУТ.....	34
1.5 Сравнительный анализ методов многокритериального выбора.....	34
Глава 2 Разработка методики многокритериальной оценки проектов космических средств и систем на основе автоматизации метода уверенных суждений	40
2.1 Постановка задачи	44
2.2 Основные аспекты практической реализации методики многокритериальной оценки	49
2.2.1 Увеличение мощности множества, моделирующего экспертные мнения	49
2.2.2 Вычисление оценки мощности множества A	53
2.2.3 Решение проблемы снижения времени вычислений.....	54
2.3 Описание методики многокритериальной оценки проектов космических средств и систем	56
2.3.1 Основание для разработки методики.....	57
2.3.2 Основные положения и терминология	57
2.3.3 Основные шаги методики	61
2.4 Сравнительный анализ методик	68
Глава 3 Результаты применения программно-математического обеспечения системы поддержки принятия решений для многокритериальной оценки проектов космических средств и систем	80
3.1 Балансировка портфеля проектов Федеральной космической программы.....	80
3.1.1 Расчёт приоритетов проектов ФКП в множестве Парето	90
3.2 Многокритериальная приоритизация проектов Федеральной космической программы для оценки рисков мультипроектов	93

3.3	Многокритериальная оценка приоритетов проектов с большим количеством показателей.....	95
3.4	Сравнительный анализ глобальных навигационных спутниковых систем.....	106
3.5	Сравнительный анализ ракет-носителей сверхтяжёлого класса	116
	Список литературы	120
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
	Приложение А Структурная схема программы.....	126

Список сокращений и условных обозначений

АСУ	-	Автоматизированная система управления
АСУПП	-	Автоматизированная система управления подготовки и пуска
АО «ЦНИИмаш»	-	Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»
БС	-	Большая система
ГНСС	-	Глобальная навигационная спутниковая система
Госкорпорация «Роскосмос»	-	Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос»
ДЗЗ	-	Дистанционное зондирование Земли
ЕГКП	-	Единая государственная космическая программа Российской Федерации
ИСЗ	-	Искусственный спутник Земли
КА	-	Космический аппарат
ЛПР	-	Лицо, принимающее решения
МАИ	-	Метод анализа иерархий
МУС	-	Метод уверенных суждений
НИР	-	Научно-исследовательская работа
ОКР	-	Опытно-конструкторская работа
ПО	-	Программное обеспечение
СППР	-	Система поддержки принятия решений
СЭП	-	Система электрического питания
ТПР	-	Теория принятия решения
ФКП	-	Федеральная космическая программа
ЭГ	-	Экспертная группа
АНР	-	Analytic hierarchy process
DSS	-	Decision Support System
MAUT	-	Multi-attribute utility theory

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования:

В процессе разработки больших сложных систем [1, 2], к которым в полной мере можно отнести средства и системы космического назначения, всегда присутствует необходимость принятия решений, основанных на преодолении большого числа неопределённостей. Важнейшей задачей является управление программой проектов космической отрасли, которое предполагает принятие решений 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. В сфере освоения космоса цена ошибочных или недостаточно сбалансированных решений слишком велика и оказывает существенное, стратегическое воздействие на уровень научно-технического развития страны, её экономический, научный и оборонный потенциал на многие годы вперёд. Тщательно отработанные научно-обоснованные методы принятия решений позволяют избежать финансовых потерь, оптимизировать расходование бюджетных средств и обеспечить в конечном итоге лидерство в вопросах освоения и использования космоса.

Многокритериальность также обуславливается учётом интересов и задач множества структур, ведомств и организаций, участвующих в реализации каждого проекта. Например, оценка приоритетов проектов в портфеле Федеральной космической программы (ФКП) определяется целым набором показателей [4]:

1. Стратегичность – количество важнейших задач государственной политики в области космической деятельности, на реализацию которых направлен данный проект.
2. Масштабность – количество других проектов, на реализацию которых влияет данный проект.

3. Целеустремлённость – количество целевых индикаторов и показателей подпрограммы, на значения которых влияют результаты проекта.
4. Технологичность – уровень технологического совершенства применяемых в проекте решений.
5. Эскалационность - количество добавленных уровней готовности новых технологий при реализации ОКР, входящих в состав проекта (рассчитывается на основе данных).
6. Трендовость – соответствие используемых проектных решений общим мировым трендам развития отрасли.
7. Задельность – 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).
8. Полнота – среднее количество завершённых типовых этапов ОКР (в соответствии с Положением РК-11-КТ), входящих в состав проекта, к концу программного периода.
9. Критичность – наличие временных интервалов (резервов) между этапами проекта.
10. Прогрессивность - доля создаваемых проектом образцов ракетно-космической техники, уровень которых соответствует лучшим мировым аналогам.
11. Импортонезависимость – доля импортозамещения электронной компонентной базы в составе образцов ракетно-космической техники, создаваемой в ходе реализации проекта.
12. Пунктуальность – соблюдение сроков в ходе выполнения этапов проекта.
13. Продуктивность – степень выполнения проекта за счёт средств заказчика.
14. Бюджетность – уровень финансирования проекта.

15. Рискovanность – содержится в паспорте проекта и рассчитывается по отдельной методике, разработанной специалистами АО «ЦНИИмаш».
16. Международность – уровень международной значимости проекта.
17. Имиджевость – число международных обязательств России в области космической деятельности, на выполнение которых направлен проект.
18. Затратность – процент стоимости проекта в суммарной стоимости подпрограммы.
19. Освоенность – уровень освоения финансовых и иных ресурсов по отношению к плановым показателям.
20. Выгодность – процент частных инвестиций в суммарной стоимости проекта.

В [7] показано, что при оценке эффективности автоматизированных систем управления подготовки и пуска используют также несколько критериев:

1. Наличие у исполнителя опыта предыдущей разработки, например, сколько проектов подобного масштаба и класса уже реализовано исполнителем.
2. Наличие практического задела или прототипа, который обладает необходимым функционалом и может быть кастомизирован в приемлемые сроки под нужды заказчика. Здесь может быть оценен уровень готовности прототипа в процентах.
3. Наличие квалифицированного кадрового потенциала, общая цифра или нормированный показатель по заполнению структуры кадрового состава проектной команды. Обычно оценивается сколько научных и инженерных работников по заданному направлению участвует в проекте и их профессиональный опыт конкретных разработок, публикаций т.п.
4. Оценка научной или экспериментальной базы исполнителя.
5. Интегрированный показатель фондовооружённости разработчика.
6. Финансовая оценка проекта в миллиардах рублей.
7. Оценка времени реализации проекта в месяцах.

Сравнительный анализ отечественных космических средств гражданского и двойного назначения с лучшими мировыми аналогами является не менее сложной и масштабной проблемой, решаемой в контексте множества показателей.

Общим свойством существующих методик, несмотря на их широкое применение, является зависимость 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 исследуется подход, предлагающий использовать 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 проработанности 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. Поэтому проблема снятия неопределённости через формализацию экспертного мнения сама создаёт в значительной степени следующую неопределённость, связанную с субъективизмом экспертов. Следовательно, 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. Эффективность применения методики продемонстрирована на основе решения задачи приоритизации проектов при балансировке портфеля проектов

ФКП, оценки рисков проектов ФКП и др.: снижается влияние субъективного фактора и сокращается время принятия решения на несколько дней.

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 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 вывода формулы 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. 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 он будет доминировать на множестве моделируемых экспертных мнений, реализуемых как равновероятные и независимые комбинации 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: $a_1 \succ a_3 \succ \dots \succ a_m$, 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. На основе предложенной методики решаются практически значимые задачи многокритериальной оценки: приоритизация проектов ФКП, расчёт рисков мультипроектов ФКП, сравнительный анализ проектов космических средств и систем.

Для решения указанных задач в диссертации использованы следующие методологии и методы исследования:

- системного анализа,
- векторной оптимизации,
- комбинаторики,
- теории вероятностей,
- теории принятия решений,
- проектирования информационных систем,
- объектно-ориентированного анализа и проектирования

автоматизированных информационных систем 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 при балансировке портфеля проектов Федеральной космической программы (ФКП).

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 предложенная методика может применяться для сравнения проектов космических средств и систем, для многокритериальной оценки сложных проектов с большим количеством показателей 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 проверки функционирования программно-математического обеспечения 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», на международных и российских конференциях:

1. Разумов Д.А., Малышев В.В. Методика многокритериальной оценки космических средств и систем. //19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 23-27 ноября 2020 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2020. – 980 с.

2. Малышев В.В. Разумов Д.А. Основные аспекты реализации многокритериальной оценки проектных решений АСУ космодрома на основе метода уверенных суждений. // XLIV Королёвские академические чтения по космонавтике, 28–31 января 2020 г. Сборник тезисов. – М: Издательство МГТУ им. Баумана. 2020 г. стр. 599-601. [электронный ресурс] URL: http://www.korolevspace.ru/sites/default/files/uploads/Abstracts_44_2020_Vol1.pdf

3. Малышев В.В. Разумов Д.А. Методика многокритериальной оценки портфеля проектов космической программы на основе метода уверенных суждений. // 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019»: Москва. Тезисы. – Типография «Логотип», 2019. – стр. 126-127. ISBN 978-5-4465-2537-9. УДК 629.7 ББК 39.5+39.6. [электронный ресурс] URL: <http://aik.mai.ru/files/abstracts2019.pdf>

4. Разумов Д.А. Оптимизация структуры большой автоматизированной системы управления космодромом уровня SmartCity с помощью имитационной модели. // Материалы двенадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2019». Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. Издательство: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2019 , стр. 944-946. [электронный ресурс] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41386632>

5. Разумов Д.А., Мохов Д.В., Мохов А.В Особенности программной реализации метода уверенных суждений для задачи многофакторного анализа при большом количестве показателей. // XXIV Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация». Сборник тезисов конференции. М: МАИ-Принт, 2019, стр. 93-97. ISBN: 978-5-4465-2336-8 [электронный ресурс] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38574710>

6. Малышев В.В., Разумов Д.А. Методика моделирования в жизненном цикле автоматизированной системы управления космодрома». // XXIII Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация». Сборник тезисов конференции. М: МАИ-Принт, 2018. При поддержке: АО «Российские космические системы» РФФИ (грант 17-08-20232).

7. Разумов Д.А. Имитационное моделирование как инструмент построения и развития крупномасштабных организационно-технических систем в условиях недостатка статистической информации. // XXII Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация». Сборник тезисов докладов на конференции. М: МАИ-Принт, 2017. При поддержке: АО «Российские космические системы» РФФИ (грант 17-08-20232).

8. Разумов Д.А. Алёшин. В.Д. Имитационное моделирование как инструмент построения и развития крупномасштабных автоматизированных систем в условиях недостатка статистической информации. // Десятая международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем». Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. Издательство: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. –2017. стр.352-355.

9. 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 (ИММОД). Труды конференции, том 1. С-Петербург.- 2011 г,

стр. 244-249. [электронный ресурс] URL:
<http://simulation.su/files/immod2011/material/38.pdf>

10. Разумов Д.А., Алёшин В.Д. Моделирование больших локализованных систем (Модель жизненного цикла). // 7-я ежегодная международная научно-практическая конференция "Инвестиции. Инновации. Информационные Технологии". Москва. РАНХГС. 2015.

Основные публикации по теме работы:

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

2. 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)

3. 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

4. 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).

5. 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)

6. 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).

7. 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).

8. 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).

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

9. 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 [электронный ресурс] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32527730>

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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. [электронный ресурс] URL: <http://journal.itmane.ru/node/1104>

Монографии:

14. 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. [электронный ресурс] URL: <https://portal.dnb.de/opac.htm?query=978-3-659-87331-7&method=simpleSearch>

Авторские свидетельства:

1. Авторское свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020614916 «Система поддержки принятия решений для многофакторного анализа DSS Studio». Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Внесена в Реестр программ для ЭВМ 29.04.2020. Авторы/правообладатели: Разумов Д.А., Малышев В.В. и др.

2. Авторское свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель/автор: Разумов Д.А. № 2019619066. Имитационная модель для оптимизации проектных параметров АСУ космодрома по поддержке действий ситуационных центров управления, дежурных служб, служб быстрого реагирования, аварийно-спасательных формирований и других структур. Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). 10.07.2019

3. Российское агентство по правовой охране программ для ЭВМ, баз данных и технологий интегральных микросхем (РОСАПО), Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ, №940134, 31.01.1994; авторы: Разумов Д.А. и др.

4. Российское агентство по правовой охране программ для ЭВМ, баз данных и технологий интегральных микросхем (РОСАПО), Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ, №940024, 31.01.1994; авторы: Разумов Д.А. и др.

Результаты работы использованы в Акционерном обществе «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» 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.

Глава 1

Обзор существующих методов многокритериального анализа

Как отмечено в [1 - 8], в большинстве случаев на практике задачи принятия решений носят многоцелевой характер и оперируют не одним критерием, а несколькими.

В [3] отмечается, что в «общем случае задача многокритериальной оптимизации формулируется как задача одновременной минимизации некоторой совокупности критериев $f_1(x), f_2(x) \dots f_m(x)$ ». Кроме того, подчёркивается, что «строго математически задача в такой постановке смысла не имеет, так как минимумы отдельных критериев оптимальности в общем случае достигаются при разных значениях вектора x ». Таким образом, 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. Таким образом, решение, чаще всего базируется на некоем субъективном соглашении между ЛПР и экспертным сообществом, в основе которого рассматривается взаимоприемлемый механизм «редуцирования неопределённости» за счёт свёртки критериев, сведения задачи многокритериального выбора к математическим методам оптимизации, устраивающим все стороны процесса принятия решения. На сегодняшний день разработано немало методов, которые дают приемлемые результаты и помогают с той или иной степенью обоснованности делать выбор в условиях неопределённости целей или их множественном характере. Рассмотрим более подробно, некоторые из них.

Особое место в этом ряду занимает *принцип Парето*.

1.1 Принцип Парето

Его суть заключается в последовательном исключении из рассмотрения вариантов, заведомо являющихся неудовлетворительными. В итоге остаётся множество так называемых «не улучшаемых» векторов или множество Парето (P).

Например, пусть x' и x'' - два допустимых варианта решения задачи, такие, что выполняются условия

$$f_i(x') \leq f_i(x''), i = \overline{1, m} \quad (1.1)$$

При этом хотя бы одно из них выполняется строго. Очевидно, что решение x' лучше, чем решение x'' и, следовательно, все векторы x'' , удовлетворяющие этому условию, могут быть просто исключены из анализа. Таким образом, для анализа оставляем лишь векторы, которые не имеют более предпочтительных векторов:

$$\text{если } x^* \in P \ \& \ f_i(\bar{x}) \leq f_i(x^*) \Rightarrow \forall i \ f_i(\bar{x}) = f_i(x^*)$$

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.

Обратимся к простейшему примеру [3], когда имеются всего две целевые однозначные функции $f_1(x)$, $f_2(x)$. В этом случае каждому значению x будет соответствовать одна точка на плоскости (f_1, f_2) . Равенства $f_1 = f_1(x)$, $f_2 = f_2(x)$ определяют параметрически некоторую кривую на этой плоскости (рис. 1.1). Пусть такой кривой будет кривая a, b, c, d, e, h . Однако множеству Парето соответствует не вся кривая, а лишь ее часть. Действительно, участок cd не может соответствовать множеству Парето, так как для каждой точки этого участка A найдется точка A' участка bc , в которой значение целевой функции f_1 будет меньше, чем в точке A .

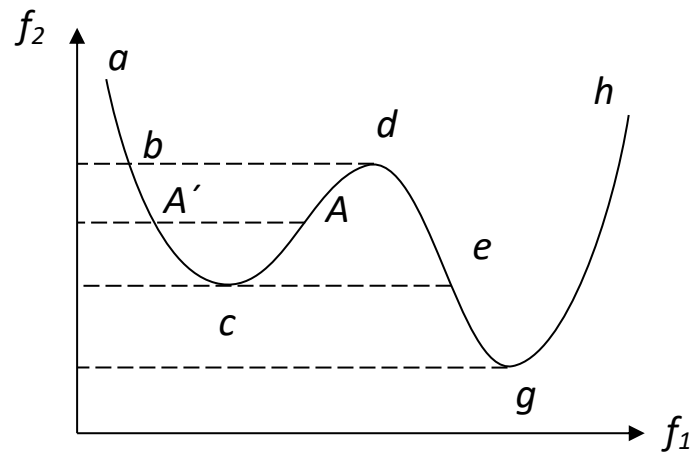


Рис. 1.1 Определение множества Парето

Аналогично должны быть исключены из рассмотрения участки de и gh . К множеству Парето в данном случае относятся лишь участки ac и eg , причем точка e также должна быть устранена.

Таким образом, принцип Парето состоит в том, что оптимальное решение x^* должно выбираться только из множества Парето, $x^* \in P$, в котором мы получаем в общем случае не единственное оптимальное решение, а множество допустимых альтернатив. Во многих случаях такая постановка вопроса оказывает весьма существенное влияние на качество принятия решения, так как, значительно сужая множество допустимых к оценке альтернатив, снижает неопределённость выбора, но в конечном итоге оставшаяся доля неопределённости разрешается за счёт экспертного мнения лица принимающего решение (ЛПР).

Таким образом, помимо уже известных критериев «неулучшаемости» (1.1) эксперты могут вводить некие дополнительные «суждения», базирующиеся на их опыте или внутреннем убеждении, позволяющим им в конечном итоге вводить отношение предпочтения на множестве допустимых альтернатив, чтобы уточнить выбор или ранжировать альтернативы относительно друг друга. Часто эти суждения носят характер компромисса или своеобразного договора между экспертным сообществом и ЛПР.

Обычно дополнительные суждения или гипотезы формулируются через некоторый формализованный скалярный критерий для принятия решения $f_{PP}(x)$ [3]. Тогда задача выбора окончательного решения может быть осуществлена из условия:

$$x^* = \arg \min_{x \in P} f_{PP}(x),$$

где через P обозначено множество Парето для функций $f_i(x), i = \overline{1, m}$, на допустимом множестве векторов $x \in P$. Таким образом, говорят, что вводятся дополнительные способы преодоления «неопределённости» выбора. Введение дополнительных гипотез, позволяющих свести задачу многокритериальной оптимизации к задаче однокритериальной оптимизации, обычно принято называть *скаляризацией* или *свёртыванием* критериев.

Рассмотрим подробнее, какие способы преодоления неопределённостей применяются чаще всего.

1.2 Скаляризация критериев

В [3, 5] описаны наиболее часто используемые способы свёртывания критериев.

1.2.1 Выделение одного основного критерия и перевод остальных критериев в разряд ограничений

Если эксперты могут однозначно определить самый важный критерий, то применяется способ, заключается в выделении одного основного критерия, например $f_1(x)$, и переводе остальных (вспомогательных) критериев в разряд ограничений. В этом случае постановка задачи принимает вид задачи однокритериальной оптимизации с набором ограничений:

$$x^* = \arg \min f_1(x)$$

при условиях

$$f_2(x) \leq f_2^*, f_3(x) \leq f_3^*, \dots, f_m(x) \leq f_m^*.$$

Считается, что подобный метод наиболее часто встречается практике инженерных исследований. Он используется, когда существует компромиссное экспертное суждение, которое предполагает, что один критерий доминирует над всеми остальными, например «стоимость проекта» или «эффективность системы». Но для его успешного применения требуется с достаточной степенью проработанности проблемы назначить допустимые границы f_i^* для вспомогательных критериев.

1.2.2 Метод линейной свёртки (Гермейера)

Если не удаётся однозначно идентифицировать один наиболее существенный критерий оценки, то применяется наиболее распространённый метод *линейной свертки*. Он предполагает переход от m критериев, $f_i(x), i = \overline{1, m}$ к одному критерию $f(x)$ вида:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i f_i(x), \quad (1.2)$$

где α_i - некоторые коэффициенты, которые характеризуют значимость соответствующего критерия и устанавливают определенный баланс между ними за счет ранжирования методами экспертных оценок критериев по их важности. Как правило, весовые коэффициенты α_i назначаются положительными, и нормированными тем или иным способом так что:

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0, i = \overline{1, m} \quad (1.3)$$

Необходимо отметить, что дополнительной гипотезой в данном случае и является назначение коэффициентов α_i . Именно эта процедура является ключевым этапом метода, которая позволяет редуцировать задачу с многими критериями к задаче с одним критерием и, таким образом, снять

неопределённость. Вместе с этим сам процесс определения весовых коэффициентов не является строго формализованной процедурой и часто связан с последовательной работой экспертов и различными подходами, позволяющими каким-либо образом оценивать и структурировать их в общем случае вербальные оценки. Поэтому, следует подчеркнуть, что при принятии решения подобным способом приходится брать во внимание долю субъективизма, связанную, с распределением весовых показателей между несколькими целевыми критериями оценки.

В литературе описано множество методов [8 - 11], позволяющих каким-то образом подойти к формализации экспертного мнения при назначении коэффициентов a_i , тем не менее, здесь не обойтись без компромисса, который часто предполагает последовательное приближение к приемлемому решению в ходе согласовательных процедур для различных значений a_i . Обычно применяют анкетирование групп специалистов и процедуры сведения вербальных характеристик важности критериев к их числовым эквивалентам.

В [3] отмечается, что «оба рассмотренных способа редукции к однокритериальной задаче взаимно связаны, так как взаимно связаны назначения допустимых границ для критериев f_i^* в первом способе и выбор коэффициентов a_i во втором способе. Практически же такое соответствие установить не всегда удастся. Поэтому к назначению a_i часто приходится прибегать с помощью экспертов».

1.2.3 Метод коэффициентов Фишберна

Одним из наиболее часто применяемых для назначения коэффициентов линейной свёртки является *метод коэффициентов Фишберна*.

