

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 004.023:9

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-249-261



Метод упорядочения альтернатив на основе заданных норм

© 2025, С.В. Микони

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (СПб ФИЦ РАН),
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН),
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Для формирования облика проектируемого изделия привлекаются лучшие образцы в данной предметной области. Выбор прототипа изделия осуществляется методами многомерной оптимизации на основе критериев и теории ценности / полезности. В работе предлагается использовать двунаправленные (двусторонние) требования к значениям показателей, которые реализуются моделью нормы. Процедура оценивания показателей, основанная на отношениях превосходства на конечном множестве альтернатив, предваряется анализом показателей на соответствие норме. Появляется возможность упорядочения объектов по величине отклонения от нормы по обе стороны от её границ. Для сопоставления результатов упорядочения объектов относительно нормы и односторонних требований к значениям показателей выполнено экспериментальное исследование в системе выбора и ранжирования. В качестве объектов оценивания рассматривались беспилотные летательные аппараты. Однонаправленные требования к значениям показателей моделировались линейными и логистическими функциями. Двунаправленные требования к значениям показателей моделировались логистическими функциями фронтов модели нормы. Эксперименты показали различие результатов, получаемых на основе односторонних и двусторонних требований. Различие полученных рейтингов беспилотных летательных аппаратов оценивалось коэффициентом ранговой корреляции по Кендаллу. Полученные результаты указывают на новизну предлагаемого метода упорядочения объектов относительно нормы, который может быть востребован для выбора прототипа проектируемого изделия и варианта существующего объекта, отвечающего требованиям нормы к значениям показателей.

Ключевые слова: показатель, класс, норма, принадлежность классу, упорядочение, рейтинг.

Цитирование: Микони С.В. Метод упорядочения альтернатив на основе заданных норм. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №2(56). С.249-261. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-2-249-261.

Финансирование: исследования проводились в рамках бюджетной темы FFZF-2025-0020.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Памяти Сергея Сергеевича Семёнова – инициатора исследований прототипов беспилотных летательных аппаратов на стадии проектирования

Введение

На этапах проектирования и применения технических систем востребован поиск лучшего варианта. Разработке методов оценки качества и технического уровня сложных технических систем на всех этапах жизненного цикла посвящены книги С.С. Семёнова [1-3]. Оригинальный метод оценки с учётом полного жизненного цикла был опубликован в [4]. Начиная с 2010 года С.С. Семёнов проводил исследования в области создания и применения многоцелевых комплексов беспилотных летательных аппаратов (БЛА), в которых рассматривались

вопросы формирования состава показателей, подлежащих оцениванию, поиска информации об их значениях для разных типов БЛА, выбора критериев, оценочных функций и весов показателей [5-14]. Эти работы позволяют принимать взвешенные решения при формировании облика проектируемых БЛА.

В качестве исходных данных для выбора варианта облика предлагалось использовать существующие образцы БЛА. При выборе наилучшего варианта образцы БЛА сопоставляются *между собой* по значениям характеризующих их показателей, отвечающих отношениям превосходства [15, 16]: $y_j \leq c_j$, ограничение сверху (не более c_j); $y_j \geq c_j$, ограничение снизу (не менее c_j), где y_j – проектное, а c_j – целевое значение j -го показателя БЛА, $j = \overline{1, n}$. Ранжирование образцов БЛА выполняется по результатам решения задачи многокритериальной оптимизации [17]. Количество критериев определяется числом $n > 1$ оцениваемых показателей. В качестве целевого значения c_j оптимизируемого j -го показателя принимается одна из границ шкалы $[y_{j \min}, y_{j \max}]$:

$c_j = y_{j \min}$ – при **минимизации** j -го показателя,

$c_j = y_{j \max}$ – при **максимизации** j -го показателя.

Облик проектируемого БЛА должен быть сбалансирован относительно граничных значений показателей, которые не всегда могут быть целевыми. Альтернативой им может быть используемое на практике понятие нормы [18, 19], которое можно распространить на перспективные значения показателей (норма меняется вместе с техническим прогрессом).

В данной работе предлагается использовать понятие нормы для выбора значений показателей перспективных вариантов БЛА. Для исследования методов упорядочения БЛА использована инструментальная системы выбора и ранжирования СВБРЬ-М [20].

1 Соотношение цели и нормы

Любая активная система чередует либо совмещает процессы *сохранения* и *улучшения* своего состояния. Для улучшения состояния она руководствуется *целью*, а достигнутое состояние принимается за *норму*, которой придерживаются в заданном промежутке времени. Таким образом, на содержательном уровне цель и норма связываются процессами *сохранения* и *улучшения* системой своего состояния. Цель – это то, что надо достигать, а норма – это то, что надо сохранять. Процессы *сохранения* и *улучшения* состояния отражают противоположные свойства *стабильности* и *развития* системы.

Формальные модели этих процессов выражаются через предикаты первого порядка на шкале оцениваемого показателя объекта x . Жёсткая цель представляется предикатом $y(x) \rightarrow \max$ ($\min$), а мягкая цель – предикатом $y(x) \geq c$ ($y(x) \leq c$) или словесно – значение y должно быть не менее (не более) значения c .

