

На правах рукописи
УДК 519.816

Пиявский Борис Семёнович

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ
СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА
АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность: 05.13.01
«Системный анализ, управление и обработка информации
(Авиационная и ракетно-космическая техника)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА
2010

Работа выполнена на кафедре «Системного анализа и управления» Московского авиационного института (государственного технического университета, МАИ).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Малышев В.В.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор,
Вишнякова Лариса Владимировна
кандидат технических наук, доцент,
Виноградов Борис Петрович

Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное
предприятие «Центральный научно-
исследовательский институт машиностроения»
Федерального космического агентства
(ФГУП «ЦНИИМаш» Роскосмоса)

Защита диссертации состоится «23» декабря 2010 года в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 Московского авиационного института (государственного технического университета, МАИ) по адресу: 125993, г.Москва, ГСП-3, А-80, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (государственного технического университета, МАИ).

Автореферат разослан «19» ноября 2010 года.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г.Москва, ГСП-3, А-80, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.12,
к.т.н., доц.

В.В.Дарнопых

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящее время одной из важных задач системного анализа и проектирования сложных организационно-технических комплексов является обеспечение принятия наиболее рациональных решений с учетом обширной разнокачественной информации, а также множественности задач и возможных условий функционирования объектов анализа и проектирования. Особенно это характерно для авиационно-космической отрасли, где принимаемые решения связаны с расходом огромных материальных и финансовых ресурсов и в течение десятилетий оказывают воздействие не только на экономику, но и на социально-политическую жизнь общества. С методологической точки зрения, специфика этих задач принятия решений (ПР) заключается в их принципиальной математической незамкнутости. Она определяется тем, что цели принятия решений и соответственно критерии его рациональности могут носить многообразный, зачастую противоречивый и даже расплывчатый характер.

В области принятия решений значительные результаты получены такими отечественными и зарубежными учёными как О.И. Ларичев, В.В. Подиновский, И.Ф. Шахнов, И.Г. Черноуцкий, Т. Саати, В. Парето, Б. Руа, Р. Шанкар и другими. В результате предложены различные подходы к свертыванию критериев (т.н. «принципы оптимальности»), методы MAUT (Multi-Attribute Utility Theory), ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité), анализа иерархий АНР (Analytic Hierarchy Process) и др.

Тем не менее, указанные методы не получили широкого применения в реальных задачах принятия решений. Это связано с тем, что практически они предъявляют к лицу, принимающему решения (ЛПР) и его аппарату подготовки решений нереалистичное требование в достаточно формализованной форме снять неопределённость, связанную с необходимостью сопоставления частных критериев (например, в виде весовых коэффициентов, функций полезности и т.п.). Поэтому разработка новых методов и методик принятия решений в отношении сложных систем продолжает оставаться **актуальной**.

Целью диссертации является повышение эффективности принятия решений при сравнении аэрокосмических систем. Для этого требуется разработка комплексной методики принятия решений при сравнении аэрокосмических систем, обеспечивающей многокритериальное сравнение всего множества рациональных (Парето-оптимальных) вариантов решения на основе использования полного множества рациональных способов учета неопределенности. Методика должна отличаться минимальным объёмом требований, предъявляемых к ЛПР, гибкостью и удобством диалога ЛПР с информационной системой поддержки принятия решения.

Объект исследования – процессы принятия решений в аэрокосмической отрасли.

Предмет исследования – разработка методики, математических моделей и алгоритмов деятельности лиц, принимающих решения в аэрокосмической отрасли.

Для достижения указанной цели в работе решены следующие **задачи**:

1. Разработана математическую модель поддержки принятия решений, использующая минимаксную свертку критериев, что обеспечивает сравнение всех парето-оптимальных вариантов на основе полного множества рациональных способов учета неопределенности.

2. На основе созданной математической модели разработана методика принятия многокритериальных решений в сложных задачах, характерных для аэрокосмической отрасли.

3. Разработан программный комплекс, обеспечивающий поддержку предложенной информационной методики.

4. Показана эффективность разработанного подхода и реализующих его средств на примере решения практически значимой задачи ПР.

Для решения указанных задач в диссертации **использованы методы** системного анализа, математического анализа, векторной оптимизации, вычислительной математики, проектирования информационных систем, программирования.

На защиту выносятся следующие **новые научные результаты**:

1. Математическая модель принятия решений, обеспечивающая всесторонний учет различных способов учета неопределенности, анализ и достоверную количественную сравнительную оценку альтернатив.

2. Метод вычисления многомерного интеграла, существенно уменьшающий вычислительную сложность алгоритма, лежащего в основе модели.

3. Информационная методика обоснования многокритериальных решений, облегчающая осмысление лицом, принимающим решения, своих приоритетов непосредственно в процессе принятия решения и обеспечивающая всестороннюю обоснованность принимаемого решения.

Практическая значимость работы состоит в том, что реализующий разработанную методику программный комплекс может быть использован при решении многокритериальных задач широкого класса.

Результаты диссертации **прошли апробацию** на шести Международных и Всероссийских конференциях: с 13-й по 15-ую Международные конференции «Системный анализ, управление и навигация» (Евпатория, 2008, 2009, 2010), VII Всероссийской объединенной конференции «Технологии информационного общества – Интернет и современное общество» (Санкт-Петербург, 2004), IV-й Международной научно-практической конференции «Педагогический процесс как культурная деятельность» (Самара, 2002), Второй Всероссийской научно-методической конференции «Интернет и современное общество» (Санкт-Петербург, 1999), опубликованы в 12 статьях, в том числе в двух журналах, включённых в список журналов, рекомендованных ВАК.

Результаты работы использованы в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» Федерального космического агентства и на кафедре Системного анализа и управления МАИ, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения, содержит 131 страниц, 41 рисунок, 41 таблицу. Список литературы состоит из 53 наименований.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов работы и описана структура диссертации.

Первая глава посвящена анализу особенностей сравнительной оценки объектов космической техники, оказывающих существенное влияние на принятие рациональных решений, математической постановке задачи принятия многокритериальных решений, обзору и сопоставлению существующих методов ее решения с позиций их корректности, реалистичности, экономности, а также понятности и логической приемлемости для лица, принимающего решение. На этой основе формулируются направления создания нового метода, сохраняющего преимущества существующих и, в то же время, устраняющих некоторые существенные их недостатки. Разрабатываются необходимые теоретические методы и алгоритмы для реализации предлагаемого метода.