На первом этапе, чаще всего, с помощью экспертного мнения частные критерии ранжируются в порядке их важности: $f_1(x) > f_2(x) > \dots > f_m(x)$, где знак « $>$ » означает, что критерий слева более важен, чем критерий справа.

Коэффициенты предпочтений критериев оценки объектов/проектов

вычисляются по следующей формуле Фишберна:

$$a_i = \frac{2(m+1-p)}{m(m+1)} \quad (1.4)$$

где p – номер i -го критерия в порядке его важности (если показатели проранжированы в порядке убывания важности, то $i = p$), при этом сумма всех коэффициентов приоритетности a_i равна единице:

$$\sum_{i=1}^m a_i = 1$$

В случае, если принято решение, что какие-то L критериев из m равноценны, то коэффициенты приоритетности для всех этих критериев равны по величине и определяются как среднеарифметическое коэффициентов a_i для равноценных критериев, которые вычислены по формуле Фишберна для случая, когда они будто бы проранжированы один за другим.

Следует отметить, что метод коэффициентов Фишберна, основываясь на теоретических положениях линейной свёртки (1.2), не даёт ответа на вопрос, как оценивать сами критерии по степени важности. Как правило, используются следующие подходы:

- непосредственное задание числовых коэффициентов экспертами на основе своего опыта и внутренних убеждений;
- метод попарного сравнения или иной способ.

Кроме того, эксперты должны определить свои предпочтения сразу на всём векторе критериев оценки, который, в случае приоритизации проектов ФКП, может содержать более 20 показателей. При чём, надо выстроить однозначно иерархию критериев по отношению друг к другу в виде: $a_1 \succ a_3 \succ \dots \succ a_m$, которая должна включать абсолютно все критерии оценки из имеющихся. 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_2 предпочтительней a_5 », оставляя все остальные оценки на уровне «не определено» или «неточно», «может быть». При этом показатели, оказавшиеся в начале этого ряда предпочтений, оказываются на много более значимыми, чем в конце, даже если такая дифференциация не требуется.

При определении приоритетности критериев сравнения проектов методом попарного сравнения, описанном в 1.3, должны применяться балльные оценки, которые требуют от экспертов однозначной числовой идентификации своих предпочтений, что при реализации сложных и длительных процедур анкетирования целых групп специалистов создаёт сложно преодолимые проблемы сводимости экспертного мнения при его численной интерпретации.

Поэтому ЛПР вынужден считаться с тем, что, во-первых, результат будет в известной степени зависеть от точности формализации субъективного мнения экспертов, которую оценить крайне трудно, если не невозможно, а во-вторых, будет получен в течение значительного временного интервала, измеряемого неделями или даже месяцами.

Рассмотрим ещё ряд методов свёртки, являющихся следствием уже описанных методов редукции критериев оценки [3].

1.2.4 Минимаксная свёртка

Минимаксная свертка основана на том, что экспертами формируется система контрольных показателей f_i^* , $i = \overline{1, m}$, которые представляют собой оценки сверху для соответствующих целевых критериев оптимальности

$$f_i(x) \leq f_i^*, \quad i = \overline{1, m}.$$

При этом в качестве меры приближения к каждому из показателей f_i^* предлагается использовать функцию максимума

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

Тогда задача скалярной оптимизации сводится к следующему функционалу

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

В этом случае, множественность целей при отыскании экстремума редуцируется за счёт поиска гарантирующего решения в смысле максимального приближения к f_i^* .

Подобные методы применяются в основном в ходе инженерных исследований, когда $x \in X$ и множество X является непрерывным. Оценки f_i^* должны, чаще всего, определяться экспертами или другим субъективным образом.

1.2.5 Квадратичная свертка

Другим способом редукции критериев является, так называемая, квадратичная свёртка. Её можно представить в следующем виде:

$$f(x) = \sum_1^m \left(\frac{f_i(x) - f_i^*}{f_i^*} \right)^2.$$

1.2.6 Использование «абсолютного минимума»

Ещё один способ получения, так называемых, контрольных значений для множественных целевых критериев f_i^* заключается в решении нескольких однокритериальных задач в виде

$$x_*^i = \arg \min_x f_i(x), \quad i = \overline{1, m}.$$

При этом совокупность величин $f_i^* = \min_x f_i(x) = f_i(x_*^i)$ в пространстве исходных критериев представляет собой некую точку, называемую иногда и «абсолютным минимумом». Следует отметить, что эта точка достижима лишь

тогда, когда все x_*^i совпадают. Во всех остальных ситуациях принято рассматривать некоторую близость к этому абсолютному максимуму. Обычно вводят в рассмотрение скалярную функцию, определяющую степень приближения. Тогда можно воспользоваться ей как скалярным критерием оптимальности. Иногда, например, применяют форму квадратичного вида

$$f(x) = \sum_{i,j=1}^m (f_i(x) - f_i^*) \lambda_{ij} (f_j(x) - f_j^*),$$

где λ_{ij} - элементы некоторой положительно-определенной матрицы.

1.3 Метод анализа иерархий

Метод анализа иерархий или Analytic Hierarchy Process (АНП), был предложен Томасом Саати (18 июля 1926 — 14 августа 2017) — профессором Пенсильванского и Питтсбургского университетов [8,9,11]. Основным принципом метода заключается в выстраивании иерархии оценки решений в контексте декомпозиции проблемы на все более элементарные компоненты. Кроме того, при этом применяется попарная обработка сравнительной оценки ЛПР на основе определённой шкалы баллов. Таким образом, достигается переход от вербальных оценок к их численному эквиваленту.

Метод анализа иерархии состоит из следующих процедур:

- синтез множественных суждений;
- получения приоритетности критериев;
- нахождение альтернативных решений.

В результате последовательность иерархий декомпозиции целей оценивается так, что результаты, полученные в одной из них, используются в качестве входных параметров при оценке следующей.

Дадим более подробное описание метода.

Сначала осуществляется последовательная иерархическая декомпозиция основных целевых оценочных критериев систем или сравниваемых объектов по

степени важности. Таким образом, получают многоуровневую зависимость этих оценок сверху до низу.

Далее выполняются попарные сравнения элементов каждого уровня. Пусть C_1, C_2, \dots, C_n — совокупность оцениваемых параметров уровня (иерархии оценки). Эксперты выражают свои суждения в виде количественных оценок о каждой паре (C_i, C_j) по некоторой шкале баллов, которые фиксируются в матрице размером $n \times n$: $A = (a_{ij}), (i, j=1, 2, \dots, n)$.

Элементы a_{ij} определяются по следующим правилам, как описано в [11]:

Правило 1. Если $a_{ij} = \alpha$, то $a_{ji} = 1/\alpha, \alpha \neq 0$.

Правило 2. Суждения экспертов таковы, что параметр C_i имеет одинаковую с C_j относительную важность, то $a_{ij} = 1, a_{ji} = 1$, в частности $a_{ii} = 1$ для всех i .

Итак, матрица A имеет вид

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Требуется найти зависимость оценки значений важности факторов (w_1, \dots, w_n) от суждений a_{ij} .

Пусть есть некоторый набор (w_1, \dots, w_n) истинных значений важности каждого из n факторов. Элемент a_{ij} матрицы парных сравнений A дает оценку отношений w_i/w_j . В общем случае искомый набор значений (w_1, \dots, w_n) должен удовлетворять уравнению $Aw = \lambda_{max}w$, где λ_{max} — наибольшее из собственных значений матрицы A . Если матрица A неотрицательна и неприводима, то это уравнение имеет единственное (с точностью до постоянного множителя) неотрицательное решение.

В общем случае отклонения в a_{ij} могут вызывать большие отклонения как в λ_{max} , так и w_i . Однако в случае обратно симметричных матриц, удовлетворяющих правилам 1 и 2, этого не наблюдается, т.е. имеется устойчивое решение.

В методе существует возможность оценить качество экспертизы. Для этого предложен специальный критерий. Поскольку оценки экспертов могут быть противоречивыми, т.е. какие-либо факторы могут быть оценены одновременно как более, так и менее предпочтительными, получив решение уравнения $Aw = \lambda_{\max}w$, можно судить о его качестве по тому, насколько λ_{\max} близко к величине n , т.е. насколько точны определяемые значения важности (w_1, \dots, w_n) .

Критерий качества экспертизы рассчитывается с помощью индекса непротиворечивости оценок (ИН), вычисляемого по формуле $ИН = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$, где n — число сравниваемых элементов. ИН соотносится с табличной величиной «случайной непротиворечивости» (СН) оценок, полученных в результате усреднения серии случайных выборок элементов матрицы A .

Если разделить индекс непротиворечивости на значение, соответствующее случайной согласованности матрицы того же порядка, получается индекс относительной непротиворечивости ($ОН = ИН/СН$). Приемлемым считается значение ОН не более 0,10 (или 10%). В некоторых случаях берется значение 0,20 (20%).

Таким образом, производится ранжирование посредством построения матриц взаимных предпочтений размерности $n \times n$, где n — количество показателей. Следующий шаг состоит в вычислении вектора приоритетов по данной матрице. Существует несколько методов оценки этого вектора. Например, суммировать элементы каждой строки матрицы и нормировать делением каждой суммы на сумму всех элементов матрицы. Первый элемент результирующего вектора будет приоритетом первого объекта, второй - второго объекта и т.д.

Дадим общее описание процедуры оценки уровней иерархии целей:

1) Эксперты производят попарное сравнение элементов 2-го уровня по влиянию их на выполнение цели. Таким образом, формируется матрица попарных сравнений A_1 ;

2) Далее осуществляется попарное сравнение элементов 3-го уровня по степени влияния на каждый критерий 2-го уровня. В результате получается n_1 (n_1 -

количество критериев) матриц попарных сравнений A_{11}, \dots, A_{nl} ;

3) Осуществляется повтор п. 2 для всех оставшихся уровней (если они есть);

4) Вычисляется вектор приоритетов для каждой матрицы;

5) Каждый элемент вектора приоритетов 2-го уровня умножается на соответствующий элемент вектора приоритетов каждой из матриц (A_{11}, \dots, A_{nl}).

После сложения всех произведений получается вектор приоритетов 3-го уровня;

б) Действия п. 5 выполняются для всех оставшихся уровней.

Рассмотрим достоинства и недостатки метода.

Среди достоинств можно перечислить:

1. АНР позволяет хорошо перейти от вербальных описаний к числовым характеристикам объектов, однако, здесь на каждом уровне описания иерархии целей мы получаем матрицы экспертных оценок, т.е. ЛПР получает вместо понятий «хорошо/плохо» и т.п. набор чисел для сравнения, который целиком и полностью зависит от субъективной экспертизы.
2. В итоге удастся получить детальное представление о том, как именно взаимодействуют факторы, влияющие на приоритеты альтернативных решений, и сами решения. Как именно формируются рейтинги возможных решений и рейтинги, отражающие важность факторов.
3. Метод позволяет разбить большую задачу, на ряд малых самостоятельных задач, тем самым структурировать процесс принятия решения.
4. В итоге ЛПР получает подробную картину о том, как именно взаимодействуют факторы, влияющие на приоритеты альтернативных решений, и сами решения, Как формируются рейтинги возможных альтернатив и рейтинги, отражающие значимость самих факторов.

Недостатки метода:

1. Ограничения по количеству критериев. Если число критериев

исчисляется десятками, то их попарное сравнение становится для ЛПР на практике трудно реализуемо, особенно в случае применения процедуры анкетирования многих экспертов.

2. На каждом уровне описания иерархии целей ЛПР получает вместо понятий типа «хорошо/плохо» набор чисел, т.е. удаётся уйти от вербальных оценок к цифровым, но с другой стороны метод не предназначен для построения оценок на основе мнений экспертов «хорошо/плохо», «лучше/хуже», которые, собственно и присутствуют в изначальной логике оценок, особенно, если критериев много (более 5-7). Поэтому процесс оцифровки экспертных мнений на основе предложенных балльных шкал закладывает субъективизм этих оценок в сами процедуры попарных сравнений.
3. Работа по подготовке принятия решений часто является слишком трудоемкой для одного человека. Применение метода позволяет разбить большую задачу, на ряд малых самостоятельных задач. Поэтому, для подготовки принятия решения нужно привлечь экспертов, работающих независимо друг от друга над локальными задачами.
4. Если речь идёт о многокритериальной оценке проектов космических средств и систем в рамках ФКП, то формирование структуры модели принятия решения в АНР достаточно трудоемкий и длительный процесс, связанный с участием большого количества экспертов из разных структурных подразделений, которые проходят сложную процедуру анкетирования. При этом само сведение мнений с достаточным уровнем достоверности всегда представляет серьёзную проблему.
5. В рамках АНР нет средств для проверки достоверности данных. Этот недостаток ограничивает отчасти возможности применения метода.
6. Метод предоставляет лишь способ ранжирования альтернатив, но не имеет никаких способов интерпретации рейтингов, т.е. считается, что ЛПР, зная рейтинг возможных решений, должен в зависимости от

ситуации сам сделать вывод.

7. Сама необходимость привлечения экспертного мнения создаёт для ЛПР часто непреодолимые трудности, связанные с реализацией персональной ответственности каждого эксперта за реализацию оценки.

1.4 Метод MAUT

Метод MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) [13] имеет аксиоматическое обоснование. Это означает, что выдвигаются некоторые условия (аксиомы), которым должна удовлетворять функция полезности ЛПР. В случае, если условия удовлетворяются, дается доказательство существования функции полезности в том или ином виде. Основные этапы метода:

1. Построение однокритериальных функций полезности.
2. Проверка условий независимости по полезности и по предпочтению.
3. Определение весовых коэффициентов.

Таким образом, в основе MAUT лежит использование весов (коэффициентов важности) критериев. При этом на ЛПР возлагается обязанность по определению этих коэффициентов с помощью чрезвычайно сложной процедуры формализации субъективных оценок экспертов, приводящей к построению однокритериальных функций полезности.

1.5 Сравнительный анализ методов многокритериального выбора

Важной проблемой, решаемой с помощью средств системного анализа, является обеспечение принятия сложных решений при проектировании больших систем [1, 2] или организационно-технических систем [6]. При этом речь идёт о выработке рекомендаций с учётом разнообразия большого объёма критериев и

различной информации из многих источников. Кроме того, в космической отрасли цена неправильно или ошибочно принятых решений нередко связана с потерей громадных финансовых и материально-технических средств, а в государственном масштабе – отставанием от ведущих держав в космической гонке, потерей крупных международных контрактов и стагнацией развития страны в целом.

При сравнительном анализе рассмотренных методов следует учитывать специфику решаемой задачи, которая в данном случае заключается в том, что надо оценить ряд проектов программы или подпроектов мультипроекта (более 20), на основании этих оценок выполнить ранжирование проектов и, в конечном итоге, используя оценку приоритетов проектов, принять решение о реализации программы в том или ином виде, при тех или иных ограничениях. Каждый объект оценки (проект) имеет не менее 12 (иногда более 20) критериев, по которым осуществляется его приоритизация в рамках программы. Данные по каждому из критериев берутся, как правило, из паспортов проектов или рассчитываются по отработанным методикам из данных паспортов, т.е. множество, на котором определяются оценочные функции, носит дискретный характер.

В выработке оценки принимают участие группы экспертов по разным направлениям реализации системы или проекта. Как правило, эти группы определяются принадлежностью к различным подразделениям головного предприятия, а также организаций, осуществляющих имплементацию проекта. В подобных условиях мнения экспертов носят фрагментарный характер и рассматриваются в категориях «лучше/хуже», «хорошо/плохо». Поэтому существует, во-первых, проблема формализации экспертного мнения, а во-вторых, проблема сведения мнений многих экспертных сообществ с приемлемой степенью доверительности.

Исходя из этого, методы, связанные с редукцией критериев на основе использования одного из них в качестве основного или методы минимаксной свёртки, чаще всего используемые в инженерных исследованиях, трудно

применимы в данном контексте, т.к. их реализация осуществляется, главным образом, на непрерывном множестве альтернатив (X) и, кроме того, предполагает, что эксперты довольно точно определяют наиболее важный критерий оценки или границы допустимости для всех остальных критериев, которых в рассматриваемой задаче значительно больше, чем в задачах инженерных исследований.

Поэтому разработчики методик многокритериальной оценки проектов программы в основном используют методы, позволяющие делать оценки на всём множестве критериев.

Метод анализа иерархий (1.3), позволяя получать численные характеристики вербальных оценок, при увеличении размерности задачи влечёт за собой ряд сложно-разрешимых проблем, связанных с преодолением субъективности этих шкально-числовых характеристик, оценкой их достоверности и интерпретацией этих оценок в приемлемые сроки. Многоуровневая процедура его реализации, в которой участвуют эксперты из многих организаций, заполняя многочисленные анкеты, часто затягивается на месяцы и более. При реализации сложной иерархичной процедуры оценки на задачах больших размерностей, как в нашем случае, становится практически невозможным оценить степень достоверности полученных результатов и интерпретировать оценки.

Разработчики методик часто пользуются для подобных задач методом линейной свёртки, где процедура оценки проектов сводится к скаляризации критериев методом назначения коэффициентов важности каждого из них. С одной стороны эта процедура кажется довольно доступной для интерпретации и осознания ЛПР результатов оценки, но требует назначения весов непосредственно методом экспертных оценок или применения механизмов, распределения важности весов, подобных методу Фишберна (1.2.3). При этом методе приоритизации (оценки) проектов предпочтения экспертов определяются однозначно и сразу на всём векторе критериев оценки, который может содержать

более 20 показателей. При чём, надо выстроить однозначно иерархию критериев по отношению друг к другу в виде: $a_1 \succ a_3 \succ \dots \succ a_m$, которая должна включать абсолютно все критерии оценки из имеющихся. 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_2 предпочтительней a_5 », оставляя все остальные оценки на уровне «не определено» или «неточно», «может быть». При этом показатели, оказавшиеся в начале этого ряда, окажутся на много более значимыми, чем в конце, даже если такая дифференциация не требуется.

Следует отметить, что разнообразие рассматриваемых задач, их методологическая неопределённость и отсутствие строгой математической замкнутости [3], вытекает из того, что критерии оптимальности часто носят нечёткий характер, основанный на вербальных формулировках и личных предпочтениях экспертов. Кроме того, неизбежно возникает ряд проблем, связанных с учётом технико-экономических, социально-политических и иных условий реализации крупных проектов. Естественно, что проблема так называемой оцифровки тех или иных предпочтений экспертного субъективного фактора в значительной степени влияет на качество итогового результата, потому что человек в значительной степени мыслит в вышеперечисленных ситуациях не цифрами, а понятиями из области «лучше/хуже», «сильнее/слабее» и т.п. Поэтому качество того или иного подхода, степень доверия или недоверия к оценкам, полученным с помощью него рассматривается в значительной степени и с позиций его независимости от субъективного фактора или способности сведения степень влияния этого фактора к минимуму.

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» или компромисса 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.

Таким образом, как было отмечено в [13,14], несмотря на то, что рассмотренные подходы обладают целым рядом преимуществ, они потенциально могут «игнорировать» некоторые полезные с точки зрения оптимальности по Парето варианты решений. Ещё один существенный недостаток заключается в том, что они зависят от участия экспертного мнения а, следовательно, в их результатах закладывается известная доля субъективизма. Кроме того, часто не удаётся обеспечить необходимое количество и качество экспертов в приемлемые сроки, которые могли бы взять на себя ответственность определять коэффициенты характеристик свёртки критериев, особенно в тех случаях, если число этих коэффициентов велико. Для руководителя или ЛПР подбор подобных экспертных сообществ связан с существенными затруднениями, а потому, как следствие, влечёт за собой затягивание принятия сложных и важных решений, что приводит порой не только к срыву сроков выполнения государственных проектов, но и к потере финансовых средств и имиджа предприятия в целом. Следует также отметить, что в основе каждого из перечисленных методов лежит способ учета неопределенности, не свободный от частного мнения, который в зависимости от метода, имеет ту или иную интерпретацию. Этот субъективизм проявляется в самой структуре метода, в назначении весовых коэффициентов частных критериев, в построении функций полезности, в попарном сопоставлении частных критериев и т.п. Сложно разрешимой проблемой здесь выступает оценка адекватности метода, уровня его субъективизма в конкретных условиях.

Необходима разработка методики, которая, не только даёт возможность экспертам вносить свои предпочтения точно, для нескольких показателей, оставляя большинство на уровне «не определено», но и моделировать возможные варианты этой неопределённости. Причём неопределённость в оценках предпочтений их возможные вариации должна закладываться в модель оценки альтернативы (проекта), т.к. реальные мнения экспертов чаще всего сложно идентифицировать однозначно, и они могут быть распределены в рамках широкого спектра оценок. Новая методика должна позволять накладывать предпочтения на множество критериев оценки проектов точно и гибко, например, a_1 лучше a_2 или a_1 лучше a_4 и a_5 , позволяя экспертам уходить от необходимости выстраивания полного последовательного ряда предпочтений ($a_1 \succ a_3 \succ \dots \succ a_m$) на всём векторе критериев оценки.

Глава 2

Разработка методики многокритериальной оценки проектов космических средств и систем на основе автоматизации метода уверенных суждений

Как отмечено [13,14], решение классической задачи многокритериального выбора базируется на разрешении нескольких видов неопределённости. Наиболее часто встречающийся вид неопределённости - неопределенность критериев оценки. Заключается она в том, что, что оптимальность выбора оценивается не одним числом, а задаётся на основе множества показателей. Каждый показатель с той или иной точки зрения характеризует вполне определённый критерий эффективности, например: стоимость проекта, время исполнения, наукоёмкость, импортозависимость, перспективность, расходы ресурса 1, ресурса 2 и т.д. Каждый из перечисленных показателей будет лишь какой-то частной мерой эффективности, и только их совокупность будет давать интегральную оценку любого из вариантов. Таким образом, получаем векторный критерий оптимальности $f(x) = \{f^1(x), f^2(x), \dots, f^m(x)\}$.