Норма формализуется предикатом принадлежности интервалу значений шкалы показателя: $y(x) \in [c_1, c_2]$. При равной важности всех значений показателя в интервале $[c_1, c_2]$ принадлежность ему выражается через совмещение двух мягких целей: $c_1 \leq y \leq c_2$ или в раздельной записи: $(y \geq c_1) \& (y \leq c_2)$.

Если в интервале выделена наиболее значимая точка, например $c = (c_1 + c_2)/2$, то норма сводится к достижению двух противоположных жёстких целей: $y(x) \rightarrow \max$, если $y(x) < c_1$ и $y(x) \rightarrow \min$, если $y(x) > c_2$. Таким образом, содержательные связи между свойствами *стабильности* и *развития* системы формализуются логической связью между их моделями.

Жёсткие границы интервала $[c_1, c_2]$ следует рассматривать как частный случай отсутствия размытости границ. В общем случае границы нормы являются размытыми, что расши-

ряет интервал до допустимых и предельных границ нормы. Достижение показателем предельной границы угрожает существованию объекта x .

Допустимые и предельные границы нормы выражаются соответственно через интервалы $[c_{\text{дом}}, c_{\text{доб}}]$ и $[c_{\text{пом}}, c_{\text{поб}}]$, где индексами дом (пом) и доб (поб) обозначаются допустимые (д) и предельные (п) отклонения (о) от границ нормы в сторону меньших (м) и больших (б) значений показателя. Расширению границ нормы соответствуют отношения вхождения интервалов: $[c_1, c_2] \subseteq [c_{\text{дом}}, c_{\text{доб}}] \subseteq [c_{\text{пом}}, c_{\text{поб}}]$.

2 Модели нормы и решаемые задачи

Интервалы $[c_{\text{пом}}, c_1]$ и $(c_2, c_{\text{поб}}]$ представляют отрезки шкалы показателя, отражающие отклонения его значения в меньшую и большую сторону от нормы. Если принять интервал $[c_1, c_2]$ за модель нормы (Н), то интервалу $[c_{\text{пом}}, c_1]$ ставится в соответствие класс «Меньше нормы» (МН), а интервалу $(c_2, c_{\text{поб}}]$ – класс «Больше нормы» (БН). Этим формулируется задача классификации объекта x по оцениваемому показателю на три класса: Н, МН и БН. Границы допустимых отклонений от нормы могут быть использованы как центры области размытости между соседними классами. Примеры нелинейных функций принадлежности классам Н, МН и БН приведены в [21]. Принадлежность объекта каждому из этих классов по многим показателям вычисляется как их средневзвешенная свёртка.

Принадлежность значения показателя классам МН и БН рассматривается в задачах наблюдения состояния объекта и его управления. Моделирование *развития* объекта по многим показателям приводит к усложнению классификационной модели в направлении учёта показателей, требующих улучшения. В связи с этим для представления отношения нежелательности / желательности отклонения в [21] введены два дополнительных класса «Хуже нормы» (ХН) и «Лучше нормы» (ЛН). Нежелательность отклонения значения нейтрального показателя в любую сторону от границ нормы выражается через делегирование принадлежностей классам МН и БН в класс ХН. Элементы класса ЛН формируются из принадлежностей классу БН для максимизируемых показателей и из принадлежностей классу МН для минимизируемых показателей.

Результатом вычисления принадлежности объекта классам по многим показателям является вектор $\mu(x) = (\mu_n(x), \mu_{\text{хн}}(x), \mu_{\text{лн}}(x))$, $(\mu_n(x) + \mu_{\text{хн}}(x) + \mu_{\text{лн}}(x)) = 1$. Компоненты вектора отражают состояние объекта через постоянство, ухудшение и улучшение его свойств.

Качество состояния оценивается через соотношение таких свойств, как стабильность, риск и развитие. В отсутствие отклонений от нормы $\mu_n(x) \rightarrow 1$, что означает отсутствие как риска, так и развития. Представляет интерес соотношение $\mu_n(x)$ и $\mu_{\text{лн}}(x)$, как долей единицы при $\mu_{\text{хн}}(x) \rightarrow 0$. Соотношение $\mu_n(x) > \mu_{\text{лн}}(x)$ характеризует превосходство стабильности над развитием, а $\mu_n(x) < \mu_{\text{лн}}(x)$ отражает обратную тенденцию.

В задаче сопоставления объектов по принадлежности одному из классов выполняется их упорядочение по величине функции принадлежности этому классу. Для получения линейного порядка на множестве объектов по принадлежности всем классам требуется преобразование векторных оценок в скалярные (числовые) оценки, которые называются индикаторами состояния (ИС) объекта [21]. Они вычисляются суммированием оценочных функций, образуемых на основе критериев: $\mu_n(x) \rightarrow \max$, $\mu_{\text{лн}}(x) \rightarrow \max$, $\mu_{\text{хн}}(x) \rightarrow \min$. Важность оценочных функций задаётся вектором весов: $w = (w(\mu_n(x)); w(\mu_{\text{лн}}(x)); w(\mu_{\text{хн}}(x)))$.

