

В.А. Нестеров, доктор технических наук,
профессор

В.А. Судаков, доктор технических наук,
доцент

Б.В. Обносков, доктор технических наук,
профессор

Многокритериальная оценка военной техники с использованием гибридной функции предпочтений на примере беспилотных летательных аппаратов

В работе рассматривается использование гибридной функции предпочтений для многокритериальной оценки образцов вооружений и военной техники. Предложенный метод формирования функций предпочтения, позволяет учесть зависимость по предпочтениям, не требует существенных затрат времени на построение пользователем функций предпочтений, работает с векторным критерием произвольной размерности. Пользователь выделяет в пространстве критериев непересекающиеся области. Для них задается строгое отношение предпочтения. В практических задачах ранжирования альтернатив часто несколько недоминируемых альтернатив попадают в одну область. В этом случае предлагается воспользоваться количественным методом сопоставления альтернатив внутри заданной области. Программная реализация гибридного метода анализа альтернатив позволяет решать задачу выбора вооружений и военной техники в условиях ограниченных финансовых ресурсов.

Введение

Одной из особенностей постановки задачи оценки объектов военной техники является многокритериальность задачи, т. е. необходимость одновременного учета ряда частных показателей. Другой особенностью постановки является необходимость учета экономических показателей затрат на закупку и эксплуатацию вооружений. И, наконец, третьей особенностью постановки является необходимость учета неконтролируемых факторов, в частности, случайных с известными законами распределения и неопределенных, относительно которых известны только области их изменения.

В работе [1] рассмотрен *количественный* подход к многокритериальной оценке боевого потенциала воинских формирований (ВФ) различного масштаба от отдельного комплекса вооружения и военной техники (ВВТ) до оперативно-стратегического воинского формирования. Однако частные критерии могут быть как

качественными, так и количественными. Существующие методы теории принятия решений ориентированы на критерии лишь одного из этих видов. В методе анализа иерархий Т. Саати качественные критерии переводятся в количественные оценки. В работе [2] доказано существование задач, в которых метод анализа иерархий дает некорректный результат.

Для совместной работы как с качественными, так и с количественными частными критериями создан новый гибридный метод скаляризации векторного критерия [3]. Метод создан с целью решения следующих задач:

- обеспечить лицо, принимающее решение (ЛПР), инструментарием для качественных суждений о предпочтительности альтернативного объекта ВВТ в задачах с высокой размерностью векторного критерия;
- выявить предпочтения ЛПР во всем критериальном пространстве, чтобы дальнейшая оценка конкретных альтернатив проходила в автоматическом режиме (таким образом,

процесс выбора и ранжирования альтернатив происходит быстро и появляется возможность проводить оптимизацию решений без привлечения ЛПР, но с учетом его предпочтений);

- учесть зависимости между компонентами векторного критерия по предпочтениям (в результате можно устранить ситуации, когда альтернативы с неприемлемыми для ЛПР оценками по одному критерию, получают высокую интегральную оценку за счет других критериев);
- обеспечить различимость альтернатив в случае, когда значения критериев подвергаются искусственной дискретизации с целью замены непрерывных шкал на балльные оценки.

Метод носит название гибридного, так как сочетает элементы качественных методов (функции предпочтений, качественные важности критериев, метод ЗАПРОС) и количественных методов (взвешенная сумма, идеальная точка) выявления суждений ЛПР [4].

Метод может быть использован для решения широкого спектра задач оценки образцов военной техники по техническим и экономическим показателям с целью последующего выбора объектов финансирования. После формализации гибридного метода будет показан конкретный пример работы метода при решении задачи выбора беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Формализация и алгоритмы работы гибридного метода

Дадим описание сути предлагаемого гибридного метода в общем виде.

Допустим, пространство критериев имеет размерность n , равную размерности векторного критерия оптимальности. Оси координат соответствуют частным критериям оптимальности. Далее, каждой точке этого пространства ставится в соответствие значение некоторой функции предпочтений, отражающей систему ценностей ЛПР о том, какие решения лучше, а какие хуже.

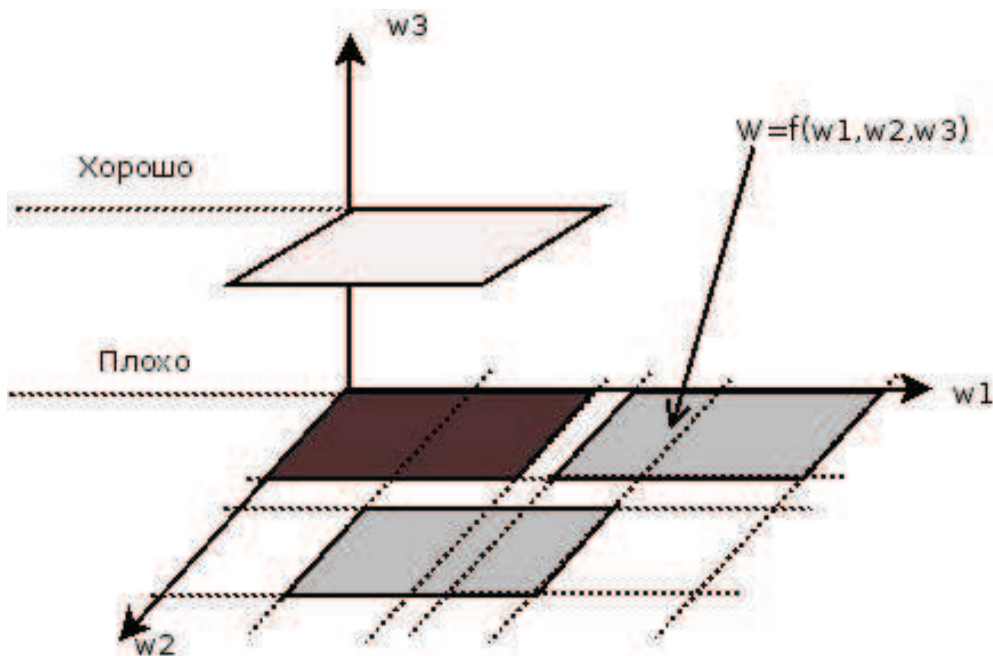


Рисунок 1 – Пример пользовательских областей предпочтений

ЛПР выделяет в пространстве критериев непересекающиеся области. Практика показывает, что ЛПР, исходя из своих знаний и опыта, легко выделяет области неудовлетворительных