Неопределённость на множестве исходных данных является следующим видом. Она заключается в том, что на значение каждого из критериев оптимальности могут влиять данные, значения которых на момент выбора в точности не известны. Если обозначить эти неопределённые данные через $w \in W$, то векторный критерий оптимальности примет вид:

$$f(x, w) = \{f^1(x, w), f^2(x, w), \dots, f^m(x, w)\}, x \in X, w \in W .$$

Показано [3], что математически каждая из этих неопределенностей представляется в виде другой. Согласно теореме о линейной свертке [16], где комплексный критерий представляется средневзвешенной суммой частных критериев, можно рассматривать в качестве неопределенных исходных данных

неизвестные значения весовых коэффициентов показателей (критериев). И наоборот, если принять, что неопределенные исходные данные могут принимать конечное число значений то, из этого вытекает, что значения критериев для каждой реализации исходных данных можно считать за новые показатели для нового варианта. Таким образом, неопределённость исходных данных отсутствует и возникает задача с возрастающим количеством вариантов решения для выбора.

Также можно рассматривать неопределённость правила исчисления самих критериев как третий тип неопределённости, который принято называть неопределённостью модели. Обычно вводят поправочные коэффициенты для её нивелирования. Значения этих коэффициентов должны лежать в пределах точности модели. Тем не менее, этот вид также можно свести к неопределённости исходных данных.

Таким образом, в формировании этого компромисса в ходе учёта неопределённостей и заключается основной способ решения задач многокритериального анализа при принятии решений.

Идентификация способа учёта неопределённости или компромисса сводит задачу принятия решения к обычной задаче оптимизации. Но до постановки задачи эта проблема заключается в том, что необходимо выбрать из всех имеющихся допустимых способов учёта неопределённости тот, который наиболее, по мнению ЛПР и привлекаемых экспертов, соответствует обстоятельствам. Следовательно, решение сводится, главным образом, к поиску способа учёта неопределённости. Можно отметить, что так называемый субъективный фактор и есть выражение способа учёта неопределённости, который носит характер так называемого компромисса между ЛПР и экспертами, определяющими, исходя из своих внутренних убеждений и опыта, каким образом будут учитываться при решении задачи эти неопределённости.

Тем не менее, существует настоятельная необходимость по возможности снизить влияние человеческого фактора или добиться минимального воздействия

его на принятие решения.

Вернёмся к решению нашей задачи, которая характеризуется тем, что необходимо оценить проекты из пула программы (Федеральной космической программы) по целому ряду критериев, количество которых может превышать 20, при этом данные берутся на момент оценки из паспортов проектов или рассчитываются на основе отработанных методик, по значениям из этих паспортов. Т.е. множество исходных данных $x \in X$ имеет дискретный характер, но при этом существует наиболее распространённая в задачах многокритериальной оценки неопределённость, связанная с оценкой значимости самих критериев. Как было отмечено в первой главе, наиболее предпочтительным в данных условиях является использование метода линейной свёртки, который позволяет учитывать вклад каждого из критериев оценки в общий результат и при этом сводить задачу многокритериального выбора к задаче обыкновенной оптимизации. Тем не менее, компромисс, связанный с реализацией экспертных оценок в области значимости показателей оценочной функции является наиболее существенной проблемой, т.к. базируется на известной доле субъективных предпочтений самих экспертов, которая заключается, во-первых, в том, что чаще всего они не в состоянии выразить однозначно в так называемых балльных подходах свои вербальные предпочтения и работают в категориях «лучше/хуже», а во-вторых, сама процедура идентификации весов, например, методом Фишберна, требует однозначного определения их значимости в виде жёсткой иерархии, до проведения расчёта. Так что одни из них, оказавшиеся в начале списка, всегда будут на много более значимыми, чем критерии, оказавшиеся в конце. Этот императив при достаточно большом списке показателей, становится трудно выполнимым, т.к. на практике становится практически не возможным определить однозначно такую жёсткую иерархию предпочтений. Достаточно большое количество показателей вообще вынуждает экспертов оставить мнение о их значимости за скобками. При этом следует также учесть, что само экспертное

сообщество состоит из групп специалистов, предприятий смежников и головной организации, а процесс формализации мнений экспертов заключается в достаточно длительной заорганизованной технологии анкетирования, которая растягивается на недели и месяцы. При чём, итоговые результаты часто не удаётся представить с требуемой долей сходимости.

Поэтому, в работе рассматривается идея реализации новой методики оценки проектов космических средств и систем на основе метода уверенных суждений [13,14].

Основная идея метода заключается в том, что в отличие от традиционных для данной области методик, основанных на применении линейной свёртки (1.2), предлагается рассматривать не одну линейную свёртку с определённой экспертами степенью важности каждого критерия (1.3), а множество реализаций этих свёрток, на множестве вариантов коэффициентов $\bar{a} \in A$, моделирующих неопределённость мнений экспертов.

Таким образом, в методе уверенных суждений считается, что коэффициенты являются неопределёнными и рассматривается множество всех возможных вариантов, на котором определены эти коэффициенты. Далее наиболее оптимальным считается тот вариант, который получает наиболее выигрышную оценку на всём множестве комбинаций из всех возможных сочетаний коэффициентов линейных свёрток.

Такой подход, в конечном итоге, объективно снижает нагрузку на процедуру формализации и процедуру сведения мнений экспертного сообщества, позволяя тем самым не только снизить степень субъективизма в оценке, но значительно облегчить и ускорить сам процесс её выработки.

Рассмотрим, как это достигается на практике.

2.1 Постановка задачи

Дано: $X = [x_i]_N$, – дискретное множество проектов (альтернатив), $x_i \in X$,
 $i = \overline{1N}$

$$f(x) = [f^j(x_i)], j = \overline{1m} \quad (2.1)$$

– 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:

$$\hat{x} \in X : (f^j(\hat{x}) \geq f^j(x), j = \overline{1m}) \quad (2.2)$$

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, определяющие отношение предпочтения на множестве допустимых альтернатив, с точки зрения, которых он будет рассматриваться как компромиссное решение. В методе линейной свёртки (1.2) в качестве этих суждений используется коэффициенты (1.3), которые определяют ценность каждого критерия, определяемую экспертами.

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 статье [25] 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 $f(x_i) = f_i, i = \overline{1, N}$ (N – число проектов), тогда $F_a = [f_{il}]_K, l = \overline{1, K}$, 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 F_a критерии оценки альтернатив, позволяющие выбирать наиболее предпочтительные из них.

В качестве относительной меры (к мере всего множества F_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 *жестким рейтингом (HR)*.

В нашем 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 $\overline{a_l}$ i -того проекта будет определяться по формуле (2.3):

$$f_{il} = \sum_{j=1}^m x_{ij} a_l^j \quad (2.3)$$

Тогда жесткий рейтинг для каждого проекта будем вычислять по формуле (2.4):

$$HR_i = \frac{\sum_{l=1}^K \sum_{i=1}^N B_{il}}{K}, \quad (2.4)$$

где $l = \overline{1, K}, i = \overline{1, N}$, N – число проектов/альтернатив, K – число вариантов реализации вектора коэффициентов линейной свёртки $\overline{a_l}$. $B_{il} = 1$, 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 (2.4) 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*.

Иными словами, если рассматривать все возможные сочетания мнений экспертов равновероятными, равнозначными и независимыми, то мера (2.4) определяет «группу равно авторитетных экспертов, отражающих все разумные взгляды на учет неопределенности» а «рейтинг варианта решения – это доля экспертного сообщества, считающая данное решение наилучшим [17]» или вероятность того, что доля экспертов, считающих данное решение наилучшим будет такой-то.

Иногда может возникнуть ситуация, когда требуется оценить не только «вероятность» того, что какая-либо из альтернатив будет предпочтительнее на множестве моделируемых экспертных мнений, но и *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 (2.5):

$$SR_i = \frac{\sum_{l=1}^K \frac{f_{il}}{\max f_{il}}}{K} \quad (2.5)$$

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

Рассмотрим пример для иллюстрации работы метода (Таблица 2.1).

Дано: 5 проектов с 2-мя показателями, оба показателя по смыслу должны максимизироваться (имеют тренд на максимум), например («скорость» и «производительность»). Шаг перебора для вычисления коэффициентов линейных свёрток $h = 0,25$.

Нормализация исходных физических значений показателей, если они имеют тренд на максимум, выполняется по формуле:

$$x_{ij}^{norm} = (x_{ij} - \min_j(x_{ij})) / (\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})) \quad (2.6)$$

, где i – номер, строки, j – номер столбца матрицы показателей.

Если по смыслу показатель должен минимизироваться (например «затраты»), то итоговое нормированное значение вычитается из единицы:

$$x_{ij}^{norm} = 1 - (x_{ij} - \min_j(x_{ij})) / (\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})) \quad (2.7)$$

Необходимо: определить наиболее предпочтительный проект

Таблица 2.1 - Демонстрационный пример.

l	Проекты	Исходные данные		Нормированные данные		Коэффициенты лин свёртки		$f_{ii} = \sum_{j=1}^m x_{ij} a_j$	Выигрыш
		x_{i1}	x_{i2}	x_{i1}^{norm}	x_{i2}^{norm}	a_l^1	a_l^2		
1	Юла	53	145	0,27	0,575	0	1	0,575	
	Лента	61	125	1	0,075	0	1	0,075	
	Куб	60	150	0,91	0,7	0	1	0,7	
	Стрела	58	122	0,73	0	0	1	0	
	Тема	50	162	0	1	0	1	1	X
2	Юла	53	145	0,27	0,575	0,25	0,75	0,4994	
	Лента	61	125	1	0,075	0,25	0,75	0,3063	
	Куб	60	150	0,91	0,7	0,25	0,75	0,7523	X
	Стрела	58	122	0,73	0	0,25	0,75	0,1818	
	Тема	50	162	0	1	0,25	0,75	0,75	
3	Юла	53	145	0,27	0,575	0,5	0,5	0,4239	
	Лента	61	125	1	0,075	0,5	0,5	0,5375	
	Куб	60	150	0,91	0,7	0,5	0,5	0,8045	X
	Стрела	58	122	0,73	0	0,5	0,5	0,3636	
	Тема	50	162	0	1	0,5	0,5	0,5	
4	Юла	53	145	0,27	0,575	0,75	0,25	0,3483	

l	Проекты	Исходные данные		Нормированные данные		Коэффициенты лин свёртки		$f_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} a_i^j$	Выигрыш
1	Лента	61	125	1	0,075	0,75	0,25	0,7688	
	Куб	60	150	0,91	0,7	0,75	0,25	0,8568	X
	Стрела	58	122	0,73	0	0,75	0,25	0,5455	
	Тема	50	162	0	1	0,75	0,25	0,25	
5	Юла	53	145	0,27	0,575	1	0	0,2727	
	Лента	61	125	1	0,075	1	0	1	X
	Куб	60	150	0,91	0,7	1	0	0,9091	
	Стрела	58	122	0,73	0	1	0	0,7273	
	Тема	50	162	0	1	1	0	0	

В таблице 2.1 демонстрируется ход решения задачи. В последнем столбце отмечены проекты «X», у которых оценочная функция при данной комбинации вектора коэффициентов линейной свёртки \bar{a}_i оказалась максимальной.

Таким образом, ответ: жёсткие рейтинги проектов *Юла* $HR = 0/5 = 0$; *Лента* $HR = 1/5 = 0,2$; *Куб* $HR = 3/5 = 0,6$, *Стрела* $HR = 0/5 = 0$, *Тема* $HR = 1/5 = 0,2$. Следовательно, наиболее предпочтительным оказался проект *Куб*, 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 ЛПП». 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 электропитания (СЭП). Для реализации многокритериального анализа на множество допустимых альтернатив накладывается отношение предпочтения. Пусть $A^M \subset A$ – это подмножество коэффициентов линейной свёртки который получает показатель

массы КА, $A^m = [a_l^m]_{K, l = \overline{1, K}}$, где K – число вариантов коэффициентов линейной свёртки (1.2). $A^{cэп} \subset A$ – это подмножество коэффициентов, которые будут получать показатель системы электропитания КА, соответственно, $a_i^{cэп} \in A^{cэп} = [a_i^{cэп}]_K$. Таким образом, при формировании множества A из него следует исключать те комбинации a_l^j , в которых не выполняется отношение: $\forall a_l^j \in A: a_l^m > a_l^{cэп}$, $j = \overline{1, m}$, m – число показателей. Таким образом, реальное число наборов $[a_l^j]$, формирующее итоговое множество F_a , может быть меньше оценки K (2.4).

Если вернуться к рассмотренному уже примеру (Таблица 2.1) и добавить суждение ЛПР о том, что $a_l^2 \geq a_l^1$, то из рассмотрения будут исключены варианты, где $l = 4, 5$. Следовательно, в данном случае в чистом выигрыше окажется проект *Куб* с $HR = 2/3 = 0,667$, рейтинг проекта *Тема* вырастет до $HR = 1/3 = 0,333$, остальные проекты будут иметь рейтинги, равные 0.

Рассмотрим подробнее, как можно на практике воплотить этот метод в виде инженерной программной реализации.

2.2 Основные аспекты практической реализации методики многокритериальной оценки

2.2.1 Увеличение мощности множества, моделирующего экспертные мнения

Для программной реализации метода необходимо алгоритмически реализовать множество оценочных функций F_a на множестве $A = [a_l^j]_K$. В работе [18] показано, как можно вычислять варианты a_l^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 (1.3) в диапазоне $[0, 1]$ и получения всех возможных уникальных комбинаций из этого распределения.

В таблице 2.2 представлен пример, в котором шаг перебора $h = 0,2$, число показателей $m = 3$ и получается набор вариантов a_l^j , содержащий 21 комбинацию.

Нетрудно проверить, что $a^1 + a^2 + a^3 = 1$.

Таблица 2.2 - Пример множества неповторяющихся комбинаций весовых коэффициентов a^j при $m = 3$ и для числа дискретных значений коэффициентов b

№ 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

Мощность множества A можно увеличить за счёт уменьшения шага дробления интервала, в котором могут располагаться коэффициенты линейной свёртки (1.2). Чем меньше шаг дробления, и чем больше показателей, и тем больше большее число функций f_{ij} , моделирующих мнения экспертов мы получим, соответственно согласно закону больших чисел решение будет устойчивее.

В работе проблема практической реализации подобного распределения при количестве при теоретически любом числе показателей равном m (maxN Рисунок 2.1) решена за счёт программно-алгоритмической рекурсии, т.е. использования в теле процедуры вызова её самой. На рисунке 2.1 представлена схема этой рекурсивной процедуры GetNextNum.

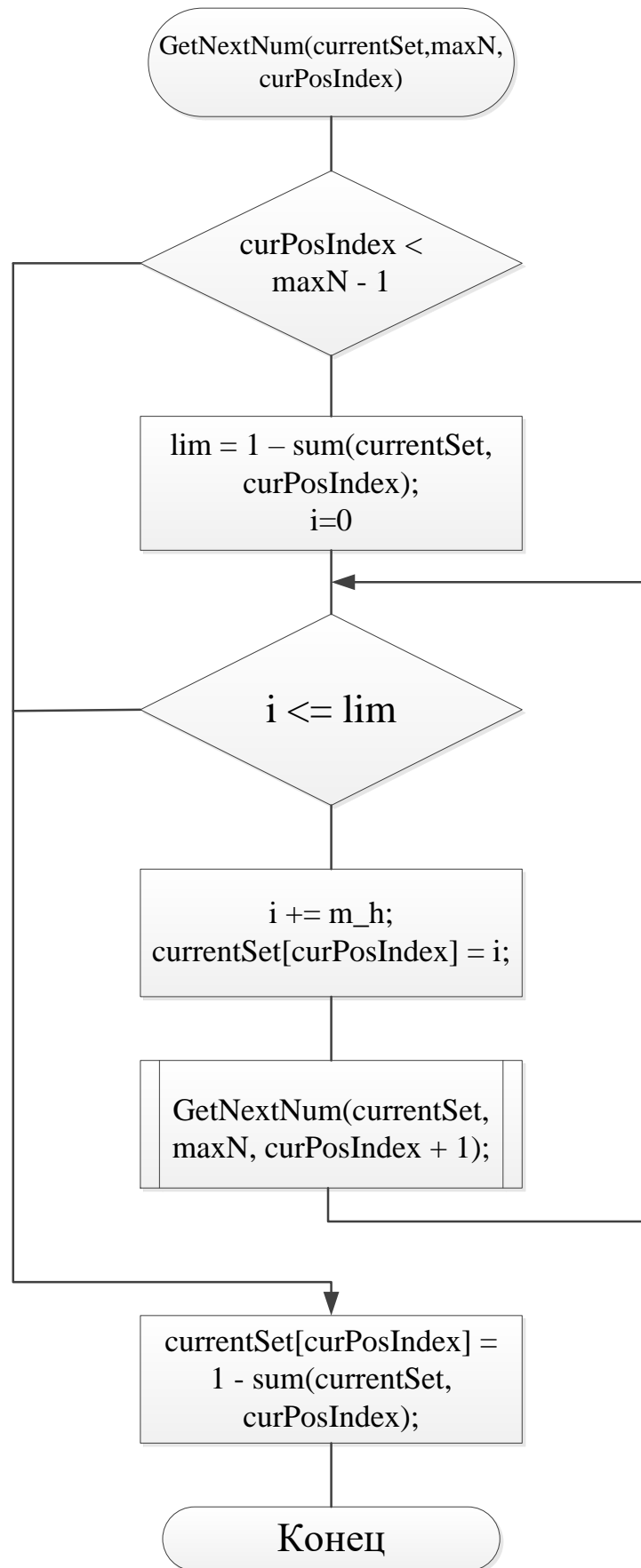


Рисунок 2.1 - Схема программной реализации алгоритма распределения весов

Дадим краткое описание процедуры.

На вход `GetNextNum (QList<double>& currentSet, int maxN, int curPosIndex)` в качестве параметров подаются:

`currentSet` – начальное состояние вектора распределения весов (контейнер - список заполненный нулями);

`maxN` – размер вектора весов, т.е. количество показателей или критериев оценки;

`curPosIndex` – текущая анализируемая позиция вектора весов.

Сначала осуществляется проверка на достижимость последней позиции в векторе весов $curPosIndex < maxN - 1$. Если результат сравнения положительный то следующим шагом осуществляется вычисление остатка от 1, который доступен для распределения на остальные коэффициенты $lim = 1 - sum(currentSet, curPosIndex)$. Следующим действием назначаем переменной i , которая служит для итерации по шагам распределения начальное значение, равное 0. Здесь следует также отметить, что метод `sum(currentSet, curPosIndex)` возвращает сумму всех весов до позиции `curPosIndex`. Далее следует блок проверки i на выход за пределы допустимого предельного значения веса для данного шага рекурсии ($i \leq lim$). Если значение не превышено, то осуществляем увеличение i на величину шага распределения ($i += m_h$) и устанавливаем значение веса по индексу `curPosIndex` равным i (`currentSet[curPosIndex] = i`). На следующем шаге в теле процедуры `GetNextNum` осуществляется её рекурсивный вызов с текущими состояниями `currentSet`, `maxN` и значением `curPosIndex`, увеличенным на 1. После этого следует возврат на начало цикла проверки значения i ($i \leq lim$). Представленная схема позволяет реализовать программный код полного равномерного распределения весов коэффициентов в выражении (1.3) таким образом, что осуществляется последовательные исчисления уникальных комбинаций сочетаний коэффициентов a^j с заданным шагом. Т.е. здесь получаем полное множество уникальных комбинаций наборов a^j , или сочетаний, в которых сумма всех элементов не превышает 1.

2.2.2 Вычисление оценки мощности множества A

Важной проблемой является вычисление оценки числа наборов $[a_i^j]_K$, т.к. от этого напрямую зависит время решения задачи. Это может быть важно, например, если требуется понять при выборе шага дробления, будет ли это сильно влиять на скорость вычислений или нет. Воспользуемся теоретическими положениями комбинаторики [24]:

Если каждому элементу некоторого конечного множества поставить в соответствие целое неотрицательное число k_j — кратность данного элемента, то говорят, что задано сочетание с повторениями. Сумма k кратностей всех элементов называется порядком сочетания:

$$k = \sum k_j$$

Если каждому a^j в формуле (2.3) поставить в соответствие число $h*k_j$, то k_j и будет соответствовать кратности повторений шага дробления при реализации a^j :

$$a^j = h*k_j$$

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 о том, что число сочетаний с повторениями из k элементов по n выражается формулой:

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

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, включая 0.

Если каждому a^j в формуле (1.2) поставить в соответствие число $h*k_j$, то k_j и будет соответствовать кратности повторений шага дробления при реализации:

$$a^j = h*k_j$$

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:

$$K = \frac{(m + 1/h - 1)!}{(1/h)!(m - 1)!}, \quad (2.8)$$

где m – число показателей (критериев сравнения).