В отсутствие информации об их важности $w(\mu_n(x)) = w(\mu_{\text{лн}}(x)) = w(\mu_{\text{хн}}(x)) = 1/3$.

Если на основе статистики установлены границы уровней качества на шкале $[0, 1]$ ИС, то существует возможность по значению ИС определить уровень качества объекта x . Для сопоставления объектов по их ИС в задаче с оптимизируемыми показателями веса всех классов

должны быть ненулевыми. Для сопоставления объектов по одному из классов веса остальных классов задаются нулевыми.

Таким образом, задача упорядочения объектов по результатам классификации решается в следующей последовательности.

- 1) задаются шкалы и нормы количественных показателей.
- 2) задаются важности (веса) показателей.
- 3) выполняется классификация каждого объекта относительно нормы.
- 4) задаются важности (веса) классов.
- 5) вычисляется ИС объекта.
- 6) выполняется упорядочение объектов по ИС.
- 7) по результатам упорядочения выбирается предпочтительный объект.
- 8) для оценивания отклонений от нормы объекты упорядочиваются относительно соответствующих классов.

3 Сопоставление методов упорядочения беспилотных летательных аппаратов

Свойства метода упорядочения объектов по заданным нормам могут быть определены в сопоставлении с методами упорядочения с использованием многокритериальной и многомерной оптимизация объектов по ценности. Для проведения экспериментов по упорядочению БЛА разными методами принят минимальный набор наиболее значимых показателей.

3.1 Характеристики беспилотных летательных аппаратов

В эксперименте приняты характеристики БЛА, приведённые в таблице 1 [13]:

$M_{взл}$ – взлётная масса БЛА (кг);

$M_{бн}$ – масса боевой нагрузки (кг);

$D_{п}$ – дальность полёта (км);

$T_{п}$ – продолжительность полёта (км);

$H_{п}$ – высота полёта (м);

V_{max} – максимальная скорость полёта (км/ч);

n – количество точек подвески УР, УАБ (ед.);

$C_{бл\lambda}$ – стоимость БЛА (млн. долл.).

Символом * в таблице помечены экспертные оценки показателей.

Таблица 1 - Характеристики разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов с взлётной массой 0,3-2,0 т. [13]

N	БЛА	Страна	$M_{взл}$	$M_{бн}$	$D_{п}$	$T_{п}$	$H_{п}$	V_{max}	n	$C_{бл\lambda}$
1	Форпост-М	Россия	454	100	500	17,5	5000	200	2	7,5
2	Дозор-600	Россия	640	220	3700	30	7500	210	2	6
3	Байрактар ТВ2	Турция	650	150	300	24	7000	220	4	8
4	Гермес 900	Израиль	1180	350	4000	36	9145	220	2*	12*
5	Орион-1 (Э)	Россия	1200	200	600	24	8000	200	2	6
6	Импакт 1300	Израиль	1300	400	1500	30	9000	250	2*	9*
7	СН-4В	Китай	1350	345	1600	14	7000	250	4	4
8	Вин Лун-1D	Китай	1500	400	2000	35	7500	280	4	8*
9	MQ-1C Грэй Игл	США	1634	478	8000	36	8840	280	4	17*
10	Рустом-2	Индия	1800	350	900	24	10660	300	2	10

Функциональность БЛА характеризуется скоростью, высотой и продолжительностью полёта. Продолжительность полёта косвенно характеризует энергоёмкость БЛА. Она оценивается затратами электроэнергии либо топлива на дальность полёта.

Взлётная масса является классификационным показателем, который в значительной степени определяет массу полезной нагрузки БЛА. Если по значению классификационного показателя два БЛА различаются в два и более раз, они принадлежат разным категориям [14]. Согласно этому условию первые три БЛА по взлётной массе не сопоставимы с остальными БЛА, выделенными (полужирный шрифт в таблице 1) в оцениваемую группу.

3.2 Модель многомерного оценивания беспилотных летательных аппаратов

Показатели БЛА разделены на группы: экономические и характеристики. Для сопоставления разных методов упорядочения БЛА можно ограничиться показателями группы характеристики, которые разделены на четыре подгруппы: тактическая, техническая, боевая, выживаемость. В тактическую подгруппу включены дальность и продолжительность полёта, в техническую – взлётная масса и масса боевой нагрузки, в боевую – количество точек подвески, в подгруппу выживаемость – максимальная скорость и высота полёта.

Методы упорядочения БЛА различаются требованиями, предъявляемыми к значениям показателей.