решений, области удовлетворительных решений, области хороших решений для достаточно небольшого (5-16) количества областей. Для применения метода необходимы знания об об-

ласти допустимых значений каждого из критериев, но не требуется, чтобы все точки критериального пространства были допустимыми, знания о предпочтениях в недопустимых точках просто не используются. Для построения областей ось каждого критерия разбивается на интервалы, в результате критериальное пространство разбивается на отдельные ячейки прямоугольной формы. На рисунке 1 показан пример критериального пространства для случая трех критериев, градации критериев выделены пунктирными линиями, пересечения пунктирных линий образуют ячейки.

Пользователь указывает одну или несколько таких ячеек и сообщает системе поддержки принятия решений (СППР), что в этой области уровень предпочтений имеет некоторое значение в заданной лексической шкале: хорошо, удовлетворительно, неудовлетворительно и т. д. Уровень предпочтений позволяет определить, что решения в одной области лучше решений в другой области, но не говорит, на сколько лучше. Таким образом, уровень предпочтений выражается в порядковой шкале. При этом должна соблюдаться транзитивность предпочтений. Проверка транзитивности суждений ЛПР выполняется СППР автоматически.

В практических задачах ранжирования альтернатив часто несколько недоминируемых альтернатив попадают в одну область. Возникает вопрос об их сопоставлении. В этом случае предлагается воспользоваться формальным (количественным) методом сопоставления альтернатив внутри заданной области. Такими формальными методами могут быть: взвешенная сумма, мультипликативная свертка, идеальная точка, свертка Гермейера, расстояние Чебышёва. Применение формальных

$$A = \{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1q_1}\} \times \{t_{21}, t_{22}, \dots, t_{2q_2}\} \times \{t_{n1}, t_{n2}, \dots, t_{nq_n}\}.$$

Мощность этого множества вычисляется по формуле:

$$Q = |A| = \prod_{i=1}^n q_i.$$

методов в локальной области основано на следующем эвристическом соображении: зависимости по предпочтениям и существенные нелинейности проявляются только при больших изменениях значений критериев. Под большими изменениями мы понимаем такие, которые приводят к переходу из одной области предпочтений в другую. В небольшой области недостатки формальных методов, такие как взаимная компенсация критериев, влияние масштабирующих коэффициентов проявляют себя несущественно для пользователя.

Для математической формализации метода, дадим следующие обозначения:

i – номер критерия,

$i = 1..n$, где n – число критериев.

С целью удобства задания областей, которые будем упорядочивать по предпочтениям, разобьем значения критериев на градации:

t_{ij} – j -я градация i -го критерия.

Число градаций у критериев может быть различным: $j = 1..q_i$, где q_i – число градаций i -го критерия.

Для лексических критериев в качестве таких градаций выступают слова (термы). Для числовых критериев градация – это интервал значений. Интервал указывается в виде правой и левой границы.

По каждому критерию предпочтения должны быть монотонны или иметь один экстремум (идеальное значение – например, комфортная температура в помещении). Градации должны быть отсортированы в порядке увеличения предпочтительности:

$$\forall i, j: t_{i, j+1} > t_{i, j}.$$

Полное пространство всех возможных комбинаций значений градаций критериев задается как декартово произведение:

В большинстве практических задач значение Q велико, например, для 7 критериев с 5 градациями: $Q = 5^7 = 78125$. Задавать уровни предпочтения для всех элементов A на практике сложно. Поэтому в качестве области, для которой определяется уровень предпочтения,

будем рассматривать объединение некоторых элементов множества A .

Определим множества M_k , где $k=1..K$. Множество M_k представляет собой множество точек критериального пространства в определенной пользователем прямоугольной области. Для каждого M_k по каждому из критериев определяются градации, которые в него входят:

m_{ik} – множество номеров градаций i -го критерия, которые входят в k -е множество

M_k . Множества M_k – это подмножества множества A .

Рассмотрим произвольную точку пространства критериев $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, где x_i – значение i -го критерия, которое обязательно попадает в одну из градаций $\exists j(x_i \in t_{ij})$. Принадлежность X к множеству M_k определяется предикатом:

$$W(X, k) = \bigwedge_{i=1}^n \left(\bigvee_{j \in m_{ik}} (x_i \in t_{ij}) \right).$$