2.2.3 Решение проблемы снижения времени вычислений

Существенной проблемой является снижение времени вычислений, т.к. при увеличении размерности массива показателей и уменьшении шага дробления интервала весов длительность расчётов может превысить приемлемое для принятия решения время. Покажем это на простейшем примере. Пусть $m = 15$. Тогда при шаге $h = 0,01$ количество вариантов наборов a^j составит примерно 4000×10^9 . С учётом того, что производительность современного обычного процессора в среднем примерно равна 100×10^9 операций с плавающей точкой в секунду, то на 4000×10^9 комбинаций с учётом количества проектов и формул по вычислениям рейтингов требуемое количество вычислений возрастает ещё на 2 порядка. Таким образом, грубая оценка длительности работы программы приближается к нескольким часам, что не очень приемлемо для принятия оперативных решений. Решить эту проблему удалось с помощью применения технологии параллельных вычислений посредством использования потоков (Thread), реализуемых в языках высокого уровня типа C++. Потоки позволили разбить вычисления сумм для формул рейтингов (2.4) (2.5), на несколько интервалов и затем производить расчёты параллельно на нескольких процессорах и/или ядрах. Используемый приём

позволил снизить длительность вычислений на несколько порядков. Подробно реализация многопоточных параллельных вычислений представлена на рисунке 2.2 и в Приложении А.

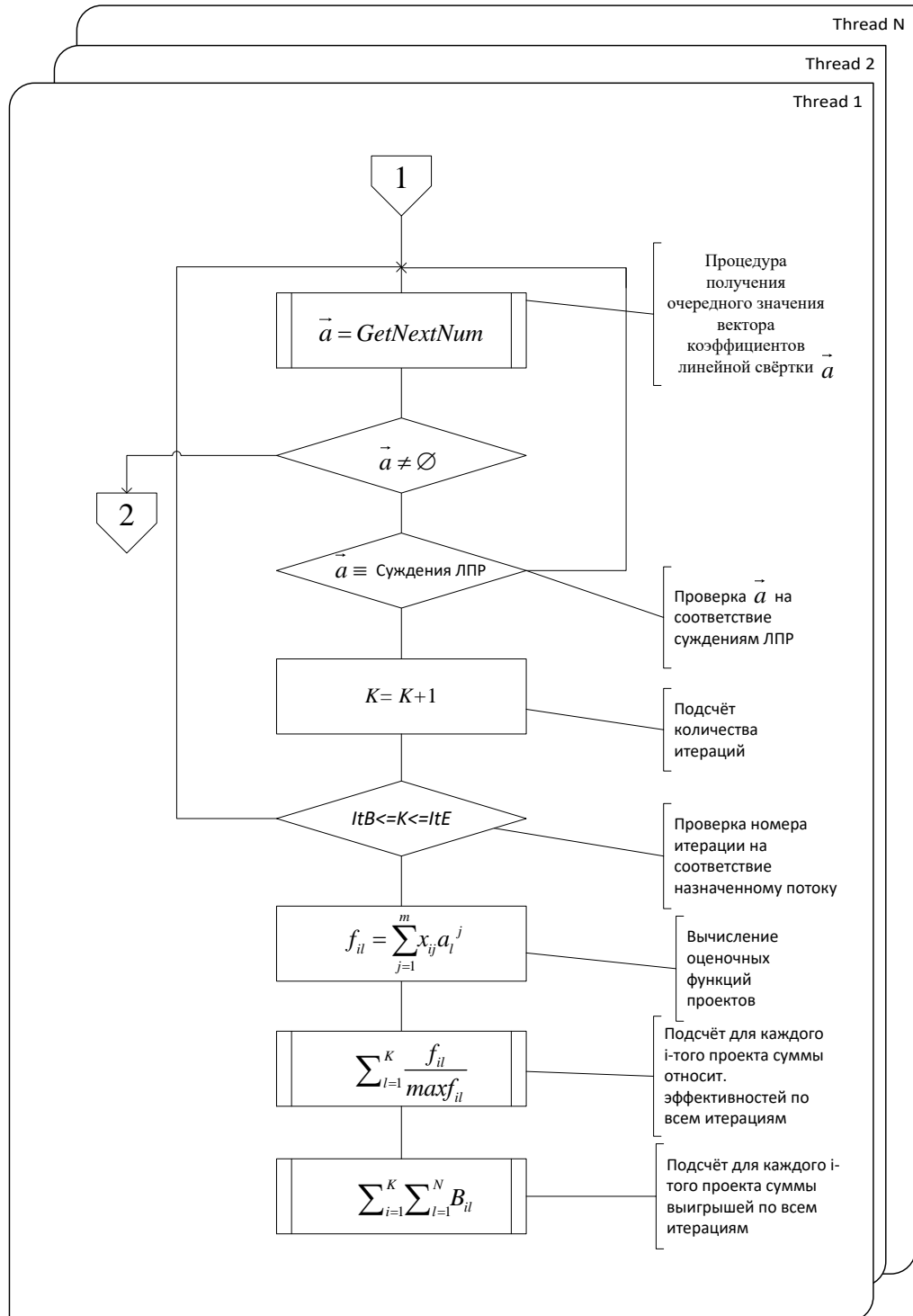


Рисунок 2.2 - Реализация параллельных многопоточных вычислений

Рассмотрим подробнее, как это работает. Прежде всего, с помощью выражения (2.8) осуществляется оценка количества наборов векторов коэффициентов линейной свёртки для множества F_a . Затем используя метод `QThread::idealThreadCount()` Qt C++, получаем количество потоков, которое может выполняться в системе, далее рассчитываем число итераций \bar{a} (наборов коэффициентов линейной свёртки), приходящееся на один поток. При этом последний поток берёт на себя также остаток от деления. Рассчитываем начальный и конечный номер итерации для каждого из потоков (ItB_i, ItE_i на схеме программы). Запускаем на выполнение потоки, в каждом из которых процедура *GetNextNum* выдаёт в качестве исходных данных для расчётов наборы \bar{a} только для номеров итераций, соответствующих конкретному потоку. Кроме того, в каждом из потоков просчитываются рейтинги проектов по текущему \bar{a} только для тех комбинаций, которые соответствуют уверенным суждениям ЛПР. Далее подсчитываются суммы выигрышей для каждого проекта и суммы относительных эффективностей по всем итерациям текущего потока. Осуществляется подсчёт количества итераций $K=K+1$. После завершения всех потоков просчитывается жёсткий и мягкий рейтинг каждого проекта, и результаты выводятся для анализа ЛПР.

2.3 Описание методики многокритериальной оценки проектов космических средств и систем

Следует отметить, что процесс приоритизации проектного пула федеральной космической программы является важнейшей задачей, решаемой подразделениями АО ЦНИИмаш и другими предприятиями ГК «Роскосмос» в ходе балансировки портфеля проектов. Это служит основой обоснования распределения финансовых средств и иных ресурсов для

успешной реализации программы развития космической отрасли. В связи с этим существует целое направление, в рамках которого проводятся научные исследования, и осуществляется разработка базовых принципов и методического обеспечения. Поэтому важно перечислить имеющиеся руководящие документы, обеспечивающие платформу для работы в этом направлении.

2.3.1 Основание для разработки методики

Основанием для разработки методики могут служить следующие документы:

1. Поручение генерального директора Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» (далее – Госкорпорация «Роскосмос») от 17 октября 2019 года № 141-п (пункт 6) «Об организации разработки Единой государственной космической программы (2021-2030 годы) (далее – ЕГКП)» с учетом требований «Порядка разработки, реализации и оценки эффективности государственных программ Российской Федерации» (утвержден 2 августа 2010 года № 588).

2. «Методические указания по разработке и реализации государственных программ российской Федерации» (утверждены приказом Минэкономразвития России № 582 от 16 сентября 2016 года).

3. Решения конференции 2018 года «Основные задачи и перспективы развития Госкорпорации «Роскосмос», определившие внедрение проектного управления основным организационно-методическим инструментом повышения эффективности реализации ЕГКП.

4. Методические разработки АО «ЦНИИмаш», полученные в рамках научно-исследовательской работы (далее – НИР) «Авангард».

5. Положение РК-11-КТ. Положение о порядке создания, производства и эксплуатации (применения) ракетных и космических комплексов.

2.3.2 Основные положения и терминология

Основными механизмами проектного управления ЕГКП, обеспечивающими повышение эффективности ее реализации, являются формирование проектов и их приоритизация. В проекты объединяются взаимосвязанные мероприятия, направленные на решение задач ЕГКП.

Приоритизация проектов устанавливает их предпочтение друг относительно друга, которое используется в ходе принятия управленческих решений.

Необходимо подчеркнуть, что основная цель предложенного методического обеспечения заключается в определении порядка приоритизации проектов подпрограммы «Разработка космических средств» (далее – проект подпрограммы) и не только.

Предлагаемая методика имеет программную реализацию, зарегистрированную в государственном Реестре программ для ЭВМ, (регистрационный № 2020614916 от 29.04.2020 Роспатента), защищенную авторским свидетельством, апробирована в ходе информационно-аналитического сопровождения управления реализацией Федеральной космической программы России на 2016-2025 годы (далее – ФКП-2025) и представлена заказчику (Госкорпорация «Роскосмос») в научно-техническом отчетах:

1. Технический отчёт «Оказание услуг по информационно-аналитическому обеспечению управления реализацией Федеральной космической программы России на 2016-2025 годы в части мониторинга реализации программы, подготовки данных о ходе выполнения программных мероприятий, проектов, а также методическому обеспечению целевого индикатора «Возможности по предоставлению данных космических наблюдений для решения задач гидрометеорологии, океанографии и гелиогеофизики» и расчётов приоритетности проектов программы» Этап 1 ведомости исполнения к контракту от 30 сентября

2019 г. № 1921730200352217000244851/57350-06048(277-1001-2017)-1112/213-2019 (п. 2.3.1-2.3.4 ТЗ).

Среди терминов, использованных при разработке методики следует перечислить следующие:

1. Проект подпрограммы – перечень мероприятий подпрограммы (например, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, работы по поддержанию работоспособности и серийным закупкам ракетно-космической техники, оказанию услуг по запуску космических аппаратов, реконструкции производства и др.), имеющих единую целевую направленность и координируемых совместно для повышения их общей результативности и управляемости.

2. Приоритизация (ранжирование, рейтингование) проектов подпрограммы – деятельность, осуществляемая Госкорпорацией «Роскосмос» и направленная на определение ценности проектов подпрограммы, ранжирование указанных проектов по убыванию их ценности, а также определение перечня наиболее ценных проектов, суммарный объем финансирования которых не превышает объема финансирования, выделенного на реализацию подпрограммы.

3. Показатель приоритета проекта – значимая характеристика проекта, используемая для расчета его ценности (приоритета).

4. Паспорт проекта – документ, содержащий основные параметры проекта, которые используются при расчете исходных физических значений показателей приоритета проекта.

5. Вес показателя приоритета – числовой коэффициент, определяющий сравнительную важность данного показателя в сравнении с другими. Сумма весов всех показателей приоритета проекта равна 1 (1.3).

6. Нормирование значений показателей приоритета проекта – приведение исходных физических значений показателей приоритета проекта к единой унифицированной шкале со значениями от 0 до 1 (2.6), (2.7).

7. Критерий приоритизации – условие, накладываемое на значение показателя приоритета, являющееся решающим правилом для присвоения проекту определённого приоритета.

8. Метод попарного сравнения (анализа иерархий или Саати) – метод оценки весов показателей приоритета, заключающийся в формировании и обработке матрицы парных сравнений. Элементами указанной матрицы являются балльные оценки результатов сравнения всех пар показателей с применением специальной шкалы (1 – одинаковая значимость сравниваемых показателей; 3 – слабое преобладание значимости одного из пары показателей; 5 – сильное (существенное) преобладание по значимости одного показателя над другим; 7 – очень сильное (очевидное) преобладание по значимости одного показателя над другим; 9 – абсолютное преобладание по значимости одного показателя над другим; 2, 4, 6 и 8 – промежуточные значения между двумя соседними оценками (суждениями); $1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8$ и $1/9$ – обратные определения оценок). Обработка данной матрицы обеспечивает расчет весов показателей приоритета в виде дробей: числитель каждой дроби равен 1, а знаменатель – сумме элементов соответствующего столбца матрицы парных сравнений (см. п.п. 1.3).

9. Правило Фишберна - метод оценки весов показателей приоритета, который основывается на предварительном ранжировании показателей в порядке убывания их важности «слева-направо» и последующем вычислении данных весов, являющихся рациональными дробями, «справа-налево» по правилу Фишберна: числитель правой дроби равен 1, числитель следующей дроби равен числителю предыдущей дроби если следующий показатель равнозначен предыдущему, числитель следующей дроби на единицу больше числителя предыдущей дроби, если следующий показатель важнее предыдущего, знаменатель каждой дроби равен сумме числителей указанных дробей (2.9):

$$r_j = \begin{cases} a_{j-1} \approx a_j \Rightarrow r_j \\ a_{j-1} > a_j \Rightarrow r_j + 1 \end{cases}, r_m = 1, j = m \dots 2, Z = \sum_{j=1}^m r_j, a_j = \frac{r_j}{Z} \quad (2.9)$$

При этом приоритет проекта вычисляется по формуле:

$$R_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij}, \text{ где } a_j - \text{ вес показателя, определяемый по правилу Фишберна}$$

(2.9), x_{ij} - значение показателя проекта из таблицы 2.5.

10. Метод уверенных суждений – метод оценки приоритета проектов, основанный на расчете для каждого проекта оценки вероятности его доминирования над всеми остальными альтернативами (проектами) на множестве моделируемых комбинаций экспертных мнений, реализуемых как множество различных вариантов комбинаций предпочтений критериев оценки.

11. Ранжирование проектов подпрограммы – упорядочение проектов подпрограммы в порядке убывания их ценности.

12. Метод ватерлинии – метод оптимизации подпрограммы, заключающийся в определении перечня наиболее ценных проектов подпрограммы, для которых суммарная оценка требуемого объема финансирования не превышает установленного лимита.

2.3.3 Основные шаги методики

Методика приоритизации проектов программы базируется на определении ценности каждого проекта программы и осуществляется на основе использования рационального множества показателей приоритета, оценки их значений, применения метода уверенных суждений (п.п. 2.1, 2.2) для ранжирования проектов и состоит из следующих шагов:

Шаг1. – обоснование рационального множества показателей приоритета и способов оценки их значений.

Множество показателей приоритета определяет перечень разнородных параметров, всесторонне характеризующих проекты и используемые для их сравнения друг с другом. Чем шире указанный перечень, тем объективнее и точнее будут результаты сравнения. Вместе с тем, с ростом числа показателей увеличивается трудоемкость процедуры приоритизации проектов обычными методами (см. п.п. 1.5). Компромиссным решением в данной ситуации является использование наиболее существенных (значимых) параметров, с одной стороны, и применение новой методики на основе метода уверенных суждений – с другой.

Рациональный перечень показателей приоритета и способов оценки их значений применительно к проектам ФКП-2025 обоснован на основе научно-исследовательских работ АО «ЦНИИМаш» и представлен в таблице 2.3.

В общем случае выбор критериев для оценки объекта, проекта или системы зависит от конкретной ситуации и формируется на основе деятельности руководителей, специалистов или экспертов, т.е. лиц принимающих решение, которые руководствуются информацией, получаемой из технической документации, паспортов проектов, технических характеристик систем, полученных в ходе их эксплуатации, испытаний и т.п.

При этом ЛПР осуществляют деятельность по следующим направлениям:

- подбор специалистов (экспертов);
- составление специальных опросных листов (анкет);
- проведение опроса;
- анализ и обработка информации, полученной от специалистов;
- определение размерности и качественного состава вектора частных критериев;
- расчет аналитических оценок космических проектов, систем или объектов.

Таблица 2.3 - Обоснованный перечень показателей приоритета

№ п/п	Показатель приоритета	Определение показателя приоритета	Тренд приоритизации	Значение показателя приоритета
1	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)
2	Масштабность (a ₂)	Степень влияния на другие проекты	Максимум	Количество других проектов, на реализацию которых влияет данный проект (содержится в паспорте проекта)
3	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)
4	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»
5	Задельность (a ₅)	Степень реализованности проекта	Максимум	Среднее количество завершенных 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)

№ п/п	Показатель приоритета	Определение показателя приоритета	Тренд приоритизации	Значение показателя приоритета
6	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)
7	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)
8	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)
9	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»
10	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)
11	Затратность (a ₁₁)	Уровень затрат на реализацию проекта	Минимум	Процент стоимости проекта в суммарной стоимости подпрограммы (рассчитывается на основе данных, содержащихся в паспорте проекта)
12	Выгодность (a ₁₂)	Степень участия частного капитала	Максимум	Процент частных инвестиций в суммарной стоимости проекта (рассчитывается на основе данных, содержащихся в паспорте проекта)

Таким образом, специалисты определяют состав альтернатив/проектов для оценки, критерии по которым происходит оценка и матрицу показателей приоритетов проектов (Таблица 2.5) для проведения оценки.

В нашем случае в роли ЛПР обычно выступают руководители структурных подразделений Госкорпорации «Роскосмос», а в качестве экспертов - ведущие специалисты головных научно-исследовательских институтов и организаций ракетно-космической промышленности.

Шаг 2. – определение значений показателей приоритета проектов.

В случае ФКП исходные числовые значения показателей приоритета проектов берутся из паспортов этих проектов или рассчитываются на основе данных, содержащихся в паспортах проектов на основании отработанных методик.

Примеры значений показателей приоритетов проектов ФКП-2025 представлены в таблице 2.5.

Шаг 3 – введение уверенных суждений ЛПР (Рисунок 3.5).

Здесь специалисты и ЛПР, в случае необходимости, определяют значимость некоторых критериев оценки относительно друг друга. Новая методика позволяет накладывать предпочтения на множество критериев оценки проектов точно и гибко, например, a_1 лучше a_2 или a_1 лучше a_4 и a_5 , оставляя без идентификации важности те показатели, по которым это сделать затруднительно или не возможно. При этом от экспертов не требуется никаких балльных интерпретаций своего мнения, достаточно определить предпочтения на уровне суждений «хуже/лучше».

Если анализ производится в условиях отсутствия подобной информации, или экспертного мнения, то данный шаг пропускается.

Шаг 4 – ранжирование проектов.

Процедура ранжирования проектов осуществляется с использованием ПМО системы поддержки принятия решения (СППР), в которую в качестве исходных данных загружается информация, полученная на предыдущих шагах (Рисунок

3.1). На этом этапе принятия решения возможны различные уточнения после введения в действие различных мнений ЛПР на счёт предполагаемой важности тех или иных показателей.

Шаг 5 – Принятие решения по финансовому и ресурсному обеспечению проектов ФКП.

Рейтинги (приоритеты) проектов ФКП, рассчитанные с помощью предложенной новой методики, указаны в таблице 3.1. Далее методом ватерлинии (Таблица 3.2- зелёный цвет) определяются:

- номенклатура наиболее перспективных проектов, интегральное финансирование которых не превышает квоты финансовых затрат или иных ресурсов доступной на учётный период, определяемую в рамках подпрограммы, реализацию которой необходимо продолжить;
- перечень менее важных проектов, реализацию которых в данных ограничениях стоит отложить.

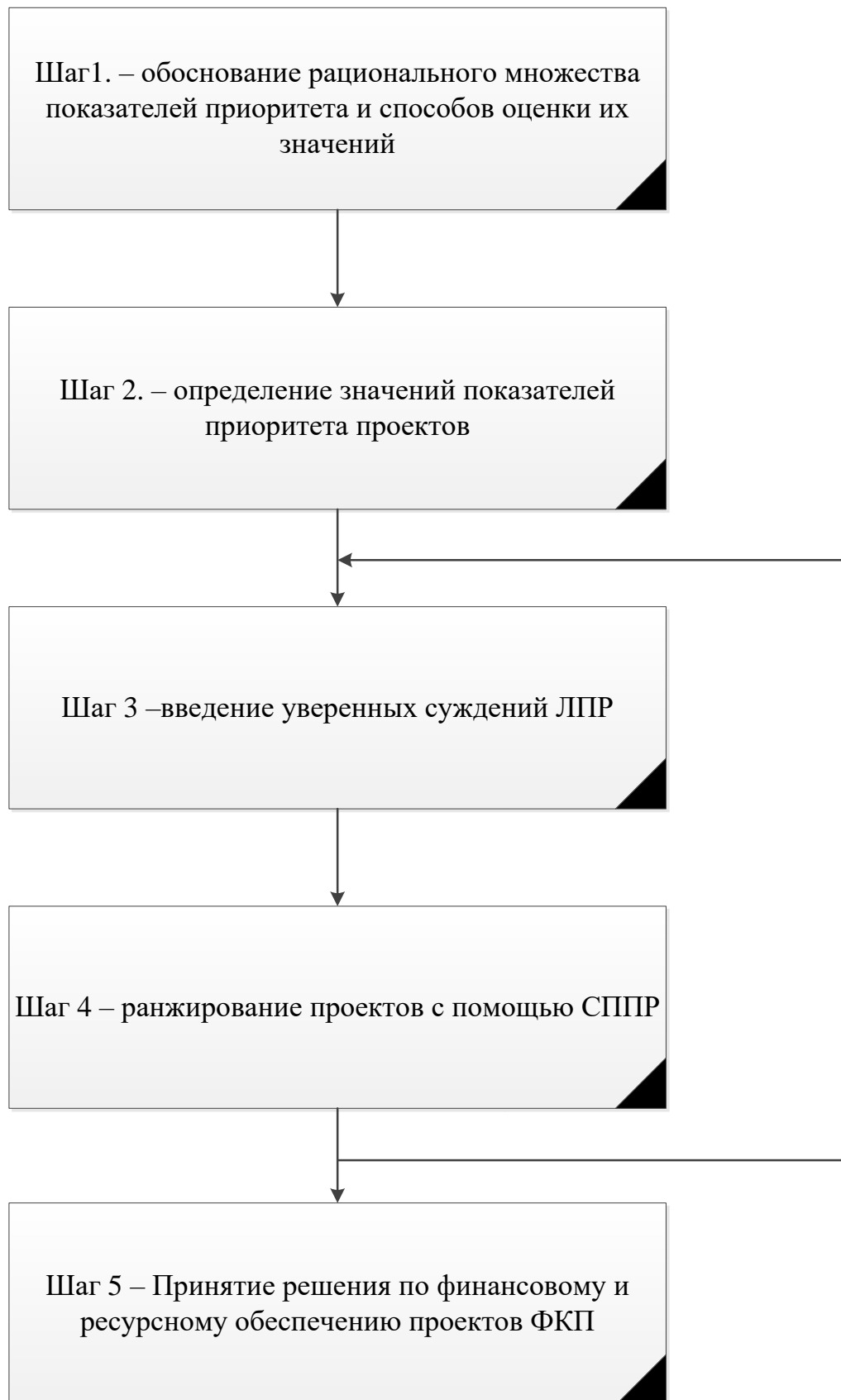


Рисунок 2.3 - Схема методики

2.4 Сравнительный анализ методик

Для того чтобы понять преимущества предлагаемой методики многокритериального анализа рассмотрим Порядок приоритизации компонентов подпрограммы «Разработка космических средств» Единой государственной космической программы Российской Федерации используемый в настоящее время.