Продемонстрируем сложность проблемы принятия многокритериальных решений в аэрокосмической отрасли следующим примером.

Федеральная космическая программа России на 2006 - 2015 годы предусматривает создание космодрома «Восточный», на строительство которого будет потрачено около 400 млрд. рублей. Многомиллиардные вложения требуют тщательной технико-экономической проработки для принятия наиболее рациональных решений. Ряд таких решений связан с определением средств выведения, на которые космодром будет ориентирован в первую очередь. В настоящее время рассматривается несколько таких средства выведения.

Сравнительный анализ этих носителей для определения наиболее рационального использования в условиях космодрома «Восточный» является весьма сложной задачей. Рассмотрим для примера сравнительно небольшое число основных массово-энергетических характеристик носителей А, Б, В, Г, приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики сравниваемых носителей

Наименование критерия	А	Б	В	Г
Показатели надежности и безопасности:				
Прогноз надежности РН к первому пуску;	0,97	0,98	0,96	0,96
наличие бортовой САЗ и прогноз ее эффективности;	0,9	0,5	0,9	0,9
минимальное время развития аварийной ситуации в кислородном тракте ЖРД;	0,2	0,1	0,2	0,2
Прогноз безопасности стартового комплекса;	0,9995	0,999	0,9995	0,9995
Прогноз безопасности экипажа ПКК;	0,995	0,99	0,995	0,995
Энергетические показатели				
резерв по массе полезного груза;	0,87	0,9	1,2	1
потенциал наращивания энергетики на основе РН первого этапа с оценкой ожидаемых затрат;	1,32	2,25	2	3
удельные показатели энерго-массовой эффективности:				
Мпг/Мо	2,68	2,5	2,37	2,05
Мпг/Мсух	35,0	40,0	22,0	34,5
Мпг/Рсум.дв.	1,68	1,84	1,62	1,6

Наименование критерия	А	Б	В	Г
Экономические показатели				
затраты на разработку КРК (млрд.руб.);	17	2	19	21,6
удельная стоимость выведения ПГ на орбиту (тыс. руб./кг)	77,0	104,0	60,0	80,5

Кажущимся наиболее логичным решением было бы использовать в качестве единственного значимого критерия показатель удельных затрат на вывод на орбиту (ГСО) единицы полезного груза. С учетом этого критерия, наиболее эффективным является носитель В, однако однобокость этого показателя (хотя бы в связи с тем, что его значение меняется в соответствии с динамически меняющейся экономической ситуацией) очевидна. Поэтому необходимо дополнительно учесть хотя бы сравнительно небольшое число основных массово-энергетических характеристик. В этом случае часто встречающимися комплексными оценками являются, при условии нормировки всех показателей, либо их суммарное значение, либо расстояние до идеальной точки – начала координат, отвечающего нулевым проигрышам сравнительно с оптимальными значениями показателей.

Таблица 2. Простейшие критерии выбора предпочтительной альтернативы

Показатель	А	Б	В	Г
Суммарное значение частных критериев	0,20	0,17	0,17	0,15
Расстояние до идеальной точки	0,66	0,55	0,58	0,40

Результаты представлены в таблице 2. Получен совершенно иной результат: наиболее предпочтительной оказывается альтернатива Г.

Таким образом, видно, что для обоснованного принятия решения в данном примере необходимо использовать более

мощный математический аппарат.

Хотя сам термин принятия решений непосредственно начал использоваться лишь в 1950 г. Э. Л. Леманном, началом развития теории принятия решений можно считать работу Б. Паскаля «Pensées», изданную в 1670 г. Неединственность предложенного им принципа оптимальности продемонстрировал в 1738 г. Д. Бернулли в статье «Предложение новой теории измерения риска (Exposition of a New Theory on the Measurement of Risk)». Итальянский математик и экономист В. Парето в начале XX в. математически сформулировал известный принцип «оптимальности по Парето». Впоследствии были предложены и иные принципы оптимальности (Лапласа, Сэвиджа и пр.) и алгоритмы принятия решений, такие как метод MAUT (Multi-Attribute Utility Theory), группа методов ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) и метод анализа иерархий АНР (Analytic Hierarchy Process). Все они предполагают большую гибкость в установлении предпочтений лица, принимающего решения, однако в основе каждого из перечисленных методов лежит некий субъективный способ учета неопределенности, приобретающий в зависимости от метода различное воплощение. Этот субъективизм проявляется в самой структуре метода, в задании «весовых коэффициентов», построении функций полезности, в попарном сопоставлении частных критериев и т.п. Оценить адекватность субъективизма метода в условиях конкретной практической задачи лицо, принимающее решение,

вряд ли в состоянии, поэтому данные методы заставляют его заниматься не связанными с непосредственным решением задачи оценками.

Этого недостатка лишен метод ПРИНН (ПРИНятие решений в условиях Неопределенности), предъявляющий минимальные требования к загрузке лица, принимающего решения. Он основан на нескольких простых аксиомах, имеющих универсальный характер, и на процедуре согласования оценок, имеющей понятный смысл и широко применяемой в течение многих лет при решении различных задач.

Сущность метода ПРИНН сводится к следующему:

- 1) описание множества допустимых способов учета неопределенности;
- 2) выделение в нем наиболее представительного набора способов учета неопределенности, который и будет использован для выбора решений;
- 3) построение на его основе итеративной процедуры формирования комплексной оценки решений в условиях неопределенности.

Такой подход, в силу его универсальности, не возлагает на лицо, принимающее решения, дополнительной нагрузки в процессе принятия решений, предоставляя в то же время ему возможность отражать свои предпочтения, относя частные критерии к различным группам значимости.

Однако и этот метод не лишен недостатков, основными из которых являются следующие:

1. Как и большинство других методов принятия решений, он использует линейную свертку, которая, как известно, в некоторых случаях может игнорировать отдельные Парето-оптимальные варианты решения.
2. Метод основан на аналитических соотношениях, выведенных для широко распространенной, однако не единственно возможной структуре задачи принятия решений, что сужает сферу его применения.

В диссертации разрабатывается новая математическая модель принятия решений, в целом базирующаяся на методологии ПРИНН, однако лишенная указанных недостатков.

Перейдем к описанию этой модели.