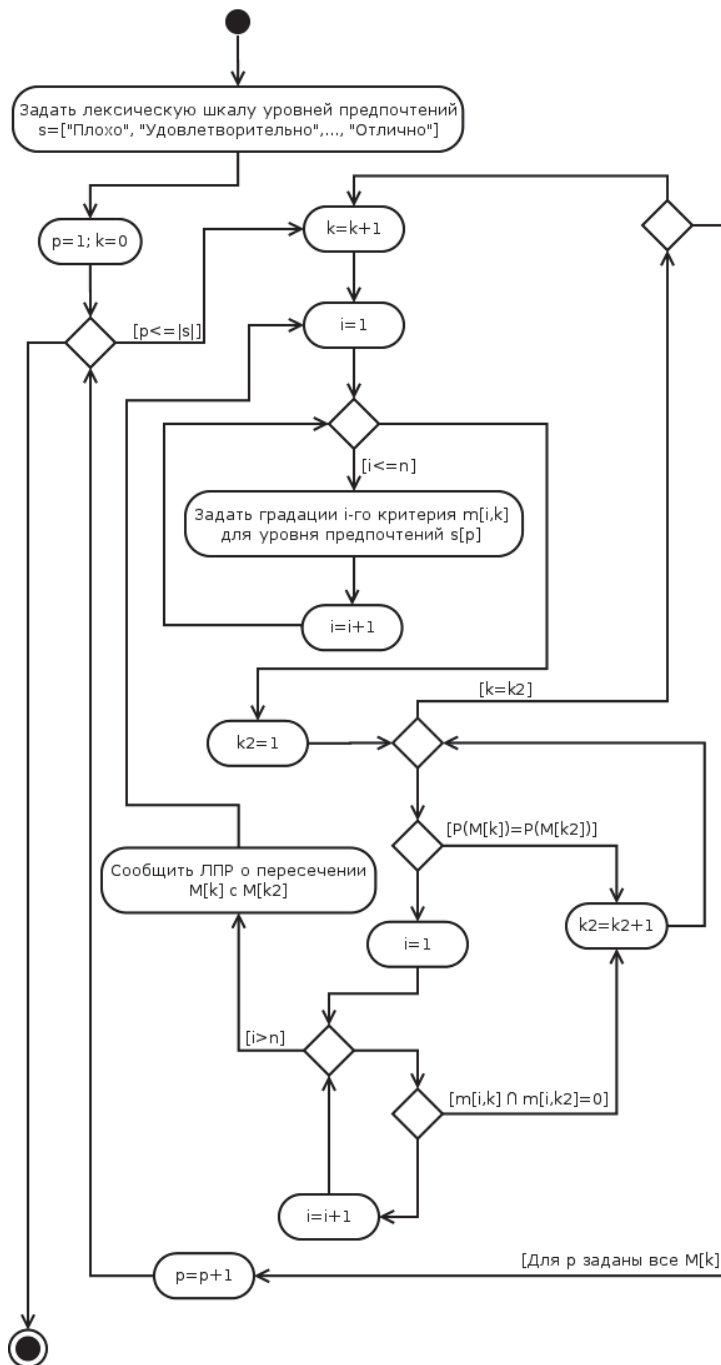


Рисунок 2 – Алгоритм ввода и редактирования M_k и уровней предпочтений

Для каждого уровня предпочтений P определяются входящие в него области с заданным уровнем предпочтений $P(M_k)$. Множество значений P – это целые числа, чем больше число, тем предпочтительнее соответствующий аргумент функции. Над значениями функции $P(\dots)$ нельзя производить арифметических операций сложения, вычитания и прочих, допустимы только операции сравнения.

$$\forall k_1 k_2 (P(M_{k_1}) \neq P(M_{k_2})) \rightarrow \exists i (m_{ik_1} \cap m_{ik_2} = \emptyset).$$

Если выражение не выполняется, то пользователь должен скорректировать свои назначения предпочтений или границы множеств M_k . Если множества M_k имеют равный уровень предпочтений, то допустимо их пересечение.

Для алгоритма, показанного на рисунке 2, в качестве входа выступают критерии и списки градаций для каждого критерия. Пользователь задает лексическую шкалу уровней предпочтений и для каждого из уровней предпочтений определяет одно или несколько множеств M_k , указывая градации по критериям. После ввода каждого множества проверяется, что оно не пересекается с остальными. На выходе получается совокупность множеств M_k , заданных через $\{m_{ik}\}$, для каждого из которых задан уровень предпочтений $P(m_k)$. При сообщении о пересечении должна выдаваться подсказка ЛПР: необходимо, чтобы хотя бы по одному из критериев градации не было общих градаций.

Так как объединение всех множеств M_k в общем случае не составляет всего множества A , то необходимо обеспечить возможность определения уровня предпочтений для любой комбинации значений градаций, которые не попали ни в одно из M_k . Назовем такие комбинации градаций ячейками и обозначим их как

$$T = \{t_{1,g_{1l}}, t_{2,g_{2l}}, \dots, t_{n,g_{nl}}\},$$

На рисунке 2 в нотации UML показано, как ЛПР вводит и редактирует множества M_k .

СППР проверяет, что все определенные пользователем множества M_k с различным уровнем предпочтений должны отличаться хотя бы по одному критерию. Для этого, после появления новой области или изменения существующей области автоматически проверяется выполнение выражения:

где g_{il} – номер градации i -го критерия для l -й ячейки, $l=1..L$.

Нужно найти все комбинации градаций, которые не попадают ни в одно из множеств M_k . Условие непопадания во все множества M_k запишется как:

$$\forall l \forall k \exists i (g_{il} \notin m_{ik}).$$

На рисунке 3 в нотации UML показан алгоритм поиска таких комбинаций градаций. В нем анализируются все комбинации градаций. Для этого используется вспомогательный массив $s = \{s[i]\}$ – номер градации i -го критерия}. Входом для алгоритма являются $\{m_{ik}\}$, на выходе формируются T_l . Алгоритм работает по методу прямого полного перебора всех комбинаций градаций по всем критериям (текущая комбинация хранится в s). Каждая текущая комбинация проверяется на принадлежность всем M_k , если для всех M_k принадлежность не найдена, то s добавляется в $\{T_l\}$.