- Для метода многокритериальной оптимизации предъявляется требование максимизации значений $y_j \rightarrow \max$, которое моделируется линейной оценочной функцией (ОцФ), возрастающей на шкале $[y_{j \min}, y_{j \max}]$.
- В качестве ОцФ для многомерной оптимизации БЛА приемлема логистическая ОцФ. Одним из её параметров является точка перегиба c_j . Для сопоставимости с методом упорядочения по принадлежности классам рассматриваются два варианта задания значения c_j , связанного с границами нормы:
 - по среднему значению нормы $c_{j1} = (c_{jn} + c_{jв})/2$;
 - по среднему значению переднего фронта класса $c_{j2} = (c_{дом,j} + c_{jn})/2$.
- Для упорядочения БЛА по принадлежности классам требуется вычисление ИС БЛА [21]. Все оцениваемые показатели оптимизируемы, причём $\mu_{лн}(y_j) = \mu_{он}(y_j)$. Вычисление ИС по принадлежности одному классу осуществляется путём назначения единицы этому классу в векторе весов и нулю – остальным классам. Например, для вычисления ИС по классу Н вектор весов $\mathbf{w} = (w(\mu_{н}(x)); w(\mu_{лн}(x)); w(\mu_{хн}(x)))$ кодируется как $\mathbf{w} = (1, 0, 0)$.

Для создания модели многомерной оптимизации БЛА по отклонению от норм помимо границ шкал показателей БЛА задаются границы норм и допустимых отклонений от норм в меньшую и большую стороны от границ норм (см. таблицу 2).

В таблице 2 приняты следующие обозначения:

МинГШ (МаксГШ) – минимальная (максимальная) граница шкалы показателя;
 НГК (ВГК) Норма – нижняя (верхняя) граница нормы на шкале показателя;
 ДОМ (ДОБ) – допустимое отклонение в меньшую (большую) сторону от границы нормы.

Таблица 2 - Границы шкал и норм показателей беспилотных летательных аппаратов

	D_{Π}	$M_{БН}$	$\Pi_{Н}$	n	$V_{\max}$	H_{Π}	$C_{БЛА}$
МинГШ	300	14	0,16	0	200	5000	4
МаксГШ	8000	36	0,35	4	300	10660	17
НГК Норма	950	20	0,29	1,9	245	6900	6,8
ВГК Норма	1050	22	0,31	2,1	255	7100	7,2
ДОМ	900	18	0,28	1,5	240	6800	6,5
ДОБ	1100	24	0,32	2,5	260	7200	7,5

Представляют интерес два варианта параметров нормы: среднее значение нормы (СН) и среднее значение расплывчатости нормы (СРН). Модель нормы содержит двусторонние требования к значению показателя.

Для оценивания степени различия / сходства рейтингов БЛА, получаемых разными методами, использованы два показателя: показатель изменения порядка мест $D(A, B)$ в рейтинге

B по сравнению с A и показатель сходства рейтингов – коэффициент ранговой корреляции Кендалла $r(A, B)$ [22].

Показатель изменения порядка мест $D(A, B)$ измеряется в шкале $[0, 1]$. Значению 0 соответствует полное сходство порядков A и B , а значению 1 – их обратный порядок. Значение 0,5 означает безразличие порядков A и B . Показатель $r(A, B)$ отражает сходство рейтингов A и B , представляемое коэффициентом ранговой корреляции с шкалой $[-1, 1]$ ¹. Значению 1 соответствует полное сходство рейтингов A и B , а значению -1 – их обратный порядок. Значение 0 означает отсутствие взаимосвязи между A и B .

4 Примеры упорядочения беспилотных летательных аппаратов

На рисунке 1 показан граф Парето-доминирования на множестве номеров² оцениваемых БЛА $\{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$. Множество Парето-недоминируемых альтернатив представлено БЛА Гермес 900 (4), Импакт 1300 (6), MQ-1С Грэй Игл (9), Рустом-2 (10). Любой из них является кандидатом на лучший объект, для выбора которого необходимо привлечь дополнительную информацию, в качестве которой использована важность (вес) оцениваемого показателя. В отсутствие экспертных предпочтений веса показателей приняты равноценными.

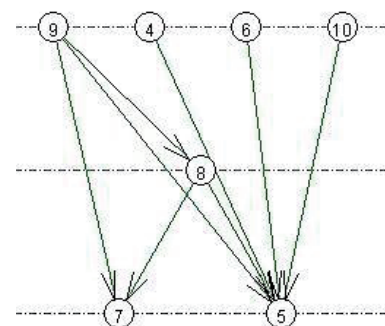


Рисунок 1 – Граф Парето-доминирования

В таблице 3 приведены веса составных и первичных показателей. Равноценные веса четырёх составных показателей (выделены полужирным шрифтом) рассчитываются, исходя из их числа: $\frac{1}{4} = 0,25$. Веса первичных показателей определяются их числом в подгруппе.