Задача принятия решений рассматривается как задача выбора альтернатив в условиях неопределенности. Одним из основных ее видов является неопределенность критериев. Она проявляется в том, что эффективность варианта решения $y \in Y$ не может быть достаточно полно охарактеризована одним числом, а требует задания целого набора чисел (частных критериев). Каждое из них измеряет какой-то один аспект эффективности, и лишь в совокупности они всесторонне оценивают вариант. Так, вместо единственного критерия оптимальности $f(y)$ возникает вектор критериев:

$$f(y) = (f^1(y), f^2(y), \dots, f^N(y)). \quad (1)$$

В процессе принятия решений может проявиться и неопределенностью исходных данных. Она порождается тем, что на значение вектора критериев влияют, помимо выбираемого варианта y и в точности известных исходных данных, еще и такие исходные данные, достоверные значения которых в момент

выбора варианта неизвестны. Для этих неопределенных исходных данных может быть указан лишь диапазон значений - некоторое множество X , которому принадлежит вектор данных x . Это множество называется множеством неопределенностей. С учетом неопределенности критериев и исходных данных эффективность варианта y измеряется вектором критериев

$$f(x, y) = (f^1(x, y), f^2(x, y), \dots, f^N(x, y)), x \in X. \quad (2)$$

Без ограничения общности функцию $f(x, y)$ можно считать нормированной $0 \leq f(x, y) \leq 1$.

Таким образом, помимо множества допустимых вариантов решений Y в рассмотрение вводится и множество X , отражающее неопределенности критериев, исходных данных и моделей. Тогда критерий оптимальности $f(x, y)$ (который можно назвать обобщёнными потерями) оказывается определенным на произведении этих множеств $X \times Y$, что не позволяет путем простой его оптимизации однозначно выбрать наилучшее решение, так как каждому x из X , вообще говоря, отвечает свой вариант наилучшего решения, получаемый оптимизацией $f(x, y)$ на Y при данном x .

В этой формальной незамкнутости и состоит принципиальное отличие задач принятия решений от обычных задач оптимизации. В связи с незамкнутостью задачи, она требует непосредственного участия человека, который при этом либо вводит дополнительную информацию, позволяющую избавиться от неопределенности, либо выбирает метод принятия решений в условиях неопределенности.

Основная идея подавляющего большинства методов, используемых в задачах принятия решений, состоит в том, чтобы осуществить переход от локального к целостному учету влияния неопределенности на эффективность различных вариантов решений. Правило, по которому выполняется переход, назовем способом учета неопределенности. С математической точки зрения, способ учета неопределенности есть правило, сопоставляющее при фиксированном y из Y функции $f(x, y)$, заданной на множестве X , число $F(X, y)$. Если критерий $f(x, y)$ называть обобщенными потерями, то $F(X, y)$ назовем H -обобщенными потерями, т.е. обобщенными потерями, вычисленными с учетом неопределенности. H -обобщенные потери могут рассчитываться как среднее значение обобщенных потерь на множестве X или как наибольшее значение на этом множестве, или как-то иначе – все это различные способы учета неопределенности.

Если задан способ учета неопределенности, то задача принятия решений становится замкнутой. Действительно, когда определены H -обобщенные потери на множестве допустимых решений $F(X, y)$, $y \in Y$, то наилучшее решение может быть найдено из обычной задачи оптимизации $F(X, y)$ на Y . За \bar{y} примем наиболее рациональное решение. Однако на стадии постановки задачи принятия решений способ учета неопределенностей неизвестен (иначе это была бы простая задача оптимизации). Можно лишь представлять, что имеется некоторое множество допустимых способов учета неопределенности S , из которых лицо, принимающее решения, выбирает способ, адекватный решаемой задаче.

Например, в большинстве существующих методов принятия решений для поиска парето-оптимального решения используется линейная свертка. Как известно, достаточным условием для того, чтобы вектор $\bar{y} \in Y$ был парето-оптимальным, является существование таких коэффициентов $x_i, i=1, \dots, N, x_i \geq 0, \max_{i=1 \dots N} x_i = 1$, что

$$F(\bar{y}) = \min_{y \in Y} F(y), \text{ где } F(y) = \max_{i=1 \dots N} x_i f_i(y). \quad (3)$$

В методологии ПРИНН не предполагается, что лицо, принимающее решения, в состоянии указать конкретные значения весовых коэффициентов x_i . Вместо этого, в структуру задачи входит всё множество неопределённых значений этих коэффициентов. Например, если все критерии представляются лицом, принимающим решения, равнозначными,

$$X = \{x_i, i = 1 \dots N : x_i \geq 0, i = 1 \dots N, \max_{i=1 \dots N} x_i = 1\}. \quad (4)$$

Если лицо, принимающее решения, относит критерии к различным группам значимости I_1, I_2, \dots, I_k , где больший номер обозначает большую значимость, то

$$\bigcup_{i=1}^N I_i = \{1 \dots N\}, I_l \cap I_s = \emptyset.$$

Будем понимать под способом учета неопределенности (СУН) правило, однозначно сопоставляющее любому подмножеству $X_A \subset X$ с определенной на нем функцией $f(x, y)$ некоторое число $F(X_A, y)$. Поскольку в ПРИНН не предполагается, что лицо, принимающее решения, в состоянии указать конкретный способ учёта неопределённости, адекватный решаемой задаче принятия решений, в структуру задачи входит также всё множество S допустимых способов учета неопределенности.

Показано, что множество S изоморфно множеству монотонно возрастающих функций одной переменной – так называемых «порождающих функций»

$$S = \{G(t), G(0) = 0, G(1) = 1\}.$$

При этом Н-обобщенные потери могут быть вычислены по формулам:

для $X = \{x_i\}_{i=1, \dots, N}$

$$F(X, y) = G^{-1}\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G(f(x_i, y))\right), \quad (5)$$

для X - области конечномерного Евклидова пространства

$$F(X, y) = G^{-1}\left(\frac{1}{S_X} \int_{x \in X} G(f(x, y)) dx\right), \quad (6)$$

где S_X - мера области X , где $G(t)$ - некоторая монотонная функция, т.н. порождающая функция.

Подставляя в (6) выражение (3) получим

$$F(X, y) = G^{-1}\left[\frac{1}{S_X} \int_{x \in X} G(\max_{i=1 \dots N} x_i f_i(y)) dx\right], \quad (7)$$

где множество X определяется структурой задачи принятия решений.

Например, для равнозначных критериев,

$$X = \{x_i, i = 1 \dots N : x_i \geq 0, i = 1 \dots N, \max_{i=1 \dots N} x_i = 1\}.$$

Соотношение (7) существенно отличает предлагаемую методику от традиционного метода ПРИНН (за счёт использования минимаксной свёртки и численного интегрирования). Как указывалось, традиционный метод ПРИНН может, как и другие методы, использующие линейную свертку, отбрасывать из рассмотрения лицом, принимающим решения, парето-оптимальные варианты, что недопустимо.