Определим общее количество таких ячеек L . Для этого нужно вычесть из общего количества комбинаций градаций значений критериев Q число комбинаций, которые уже покрыты всеми множествами M_k . Если M_k не пересекаются, то количество комбинаций, которые они покрывают, можно сложить:

$$L = Q - \sum_{k=1}^K \prod_{i=1}^n |m_{ik}|.$$

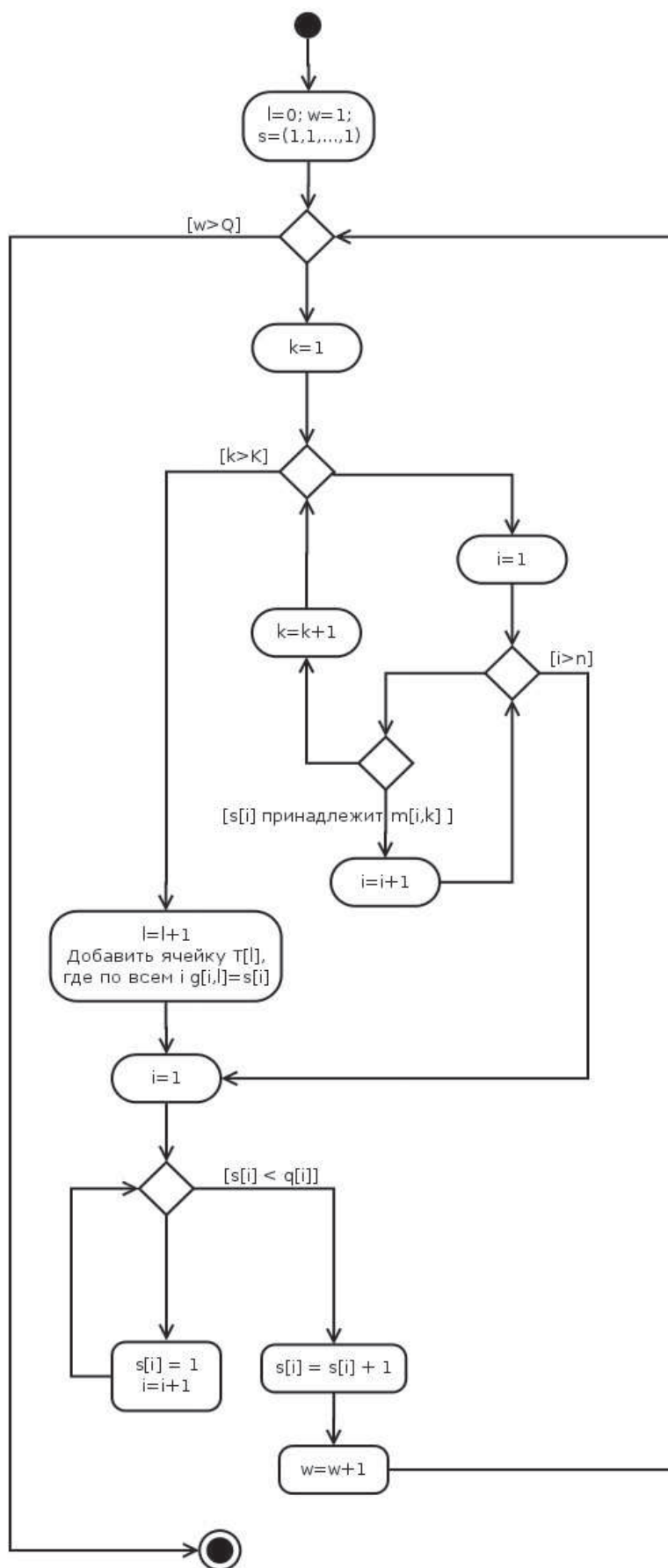


Рисунок 3 – Алгоритм определения ячеек T_l

Учитывая, что градации отсортированы в порядке увеличения предпочтительности, применим к ячейкам T_l и множествам M_k условие оптимальности по Парето. В результате возникают отношения предпочтения одних ячеек над другими:

$$\forall i (g_{il_1} \geq g_{il_2}) \wedge \exists i (g_{il_1} > g_{il_2}) \rightarrow T_{l_1} > T_{l_2}.$$

А также отношения предпочтения ячеек над множествами:

$$\forall i (g_{il} \geq \max_{j \in m_k} j) \wedge \exists i (g_{il} > \max_{j \in m_k} j) \rightarrow T_l > M_k$$

и отношения предпочтения множеств над ячейками:

$$\forall i (\min_{j \in m_k} j \geq g_{il}) \wedge \exists i (\min_{j \in m_k} j > g_{il}) \rightarrow M_k > T_l.$$

Кроме того, существует отношение доминирования между всеми множествами M_k . Оно определяется уровнями предпочтений, заданными пользователем:

$$\forall k_1 \forall k_2 (P(M_{k_1}) > P(M_{k_2}) \rightarrow M_{k_1} > M_{k_2}).$$