Шаг 1 – обоснование рационального множества показателей приоритета и способов оценки их значений.

Совпадает с описанием предложенной методики п. 2.3.3

Шаг 2 – оценка исходных физических значений показателей приоритета проектов.

Совпадает с описанием предложенной методики п. 2.3.3.

Шаг 3 – нормирование значений показателей проектов.

Нормирование значений показателей приоритета обеспечивает приведение исходных физических значений разнородных показателей приоритета к единой унифицированной шкале.

В данном случае нормирование осуществляется по правилам, описанным в п.п. 2.2, но по сравнению с предложенной в работе методикой, в которой эта операция осуществляется автоматически с помощью ПО системы поддержки принятия решений, здесь могут использоваться расчёты вручную, что занимает существенное время.

Шаг 4 – Оценка приоритета (ценности) проекта.

Оценка приоритета проекта используется для его ранжирования в составе подпрограммы и осуществляется путем аддитивной линейной свертки значений нормированных показателей приоритета с учетом их весов по формуле (1.2) что здесь означает

$$R_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij} \quad (2.10)$$

где a_j – вес j –го показателя, а x_{ij} – нормированное значение j – того показателя i – того проекта.

Оценка весов показателей приоритета (a_j), отражающих значимость данных показателей относительно друг друга, в настоящее время осуществляется по следующему правилу Фишберна [10]:

- производится предварительное ранжирование показателей в порядке убывания их важности «слева-направо», например, эксперты могут использовать метод попарных сравнений или просто назначить более или менее важные показатели;

- в последующем осуществляется вычисление данных весов, являющихся рациональными дробями, «справа-налево»: числитель правой дроби равен 1, числитель следующей дроби равен числителю предыдущей дроби, если следующий показатель равнозначен предыдущему, числитель следующей дроби на единицу больше числителя предыдущей дроби, если следующий показатель важнее предыдущего, знаменатель каждой дроби равен сумме числителей указанных дробей:

$$r_j = \begin{cases} a_{j-1} \approx a_j \Rightarrow r_j \\ a_{j-1} > a_j \Rightarrow r_j + 1 \end{cases}, r_m = 1, j = m \dots 2, Z = \sum_{j=1}^m r_j, a_j = \frac{r_j}{Z} \quad (2.11)$$

Веса, ранжированных в порядке значимости показателей приоритета, представлены в таблице 2.7.

Кроме того, веса могут задаваться:

- методом непосредственного задания числовых коэффициентов экспертами;

- методом попарного сравнения, применяемого в методе анализа иерархий (п.п. 1.3);

- по методу Фишберна, описанному в п.п.1.2.3.

Тем не менее, важно сравнить предложенную методику с тем вариантом, который используется в настоящее время.

Все используемые в настоящее время методы в той или иной степени зависят от суждений экспертов, в качестве которых привлекаются руководители структурных подразделений Госкорпорации «Роскосмос», а также ведущие специалисты головных научно-исследовательских институтов и организаций ракетно-космической промышленности. При чём, естественно, что ЛПР вносят известную долю субъективизма в свои оценки. Часто не удается обеспечить необходимые качество и количество экспертов, которые могли бы взять на себя ответственность определения весов показателей приоритета. В результате этого возникают проблемы со сходимостью мнений экспертов и обеспечением заданного уровня достоверности результатов анализа.

Вторым существенным недостатком является то, что организация процесса содержит в себе этапы определения и назначения экспертов, их анкетирования и обработки этих экспертных мнений, что на практике сопряжено с существенными затратами времени, которое может растягиваться на несколько дней или недель.

В существующей методике приоритизации (оценки) проектов предпочтения экспертов определяются однозначно и сразу на всём векторе критериев оценки, который может содержать более 20 показателей. При чём, надо выстроить однозначно иерархию критериев по отношению друг к другу в виде: $a_1 \succ a_3 \succ \dots \succ a_m$, которая должна включать абсолютно все критерии оценки из имеющихся. 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_2 предпочтительней a_5 », оставляя все остальные оценки на уровне «не определено» или «неточно», «может быть».

Шаг 5 – ранжирование проектов и определение наиболее ценных из них при заданных ресурсных ограничениях методом ватерлинии.

Аналогичен шагу 5 предлагаемой методики.

Для более полного понимания преимуществ решения приведём сравнительный анализ существующей методики и предлагаемой в работе в табличной форме (Таблица 2.4):

Таблица 2.4 - Сравнительный анализ методик

№ шага	Существующая методика	Предлагаемая методика
Шаг 1 – обоснование рационального множества показателей приоритета и способов оценки их значений.	Исходные числовые значения показателей приоритета проектов берутся из паспортов этих проектов или рассчитываются на основе данных, содержащихся в паспортах проектов.	Совпадает с существующей методикой
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 3.5)
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 (секунды-минуты). При этом приоритет/ценность проекта определяется как вероятность его чистого выигрыша при всех возможных моделируемых мнениях экспертов (Рисунок 3.3).
Шаг 5 – ранжирование проектов и	Осуществляется методом ватерлинии по таблице ранжированных по	Совпадает с существующей методикой (Таблица 3.2). Определяются номенклатура

№ шага	Существующая методика	Предлагаемая методика
определение наиболее ценных из них при заданных ресурсных ограничениях	приоритету проектов (Таблица 3.2, зелёный цвет)	наиболее перспективных проектов, интегральное финансирование которых не превышает квоты финансовых затрат или иных ресурсов доступной на учётный период.

Таким образом, преимущества предлагаемого решения можно сформулировать так:

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 предпочтительным при всех возможных моделируемых мнениях экспертов по предпочтениям критериев оценки.

3. В существующей методике приоритизации (оценки) проектов предпочтения экспертов определяются однозначно и сразу на всём векторе критериев оценки, который может содержать более 20 показателей. При чём, надо выстроить однозначно иерархию критериев по отношению друг к другу в виде: $a_1 \succ a_3 \succ \dots \succ a_m$, которая должна включать абсолютно все критерии оценки из имеющихся. 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_2 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, 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. Новая методика позволяет накладывать предпочтения на множество критериев оценки проектов точно и гибко, например, a_1 лучше a_2 или a_1 лучше a_4 и a_5 , в существующей методике всегда надо выстроить полный последовательный ряд предпочтений ($a_1 \succ a_3 \succ \dots \succ a_m$) с помощью экспертов. При этом показатели, оказавшиеся в начале этого ряда, окажутся на много более значимыми, чем в конце, даже если такая дифференциация не требуется.

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 экспертного мнения на основе анкетирования, а предложенный подход исключает этот этап.

5. Эффективность применения методики продемонстрирована при отработке на реальных данных на основе решения задачи приоритизации проектов при балансировке портфеля проектов ФКП, оценки рисков проектов ФКП, сравнении проектов РКН и др.

Теперь рассмотрим, на примере программно-математического обеспечения системы поддержки принятия решений для многокритериальной оценки космических средств и систем как эти преимущества реализуются на практических применениях.

Таблица 2.5 - Значения показателей проектов

№ п/п	Шифр проекта	Исходное значение показателей приоритетов проектов											
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂
1	Астро	4	1	3	0	3,16	1,83	1	0,45	0,49	2	2,13	0
2	Био	3	0	2	0	0,5	4	1	0,14	0,05	1	0,92	0
3	Гео-гелио	3	0	2	0	2	4	0,33	0,75	0,86	0	0,78	0
4	Гонец	1	0	3	0	1	6	0,5	0,68	0,56	0	2,37	0
5	Грузопоток	5	2	0	2	0,5	4	0	1	0,50	0	5,47	2,4
6	Дозор	2	7	1	2	0	6	0,33	0,95	0,21	1	1,13	0
7	Енисей	2	1	1	10	0	4	0	1	0,44	0	6,17	2,2
8	Импортозамещение	0	0	1	5	0	0	1	1	0,26	0	1,01	1
9	Качество	1	10	2	0	0	4	0	1	0,25	0	1,98	0
10	Линза	4	1	3	1	1	4	0,8	0,71	0,22	0	5,04	0
11	Луна	6	1	3	9	2,66	3	0,33	0,68	0,41	1	2,23	0
12	Мегаватт	1	0	1	3	0	1	0	1	0,43	0	1,35	0,06
13	Метео-Глоб	1	1	4	0	3	4	1	0,65	0,03	0	3,86	0,08
14	Метео-ССО	1	1	4	0	3	4	1	0,65	0,12	0	3,69	0,04
15	МКС	3	0	3	2	2,2	5,8	0,33	1	0,45	2	22,71	3,6
16	МКСР	1	1	3	0	3	4	1	0,72	0,05	0	1,98	0
17	Общего назначения	5	27	1	0	0	0	0	1	0,05	1	0,50	0
18	Партнерство	1	0	2	0	4	6	1	0,68	0,40	0	14,78	95
19	Перспектива	1	0	1	17	0	4	1	1	0,14	0	1,01	0,28
20	Производство	1	0	1	4	0	5	1	0,5	0,15	0	1,88	0
21	Радар	6	0	4	0	2	4	0,75	0,5	0,03	0	4,41	1,02
22	Сервис	2	5	1	0	0	0	4	0	0,03	0	2,92	0
23	Система	1	6	0	7	0	0	0	0	0,20	0	1,75	0
24	Сотрудничество- КОСПАС	0	2	1	0	2	5	1	0,75	0,05	5	0,17	0

№ п/п	Шифр проекта	Исходное значение показателей приоритетов проектов											
		a₁	a₂	a₃	a₄	a₅	a₆	a₇	a₈	a₉	a₁₀	a₁₁	a₁₂
25	Сотрудничество-Марс	5	1	3	2	3	2,33	0,8	0,47	0,57	3	1,74	0
26	Союз-Восток	1	3	1	0	1	6	0	1	0,03	0	1,11	0
27	Управление КА	2	10	3	0	0	5	0,6	1	0,26	3	2,47	0
28	Федерация	7	0	2	3	2	6	1	1	0,14	0	4,44	0,3

Таблица 2.6 - Приоритеты (рейтинги) проектов ФКП рассчитанные с помощью предложенной методики

№ п/п	Шифр проекта	Приоритет (ценность) проекта		№ п/п	Шифр проекта	Приоритет (ценность) проекта		№ п/п	Шифр проекта	Приоритет (ценность) проекта	
		Жёсткий рейтинг	Мягкий рейтинг			Жёсткий рейтинг	Мягкий рейтинг			Жёсткий рейтинг	Мягкий рейтинг
1	Астро	0.000978	0.627499	11	Луна	0.048855	0.734439	21	Радар	0.044894	0.698490
2	Био	0.000045	0.535422	12	Мегаватт	0.000000	0.396895	22	Сервис	0.043191	0.464243
3	Гео-гелио	0.000014	0.490242	13	Метео-Глоб	0.036494	0.672297	23	Система	0.000000	0.316512
4	Гонец	0.001321	0.527237	14	Метео-ССО	0.009192	0.659981	24	Сотрудничество-КОСПАС	0.141944	0.714332
5	Грузопоток	0.000000	0.489691	15	МКС	0.008922	0.614295	25	Сотрудничество-Марс	0.028859	0.680449
6	Дозор	0.003450	0.612538	16	МКСР	0.004823	0.655421	26	Союз-Восток	0.008900	0.583519
7	Енисей	0.000000	0.515219	17	Общего назначения	0.131718	0.652050	27	Управление КА	0.040922	0.711433
8	Импортозамещение	0.000116	0.437205	18	Партнерство	0.184843	0.703620	28	Федерация	0.144445	0.770229
9	Качество	0.000000	0.541253	19	Перспектива	0.110035	0.652814				
10	Линза	0.000000	0.604315	20	Производство	0.000000	0.499788				

Таблица 2.7 - Веса показателей приоритета, рассчитанные в соответствии с (2.11) по используемой методике

	Ранжированные в порядке убывания значимости показатели приоритета																						
	a_1	$>$	a_3	$>$	a_7	$>$	a_2	\approx	a_{10}	$>$	a_9	$>$	a_6	\approx	a_4	$>$	a_5	$>$	a_8	$>$	a_{12}	\approx	a_{11}
Вес показателя приоритета	9/56		8/56		7/56		6/56		6/56		5/56		4/56		4/56		3/56		2/56		1/56		1/56
$>$	- знак предпочтения левого показателя перед правым																						
\approx	- знак равнозначности левого и правого показателей																						

Не трудно заметить, что $\sum_{j=1}^m a_j = 1$

Таблица 2.8 – Приоритеты проектов ФКП, рассчитанные по используемой методике

№ п/п	Шифр проекта	Приоритет (ценность) проекта	№ п/п	Шифр проекта	Приоритет (ценность) проекта	№ п/п	Шифр проекта	Приоритет (ценность) проекта
1	Астро	0,413	11	Луна	0,479	21	Радар	0,500
2	Био	0,357	12	Мегаватт	0,182	22	Сервис	0,331
3	Гео-гелио	0,269	13	Метео-Глоб	0,416	23	Система	0,000
4	Гонец	0,303	14	Метео-ССО	0,407	24	Сотрудничество-КОСПАС	0,400
5	Грузопоток	0,274	15	МКС	0,417	25	Сотрудничество-Марс	0,456
6	Дозор	0,342	16	МКСР	0,382	26	Союз-Восток	0,298
7	Енисей	0,270	17	Общего назначения	0,420	27	Управление КА	0,452
8	Импортозамещение	0,206	18	Партнерство	0,349	28	Федерация	0,502
9	Качество	0,299	19	Перспектива	0,339			
10	Линза	0,401	20	Производство	0,277			

Таблица 2.9 - Сравнительный анализ результатов расчётов приоритетов проектов ФКП по новой и существующей методикам

Существующая методика		Новая методика			
Проекты	Рейтинг	Проекты	М. Рейтинг	Проекты	Ж. Рейтинг
Федерация	0,502	Радар	0,972325	Радар	0,532374
Радар	0,5	Федерация	0,931737	Федерация	0,251799
Луна	0,479	Луна	0,921618	Общего назначения	0,107914
Сотрудничество-Марс	0,456	Сотрудничество-Марс	0,88253	Луна	0,05036
Управление КА	0,452	Общего назначения	0,816246	Сотрудничество-Марс	0,035971
Общего назначения	0,42	Астро	0,802479	Управление КА	0,014388
МКС	0,417	Линза	0,754534	Сотрудничество-КОСПАС	0,007194
Метео-Глоб	0,416	Управление КА	0,694887	Астро	0
Астро	0,413	Био	0,685509	Линза	0
Метео-ССО	0,407	Сервис	0,63414	Био	0
Линза	0,401	Метео-Глоб	0,629118	Сервис	0
Сотрудничество-КОСПАС	0,4	Метео-ССО	0,627731	Метео-Глоб	0
МКСР	0,382	Гео-гелио	0,623276	Метео-ССО	0
Био	0,357	Грузопоток	0,596164	Гео-гелио	0
Партнерство	0,349	МКСР	0,586891	Грузопоток	0
Дозор	0,342	Дозор	0,547373	МКСР	0
Перспектива	0,339	Гонец	0,544898	Дозор	0
Сервис	0,331	Качество	0,506676	Гонец	0

Существующая методика		Новая методика			
Проекты	Рейтинг	Проекты	М. Рейтинг	Проекты	Ж. Рейтинг
Гонец	0,303	МКС	0,478568	Качество	0
Качество	0,299	Перспектива	0,471481	МКС	0
Союз-Восток	0,298	Сотрудничество- КОСПАС	0,468733	Перспектива	0
Производство	0,277	Производство	0,456238	Производство	0
Грузопоток	0,274	Союз-Восток	0,44456	Союз-Восток	0
Енисей	0,27	Енисей	0,435803	Енисей	0
Гео-гелио	0,269	Мегаватт	0,402971	Мегаватт	0
Импортозамещение	0,206	Импортозамещение	0,376297	Импортозамещение	0
Мегаватт	0,182	Партнерство	0,367069	Партнерство	0
Система	0	Система	0,362157	Система	0

В таблице 2.9 представлен сравнительный анализ результатов счёта по существующей методике и по предлагаемой новой методике. Видно, что решение во многом совпадает, тем не менее, при использовании новой методики исключён этап расчёта коэффициентов важности критериев сравнения с помощью анкетирования экспертного мнения. Рейтинг по существующей методике более соответствует мягкому рейтингу (по новой методике) по сути, т.к. мягкий рейтинг не является вероятностью доминирования проекта на множестве моделируемых экспертных мнений, т.е. не равен 1 в сумме по всем проектам. В этом смысле приоритизация по правилу Фишберна более соответствует сравнительной эффективности (мягкому рейтингу).

Глава 3

Результаты применения программно-математического обеспечения системы поддержки принятия решений для многокритериальной оценки проектов космических средств и систем

Для демонстрации методики, а также для использования её в практических применениях было разработано программно-математическое обеспечение (ПМО) Системы поддержки принятия решений для многокритериальной оценки проектов космических средств и систем, которая была внесена в Реестр программ для ЭВМ, регистрационный № 2020614916 от 29.04.2020. Схема программы представлена в Приложение А.

Следует отметить, что ПМО создано на базе много-платформенного IDE QT Creator, защищённая версия которого применяется для автоматизации центров управления космическими группировками различного назначения на предприятиях ГК «Роскосмос» и в Министерстве обороны РФ. В качестве языка программирования используется C++. Таким образом, ПМО может функционировать не только под управлением Windows 7-10, но и в защищённой операционной системе Astra Linux.

Воспользуемся описанной в п.п. 2.3. методикой и ПМО СППР для подтверждения её эффективности на примерах расчёта приоритетов проектов Федеральной космической программы для балансировки портфеля проектов ФКП, расчёта рисков мультипроектов ФКП и др.

3.1 Балансировка портфеля проектов Федеральной космической программы

Дано:

- обоснованный перечень критериев оценки приоритетов проектов ФКП (Таблица 2.3);
- исходные значения показателей приоритетов проектов (Таблица 2.5);

Необходимо:

- рассчитать приоритеты проектов по предложенной методике с учётом уверенных суждений ЛППР – «рискованность» значительно больше «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.

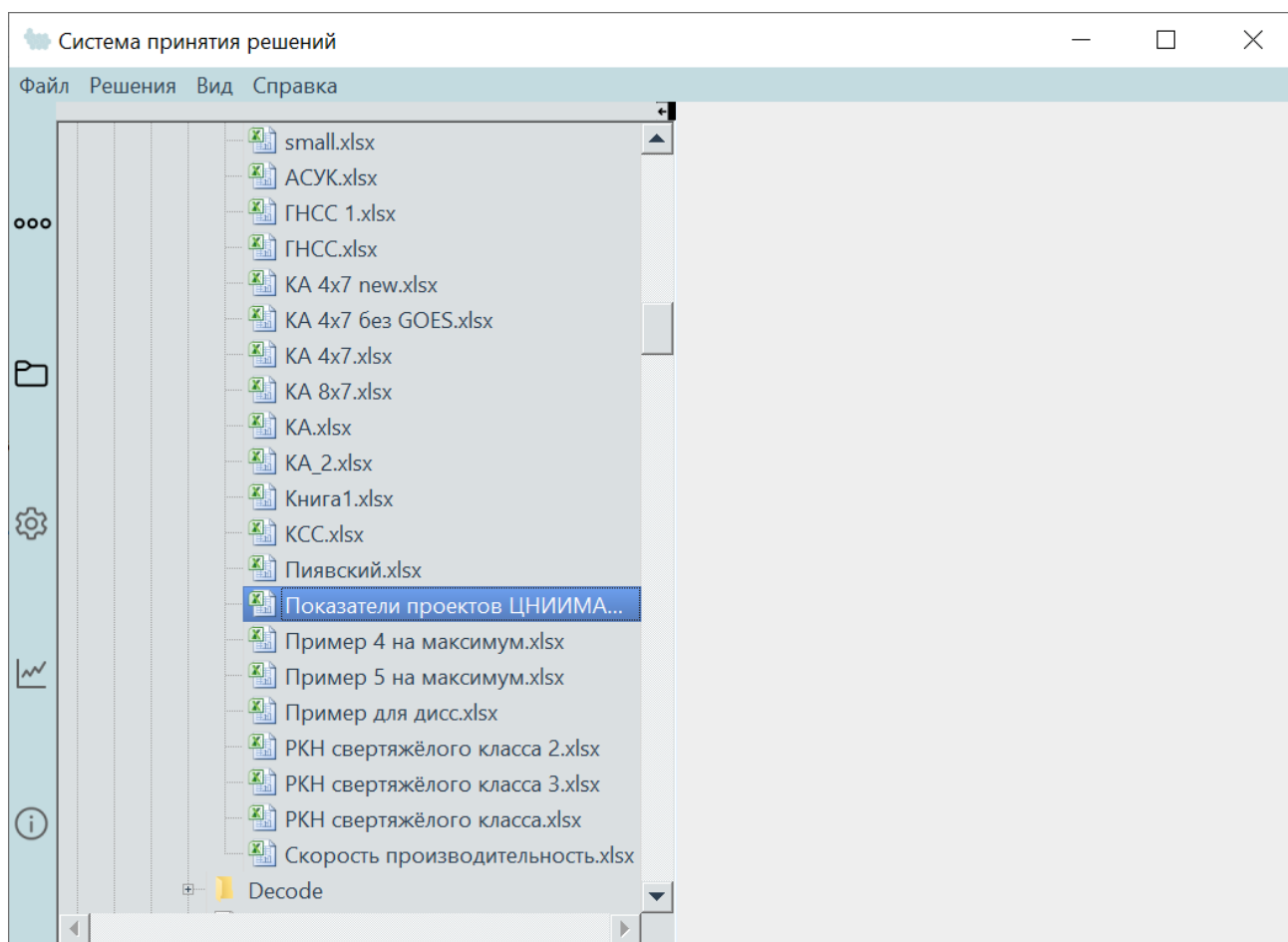


Рисунок 3.1 - Ввод исходных данных

На рисунке 3.1. демонстрируется скриншот ПМО СППР, на котором оператор осуществляет ввод исходных данных для расчётов с помощью программы. Исходные данные располагаются в таблицах MS Excel и соответствуют таблице 2.5.