Приведем пример, показывающий, что использование линейной свертки при принятии многокритериального решения может привести к потере Парето-оптимального решения. Рассмотрим четыре альтернативы (A_1, A_2, A_3 и A_4), характеризующиеся двумя минимизируемыми частными критериями f_1, f_2 . Значения критериев для этих альтернатив приведены в таблице 3.

Таблица 3. Исходные данные примера, показывающего преимущество использования свёртки Гермейера

Альтернативы	Критерий 1 f_1	Критерий 2 f_2
A_1	5	1
A_2	0	10
A_3	3	6,5
A_4	0,8	8

В диссертации показано, что хотя альтернатива A_3 является Парето-оптимальной, т.е. отсутствует альтернатива, которая бы ее доминировала, при

использовании линейной свертки она ни при каких значениях коэффициентов свертки не может быть выявлена в качестве наиболее рационального решения.

Для ряда структур задачи принятия решений интеграл, входящий в соотношение (7), может быть вычислен аналитически. Например, пусть порождающая функция имеет простейший вид $G(t) = t$. Рассмотрим задачу принятия решений с двумя минимизируемыми критериями. В этом случае н-обобщенные потери имеют вид

$$F(X, y) = \frac{3(\max(f^1(y), f^2(y)))^2 + (\min(f^1(y), f^2(y)))^2}{4(\max(f^1(y), f^2(y)))^2}. \quad (8)$$

что отличается от результата использования линейной свертки

$$F(X, y) = \frac{f^1(y) + f^2(y)}{2}. \quad (9)$$

Для случая, когда критерий f^1 полагается лицом, принимающим решения, «более важным», чем f^2 , из (8) получится

$$F(X, y) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{(f^1(y))^2 + (f^2(y))^2}{2f^2(y)} \text{ при } f^1(y) \leq f^2(y), \\ f^1(y) \text{ при } f^1(y) \geq f^2(y). \end{array} \right\}. \quad (10)$$

Для более сложных структур задачи принятия решений получить аналитические выражения затруднительно, что и ограничивало сферу применимости традиционного метода ПРИНН. В диссертации предложено

использовать численные методы вычисления кратного интеграла в (7). Решение этой задачи является сложной проблемой ввиду большой размерности области интегрирования. Типичные практические задачи принятия решений включают десятки частных критериев, таким же и является пространство, в котором происходит интегрирование. Автором разработана модификация методов численного интегрирования Монте-Карло, учитывающая структуру кратного интеграла в (7) и особенности разработанного метода принятия решений.

При известном способе учета неопределенности соотношение (7) позволяет рассчитать n -обобщенные потери для всех альтернатив $y \in Y$, на основе чего выявляется наилучшее решение, отвечающее наименьшему значению этих потерь.

Поскольку способ учета неопределенности, адекватный решаемой задаче принятия решений, неизвестен, требуется включить в рассмотрение все бесконечное множество способов учета неопределенности S . Представим его оптимальным конечным типовым набором, достаточно полно представляющим все множество. Формирование типовых наборов способов учета неопределенности состоит в размещении оптимальных ε -сетей в множестве допустимых порождающих функций $S = \{G(t), G(0) = 0, G(1) = 1\}$. Число элементов такой сети определяет число способов учета неопределенности, используемых лицом, принимающим решения, при его выборе, а величина ε характеризует, насколько полно эти способы отражают все многообразие различных аспектов влияния неопределенности на эффективность решения. В таблице 4 показан один из таких наборов, включающий 7 элементов.

Таблица 4. Семиэлементный типовой набор порождающих функций для всесторонней оценки решений в условиях неопределенности

Номер	Название	Порождающая функция
1	Наилучший	$t^k, k \rightarrow -\infty$
2	Оптимистический	$\sqrt[4]{t}$
3	Средний	t
4	Осторожный	t^4
5	Наихудший	$t^k, k \rightarrow \infty$
6	Релейный	$0.5 * (1 + \sqrt[5]{2t - 1})$
7	Нивелирующий	$0.5 * (1 + (2t - 1)^5)$

Дальнейшая процедура принятия решений моделирует известный метод ДЕЛФИ согласования экспертных оценок. Каждый способ учета неопределенности, входящий в типовой набор, выступает математической моделью некоторого эксперта s_j , привлеченного для оценки решений из множества Y . Этот эксперт по-своему (по формулам (5), (7) при соответствующей ему порождающей функции) учитывает неопределенность $x \in X$ и в результате строит собственную оценку $F_{s_j}(y)$ для каждого решения y из Y . Типовой набор способов учета неопределенности описывает как бы гармонически подобранную группу экспертов. После того, как все эксперты дали решениям y из Y собственные оценки $F_{s_j}(y)$, $j=1, \dots, k$, где k - число экспертов, предлагается им согласовать свои оценки. Для этого каждому эксперту следует, не меняя собственного подхода к неопределенности, построить оценку эффективности решения y в условиях

неопределенности критериев, а именно оценок, данных ему всеми другими экспертами. Таким образом, каждый эксперт косвенно учитывает мнения других экспертов и их оценки сближаются.

Повторная оценка ведется до тех пор, пока мнения экспертов не совпадут с заданной точностью. Практика показывает, что при семи экспертах для этого требуется 3-5 повторений.

Описанная структура метода предполагает на каждом шаге «согласования» оценок вычисления кратного интеграла большой размерности для каждого типового способа учета неопределенности. Эту задачу удалось преобразованием интегральной суммы заменить однократным вычислением кратного интеграла той же размерности и вычислением определенных интегралов, число которых совпадает с количеством типовых способов учета неопределенности. Проведенное преобразование позволило в несколько раз уменьшить вычислительную сложность расчетов.

Действительно, прямой алгоритм заключается в следующем.

1. С достаточно малым шагом h проверкой всех наложенных на множество неопределенностей X условий формируется множество N точек $\{x_i\}$, покрывающих X .
2. Вычисляется множество значений функции локальной эффективности в этих точках $\{f(x_i)\}$. На это требуется N операций с общей сложностью $O_f N$, где O_f - сложность (например, длительность в мсек) одной операции вычисления функции локальной эффективности.
3. Для каждой ТСУН вычисляются значения $\{G_k(f(x_i)), i=1, \dots, N, k=1, \dots, 7\}$, где k - номер ТСУН. Это требует $\sum_{k=1}^7 N O_k$ операций, если O_k - сложность однократного вычисления функции $G_k(t)$.
4. Суммированием по k вычисляются восемь интегральных сумм, отвечающих вычислению интегралов в формулах (6) для семи типовых ТСУН. Вычислительная сложность этого равна $8N O_c$, где O_c - сложность одной операции сложения.