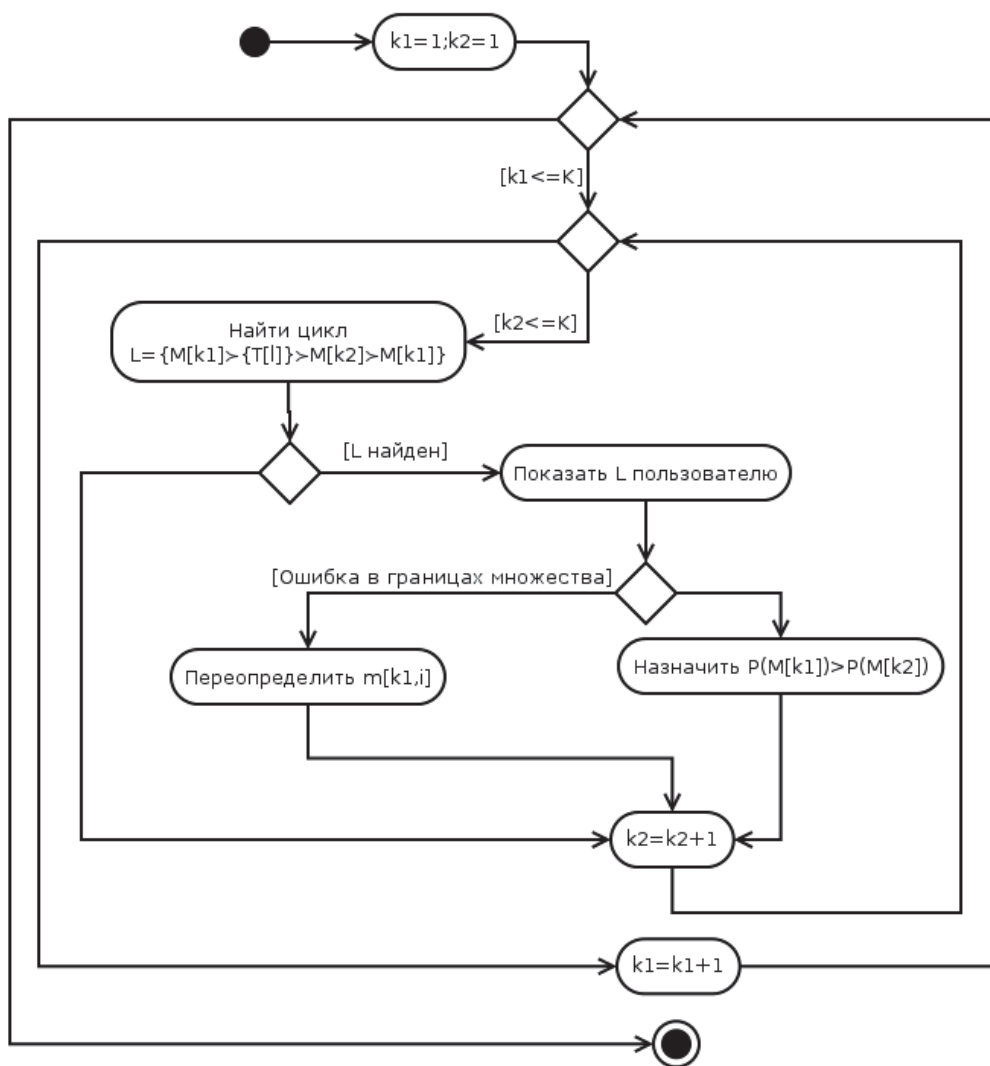


Рисунок 4 – Алгоритм корректировки предпочтений в случае циклов

Для некоторых ячеек можно определить предпочтения между ячейками методом качественного учета важностей Подиновского, если выполняются следующие условия:

1) для критериев установлено отношение предпочтения, например, критерий i важнее

критерия $i+1$, при этом не устанавливается, на сколько важнее,

2) критерии являются однородными, то есть для них используется одна и та же шкала, например, пятибалльная шкала экспертных оценок от 1 до 5.

Между ячейками, которые получаются друг из друга перестановкой номеров градаций по двум критериям в случае их однородности, получается отношение предпочтения по правилу Подиновского:

$$\exists i_1 \exists i_2 (i_1 < i_2) \wedge (\forall i (i \neq i_1 \wedge i \neq i_2) \rightarrow (g_{i_1} = g_{i_2})) \wedge \wedge (g_{i_1} > g_{i_2}) \wedge (g_{i_2} < g_{i_1}) \wedge (g_{i_2} = g_{i_1}) \rightarrow T_{i_1} > T_{i_2} .$$

Это правило говорит о том, что в случае, если одна ячейка получается из другой перестановкой значений двух критериев, то из этих двух ячеек предпочтительней та, где большее значение указано у более важного критерия. Упорядочивание критериев по важности осуществляется пользователем.

Применяя указанные правила доминирования ко всем ячейкам и множествам, можно построить ориентированный граф доминирования ячеек T_l и множеств M_k . Вершины этого графа будут соответствовать ячейкам и множествам, а направленные дуги будут говорить об отношении доминирования. Граф нужно проверить на наличие циклов. И если таковые будут найдены, то следует указать на это ЛПР. Цикл в графе говорит о наличии не-транзитивности в суждениях ЛПР. На рисунке 4 в нотации UML показан алгоритм корректировки предпочтений в случае циклов. Необходимо для каждого цикла определить множества M_k , которые в него входят, и сообщить пользователю, что необходимо ввести корректировки уровней предпочтений или изменить сами множества, например, назначить $M[k_2]$ уровень предпочтений меньше, чем уровень предпочтений $M[k_1]$. В практических задачах возникновение цикла – редкое явление. На реальных исходных данных цикл не возникал. Чтобы проверить корректность алгоритма обнаружения циклов в приложении были сформированы специальные исходные данные, цикл устраняется за одну итерацию.

После того, как будет установлено отсутствие циклов, следует использовать алгоритм анализа графа, который академик Ларичев назвал «разборка» графа. В этом алгоритме

определяются значения уровней предпочтений для M_k и T_l :

1) $p = L + K$ – это максимальный уровень предпочтений, который возможен в случае, если все M_k и T_l различимы по предпочтительности;

2) определить множество недоминируемых вершин M_k и T_l ;

3) присвоить им уровень предпочтений p ;

4) исключить из графа недоминируемые вершины;

5) $p = p - 1$;

6) если граф пуст, то завершение алгоритма;

7) переход на шаг 2.

После применения данного алгоритма, некоторые вершины попадут на один уровень предпочтений. Если все вершины будут различимы, то в конце работы алгоритма переменная p будет равна нулю. Если все вершины неразличимы, то p будет равна $L + K$.