Таблица 3 – Веса составных и первичных показателей беспилотных летательных аппаратов

Показатель	Вес в подгруппе	Вес в иерархии
Характеристика БЛА	1,00	1,000
Тактический	0,25	0,250
Дальность полёта $D_{П}$, км	0,50	0,125
Продолжительность полёта $T_{П}$, ч	0,50	0,125
Технический	0,25	0,250
Полезная нагрузка	1,00	0,250
Боевой	0,25	0,250
Количество точек подвески (УР и УАБ) n , ед.	1,00	0,250
Выживаемость	0,25	0,250
Макс. скорость полёта $V_{МАКС}$, км/ч	0,50	0,125
Высота полёта $H_{П}$, м	0,50	0,125

Количественная оценка БЛА по всем показателям рассчитывается как средневзвешенная свёртка их значений.

В таблицах сопоставления рейтингов, полученных разными методами упорядочения (таблицы 4-8), методы именуются типом применяемой ОцФ, сокращённое имя которой приводится в тексте. Цифры в двух левых столбцах таблицы указывают на места, полученные БЛА при оценивании каждым методом, а цифры в правых столбцах таблицы – на различие рангов БЛА, полученных сопоставляемыми методами. Отрицательный знак указывает на повышение места БЛА, а положительный – на его понижение. Нули означают неизменность

¹ Для удобства оба показателя измеряются в процентах.

² Нумерация БЛА приведена в таблице 1.

места БЛА при оценивании разными методами. Для сокращения в тексте, помечающем каждый эксперимент сопоставления методов упорядочения БЛА, используются имена ОцФ.

4.1 Линейные и логистические оценочные функции показателей беспилотных летательных аппаратов

Таблица 4 - Сопоставление рейтингов с оценочными функциями Лин и «среднее значение нормы» показателей беспилотных летательных аппаратов

БЛА	ОцФ Лин	ОцФ СН	Изменение	Различие, %
MQ-1С Грэй Игл	1	1	0	0,00
Ван Лун-1D	2	2	0	0,00
Гермес-900	3	5	2	33,33
СН-4В	4	4	0	0,00
Импакт-1300	5	3	-2	-33,33
Рустом-2	6	6	0	0,00
Орион-1 (Э)	7	7	0	0,00

Изменение порядка мест БЛА составляет $D(\text{ОцФ Лин}, \text{ОцФ СН})$ 14,3%, а сходство рейтингов $r(\text{ОцФ Лин}, \text{ОцФ СН})$ 71,4% оценивается как высокое. БЛА Гермес-900 и Импакт-1300 обменялись местами (3-е и 5-е места). Учитывая параметрическую связь логистических ОцФ с нормой, БЛА Импакт-1300 в большей степени соответствует норме.

4.2 Логистические оценочные функции с точками перегиба

□среднее значение нормы□ и □среднее значение распылчатости нормы□

Таблица 5 - Сопоставление рейтингов с оценочными функциями «среднее значение нормы» и «среднее значение распылчатости нормы» показателей беспилотных летательных аппаратов

БЛА	ОцФ СН	ОцФ СРН	Изменение	Различие, %
MQ-1С Грэй Игл	1	1	0	0,00
Ван Лун-1D	2	4	2	33,33
Импакт-1300	3	2	-1	-16,67
СН-4В	4	6	2	33,33
Гермес-900	5	3	-2	-33,33
Рустом-2	6	5	-1	-16,67
Орион-1 (Э)	7	7	0	0,00

За базовую принята модель БЛА с линейными ОцФ Лин. С ней сопоставлена модель с возрастающими логистическими ОцФ показателей с точкой перегиба, равной СН. Например, согласно таблице 2 $c_1(D_n) = (950 + 1050)/2 = 1000$. Результаты сопоставления полученных рейтингов БЛА показаны в таблице 4.

За базовую принята модель БЛА с логистическими ОцФ показателей с точкой перегиба, равной СН. С ней сопоставлена модель с логистическими ОцФ показателей с СРН. Результаты сопоставления полученных рейтингов БЛА показаны в таблице 5.

СН ОцФ равно $c_2(D_n) = 1000$, а СРН ОцФ равно $c_2(D_n) = (900 + 950)/2 = 925$. Изменение этого параметра логистической функции повлияло на изменение порядка мест БЛА. Оно определено параметром $D(\text{ОцФ Лин}, \text{ОцФ СН})$ 19,3%. Сходство рейтингов $r(\text{ОцФ Лин}, \text{ОцФ СН})$ 61,9% оценивается как умеренное. Сдвиг точки перегиба логистических ОцФ с середины нормы на фронт модели нормы оказывает существенное влияние на рейтинг БЛА с изменением их порядка на 19%.

4.3 Линейные оценочные функции показателей беспилотных летательных аппаратов и принадлежность классу Н

За базовую принята модель БЛА с ОцФ Лин. С ней сопоставлена модель с функциями принадлежности классу Н. Результаты сопоставления полученных рейтингов БЛА показаны в таблице 6.