Таким образом, общая вычислительная сложность равна $N(O_f + \sum_{k=1}^7 O_k + 8O_c)$ операций.

Предлагается иной алгоритм, отличающийся от только что описанного, начиная с пункта 2.

2. В дополнение к содержанию предыдущего пункта 2 вычисляются границы интервала $[f_{\min}, f_{\max}]$ изменения значений $\{f(x_i), i=1, \dots, N\}$. Это дополнительно требует $N O_{cp}$ операций сравнения (O_{cp} - сложность одной операции сравнения).
3. С достаточно малым шагом h формируется множество p точек $\{f_r\}$, равномерно покрывающих интервал $[f_{\min}, f_{\max}]$. Трудоемкость этой операции $p O_c$.

4. Рассчитывается количество $M_r, r=1, \dots, p$ точек $\{x_i\}$, попадающих в интервалы $[f_r - \frac{h}{2}, f_r + \frac{h}{2}]$. Трудоемкость этой операции равна NO_c .
5. Для каждой ТСУН вычисляются значения $\{G_k(f_r)\}, k=1, \dots, 7, r=1, \dots, p$, что требует $\sum_{k=1}^7 pO_k$ операций.
6. Суммированием по r вычисляются восемь интегральных сумм, отвечающих вычислению интегралов в формулах (6) для семи типовых ТСУН. Вычислительная сложность этого равна $8pO_c$.

Общая вычислительная сложность этого алгоритма $N(O_f + O_{cp} + O_c) + p(\sum_{k=1}^7 O_k + 9O_c)$.

Отметим, что, при T критериях оптимальности N эквивалентно p^T . Тогда расчеты показывают, что сложность предложенного алгоритма, независимо от числа критериев оптимальности и точности дискретизации множества неопределенностей, примерно в 5,3 раза ниже сложности прямого алгоритма.

Вторая глава посвящена разработке методики принятия решений и поддерживающего ее программного комплекса.

Сформулированы требования к методике принятия решений, обеспечивающие простоту и эффективность ее применения лицом, принимающим решения.

Методика должна позволять ему:

- 1) работать как с количественными, так и с качественными данными по частным критериям;
- 2) относить критерии к различным группам важности;
- 3) устанавливать отношения предпочтения между отдельными критериями;
- 4) благодаря легкости варьирования целевыми установками и исходными данными, расширять полноту анализа и устранять возможность ошибочных решений;
- 5) централизованно хранить и модифицировать задачи принятия решений;
- 6) наглядно представлять условия и результаты расчётов;
- 7) использовать интервальные оценки для значений критериев;
- 8) использовать разные источники информации (для достижения консенсуса).

Решение задачи начинается в тот момент, когда лицо, принимающее решения, ставит перед собой некоторую проблему. При этом начинается проработка решения и создаётся рабочая группа, определяются сроки решения, заинтересованные и ответственные лица, выделяются ресурсы.

После этого определяется некоторое множество вариантов решения. Этой и следующими ступенями постановки задачи занимаются в равной мере как лицо, принимающее решения, так и рабочая группа.

Формирование набора критериев следует за формированием вариантов решения. На этой ступени описывается множество критериев и их свойства, выделяются точечные или интервальные критерии (по типу задаваемых значений),

количественные или качественные (по типу шкалы оценки). При этом могут изменяться условия, накладываемые на варианты решения путём варьирования пороговых значений для отдельных критериев.