Определим Z – синтетический показатель уровня неразличимости на полном множестве:

$$Z = \frac{p}{L + K} \cdot 100\% .$$

Следует заметить, что чем детальней пользователь задаст свои предпочтения, тем меньше будет это число. Если пользователя не устраивает результат работы метода (например, не устраивают ранги альтернатив, полученные в результате ранжирования альтернатив указанным методом), то следует указать пользователю на необходимость понижения значения Z . Понизить значение Z можно путем ввода новых множеств M_k .

Обычно градация или множество включает более одного возможного значения критерия. Для возможности сопоставления различных векторов пространства критериев, входящих в одно множество или в одну ячейку, необходимо добиться изменения итоговой оценки альтернативы при изменении критерия в рамках одного уровня предпочтений.

Для этого предлагается вычислять итоговое значение предпочтений по формуле:

$$Y(x) = p(x) + D(x),$$

где $p(x)$ – целочисленный уровень предпочтений, соответствующий области M_k или ячейке T_l , в которую попало значение X , определенный вышеописанным алгоритмом разбора графа;

$D(x)$ – оценка, полученная количественным методом свертки векторного критерия, вычисленная в рамках той области (множества или ячейки), куда попало значение вектора X , и нормированная в пределах от 0 до 1.

Функцию $Y(x)$, вычисляющую итоговое значение предпочтений, назовем гибридной функцией предпочтений (ГФП).

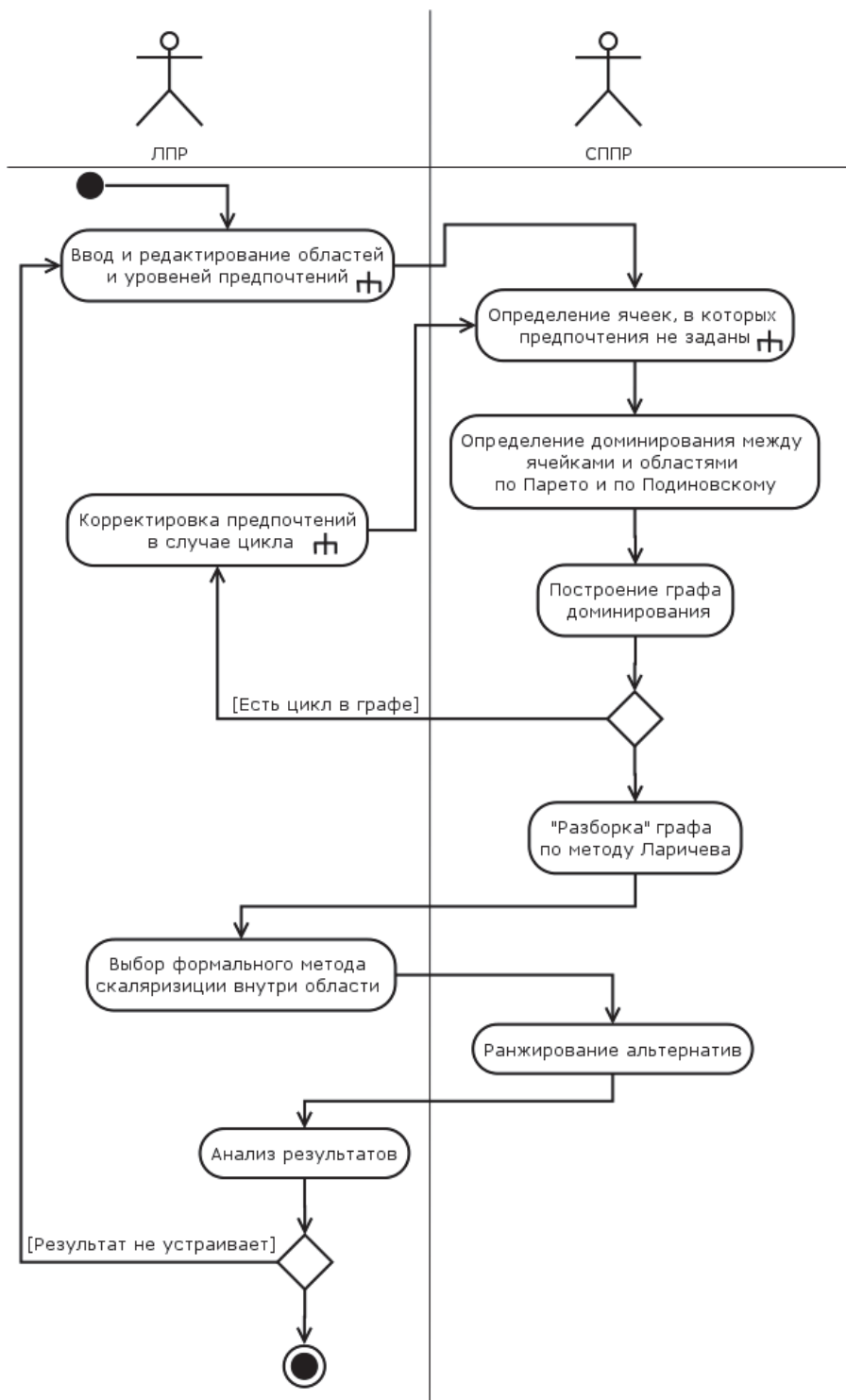


Рисунок 5 – Алгоритм формирования гибридной функции предпочтений

Итоговая оценка альтернативы, полученная указанным методом, состоит из целой части отражающей качественные суждения пользователя, и дробной части, отражающей применение количественных методов, с целью повышения чувствительности и возможности оптимизации на непрерывном множестве.