Таблица 6 - Сопоставление рейтингов с оценочными функциями Лин и функциями принадлежности классу Н показателей беспилотных летательных аппаратов

БЛА	ОцФ Лин	Класс Н	Изменение	Различие, %
MQ-1C Грэй Игл	1	6	5	83,33
Ван Лун-1D	2	7	5	83,33
Гермес-900	3	2	-1	-16,67
СН-4В	4	4	0	0,00
Импакт-1300	5	1	-4	-66,67
Рустом-2	6	5	-1	-16,67
Орион-1 (Э)	7	3	-4	-66,67

Изменение порядка мест БЛА составляет $D(\text{ОцФ Лин, ОцФ СН})$ 66,67%, а сходство рейтингов $r(\text{ОцФ Лин, ОцФ СН})$ 33,33% оценивается как низкое. Коэффициент изменения порядка $D = 66,67\%$ отражает слабую обратную связь рейтингов.

4.4 Логистические оценочные функции с точками перегиба «среднее значение нормы» и принадлежность классу Н

Таблица 7 - Сопоставление рейтингов с оценочными функциями «среднее значение нормы» и функциями принадлежности классу Н показателей беспилотных летательных аппаратов

БЛА	ОцФ СН	Класс Н	Изменение	Различие, %
MQ-1C Грэй Игл	1	6	5	83,33
Ван Лун-1D	2	7	5	83,33
Импакт-1300	3	1	-2	-33,33
СН-4В	4	4	0	0,00
Гермес-900	5	2	-3	-50,00
Рустом-2	6	5	-1	-16,67
Орион-1 (Э)	7	3	-4	-66,67

За базовую принята модель БЛА с логистическими ОцФ с точками перегиба СН. С ней сопоставлена модель с функциями принадлежности классу Н. Результаты сопоставления полученных рейтингов БЛА показаны в таблице 7.

Изменение порядка мест БЛА составляет $D(\text{ОцФ Лин, ОцФ СН})$ 61,9%, а сходство рейтингов $r(\text{ОцФ Лин, ОцФ СН})$ 21,81% оценивается как низкое. Коэффициент изменения порядка $D = 61,9\%$ отражает ещё более слабую обратную связь рейтингов в сравнении с применением ОцФ Лин.

4.5 Логистические оценочные функции с точками перегиба «среднее значение распылчатости нормы» и принадлежность классу Н

Таблица 8 - Сопоставление рейтингов с оценочными функциями «среднее значение распылчатости нормы» и функциями принадлежности классу Н показателей беспилотных летательных аппаратов

БЛА	ОцФ СРН	Класс Н	Изменение	Различие, %
MQ-1C Грэй Игл	1	6	5	83,33
Импакт-1300	2	1	-1	-16,67
Гермес-900	3	2	-1	-16,67
Ван Лун-1D	4	7	3	50,00
Рустом-2	5	5	0	0,00
СН-4В	6	4	-2	-33,33
Орион-1 (Э)	7	3	-4	-66,67

За базовую принята модель БЛА с логистическими ОцФ с точками перегиба СРН. С ней сопоставлена модель с функциями принадлежности классу Н. Результаты сопоставления полученных рейтингов БЛА показаны в таблице 8.

Изменение порядка мест БЛА составляет $D(\text{ОцФ Лин, ОцФ СН})$ 52,38%, а сходство рейтингов $r(\text{ОцФ Лин, ОцФ СН})$ 4,76% оценивается как очень низкое. Коэффициент изменения порядка $D = 52,38\%$ соответствует значению 0,5 в шкале [0, 1]. Это означает практическое отсутствие сходства между сопоставляемыми рейтингами БЛА.

Результаты упорядочения БЛА по принадлежности норме не обязательно согласуются с отношением Парето-доминирования (см. рисунок 2). Если занявший первое место БЛА Импакт-1300 входит во множество Парето, то входящие в него БЛА MQ-1C Грэй Игл (9) и Рустом-2 (10) получили места ниже всеми доминируемого БЛА Орион-1 (5), занявшего 3-е место. Это объясняется ужесточением требований к значениям показателей со стороны нормы.

Выполненные сопоставления рейтингов БЛА, полученных разными методами упорядочения, позволяют сделать вывод о значительном расхождении рейтингов, что объясняется различием требований к значениям показателей.

5 Оценка отклонений беспилотных летательных аппаратов от нормы

Поскольку упорядочение БЛА по принадлежности классу Н выполняется в два этапа, информация, полученная на этапе классификации, может использоваться для оценивания меры отклонений показателей от нормы. В таблице 9 приведена принадлежность БЛА классам по всем показателям. Для упорядочения БЛА по принадлежности классу Н используется класс ХН, суммирующий отклонения в обе стороны от границ нормы. Лучшим считается БЛА, имеющий наименьшее суммарное отклонение от нормы. Таковым является БЛА Импакт-1300 с $\mu_{\text{ХН}}(\text{Импакт-1300})$ 0,46. Поскольку целевым классом является Н, класс ЛН в этой задаче не учитывается.