Параметры вычислений

Шаг дробления
 Количество итераций: 352 716

Критерий оптимальности по Паррето
 Вкл Выкл

Список приоритетов

(a6) Полнота	Больше - лучше
(a7) Прогрессивность	Больше - лучше
(a8) Импортонезависимость	Больше - лучше
(a9) Рискованность	Меньше - лучше
(a10) Имиджевость	Больше - лучше
(a11) Затратность	Меньше - лучше
a12 (Выгодность)	Больше - лучше

Задать группы важности проектов

Задать группы важности показателей

OK Отмена

Рисунок 3.2 - Ввод параметров для расчётов

На рисунке 3.2 продемонстрирован интерфейс ПМО СППР для установки параметров расчёта. В данном случае оператор устанавливает шаг дробления интервала для генерации коэффициентов линейной свёртки (0,1) и тренды показателей. При этом по формуле (2.8) программа автоматически вычисляет оценку количества вариантов коэффициентов линейной свёртки, моделирующих экспертные мнения (количество итераций 352716).

Система принятия решений | Показатели проектов ЦНИИМАШ 00:00:00:403

Файл Решения Вид Справка

Проекты	(a1)Стратегичность	(a2)Масштабность	(a3)Целеустремленность	(a4)Эскалационность	(a5)Задельность	(a6)Полнота	(a7)Прогрессивность	(a8)Импортонезависимость
Астро	4	1	3	0	3.16	1.83	1	0.45
Био	3	0	2	0	0.5	4	1	0.14
Гео-гелио	3	0	2	0	2	4	0.33	0.75
Гонец	1	0	3	0	1	6	0.5	0.68
Грузопоток	5	2	0	2	0.5	4	0	1
Дозор	2	7	1	2	0	6	0.33	0.95

Проекты	Мягкий рейтинг	Жёсткий рейтинг	(a1)Стратегичность	(a2)Масштабность	(a3)Целеустремленность	(a4)Эскалационность	(a5)Задельность	(a6)Полнота	(a7)Прогрессивность
Партнерство	0.703620	0.184956	0.142857	0.000000	0.500000	0.000000	1.000000	1.000000	0.45
Федерация	0.770229	0.144525	1.000000	0.000000	0.500000	0.176471	0.500000	1.000000	0.14
Сотрудничество-КОСПАС	0.714332	0.142017	0.000000	0.074074	0.250000	0.000000	0.500000	0.833333	0.75
Общего назначения	0.652050	0.131788	0.714286	1.000000	0.250000	0.000000	0.000000	0.000000	0.68
Перспектива	0.652814	0.110182	0.142857	0.000000	0.250000	1.000000	0.000000	0.666667	0.68
Луна	0.734439	0.048855	0.857143	0.037037	0.750000	0.529412	0.665000	0.500000	0.68
Радар	0.698490	0.045150	0.857143	0.000000	1.000000	0.000000	0.500000	0.666667	0.68
Сервис	0.464243	0.043319	0.285714	0.185185	0.250000	0.000000	0.000000	0.000000	0.68
Управление КА	0.711433	0.040974	0.285714	0.370370	0.750000	0.000000	0.000000	0.833333	0.68
Метео-Глоб	0.672297	0.039142	0.142857	0.037037	1.000000	0.000000	0.750000	0.666667	0.68
Сотрудничество-Марс	0.680449	0.028873	0.714286	0.037037	0.750000	0.117647	0.750000	0.388333	0.68
Метео-ССО	0.659981	0.011546	0.142857	0.037037	1.000000	0.000000	0.750000	0.666667	0.68
МКС	0.614295	0.008940	0.428571	0.000000	0.750000	0.117647	0.550000	0.966667	0.68
Союз-Восток	0.583519	0.008933	0.142857	0.111111	0.250000	0.000000	0.250000	1.000000	0.68
МКСР	0.655421	0.004823	0.142857	0.037037	0.750000	0.000000	0.750000	0.666667	0.68

Рисунок 3.3 - Результаты расчёта рейтингов проектов ФКП

На рисунке 3.3 демонстрируется скриншот с результатами расчётов приоритетов проектов ФКП, ранжированных по жёсткому рейтингу (шаг 4 методики п.п. 2.3.3). При этом в верхней части экрана располагаются исходные данные значений показателей оценки приоритетов проектов, аналогичные таблице 2.5, а в нижней - нормированные значения этих показателей и также расчётные значения жёсткого и мягкого рейтингов для каждого из проектов.

На рисунке 3.4 представлен скриншот с графическим представлением результатов расчёта.

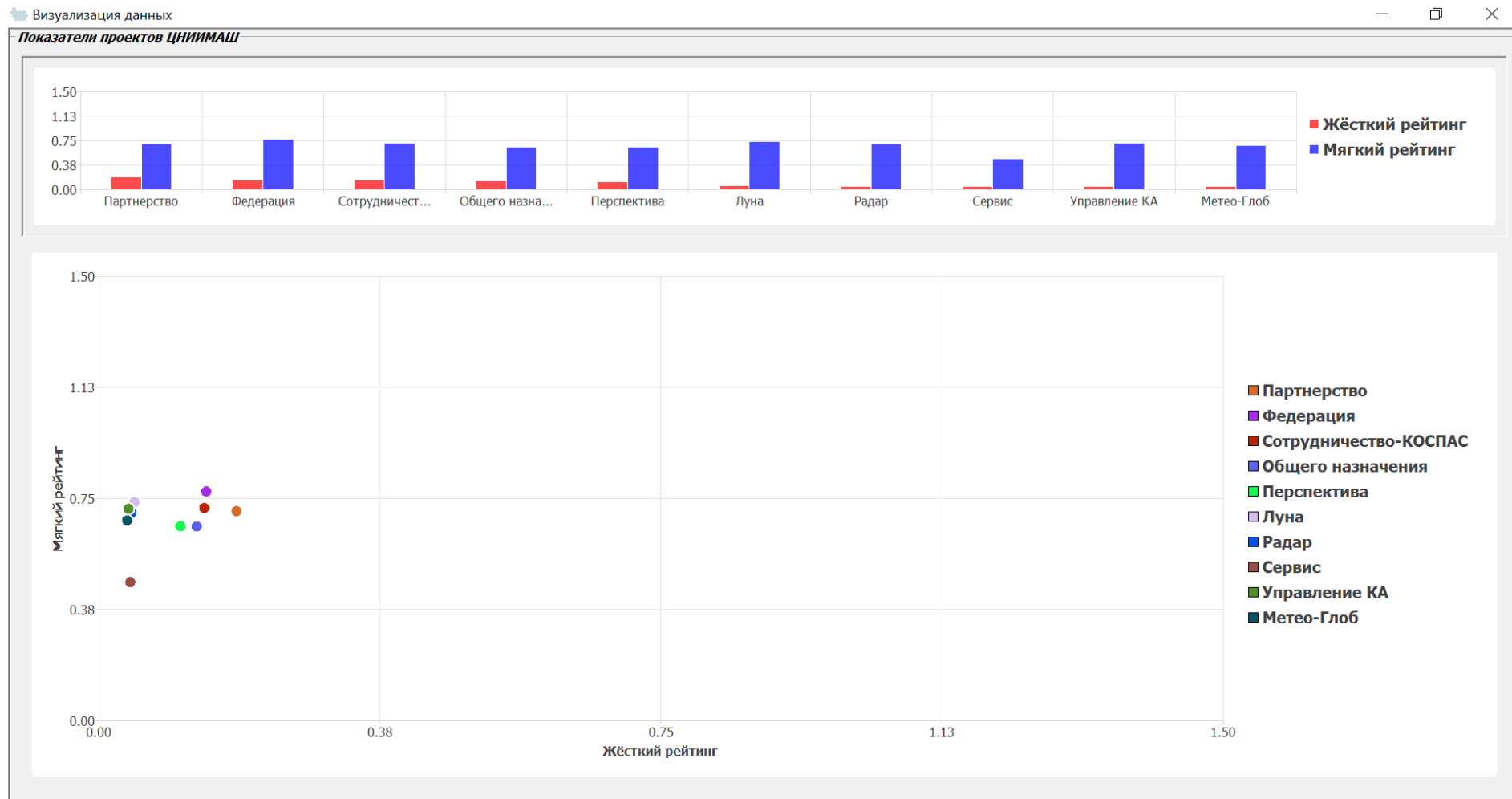


Рисунок 3.4 - Графическое представление результатов расчёта

Теперь выставим согласно условиям решения задачи предпочтение ЛПР о том, что показатель рискованности имеет преимущество над показателем затратности проектов. Такое суждение может быть установлено в случае, например, если на данном этапе реализации программы принято решение, что её успешная реализация с точки зрения рисков (определяемых по отдельной методике ЦНИИМаш) предпочтительнее, чем расходы, т.е. в приоритете выступает успешная реализация, нежели финансовые затраты (шаг 3 предлагаемой методики).

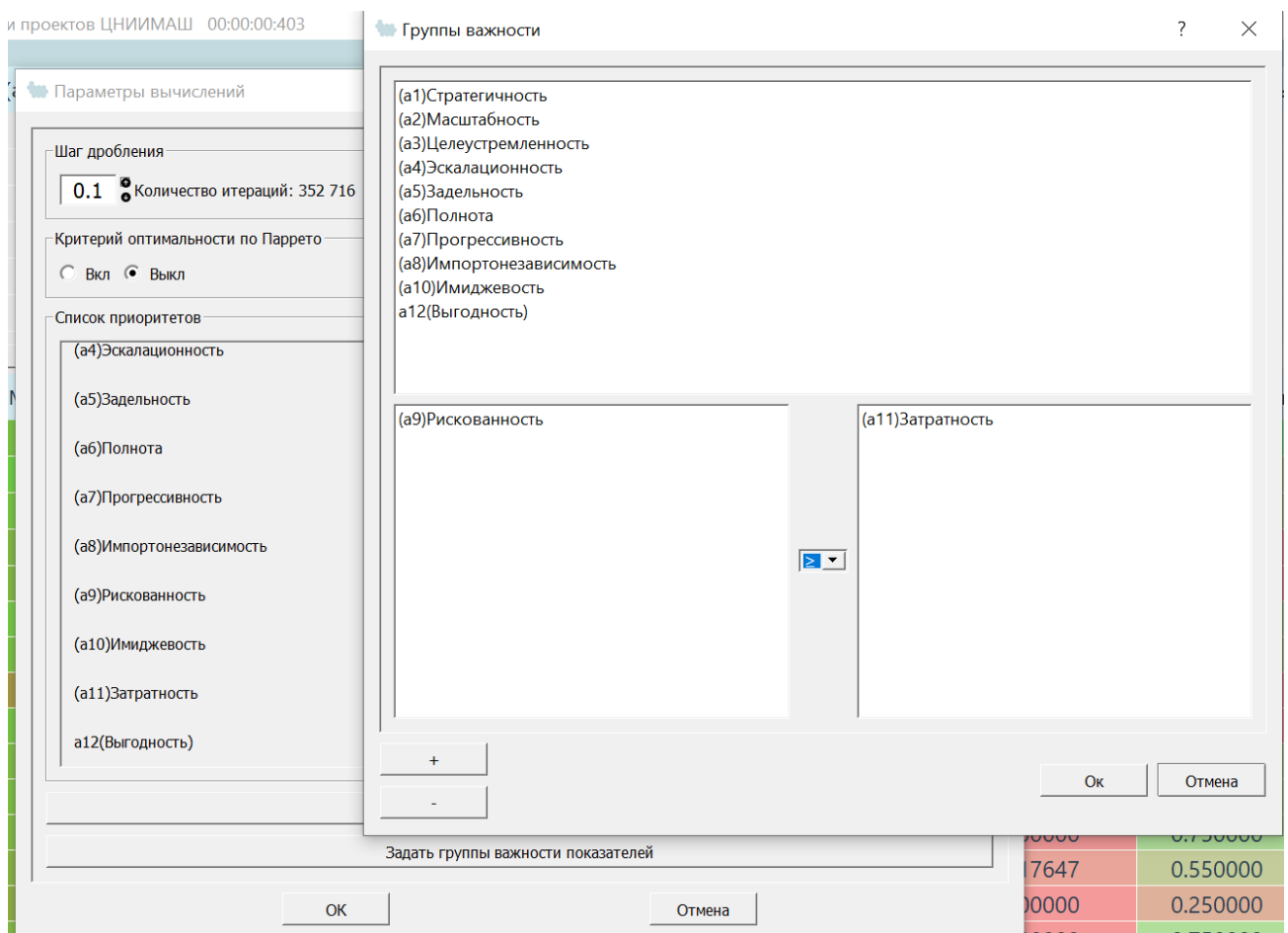


Рисунок 3.5 - Установка уверенных суждений ЛПР

Система принятия решений | Показатели проектов ЦНИИМАШ 00:00:00:076

Файл Решения Вид Справка

Проекты	(a1)Стратегичность	(a2)Масштабность	(a3)Целеустремленность	(a4)Эскалационность	(a5)Задельность	(a6)Полнота	(a7)Прогрессивность	(a8)Импортонезави
Астро	4	1	3	0	3.16	1.83	1	0.45
Био	3	0	2	0	0.5	4	1	0.14
Гео-гелио	3	0	2	0	2	4	0.33	0.75
Гонец	1	0	3	0	1	6	0.5	0.68
Грузопоток	5	2	0	2	0.5	4	0	1
Дозор	2	7	1	2	0	6	0.33	0.95

Проекты	Мягкий рейтинг	Жёсткий рейтинг	(a1)Стратегичность	(a2)Масштабность	(a3)Целеустремленность	(a4)Эскалационность	(a5)Задельность	(a6)Полнота	(a7)П
Партнерство	0.722964	0.209929	0.142	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000	
Федерация	0.765172	0.151426	1.000	0.000000	0.000000	0.176471	0.500000	1.000000	
Сотрудничество-КОСПАС	0.694723	0.135476	0.000	0.000000	0.000000	0.000000	0.500000	0.833333	
Общего назначения	0.631536	0.126499	0.714	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Перспектива	0.629898	0.104408	0.142	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.666667	
Радар	0.695100	0.052809	0.857	0.000000	0.000000	0.000000	0.500000	0.666667	
Метео-Глоб	0.665346	0.051963	0.142	0.000000	0.000000	0.000000	0.750000	0.666667	
Сервис	0.445321	0.043573	0.285	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Луна	0.707255	0.037472	0.857	0.529412	0.665000	0.500000	0.500000		
Управление КА	0.691210	0.035764	0.285	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.833333	
Сотрудничество-Марс	0.641575	0.019550	0.714	0.000000	0.117647	0.750000	0.388333		
МКС	0.660402	0.013263	0.428571	0.000000	0.750000	0.117647	0.550000	0.966667	
Союз-Восток	0.561775	0.009217	0.142857	0.111111	0.250000	0.000000	0.250000	1.000000	
Метео-ССО	0.647672	0.003495	0.142857	0.037037	1.000000	0.000000	0.750000	0.666667	
МКСР	0.639361	0.002972	0.142857	0.037037	0.750000	0.000000	0.750000	0.666667	

(a2)Масштабность: Больше - лучше
 (a3)Целеустремленность: Больше - лучше
 (a4)Эскалационность: Больше - лучше
 (a5)Задельность: Больше - лучше
 (a6)Полнота: Больше - лучше
 (a7)Прогрессивность: Больше - лучше
 (a8)Импортонезависимость: Больше - лучше
 (a9)Рискованность: Меньше - лучше
 (a10)Имиджевость: Больше - лучше
 (a11)Затратность: Меньше - лучше
 a12(Выгодность): Больше - лучше
 (a9)Рискованность ≥ (a11)Затратность

Введите здесь текст для поиска

16:20
15.12.2020

Рисунок 3.6 - Расчёт приоритетов проектов ФКП с условием критерий «Рискованность» предпочтительнее, чем «Затратность»

На рисунке 3.6 и в таблице 3.1 видно, что после назначения ЛПР условия, что показатель рискованности имеет более важное значение, нежели затратность проекта, иерархия по жёсткому рейтингу несколько поменялась, например, «Радар» поднялся на одну позицию вверх по иерархии, а «Луна» потеряла 3 ранга и т.д.

Таблица 3.1 – Сравнение приоритизации проектов без предпочтений критериев и с предпочтением (правая часть) «рисков» над «затратностью»

№	Проекты	Рейтинг	Проекты	Рейтинг
1	Партнерство	0,184956263	Партнерство	0,209929009
2	Федерация	0,144525267	Федерация	0,151426298
3	Сотрудничество-КОСПАС	0,142016996	Сотрудничество-КОСПАС	0,135475679
4	Общего назначения	0,131788297	Общего назначения	0,126498762
5	Перспектива	0,110181678	Перспектива	0,104408186
6	Луна	0,04885517	Радар	0,052809462
7	Радар	0,045149639	Метео-Глоб	0,051963116
8	Сервис	0,043319318	Сервис	0,043572611
9	Управление КА	0,040973732	Луна	0,037472116
10	Метео-Глоб	0,039141736	Управление КА	0,035763672
11	Сотрудничество-Марс	0,028872851	Сотрудничество-Марс	0,019550135
12	Метео-ССО	0,01154588	МКС	0,013263427
13	МКС	0,008939933	Союз-Восток	0,00921668
14	Союз-Восток	0,00893294	Метео-ССО	0,003495167
15	МКСР	0,004822577	МКСР	0,002971506
16	Дозор	0,003450935	Дозор	0,001705459
17	Гонец	0,001324106	Гонец	0,000256885
18	Астро	0,000978124	Астро	0,000180984
19	Импортозамещение	0,000163987	Импортозамещение	3,93152E-05
20	Био	4,53623E-05	Грузопоток	3,8263E-07
21	Гео-гелио	1,41757E-05	Енисей	3,8263E-07
22	Грузопоток	2,5774E-07	Качество	3,8263E-07
23	Енисей	2,5774E-07	Мегаватт	3,8263E-07
24	Качество	2,5774E-07	Био	0
25	Мегаватт	2,5774E-07	Гео-гелио	0
26	Линза	0	Линза	0
27	Производство	0	Производство	0
28	Система	0	Система	0

Таблица 3.2. - Определение наиболее ценных проектов методом ватерлинии

Проекты	Ж. Рейтинг	Объём финансирования	Сумма с нарастающим итогом
Партнерство	0,209929009	100	100
Федерация	0,151426298	300	400
Сотрудничество-КОСПАС	0,135475679	120	520
Общего назначения	0,126498762	20	540
Перспектива	0,104408186	150	690
Радар	0,052809462	350	1040
Метео-Глоб	0,051963116	120	1160
Сервис	0,043572611	200	1360
Луна	0,037472116	160	1520
Управление КА	0,035763672	100	1620
Сотрудничество-Марс	0,019550135	130	1750
МКС	0,013263427	20	1770
Союз-Восток	0,00921668	15	1785
Метео-ССО	0,003495167	5	1790
МКСР	0,002971506	3	1793
Дозор	0,001705459	10	1803
Гонец	0,000256885	30	1833
Астро	0,000180984	70	1903
Импортозамещение	3,93152E-05	20	1923
Грузопоток	3,8263E-07	32	1955
Енисей	3,8263E-07	14	1969
Качество	3,8263E-07	15	1984
Мегаватт	3,8263E-07	17	2001
Био	0	25	2026
Гео-гелио	0	42	2068
Линза	0	70	2138
Производство	0	15	2153
Система	0	20	2173

Ответ:

1. На рисунке 3.6 представлен расчёт приоритетов проектов с помощью ПМО СППР с учётом уверенных суждений ЛПР – «рискованность» предпочтительнее «затратности», наиболее доминирующими оказались проекты, у которых получилась наибольшая вероятность выигрыша при всех возможных моделируемых экспертных мнениях;
2. Рисунок 3.5 – интерфейс ввода уверенных суждений;
3. Таблица 3.2 - балансировка портфеля проектов ФКП с итоговой суммой ≤ 1500 млн. руб. методом ватерлинии.

3.1.1 Расчёт приоритетов проектов ФКП в множестве Парето

Иногда бывает важно провести оценку приоритетов проектов в множестве Парето. Например, когда понятно, что все т.н. «улучшаемые» альтернативы всё равно окажутся ниже ватерлинии. Это с одной стороны снижает затраты на время вычислений, а с другой гарантировано обеспечивает принятие решений по наиболее рейтинговым проектам.

Постановка задачи.