На рисунке 5 показан общий алгоритм гибридного метода формирования функции предпочтений. Данный гибридный метод, с одной стороны, позволяет существенно упро-

стить процедуру построения функции предпочтений, задавая ее подробно не на всем критериальном пространстве. С другой стороны – использовать преимущества, представляемые количественными методами свертки векторных критериев и требующие, как правило, меньшего объема информации при их использовании, для более детального сопоставления альтернативных решений, находящихся в одной области предпочтительности с точки зрения выбора перспективных образцов ВВТ.

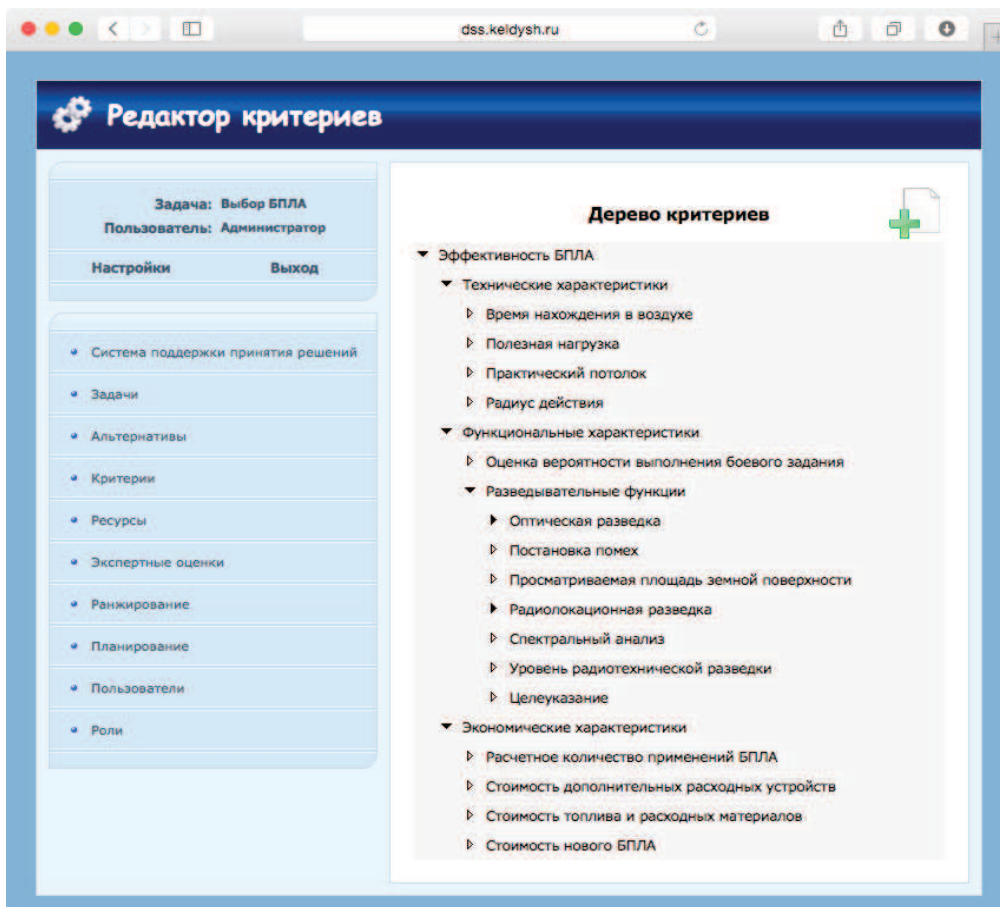


Рисунок 6 – Редактор векторного критерия

Задача выбора БПЛА

Для демонстрации эффективности предлагаемого подхода решим следующую задачу: пусть дано множество проектов БПЛА и из них необходимо выбрать несколько БПЛА в условиях ограниченности финансовых ресурсов. Каждый БПЛА характеризуется следующим векторным критерием:

1. Технические характеристики:

- 1.1. Время нахождения в воздухе, ч.
- 1.2. Радиус действия, км.
- 1.3. Полезная нагрузка, кг.
- 1.4. Практический потолок, м.
2. Экономические характеристики:
 - 2.1. Стоимость нового БПЛА, тыс.руб.
 - 2.2. Расчетное количество применений БПЛА.
 - 2.3. Стоимость дополнительных расходных устройств для обеспечения одного вылета

(стоимость пороховых ускорителей, срезных болтов и т. п.), тыс.руб.

2.4. Стоимость топлива и расходных материалов (ГСМ, технические газы и т. п.), тыс.руб.

3. Функциональные характеристики:

3.1. Оценка вероятности выполнения боевого задания, %.

3.2. Разведывательные функции:

3.2.1. Оптическая разведка:

3.2.1.1. В видимом диапазоне (нет, панорамная, детальная).

3.2.1.2. В ИК-диапазоне (есть, нет).

3.2.1.3. В УФ-диапазоне (есть, нет).

3.2.2. Целеуказание (есть, нет).

3.2.3. Радиолокационная разведка:

3.2.3.1. Передней полусферы (есть, нет).

3.2.3.2. Боковая (есть, нет).

3.2.4. Уровень радиотехнической разведки (высокий, удовлетворительный, низкий).

3.2.5. Спектральный анализ (есть, нет).

3.2.6. Просматриваемая площадь земной поверхности в 1 вылете, кв. км.

3.2.7. Постановка помех (есть, нет).

Таким образом, векторный критерий включает в себя 19 первичных показателей и 6 агрегирующих показателей. Среди них есть как качественные, так и количественные критерии. Для апробации гибридного метода использовалась готовая программная оболочка СППР «Космос», которая инвариантна по отношению к предметной области и успешно решает задачи выбора заявок на проведение космических экспериментов. На рисунке 6 показан интерфейс ввода векторного критерия эффективности. На основе введенных предпочтений для 6 тестовых проектов БПЛА было получено их ранжирование, показанное на рисунке 7.