Таблица 9 - Принадлежность беспилотных летательных аппаратов классам отклонений

БЛА	Меньше нормы	Норма	Больше нормы	Лучше нормы	Хуже нормы
Гермес-900	0,12	0,37	0,38	0,00	0,50
Орион-1 (Э)	0,42	0,29	0,19	0,00	0,60
Импакт-1300	0,00	0,39	0,46	0,00	0,46
СН-4В	0,21	0,25	0,37	0,00	0,58
Ван Лун-1D	0,08	0,00	0,92	0,00	1,00
MQ-1C Грэй Игл	0,00	0,02	0,92	0,00	0,92
Рустом-2	0,15	0,25	0,40	0,00	0,54

Оценка меры отклонений БЛА Импакт-1300 от нормы выполняется по таблице 10, в которой показатели ранжируются по кратности отклонения от ближайшей границы нормы.

Таблица 10 – Показатели беспилотного летательного аппарата Импакт-1300, имеющие отклонение от класса Н

Показатель	Значение	Норма	Отклонение
Дальность полёта $D_{\text{П}}$, км	1500	[950, 1050]	1,43
Продолжительность полёта $T_{\text{П}}$, час	30	[20, 22]	1,36
Высота полёта $H_{\text{П}}$, м	9000	[6900, 7100]	1,27
Масса боевой нагрузки $M_{\text{БН}}$, кг	400	[226, 352]	1,13

Наибольшее отклонение имеется по показателю дальности полёта в большую сторону от границы 1050 км. Полуторный запас по этому показателю отражает его избыточность по отношению к потребностям. Это касается и остальных трёх показателей с меньшей долей избыточности. Можно отметить, что в таблице 10 отсутствуют показатели с отклонением в меньшую сторону от заданных норм.

Заключение

В работе упорядочение объектов относительно выполнения односторонних требований к значениям показателей расширено на случай двусторонних требований, выраженных через понятие нормы. Определение отношения соответствия значения показателя норме относится

к задачам классификации. Для учёта отклонений значений показателей от нормы в меньшую или в большую сторону требуется включение в рассмотрение двух дополнительных классов. Принадлежность объекта каждому из этих классов расширяет исходные данные для последующего упорядочения объектов в отношении превосходства. Таким образом, задача упорядочения объектов относительно нормы представляет собой двухэтапную процедуру реализации отношений соответствия и превосходства. Наряду с базовым вариантом упорядочения объектов относительно нормы имеется возможность их ранжирования относительно как каждого типа отклонения, так и в целом на основе вычисления ИС объекта.

По результатам экспериментального сопоставления известных и предложенного методов упорядочения объектов, выполненного в системе выбора и ранжирования СВРЬ-М на примере семи БЛА, было установлено: отсутствие сходства полученных рейтингов БЛА; рассогласование рангов отдельных БЛА с отношением Парето-доминирования, построенным по односторонним требованиям к значениям показателей.

Список источников

- [1] **Семенов С.С.** Оценка качества и технического уровня сложных технических систем. Практика применения метода экспертных оценок. М.: Ленанд. 2015. 352 с.
- [2] **Семенов С.С., Щербинин В.В.** Оценка технического уровня систем наведения управляемых авиационных бомб. М.: Машиностроение. 2015. 326 с.
- [3] **Семенов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В., Крянев А.В.** Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. М.: Ленанд, 2016. 520 с.
- [4] **Воронов Е.М., Щербинин В.В., Семенов С.С.** К оценке технического уровня сложных технических систем с учетом полного жизненного цикла. *Онтология проектирования*. Т.6, №2(20). 2016. С.173-192. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-173-192.
- [5] **Полтавский А.В., Маклаков В.В., Аверкин А.Е., Полохов А.Н., Бородуля В.М., Бурба А.А., Семенов С.С., Седых Ю.И.** Системные принципы создания и применения многоцелевых комплексов беспилотных летательных аппаратов. М.: ИПУ РАН. 2010. 102 с.
- [6] **Семенов С.С., Полтавский А.В., Щербинин В.В.** К определению функций ценности единичных оценочных показателей при оценке технического уровня ударных комплексов беспилотных летательных аппаратов. *Вопросы оборонной техники*. Серия 9. Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы. 2012. № 5 (257). С.56-63.
- [7] **Семенов С.С., Коваленко И.Л., Полтавский А.В.** Структура и системы интегральных и единичных оценочных показателей при оценке технического уровня многофункциональных беспилотных летательных аппаратов. *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2013. № 2. С.22-27.
- [8] **Семенов С.С., Полтавский А.В.** Оценка технического уровня комплексов беспилотных летательных аппаратов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского". Сборник докладов. М.: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2013. С.500-507.
- [9] **Семенов С.С., Полтавский А.В.** Оценка технического уровня как концептуальный подход к созданию новой конкурентоспособной техники. Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции "Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского". Сборник докладов. М.: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2017. С. 193-213.
- [10] **Полтавский А.В., Семенов С.С., Бурба А.А.** Информационное моделирование оценки технического уровня сложных технических систем. *Двойные технологии*. 2019. № 4 (89). С.68-75.
- [11] **Крянев А.В., Семенов С.С., Калдаева А.Э.** Методический подход к определению показателей приоритета разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов. *Надёжность*. 2020. Том 20. №4. С.50-60. DOI:10.21683/1729-2646-2020-20-4-50-60.
- [12] **Крянев А.В., Климанов С.Г., Полтавский А.В., Семенов С.С.** Характеристика многофункциональных беспилотных летательных аппаратов по методу Варда. *Полёт*. 2020. № 12. С. 7-25.
- [13] **Микони С.В., Семенов С.С.** Оценивание рейтинга разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов. *Полёт*, 2021. № 6. с.28-40.
- [14] **Микони С.В., Полтавский А.В., Семенов С.С.** Методология проектирования модели многомерного оценивания привязных высотных платформ на базе мультикоптеров. *Надёжность*. 2022. №2. С. 55-63. DOI:10.21683/1729-2646-2022-22-2-55-63.