Дано:

- обоснованный перечень критериев оценки приоритетов проектов ФКП (Таблица 2.3);
- исходные значения показателей приоритетов проектов (Таблица 2.5);

Необходимо:

- рассчитать приоритеты проектов по предложенной методике с учётом уверенных суждений ЛПР – «рискованность» значительнее «затратности» в множестве Парето.

Ответ: на рисунке 3.7 представлен расчёт приоритетов ФКП в множестве Парето.

При этом показано, что условие, которое задаёт необходимость исключения из расчётов т.н. улучшаемых альтернатив задаётся с помощью Radio Button „Критерий оптимальности по Парето – Вкл». В верхней части экрана проекты, исключённые из множества допустимых альтернатив, помечаются красноватой подсветкой.

Система принятия решений | Показатели проектов ЦНИИМАШ_3 00:00:00:207

Файл Решения Вид Справка

Проекты	(a1)Стратегичность	(a2)Масштабность	(a3)Целеустремленность	(a4)Эскалационность	(a5)Задельность	(a6)Полнота	(a7)Прогрессивность	(a8)ИИ
Дозор	2	7						
Енисей	2	1						
Импортозамещение	0	0						
Качество	1	10						
Линза	4	1						
Луна	6	1						
Мегаватт	1	0						
Метео-Глоб	1	1						
Метео-ССО	1	1						
МКС	3	0						
МКСР	1	1						

Обозреватель

Конфигурация

Проекты	Мягкий рейтинг	Жёсткий рейтинг	(a1)Стратегич
Партнерство	0.722964	0.209929	0.142857
Федерация	0.765172	0.151426	1.000000
Сотрудничество-КОСПАС	0.694723	0.135476	0.000000
Общего назначения	0.631536	0.126499	0.714286
Перспектива	0.629898	0.104408	0.142857
Радар	0.695100	0.052809	0.857143
Метео-Глоб	0.665346	0.051963	0.142857
Сервис	0.445321	0.043573	0.285714
Луна	0.707255	0.037472	0.857143
Управление КА	0.691210	0.035764	0.285714
Сотрудничество-Март	0.641575	0.019550	0.714286

Графики

Инфо

Параметры вычислений

Шаг дробления: 0.1 Количество итераций: 352 716

Критерий оптимальности по Парето: Вкл Выкл 27/28 (96%)

Список приоритетов:

- (a5)Задельность: Больше - лучше
- (a6)Полнота: Больше - лучше
- (a7)Прогрессивность: Больше - лучше
- (a8)Импортонезависимость: Больше - лучше
- (a9)Рискованность: Меньше - лучше
- (a10)Имиджевость: Больше - лучше
- (a11)Затратность: Меньше - лучше
- a12(Выгодность): Больше - лучше

Задать группы важности проектов

Задать группы важности показателей

OK Отмена

Введите здесь текст для поиска

16:14 16.12.2020

Рисунок 3.7 - Расчёт приоритетов проектов ФКП в множестве Парето

3.2 Многокритериальная приоритизация проектов Федеральной космической программы для оценки рисков мультипроектов

Многокритериальная оценка рейтингов проектов Федеральной космической программы (ФКП), имеет большое значение не только при балансировке портфеля, но и с точки зрения менеджмента рисков, так как программа реализуется в условиях неопределённости и подвержена на каждом этапе реализации её проектов, подпроектов и мероприятий различным факторам риска, которые оказывают существенное влияние на её успешное осуществление. В последнее время подобные оценки приобретают особое значение, т.к. среди неблагоприятных воздействий, влияющих на выполнение программы, добавились международные санкции, ограничения на закупку современной электронной компонентной базы, прекращение реализации совместных проектов с зарубежными компаниями и др. Ущерб от их воздействия, особенно в первое время, неуклонно возрастает и требует от руководителей особой концентрации, во-первых, для своевременной идентификации этих рисков, их оценки, а во-вторых, для разработки мероприятий по их нивелированию.

В настоящее время методики, предложенные для комплексной оценки рисков выполнения ФКП предполагают, среди прочего, что показатель риска по результатам m – ого мультипроекта рассчитывается как аддитивная свертка рисков по всем проектам данного мультипроекта с учетом их приоритетов:

$$R^m = \sum_{l=1}^{N^m} W^{ml} * R^{ml}, \quad (3.1)$$

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 – ого мультипроекта.

Обычно для вычисления W^{ml} применяются сложные экспертные методы многокритериальной оценки, основанные на известных методиках (методы

коэффициентов Фишберна, Саати др.). Однако их практическая реализация требует иногда более глубокого осмысления алгоритмов и при внедрении в некоторых случаях сталкивается с серьёзными ограничениями (см. п.п. 1.5). 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^m использовать приоритет проекта, рассчитанного по предложенной методике. Дадим *постановку задачи*.

Дано:

- обоснованный перечень критериев оценки приоритетов проектов ФКП (Таблица 2.3);
- исходные значения показателей приоритетов проектов N^m проектов ФКП (Таблица 2.5);
- уверенные суждения ЛПР о том, что показатель рискованности предпочтительнее показателя затраты.

Необходимо: используя разработанную методику и ПМО рассчитать приоритеты проектов программы и далее обобщённый риск m -го мультипроекта (программы), по формуле (3.1).

Ответ:

На рисунке 3.6 представлены результаты расчёта приоритетов проектов m -го мультипроекта по предложенной методике с помощью ПМО СППР.

В таблице 3.3 представлены результаты расчёта риска мультипроекта (программы).

Таблица 3.3 - Расчёт риска мультипроекта/программы ФКП

Проекты	Ж. Рейтинг	Рискованность	$R*HR$
Астро	0,000181	0,49	0,00008869
Био	0	0,05	0
Гео-гелио	0	0,86	0
Гонец	0,000253	0,56	0,00014168
Грузопоток	0	0,5	0
Дозор	0,001705	0,21	0,00035805
Енисей	0	0,44	0

Проекты	Ж. Рейтинг	Рискованность	$R*HR$
Импортозамещение	0,000029	0,26	0,00000754
Качество	0	0,25	0
Линза	0	0,22	0
Луна	0,037472	0,41	0,01536352
Мегаватт	0	0,43	0
Метео-Глоб	0,048032	0,03	0,00144096
Метео-ССО	0	0,12	0
МКС	0,013237	0,45	0,00595665
МКСР	0,002972	0,05	0,0001486
Общего назначения	0,126394	0,05	0,0063197
Партнерство	0,209761	0,4	0,0839044
Перспектива	0,104251	0,14	0,01459514
Производство	0	0,15	0
Радар	0,052431	0,03	0,00157293
Сервис	0,043381	0,03	0,00130143
Система	0	0,2	0
Сотрудничество- КОСПАС	0,135368	0,05	0,0067684
Сотрудничество-Марс	0,019529	0,57	0,01113153
Союз-Восток	0,009167	0,03	0,00027501
Управление КА	0,035688	0,26	0,00927888
Федерация	0,151307	0,14	0,02118298
	Ответ:	$R^m =$	0,17983609

3.3 Многокритериальная оценка приоритетов проектов с большим количеством показателей

Теперь продемонстрируем, как работает предложенная методика на основе разработанного ПМО на большом количестве проектов (30) и показателей (21). Это важно, чтобы понять, что программная стратегия реализации методики была выбрана верно, и ПМО имеет хороший «запас прочности» по производительности.

Рассмотрим следующую постановку задачи:

Дано:

- исходные значения показателей приоритетов проектов (Таблица 3.4);

Необходимо: используя разработанную методику и ПМО рассчитать приоритеты проектов программы.

На рисунках 3.8 – 3.9 представлены результаты расчётов приоритетов проектов с помощью ПМО.

Система принятия решений | FileBig 21 x 30_1 00:00:23:044

Файл Решения Вид Справка

Проекты	Стратегичность	Важность	Масштабность	Целеустремлённость	Технологичность	Эскалационность	Трендовость	Задельность	Полнота	Критичность	Про
Союз-Восток	18	13	10	90	7	15	32	18	13	10	
Грузопоток	19	14	12	74	8	18	42	19	14	12	
Енисей	21	11	9	80	6	19	37	21	11	9	
Линза	18	23	11	79	6	16	35	18	23	11	
Радар	14	9	10	76	5	17	40	14	9	10	
Метео-Глоб	17	14	12	81	4	20	39	17	14	12	
Метео-ССО	17	14	12	81	4	20	39	17	14	12	
Партнерство	17	23	12	81	4	20	23	17	14	12	
МКСР	17	14	56	81	4	20	39	17	14	12	
Гонец	17	14	17	44	4	23	39	17	14	12	
Перспектива	17	17	12	81	4	20	39	17	14	12	

Проекты	Мягкий рейтинг	Жёсткий рейтинг	Стратегичность	Важность	Масштабность	Целеустремлённость	Технологичность	Эскалационность	Трендовость	Задельность
Грузопоток	0.902250	0.414955	0.714286	0.357143	0.063830	0.761194	1.000000	0.375000	0.783784	0.263
Сервис	0.814334	0.173151	0.142857	0.785714	0.765957	0.865672	0.000000	0.625000	0.702703	1.000
Метео-ССО	0.795805	0.094951	0.428571	0.357143	0.063830	0.865672	0.000000	0.625000	0.702703	0.157
Линза	0.747930	0.082122	0.571429	1.000000	0.042553	0.835821	0.500000	0.125000	0.594595	0.210
Гонец	0.762345	0.043416	0.428571	0.357143	0.170213	0.313433	0.000000	1.000000	0.702703	0.157
Астро	0.770890	0.038142	0.428571	0.357143	0.063830	0.865672	0.000000	0.625000	0.702703	0.157
МКСР	0.689512	0.038109	0.428571	0.357143	1.000000	0.865672	0.000000	0.625000	0.702703	0.157
Енисей	0.775745	0.034095	1.000000	0.142857	0.000000	0.850746	0.500000	0.500000	0.648649	0.368
Сотрудничество-Марс	0.734192	0.033356	0.428571	0.357143	0.063830	0.865672	0.000000	0.625000	0.702703	0.157
Союз-Восток	0.613018	0.018629	0.571429	0.285714	0.021277	1.000000	0.750000	0.000000	0.513514	0.210
Линза	0.739701	0.014050	0.428571	0.357143	0.063830	0.865672	0.000000	0.625000	1.000000	0.157

Рисунок 3.8 - Результат счёта 30 проектов , 21 показатель



Рисунок 3.9 - Графическая интерпретация результатов расчёта 30 проектов по 21 показателю

Следует отметить, что длительность расчётов на 8 потоках составила всего 23 секунды, в то время как без использования параллельной обработки время ожидания результатов счёта составляет несколько часов.

На рисунках 3.8, 3.9 хорошо видна иерархия проектного пула, которую возглавляет проект «Грузопоток». Теперь попробуем исключить его из расчётов, чтобы исследовать, как влияет исключение лидера по жёсткому рейтингу на порядок иерархии.

Система принятия решений | FileBig 21 x 30 без Грузопоток 00:00:23:959

Файл Решения Вид Справка

Проекты	Стратегичность	Важность	Масштабность	Целеустремлённость	Технологичность	Эскалационность	Трендовость	Задельность	Полнота	Критичность	Про
Союз-Восток	18	13	10	90	7	15	32	18	13	10	
Енисей	21	11	9	80	6	19	37	21	11	9	
Линза	18	23	11	79	6	16	35	18	23	11	
Радар	14	9	10	76	5	17	40	14	9	10	
Метео-Глоб	17	14	12	81	4	20	39	17	14	12	
Метео-ССО	17	14	12	81	4	20	39	17	14	12	
Партнерство	17	23	12	81	4	20	23	17	14	12	
МКСР	17	14	56	81	4	20	39	17	14	12	
Гонец	17	14	17	44	4	23	39	17	14	12	
Перспектива	17	17	12	81	4	20	39	17	14	12	
Управление КА	17	14	12	34	4	20	39	17	14	12	

Проекты	Мягкий рейтинг	Жёсткий рейтинг	Стратегичность	Важность	Масштабность	Целеустремлённость	Технологичность	Эскалационность	Трендовость	Задельность
Сервис	0.847459	0.219004	0.142857	0.785714	0.765957	0.865672	0.000000	0.625000	0.702703	1.000
Метео-ССО	0.839001	0.142380	0.428571	0.357143	0.063830	0.865672	0.000000	0.625000	0.702703	0.157
Енисей	0.828432	0.138737	1.000000	0.142857	0.000000	0.850746	0.666667	0.500000	0.648649	0.368
Линза	0.791295	0.133637	0.571429	1.000000	0.042553	0.835821	0.666667	0.125000	0.594595	0.210
Союз-Восток	0.656724	0.062700	0.571429	0.285714	0.021277	1.000000	1.000000	0.000000	0.513514	0.210
Астро	0.804711	0.060096	0.428571	0.357143	0.063830	0.865672	0.000000	0.625000	0.702703	0.157
Гонец	0.796145	0.058668	0.428571	0.357143	0.170213	0.313433	0.000000	1.000000	0.702703	0.157
Сотрудничество-Марс	0.768084	0.056203	0.428571	0.357143	0.063830	0.865672	0.000000	0.625000	0.702703	0.157
МКСР	0.722697	0.052677	0.428571	0.357143	1.000000	0.865672	0.000000	0.625000	0.702703	0.157
Луна	0.773310	0.027269	0.428571	0.357143	0.063830	0.865672	0.000000	0.625000	1.000000	0.157
Радар	0.688288	0.020814	0.000000	0.000000	0.021277	0.791045	0.333333	0.250000	0.729730	0.000

Рисунок 3.10 - Расчёт рейтингов 29 проектов (исключён проект «Грузопоток») 21 показатель с выстраиванием иерархии по жёсткому рейтингу

Таблица 3.5 - Расчёт рейтингов 29 проектов (исключён проект «Грузопоток») 21 показатель с выстраиванием иерархии по жёсткому рейтингу (экспорт в Excel)

Проекты	Жёсткий рейтинг	Мягкий рейтинг
Сервис	0,219003523	0,84745903
Метео-ССО	0,142379551	0,839000762
Енисей	0,138736913	0,828432497
Линза	0,133636782	0,791295346
Союз-Восток	0,062699954	0,65672363
Астро	0,060096027	0,804711005
Гонец	0,058667892	0,796144851
Сотрудничество-Марс	0,056202935	0,768083678
МКСР	0,052677083	0,722697401
Луна	0,027269266	0,773309697
Радар	0,020814416	0,688288063
Партнерство	0,015711197	0,676532075
Перспектива	0,00566041	0,792256883
Метео-Глоб	0,000486307	0,777990846
Био	0,000486307	0,777990846
Гео-Гелио	0,000486307	0,777990846
МКС	0,000486307	0,777990846
Федерация	0,000486307	0,777990846
Импортозамещение	0,000486307	0,777990846
Производство	0,000486307	0,777990846
Мегаватт	0,000486307	0,777990846
Дозор	0,000486307	0,777990846
Общего назначения	0,000486307	0,777990846
Уран	0,000486307	0,777990846
Сатурн	0,000486307	0,777990846
Качество	0,000212331	0,721503483
Система	0,000212331	0,753642845
Управление КА	0,000120468	0,692092502
Сотрудничество-Коспас	6,32411E-05	0,662583156

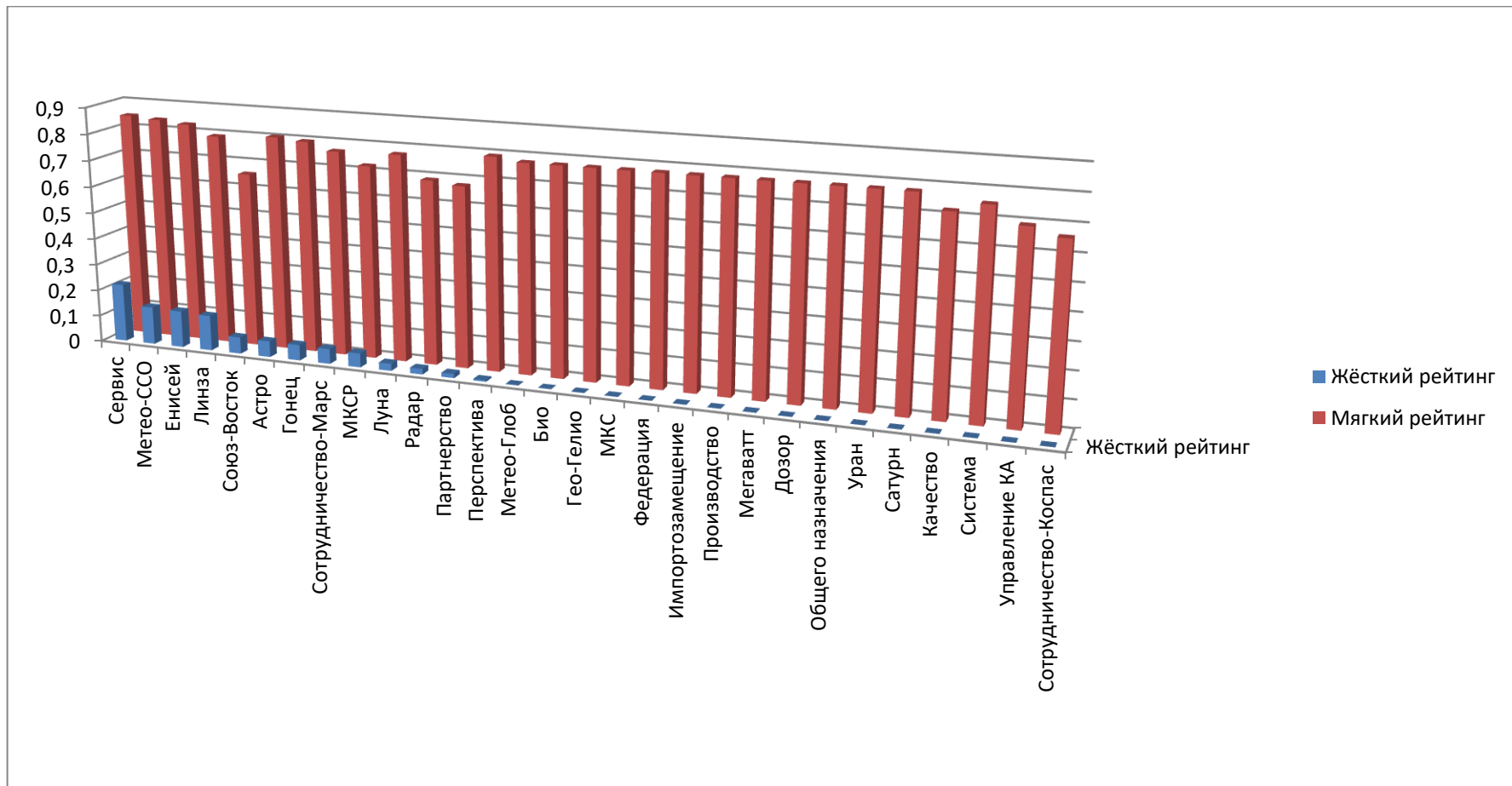


Рисунок 3.11 - Расчёт рейтингов 29 проектов (исключён проект «Грузопоток») 21 показателя с выстраиванием иерархии по жёсткому рейтингу – графики (экспорт в Excel)

На рисунках 3.10, 3.11, в таблице 3.5 продемонстрированы возможности ПМО СППР по экспорту результатов расчётов в MS Excel, что значительно улучшает возможности по анализу.

Видно, что в условиях исключения проекта «Грузопоток» из общего пула иерархия по жёсткому рейтингу изменилась, так, например: «Енисей» поднялся на 3-е место, а «Гонец» опустился на 7-е место с 5-го и т.д. (Таблица 3.6):

Таблица 3.6 – Анализ влияния на оценку приоритетов исключения лидирующего проекта из пула программы

№	Полный пул	Исключён «Грузопоток»
1.	Грузопоток	Сервис
2.	Сервис	Метео-ССО
3.	Метео-ССО	Енисей
4.	Линза	Линза
5.	Гонец	Союз-Восток
6.	МКСР	Астро
7.	Астро	Гонец
8.	Енисей	Сотрудничество-Марс
9.	Сотрудничество-Марс	МКСР
10.	Союз-Восток	Луна
11.	Луна	Радар
12.	Партнерство	Партнерство
13.	Перспектива	Перспектива

Это есть следствие того, что максимальный жёсткий рейтинг проекта «Грузопоток» не давал «выигрыша» некоторым другим в тех ситуациях, когда их рейтинг лишь немного был меньше лидера.

3.4 Сравнительный анализ глобальных навигационных спутниковых систем

Глобальные навигационные спутниковые системы получили одно из самых распространённых применений, как в военной, так и в гражданской области.

Первые советские системы спутниковой навигации 60 – 70-х г.г., Циклон, Парус - Цикада, не имели возможности мгновенного определения координат, тем не менее, они решали свои задачи в основном в области военного применения. Системы глобального позиционирования стали создаваться ещё в начале 80-х годов прошлого века и пионерами в этом деле стали разработчики космической техники в СССР и в США. В нашей стране последнее название ГНСС закрепилось за аббревиатурой ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система), в США система называется NAVSTAR. В последнее время в прессе проект чаще всего называют GPS (Global Position System), хотя это не совсем точно по отношению к конкретному проекту, т.к. GPS скорее не название системы, а функция. Система находится на балансе Пентагона, развивается и эксплуатируется в основном в интересах министерства обороны, несмотря на получившие широкое распространение гражданские применения. Как раз это обстоятельство вынудило многие страны, а также европейское космическое агентство (ЕКА ESA) приступить к созданию своих собственных ГНСС. Так, например, в Китайской Народной Республике буквально в последние годы запущена в эксплуатацию полноценная космическая навигационная система Бейдоу (компас по-китайски). Судя по характеристикам – это серьёзная заявка КНР на лидерство в этой чувствительной области космических исследований, которая существенным образом оказывает влияние не только на развитие технологического базиса страны в целом, но и на её обороноспособность. Европейцы разрабатывают ГНСС Galileo, при этом в рамках ЕКА создан интернациональный концерн, осуществляющий финансирование и управление работами по разработке и эксплуатации системы. Следует отметить, что заявлено, прежде всего, гражданское назначение навигационной системы, а членами организации, обеспечивающей её развитие, являются не только страны Евросоюза, но и КНР, например. Интернациональный характер предприятия, наверняка, предполагает использование всевозможных технических решений от различных поставщиков, которые уже являются отлаженными механизмами. Это,

с одной стороны, способствует увеличению скорости ввода в эксплуатацию системы в целом, а с другой – создаёт многовекторный характер зависимости от множества участников проекта. Поэтому сравнительный анализ ГНСС имеет достаточно широкий спектр применений от понимания позиций, на которых находится по уровню технологического развития то или иное решение, до выявления тенденций в целом этого направления.