Наименование	Эффективность БПЛА	Технические характеристики			
		Технические характеристики	Время нахождения в воздухе	Полезная нагрузка	Практический потолок
БПЛА 1	0,68229	1	1	1	1
БПЛА 6	0,460268	0,25	1	0	0
БПЛА 3	0,400809	0,75	0	1	1
БПЛА 4	0,345417	0,5	0	1	0
БПЛА 5	0,205659	0,5	0	1	1
БПЛА 2	0	0	0	0	0

Рисунок 7 – Результаты ранжирования

Для каждого из проектов БПЛА были заданы ограничения по требуемым на реализацию ресурсам. В СППР «Космос» встроена реализация алгоритма оптимизации отбора нескольких альтернатив в условиях ограниченности ресурсов. Для этого используется эвристический алгоритм оптимизации, основанный на локальной стратегии поиска [5]. Результаты отбора БПЛА приведены на ри-

сунке 8. Текущая реализация привязывает отобранные альтернативы к временной шкале начала работ по их реализации, поэтому результат показан в виде диаграммы Ганта. Для выбранных БПЛА указывается время начала работ над ними, для БПЛА, которые не попали в план, время начала работ не указано. Программа реализации СППР «Космос» с современным веб-интерфейсом позволяет

работать с ней широкому кругу ЛПР и экспертному сообществу с использованием Ин-

тернет- и интранет-каналов связи в режиме облачных вычислений.

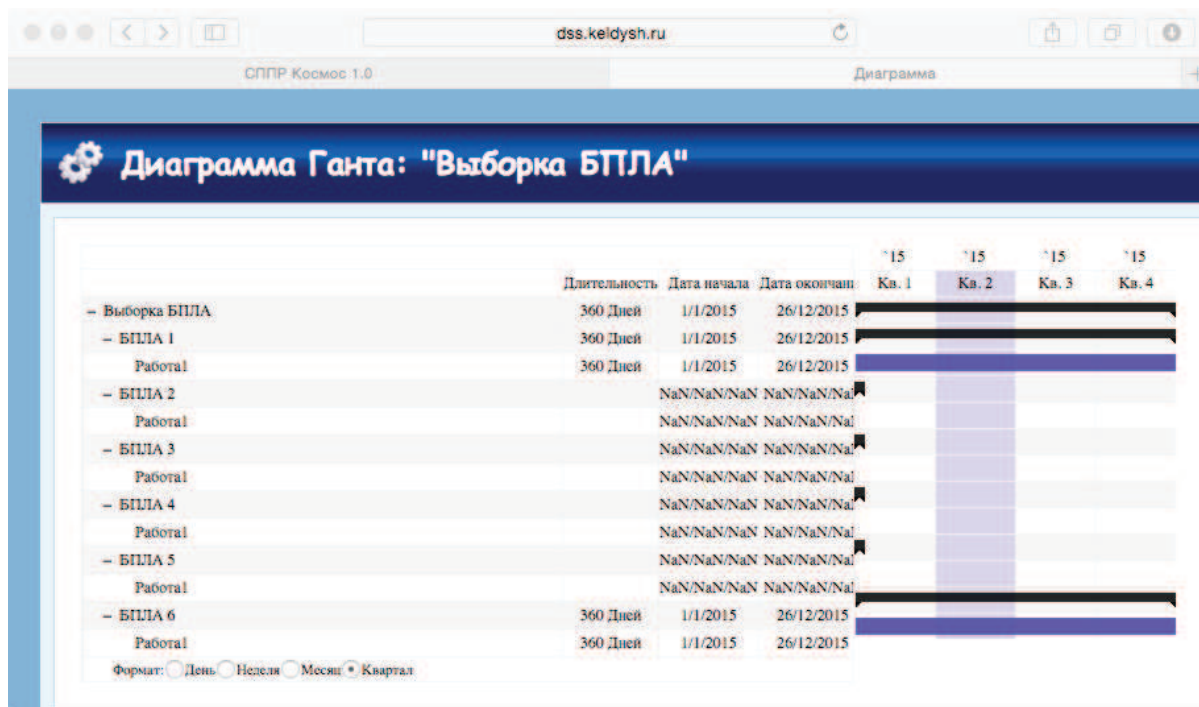


Рисунок 8 – Планирование реализации отобранных БПЛА

Заключение

1. Предложенный метод построения гибридной функции предпочтений содержит алгоритмы ввода и редактирования системы ценностей ЛПР для высокоразмерного критерия, позволяет учитывать зависимости по предпочтениям.

2. Гибридный метод является инвариантным по отношению к предметной области,

позволяет решать широкий круг военных и технических задач, связанных с многокритериальной оценкой по высоко размерному критерию, включающему в свой состав как качественные, так и количественные компоненты.

3. Реализация многокритериальных методов анализа альтернатив в СППР «Космос» позволяет решать задачу выбора вооружения и военной техники в условиях ограниченных финансовых ресурсов.

Список использованных источников

1. Буравлев А.И., Буренок В.М. Методические основы обоснования количественных параметров вооруженных сил по критерию «эффективность-стоимость» // Вооружение и экономика. – 2014. – № 4(29).

2. Подиновский В.В., Подиновская О.В. О некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. – 2011. – № 1. – С. 8-13.

3. Ескин В.И., Судаков В.А. Автоматизированная поддержка решений с использованием гибридной функции предпочтений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2014. – № 3. – С. 116-124.

4. Бомас В.В., Судаков В.А. Поддержка субъективных решений в многокритериальных задачах. – М.: Изд-во МАИ, 2011. – 173 с.

5. Осипов В.П., Загреев Б.В., Судаков В.А. Система поддержки принятия решений для формирования программ исследований на МКС // Полет. – 2013. – № 10. – С. 28-41.