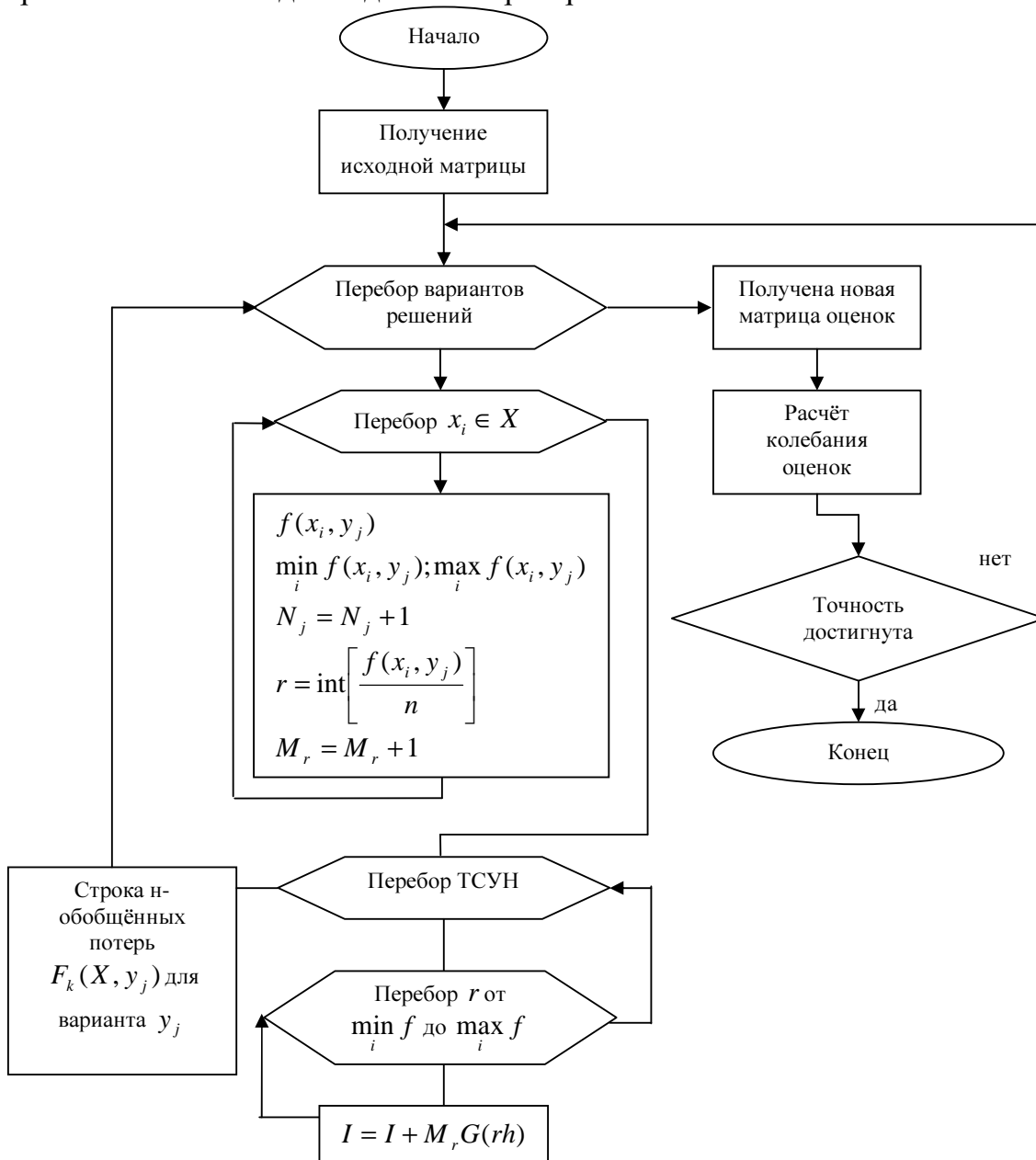


Рис. 1. Алгоритм вычисления N-обобщенных потерь в методе ПРИНН

За формированием набора критериев следует определение политики выбора. Оно включает в себя определение направления оптимизации, выделение групп важности критериев, а также задание сравнительной значимости отдельных критериев. Следующей задачей, стоящей в основном перед рабочей группой, является разработка методики сбора информации о значениях критериев для различных вариантов решения. Процесс сбора и сопоставления информации может повлечь за собой изменение типа критериев, например, переход некоторого критерия с количественных на качественные оценки, или заданию его значений по интервальной шкале. Введённую рабочей группой задачу принятия решений

решает непосредственно лицо, принимающее решения, опираясь на рассчитываемую программным комплексом комплексную эффективность (Н-обобщенные потери) вариантов решения. Анализ результатов расчёта может привести лицо, принимающее решения, к варьированию важности и сравнительной значимости, а также пороговых значений для отдельных критериев, и к модификации множества вариантов решения, и возвращению всей задачи на последующую проработку. Этот процесс оканчивается процедурой принятия окончательного решения лицом, принимающим решения, и процедурой документирования решения рабочей группой.

Далее в главе рассматривается реализации разработанного подхода в виде программного комплекса ПРИНН (рис.2).

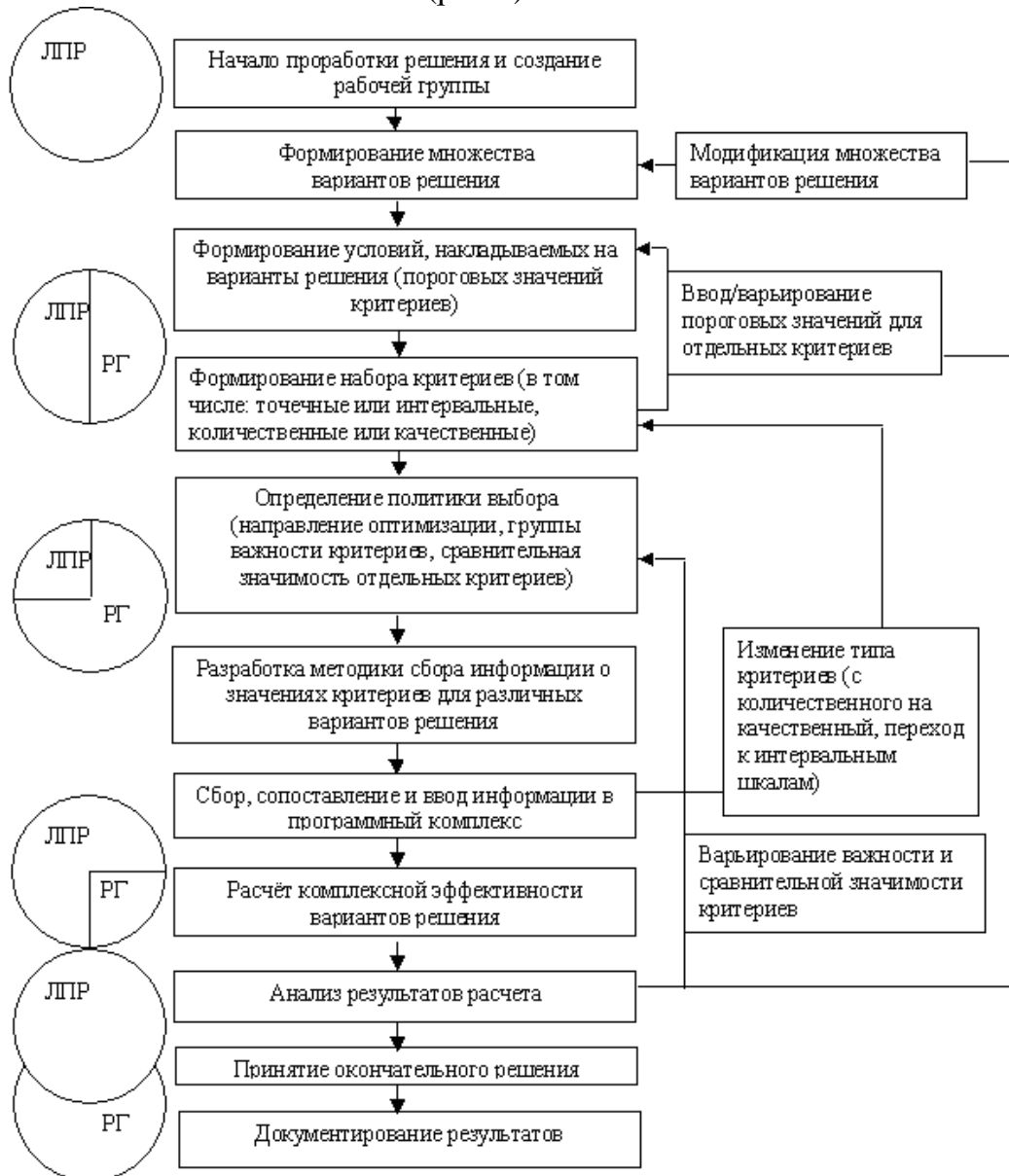


Рис. 2. Алгоритм работы программного комплекса ПРИНН.