Следует также отметить, что критерии сравнения и соответственно данные по каждому из них взяты из открытых источников [21 - 23], имеющихся на сегодняшний день в распоряжении, поэтому результаты анализа необходимо оценивать с этих позиций. Тем не менее, представленные примеры можно в полной мере использовать для понимания практических аспектов применения предложенной методики.

Дадим постановку задачи.

Дано:

1. Перечень критериев оценки приоритетов проектов ГНСС (GPS(NAVSTAR), ГЛОНАСС, Galileo, Бейдоу)¹:
 - 1) Количество основных космических аппаратов в группировке (Основных КА). Чем больше – тем лучше.
 - 2) Количество резервных космических аппаратов в группировке (Резервных КА). Чем больше - тем лучше.
 - 3) Точность определения в метрах (Точность). Чем меньше – тем лучше.
 - 4) Масса космического аппарата в килограммах (Масса КА). Чем меньше – тем лучше.
 - 5) Длина космического аппарата в метрах (Длина КА). Чем меньше – тем лучше.
 - 6) Технический ресурс космических аппаратов в годах (Техресурс). Чем больше – тем лучше.

¹ Данные по критериям сравнения, взятые из открытых источников [21 - 23]

- 7) Период обращения КА на орбите в минутах (Период обращения). Чем меньше – тем лучше.
- 8) Длительность информационной посылки данных в минутах (Длительность посылки). Чем меньше – тем лучше.
- 9) Объем информационной посылки данных в битах (Объем посылки). Чем больше – тем лучше.
- 10) Уровень переходных помех для двух соседних каналов в децибелах (Ур. перех. помех). Чем меньше – тем лучше.
- 11) Период повторения синхрокода в секундах (Период синхр). Чем меньше – тем лучше.
- 12) Среднее количество космических аппаратов в зоне видимости пользователя (КА в доступе). Чем больше – тем лучше.
- 13) Покрытие группировкой зоны обслуживания (земного шара) в процентах (Покрытие). Чем больше – тем лучше.

2. Исходные значения показателей приоритетов проектов (Таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Исходные значения показателей приоритетов проектов ГНСС

Проекты	Основных КА	Резервных КА	Точность (м)	Масса КА (кг)	Длина КА (м)	Техресурс (лет)	Период обращения (м)	Длит посылки (мин)	Объём посылки (Мбит)	Ур перех помех (Дб)	Период синрокода(с)	КА в зоне доступа	Покрытие
ГЛОНАСС	24	3	2,8	935	2,53	11	676	2,5	7500	48	2	7,8	100
GPS	24	8	7,15	1000	2,24	12	707	12,5	37000	21	6	9	100
Бэйдоу	35	5	10	1014	2,25	10	1433	10	40000	25	7	7,5	100
Galileo	26	2	4	640	1,2	12	900	12	6000	30	6	4,4	80

Необходимо: используя в п.п. 2.3 предложенную методику и ПМО СППР определить наиболее перспективный проект ГНСС.

Система принятия решений | ГНСС 1 00:00:00:135

Файл Решения Вид Справка

Проекты	Основных КА	Резервных КА	Точность (м)	Масса КА (кг)	Длина КА (м)	Техресурс (лет)	Период обращен (м)	Длит посылки (мин)	Объём посылки (Мбит)	Ур перех помех (Дб)
ГЛОНАСС	24	3	2.8	935	2.53	11	676	2.5	7500	48
GPS(NAVSTAR)	24	8	7.15	1000	2.24	12	707	12.5	37000	21
Бэйдоу	35	5	10	1014	2.25	10	1433	10	40000	25
Galileo	26	2	4	640	1.2	12	900	12	6000	30

Проекты	Мягкий рейтинг	Жёсткий рейтинг	Основных КА	Резервных КА	Точность (м)	Масса КА (кг)	Длина КА (м)	Техресурс (лет)	Период обращен (м)	Длит посылки (мин)	Объём
GPS(NAVSTAR)	0.850040	0.448635	0.000000	1.000000	0.395833	0.037433	0.218045	1.000000	0.959049	0.000000	
ГЛОНАСС	0.743015	0.273276	0.000000	0.166667	1.000000	0.211230	0.000000	0.500000	1.000000	1.000000	
Galileo	0.640426	0.168694	0.181818	0.000000	0.833333	1.000000	1.000000	1.000000	0.704095	0.050000	
Бэйдоу	0.619402	0.109395	1.000000	0.500000	0.000000	0.000000	0.210526	0.000000	0.000000	0.250000	

Рисунок 3.12 - Сравнительный анализ ГНСС



Рисунок 3.13 - Сравнительный анализ ГНСС - графики

Ответ:

Таким образом, по предложенной методике наилучший рейтинг многокритериальной оценки при имеющихся исходных данных получился у ГНСС GPS, т.к. этот проект на множестве моделированных комбинаций мнений экспертов имеет наивысшую вероятность выигрыша. Второе место заняла отечественная система ГЛОНАСС (Рисунок 3.12, Рисунок 3.13).

Теперь зададим уверенные суждения ЛПР так, что точность и покрытие всегда предпочтительнее всех остальных критериев (Рисунок 3.14). На рисунке 3.15 видно, что в случае определения уверенных суждений ЛПР с предпочтениями по критериям «Точность», «Покрытие» получаем, что на первое место выходит ГНСС ГЛОНАСС.

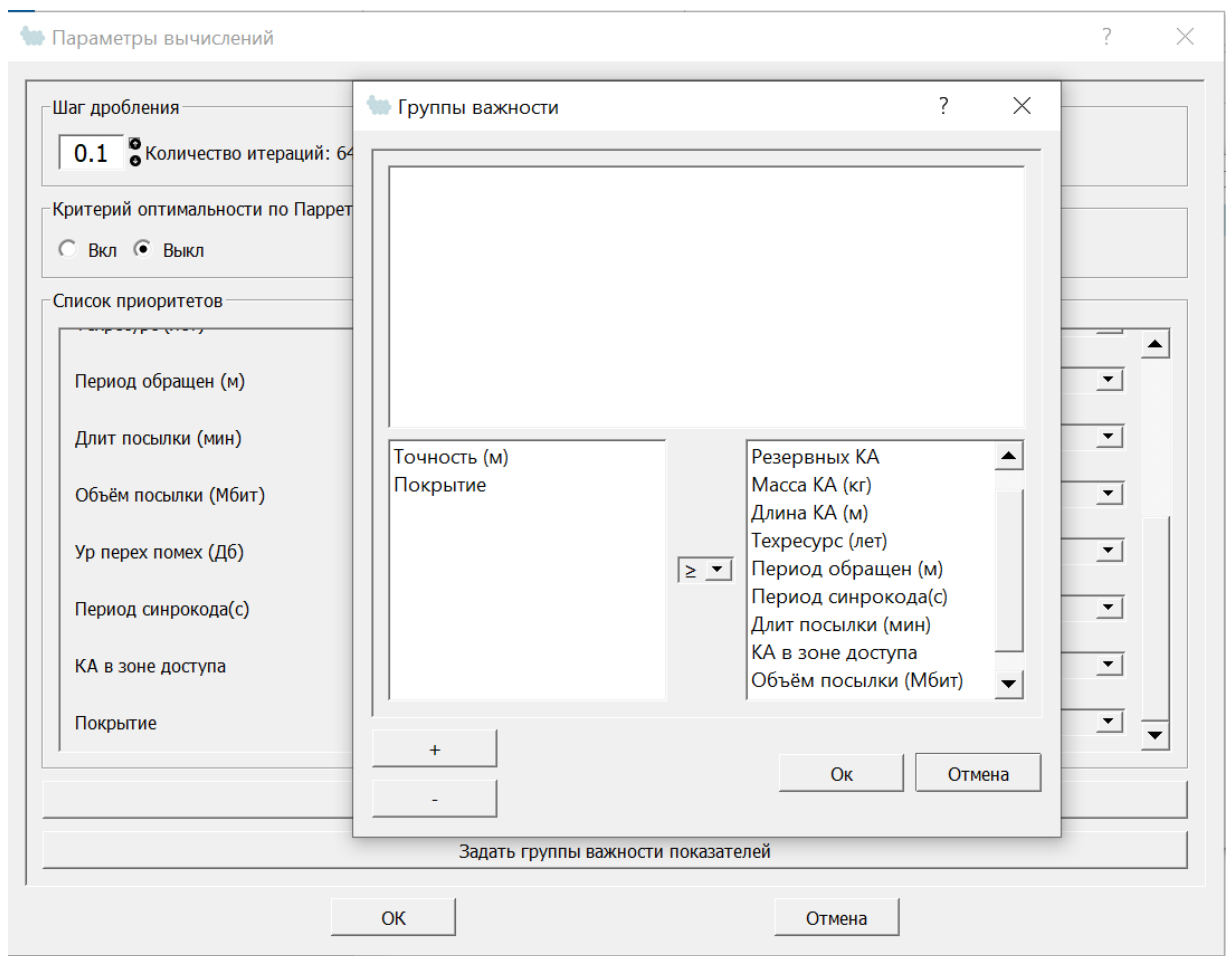


Рисунок 3.14 - Задание уверенных суждений ЛПР

Система принятия решений | ГНСС 1 00:00:00:037

Файл Решения Вид Справка

Проекты	Основных КА	Резервных КА	Точность (м)	Масса КА (кг)	Длина КА (м)	Техресурс (лет)	Период обращен (м)	Длит посылки (мин)	Объём посылки (Мбит)	Ур перех помех (Дб)
ГЛОНАСС	24	3	2.8	935	2.53	11	676	2.5	7500	48
GPS(NAVSTAR)	24	8	7.15	1000	2.24	12	707	12.5	37000	21
Бэйдоу	35	5	10	1014	2.25	10	1433	10	40000	25
Galileo	26	2	4	640	1.2	12	900	12	6000	30

Проекты	Мягкий рейтинг	Жёсткий рейтинг	Основных КА	Резервных КА	Точность (м)	Масса КА (кг)	Длина КА (м)	Техресурс (лет)	Период обращен (м)	Длит посылки (мин)	Объём
ГЛОНАСС	0.959070	0.660687	0.000000	0.166667	1.000000	0.211230	0.000000	0.500000	1.000000	1.000000	
GPS(NAVSTAR)	0.862498	0.295905	0.000000	1.000000	0.395833	0.037433	0.218045	1.000000	0.959049	0.000000	
Бэйдоу	0.626921	0.024842	1.000000	0.500000	0.000000	0.000000	0.210526	0.000000	0.000000	0.250000	
Galileo	0.576519	0.018566	0.181818	0.000000	0.833333	1.000000	1.000000	1.000000	0.704095	0.050000	

Рисунок 3.15 - Сравнительный анализ ГНСС с условием, что критерии «Точность» и «Покрытие» предпочтительнее всех остальных критериев

3.5 Сравнительный анализ ракет-носителей сверхтяжёлого класса

Технологическое преимущество в космической гонке определяется, прежде всего, способностью доставлять полезную нагрузку на околоземные орбиты и орбиты, предназначенные для вывода КА в целях исследования дальнего космоса. Подобными качествами обладают ракеты-носители (РКН) сверхтяжёлого класса, производить которые в настоящее время способны лишь несколько государств.

Задача сравнительного анализа РКН сверхтяжёлого класса интересна и с коммерческой точки зрения, т.к. позволяет, например, оценить возможность использования того или иного решения для вывода на орбиту полезной нагрузки с точки зрения надёжности и экономии финансовых ресурсов. Поэтому покажем, как с помощью предложенной методики можно осуществлять подобный выбор.

Дано:

1. Обоснованный перечень критериев оценки приоритетов проектов РКН (Рисунок 3.16):
 - 1) НОО (вывод полезной нагрузки на низкую околоземную орбиту, тонны);
 - 2) ГПО (вывод полезной нагрузки на геопереходную орбиту, тонны);
 - 3) ГСО (вывод полезной нагрузки на геостационарную орбиту, тонны);
 - 4) Тяга (тяга в меганьютонах на уровне моря),
 - 5) Длина (длина носителя в метрах);
 - 6) Масса (тонны);
 - 7) Всего запусков (общее число запусков на текущее время);
 - 8) Надёжность (отношение числа удачных пусков к общему числу запусков);
 - 9) Цена запуска в млн. \$.
2. Исходные значения показателей приоритетов проектов² (Рисунок 3.16).

² Данные взяты из открытых источников [26-28]

Система принятия решений | РКН сверхтяжёлого класса 3 00:03:46:195

Файл Решения Вид Справка

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	Мягкий рейтинг	Жёсткий рейтинг	НОО т	ГПО т	ГСО т	Тяга МН	Длина м	Масса т	Всего запусков	Надёжность	Цена запуска млн \$
Атлас-5 551	0.827322	0.314343	0.000000	0.397727	0.049180	1.000000	0.801551	1.000000	0.193853	0.939759	0.597015
Delta IV heavy	0.768367	0.304443	1.000000	1.000000	1.000000	0.200000	0.000000	0.417445	0.092199	0.875000	0.000000
Протон-М	0.831472	0.296504	0.424242	0.193182	0.000000	0.371429	0.808016	0.504673	1.000000	0.681604	1.000000
Чанджен-5	0.629598	0.042627	0.626263	0.977273	0.262295	0.542857	0.885585	0.000000	0.009456	0.000000	0.447761
Ангага-А5	0.640797	0.042084	0.575758	0.000000	0.098361	0.000000	1.000000	0.292835	0.000000	1.000000	0.895522

Рисунок 3.16 - Многокритериальный анализ РКН сверхтяжёлого класса

Система принятия решений | РКН свертяжёлого класса 3_1 00:02:09:116

Файл Решения Вид Справка

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

Тяга МН: Больше - лучше
 Длина м: Меньше - лучше
 Масса т: Меньше - лучше
 Всего запусков: Больше - лучше
 Надёжность: Больше - лучше
 Цена запуска млн \$: Меньше - лучше
 Цена запуска млн \$ ≥ Тяга МН
 Надёжность ≥ Тяга МН
 Всего запусков ≥ Тяга МН

Проекты	Мягкий рейтинг	Жёсткий рейтинг	НОО т	ГПО т	ГСО т	Тяга МН	Длина м	Масса т	Всего запусков	Надёжность	Цена запуска млн \$
Протон-М	0.877909	0.434295	0.424242	0.193182	0.000000	0.371429	0.808016	0.504673	1.000000	0.681604	1.000000
Delta IV heavy	0.782552	0.333846	1.000000	1.000000	1.000000	0.200000	0.000000	0.417445	0.092199	0.875000	0.000000
Атлас-5 551	0.760637	0.132945	0.000000	0.397727	0.049180	1.000000	0.801551	1.000000	0.193853	0.939759	0.597015
Ангага-А5	0.713201	0.072966	0.575758	0.000000	0.098361	0.000000	1.000000	0.292835	0.000000	1.000000	0.895522
Чанджен-5	0.578835	0.025948	0.626263	0.977273	0.262295	0.542857	0.885585	0.000000	0.009456	0.000000	0.447761

Введите здесь текст для поиска

15:55 18.12.2020

Рисунок 3.17 - Расчёт приоритетов проектов РКН с суждением о том, что цена запуска, общее количество запусков и надёжность предпочтительнее, чем критерий тяги на уровне моря

Необходимо: рассчитать предпочтительность проектов РКН по предложенной методике.

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 мнениях экспертов (1916797311) проект окажется в выигрыше у него наивысшая (0,314343) - Рисунок 3.16.

Если же задать суждение о том, что цена запуска, надёжность, и общее количество запусков предпочтительнее, чем критерий тяги на уровне моря, то Протон-М уверенно выходит на первое место (Рисунок 3.17). Необходимо отметить, что американский РКН Атлас в первой ступени использует двигатели РД-180 производства НПО «Энергомаш».

Таким образом, в главе 3 были продемонстрированы особенности практического применения предлагаемой методики на примерах многокритериальной оценки приоритетов проектов ФКП, расчёта рисков проектов ФКП и оценки проектов космических средств и систем.

Список литературы

1. Лернер Л. Я. Начала кибернетики / Л. Я. Лернер – М: Наука, 1967 г - 400 с.
2. Большие системы. Ситуационное управление / Д.А. Поспелов – М: Знание, 1975 г. – 64 с.
3. Малышев В.В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления / В.В. Малышев – М: Изд. МАИ-ПРИНТ, 2010 г. – 440 с.
4. Оказание услуг по информационно-аналитическому обеспечению управления реализацией Федеральной космической программы России на 2016-2025 годы в части мониторинга реализации программы, подготовки данных о ходе выполнения программных мероприятий, проектов, а также методическому обеспечению расчётов целевого индикатора «Возможности по предоставлению данных космических наблюдений для решения задач гидрометеорологии, океанографии и гелиофизики» и расчётов приоритетности проектов программы: технический отчёт / Малышев В.В. и др. – М: ЦНИИмаш, 2019. - 115 с.
5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев - М.: Наука, 1981 г. – 488 с.
6. Бобронников В.Т. Системный анализ в инженерных исследованиях / В.Т. Бобронников - М.: Изд. МАИ, 2018 г. – 144 с.
7. Кравец В.Г. Автоматизированные системы управления космическими полётами. Москва, Машиностроение. 1995.- 256 с.
8. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений / О.И. Ларичев – М: Логос, 2000 г. - 295 с.
9. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений / О.И. Ларичев – М: Наука, 2006, 181 с.
10. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений / П. Фишберн – М: Наука, 1978 г. - 352 с.
11. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати – М: Радио и связь, 1993 – 287 с.

12. Лебедев А.А. Введение в анализ и синтез систем / А.А. Лебедев – М: МАИ, 2001 г. - 352 с.
13. Малышев В.В., Пиявский Б.С., Пиявский С.А. Метод принятия решений в условиях многообразия способов учета неопределенности. // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010, № 1, с. 46–61.
14. Панов Д.В., Малышев В.В., Пиявский С.А., Ковков Д.В. Сравнительный многокритериальный анализ сложных технических и социальных систем в экономико-управленческом аспекте. // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2016, Т. 7, № 2. с. 74–83. doi:10.18184/2079-4665.2016.7.2.74.83
15. Малышев В.В. Разумов Д.А. Решение задачи многокритериальной оценки проектных решений АСУ космодрома методом уверенных суждений // Информация и Космос. – 2019 г. - №4(11), 2019., стр. 78-82.
16. Ногин В.Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации. // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. - №4. Стр. 73- 82.
17. Малышев В.В. Пиявский С.А. Метод «уверенных суждений» при выборе многокритериальных решений // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2015. №5, стр. 90 - 101. DOI: 10.7868/S0002338815050091.
18. Пиявский С.А. Два новых понятия верхнего уровня в онтологии многокритериальной оптимизации. // Онтология проектирования. – 2013. № 1, стр. 65 – 85.
19. Положение РК-11-КТ. Положение о порядке создания, производства и эксплуатации (применения) ракетных и космических комплексов.
20. Тарасов А.Г. Системный подход к совершенствованию функционирования автоматизированной системы подготовки и пуска ракет космического назначения // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. - С-Петербург, 2014 г., стр. 204-209.
21. Серапинас Б.Б. «Глобальные системы позиционирования» учеб. Изд. / Б.Б. Серапинас – М.: ИКФ «Каталог», 2002. – 106 с.

22. Яценков В.С. «Основы спутниковой навигации» / В.С. Яценков - М: Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с.
23. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. [электронный ресурс] - URL: <https://www.glonass-iac.ru/>
24. Виленкин Н.Я., Виленкин А.Н., Виленкин П.А. Комбинаторика / Н.Я. Виленкин и др. – М: ФИМА, МЦНМО, 2006. – 400 с.
25. Пиявский С.А. Простой и универсальный метод принятия решений в пространстве критериев “стоимость–эффективность” // Онтология проектирования. 2014. № 3(10). С. 89–102.
26. Борзенко В.П. Сравнительный анализ конкурентных рядов отечественных и зарубежных ракет-носителей // Научные чтения памяти К.Э. Циолковского г. Калуга. 2014 г.
27. Владимир Колбин, Samuel Grey Сравнение тяжёлых и сверхтяжёлых модификаций ракет-носителей. [электронный ресурс] - URL: <https://maxpark.com/community/5255/content/5847026>
28. Paul K. McConnaughey; Mark G. Femminineo, Syri J. Koelfgen, Roger A. Lepsch, Richard M. Ryan, Steven A. Taylor. Draft Launch Propulsion Systems Roadmap: Technology Area 01 NASA Headquarters Washington, DC 20546 www.nasa.gov p.11 (November 2010).

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 на множестве комбинаций экспертных мнений, моделируемых 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: $a_1 \succ a_3 \succ \dots \succ a_m$, 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. 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.

Приложение А
Структурная схема программы