Основным пользователем системы является лицо, принимающее решение. Система позволяет ему в интерактивном режиме устанавливать или изменять следующие характеристики:

1. Направление желательного изменения значений частных критериев для наиболее рационального решения (на максимум, на минимуму).
2. Дополнительно классифицировать частные критерии по различным группам важности (обычная, более важная, ещё более важная и т.д.).
3. Дополнительно устанавливать отношения сравнительной важности между отдельными критериями.

При этом использование дополнительных возможностей необязательно для получения решения, оно используется в основном для удобства описания задачи для лица, принимающего решения.

В качестве примера продемонстрирован процесс принятия решений в ходе сравнения пяти 4-хместных легких гражданских самолетов (ЛГС) по 13 критериям: массовым, летно-техническим, взлётно-посадочным, геометрическим и экономическим. Выбраны два наиболее эффективных ЛГС (таблица 5).

Таблица 5. Сводная таблица эффективности ЛГС

Группы важности	Группы показателей				Комплексная эффективность
	Массовые	Летно-технические и взлетно-посадочные	Геометрические	Экономические	
	обычная	высочайшая	высочайшая	Высокая	
Cessna-182	0,65	0,54	0,23	0,86	0,54
DA40-180	0,57	0,18	0,31	0,04	0,18
Ил-103	0,27	0,32	0,31	0,99	0,32
Lancair-IY	0,37	0,67	0,56	0,7	0,67
Cirrus SR-20	0,56	0,68	0,92	1	0,68

В третьей главе приводится описание результатов применения разработанного программного комплекса при сравнительном анализе четырех различных вариантов (А, Б, В, Г) средств выведения космических аппаратов с целью выявления наиболее предпочтительного среди них. В качестве частных критериев оптимальности рассматривались показатели, приведенные в таблице 6.

Описанная задача принятия решений была структурирована в двухуровневую систему. На первом уровне выполнялся расчет H -обобщенных потерь внутри каждой группы показателей, а на втором уровне рассматривалась сводная задача, в которой частными критериями являлись n -обобщенные потери по эти группам. Такой подход отвечает привычной для лица, принимающего решения, структуре анализа объектов принятия решения. Во всех случаях использовалась нормировка от минимального до максимального значения критериев и применялся метод ПРИНН. В таблице также показана политика выбора.

Таблица 6. Политика выбора при сравнительной оценке носителей

Наименование критерия	Важность
Критерии надежности и безопасности	Обычная
1. Прогноз безопасности экипажа ПКК	Обычная
2. Прогноз безопасности стартового комплекса	Обычная
3. Мин. время развития аварийной ситуации в КТ ЖРД	Обычная
4. Прогноз надежности РН к первому пуску;	Высокая
5. Наличие и прогноз эффективности бортовой САЗ	Высокая

Наименование критерия	Важность
Энергетические критерии	
6. Резерв по массе полезного груза	Высокая
7. Потенциал наращивания энергетики на основе РН 1 этапа	Обычная
8. Удельные показатели энерго-массовой эффективности	Обычная
Экономические критерии	
9. Затраты на разработку КРК	Высокая
10. Удельная стоимость выведения ПГ	Обычная

Для примера в таблице 7 и на рис. 3 показаны исходные данные сводной задачи.

Таблица 7. Комплексные Н-обобщённые потери вариантов решений по группам критериев

Группы критериев	Показатели надежности и безопасности	Энергетика	Экономика
Важность	Обычная	обычная	высокая
А	0,302	1	0,53
Б	1	0,909	1
В	0,543	0,646	0,543
Г	0,543	0,638	0,66

Каждый столбец, отвечающий группе критериев, содержит результаты сравнительной оценки носителей с помощью разработанной методики по соответствующему набору критериев методом ПРИНН. Эти результаты

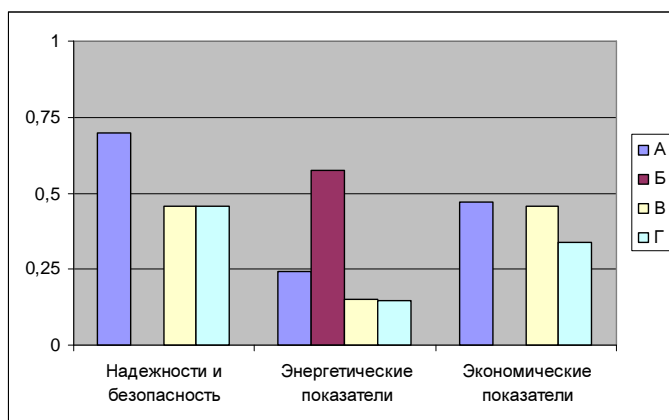


Рис. 3. Исходные данные в сводной задаче

рассматриваются как новый, обобщенный критерий в сводной задаче. При решении присоединенной задачи экономические затраты полагались «более важным» аспектом рациональности выбора, чем энергетические возможности и надёжность и безопасность.

На рис. 4 представлены окончательные результаты решения сводной задачи.

Наиболее эффективным является вариант В. Полученный результат может быть объяснен: сыграла роль возможность учитывать в методе ПРИНН сравнительную важность отдельных частных критериев. Действительно, по безопасности стартового комплекса и экипажа все носители существенно превосходят вариант Б, вариант А также менее эффективен, чем В и Г. По группе энергетических показателей результат не столь однозначен: варианты В и Г имеют примерно равную высокую эффективность, и им существенно уступают варианты А и Б. Наконец, по экономическим показателям вариант Г уступает В и А. Отметим,

однако, что приведенные рассуждения сами по себе не могли бы служить основой для доказательного преимущества варианта В. Они позволяют только объяснить результаты, полученные с использованием разработанного метода.

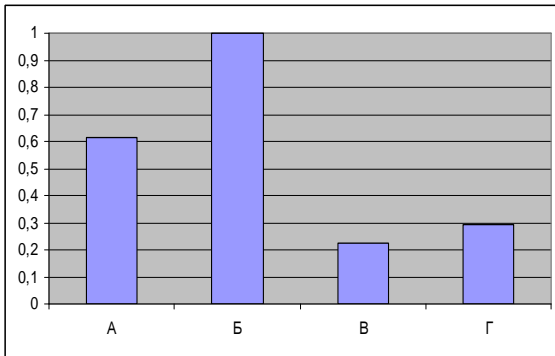


Рис. 4. Комплексные N-обобщённые потери средств выведения, рассчитанные методом ПРИНН

Таблица 8. Комплексные N-обобщённые потери носителей при различных целевых установках ЛПР

Варианты	Основная целевая установка	Установка Ц1
А	0,615	0,704
Б	1	0,942
В	0,226	0,26
Г	0,292	0,291

Таблица 9. Сравнительные результаты расчета комплексных N-обобщённых потерь методом ПРИНН при различных базовых свертках

Вариант	ПРИНН при свертке Гермейера	ПРИНН при линейной свертке
А	0,615	0,553
Б	1	0,374
В	0,226	0,325
Г	0,292	0,551

и при свертке Гермейера, при базовой линейной свертке наилучшим является вариант В. Это свидетельствует об устойчивости данного решения. Что же касается остальных вариантов решения, то если при свёртке Гермейера вариант Б был существенно хуже других вариантов, а вариант Г занимал второе место по N-обобщённым потерям после наилучшего варианта В, то при линейной свёртке взаимная расстановка вариантов меняется. Наиболее близким к оптимальному варианту является вариант Б, а варианты А и Г имеют примерно одинаковую оценку. Это подчеркивает, что различные базовые свертки в методе ПРИНН могут

Выше моделировалась целевая установка лица, принимающего решение, состоящая в том, что надежность и безопасность полагаются более важными, чем энергетические и экономические соображения. Одним из существенных преимуществ разработанной в диссертации технологии является то, что она позволяет ЛПР гибко варьировать целевые установки с тем, чтобы выяснить, насколько принимаемой решение устойчиво с этой точки зрения.

В таблице 8 представлены итоговые результаты принятия решения как при исходной, так и при варьированной целевой установке Ц1 (все группы показателей эквивалентны по значимости), и относительная эффективность носителей остается одинаковой, что свидетельствует об устойчивости решения задачи.

Исследована устойчивость полученного решения относительно вида базовой свертки критериев, используемой методом ПРИНН. В таблице 9 приведены N-обобщённые потери носителей при основной целевой установке ЛПР, рассчитанная как при базовой свертке Ю.Б. Гермейера, так и при линейной базовой свертке. Видно, что здесь, в отличие от расчетов по отдельным группам характеристик, результаты отличаются. Как

приводить к несколько отличным результатам, поэтому для того, чтобы математические нюансы не вносили дополнительную неопределенность в поведение ЛПР, по мнению автора, следует ориентироваться на ПРИНН при базовой свертке Гермейера.

Разработанная в диссертации технология позволяет гибко и оперативно варьировать целевыми установками и даже базовыми свертками, что облегчает лицу, принимающему решение проведение содержательного анализа при принятии окончательного решения по результатам компьютерного моделирования.

3. ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Проведен сопоставительный анализ основных существующих принципов оптимальности и алгоритмов для решения задачи многокритериального выбора решений с позиций их корректности, реалистичности, экономности, понятности и логической приемлемости для лица, принимающего решение. Показано, что наилучшей основой для разработки наиболее эффективного метода принятия сложных решений является метод ПРИНН.

2. На базе методологии ПРИНН разработана новая математическая модель поддержки принятия многокритериальных решений. Ее отличительными особенностями являются использование базовой свёртки Гермейера и численного интегрирования по множеству неопределённостей, а также применение типовых наборов способов учета неопределенности и итеративной процедуры согласования оценок, полученных с их использованием.

3. Создан экономный алгоритм численного вычисления многомерных интегралов для реализации разработанной математической модели, примерно в пять раз уменьшающий трудоемкость вычислений по сравнению с прямым методом Монте-Карло.

4. На основе созданной математической модели разработана информационная методика принятия многокритериальных решений, ориентированная на ведущую роль лица, принимающего решение, в формировании наиболее рационального решения в непосредственном диалоге с соответствующей программно-информационной системой.

5. Создан программный комплекс, обеспечивающий принятие решений в соответствии с разработанной методикой. Комплекс имеет интернет-доступ и обеспечивает дружественный интерфейс для всех категорий пользователей, включая лицо, принимающее решение.

6. Решена практически значимая задача сравнительной оценки четырех типов средств выведения КА при учете 10 частных критериев, характеризующих надежность и безопасность, а также энергетические и экономические факторы. Этим продемонстрировано, что разработанный в диссертации подход обеспечивает решение практических многокритериальных задач, позволяя также анализировать устойчивость решения при различных целевых установках лица, принимающего решения, и различных базовых свёртках.

4. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Малышев В.В., Пиявский Б.С., Пиявский С.А., Метод принятия решений в условиях многообразия способов учета неопределенности, Известия РАН, серия «Теория и системы управления», 2010, № 1, с. 46–61
2. Пиявский Б.С., Абдыкеров С.Е. Методика многокритериальной оценки программ развития национального исследовательского университета. Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 37, 2010, с. 1-7.
3. Крищенко В.А., Пиявский Б.С. Математическая модель для формирования целевых коллективов на предприятии, - Информатика и системы управления в XXI веке., сб. трудов №5, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2007
4. Брусов В.С., Пиявский С.А., Пиявский Б.С. Система поддержки принятия решений при многокритериальности и множественности условий функционирования альтернатив, в Межвуз. сб. трудов «Математическое моделирование информационных процессов и систем в науке, технике и образовании», Самара, 2005, с.3-15
5. Пиявский С.А., Пиявский Б.С. Многоаспектный анализ и согласование политико-управленческих решений на базе технологии ПРИНН, Труды VII Всероссийской объединенной конференции «Технологии информационного общества – Интернет и современное общество», 10-12 ноября 2004 г., Санкт-Петербург, 2004. – с. 197-199
6. Пиявский Б.С. Разработка консультативного Интернет-сайта исследовательских работ молодежи на базе математического моделирования развития научных способностей// Обнинский полис. Творческие работы участников общероссийской конференции «Юность. Наука. Культура» - М, Молодая гвардия, 2002. – С.372-385.
7. Пиявский С.А., Соловов А.В., Пиявский Б.С. Автоматизированный учебный комплекс для поддержки исследовательской работы молодежи // «Педагогический процесс как культурная деятельность» Материалы IV Международной научно-практической конференции, т.2, Самара, 2002. – стр.407-412
8. Пиявский Б.С. Сборник тезисов докладов 15 Международной конференции «Системный анализ, управление и навигация», 27.06-4.07.2010, Евпатория. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010, с.94
9. Пиявский Б.С., Абдыкеров С.Е. Методика многокритериальной оценки программ развития национального исследовательского университета. Сборник тезисов докладов 15 Международной конференции «Системный анализ, управление и навигация», 27.06-4.07.2010, Евпатория. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010, с.161-162.