- [15] **Ерохин Б.Т., Богословский В.Н., Куликовский А.Ю.** Методы проектирования сложных систем по комплексному критерию качества. *Известия РАН*. 2010. № 2 (64). С.33-38.
- [16] **Семенов С.С., Харчев В.Н., Иоффин А.И.** Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники. М.: Радио и связь, 2004. 552 с.
- [17] **Steuer R.E.** Multiple Criteria Optimization: Theory, Computations, and Application. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1986.
- [18] **Карпович В.Н.** Нормы и описание как категории эпистемологии: рациональность как вид и основание нормативности. *Сибирский философский журнал*. 2013. Т.11. №4. С.5-11.
- [19] **Якушев А.И., Воронцов Л.Н., Федотов Н.М.** Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Машиностроение. 1986. 352 с.
- [20] **Микони С.В., Соколов Б.В., Бураков Д.П.** Система выбора и ранжирования альтернатив СВБРЬ-М: теоретические основы и практика применения. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №3(53). С.167-180. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-3-167-180.
- [21] **Микони С.В.** Моделирование отклонений показателей качества объекта от нормы. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С.167-180. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180.
- [22] **Кенделл М.** Ранговые корреляции. М.: Статистика, 1975. 216 с.

Сведения об авторе

Микони Станислав Витальевич, 1936 г. рождения. Окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта им. Образцова в 1963 г., д.т.н. (1992), профессор (1994), ведущий научный сотрудник СПИИРАН. В списке публикаций 350 работ, из них 2 монографии и 7 учебных пособий в области технической диагностики, дискретной математики, системного анализа, теории принятия решений, искусственного интеллекта. AuthorID (РИНЦ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; <https://orcid.org/0000-0001-7153-6804>. smikoni@mail.ru.



Поступила в редакцию 23.01.2025, после рецензирования 24.02.2025. Принята к публикации 03.03.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-249-261

Method of ranking alternatives based on given norms

© 2025, S.V. Mikoni

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract

The best examples in a given subject area are used to shape the appearance of the designed product. The selection of the product prototype is carried out using multidimensional optimization methods based on criteria and value/utility theory. The paper proposes to use bidirectional (two-sided) requirements for indicator values that are implemented through the norm model. Prior to assessing indicators based on superiority relations within a finite set of alternatives, an analysis is conducted to verify compliance with the norm. This approach enables the ordering of objects based on the magnitude of deviation from the norm on both sides of its boundaries. An experimental study in the selection and ranking system was performed to compare the results of ordering objects relative to the norm and one-sided requirements for indicator val-

ues. Unmanned aerial vehicles were considered as evaluation objects. Unidirectional requirements for indicator values were modeled using linear and logistic functions, while bidirectional requirements were modeled by logistic functions of the norm model fronts. The experiments showed a difference in the results obtained on the basis of one-sided and two-sided requirements. The difference in the obtained ratings of unmanned aerial vehicles was assessed using the Kendall rank correlation coefficient. The obtained results indicate the novelty of the proposed method of ranking objects relative to the norm, which can be used to select a prototype of the designed product and a version of an existing object that meets the norm's requirements for indicator values.

Keywords: indicator, class, norm, class membership, ranking, rating.

Citation: Mikoni SV Method of ranking alternatives based on given norms [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 14(3): 249-261. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-249-261.

Financial support: The research was carried out within the framework of budget topic FFZF-2025-0020.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 – Pareto dominance graph

Table 1 – Characteristics of reconnaissance-strike and strike UAVs with a takeoff weight of 0.3-2.0 t

Table 2 – Boundaries of scales and standards of UAV indicators

Table 3 – Weights of composite and primary indicators of UAVs

Table 4 – Comparison of ratings with Lin evaluation functions and average value of norm of UAV indicators

Table 5 – Comparison of ratings with evaluation functions of average value of norm and average value of norm fuzziness of UAV's indicators

Table 6 – Comparison of ratings with Lin evaluation functions and membership functions of class N of UAV indicators

Table 7 – Comparison with the evaluation functions of average value of norm and the class N membership functions of UAV indicators

Table 8 – Comparison of ratings with evaluation functions of average value of norm fuzziness and the class N membership functions of UAV indicators

Table 9 – UAV's belonging to deviation classes

Table 10 – UAV indicators deviating from the "Norm" class

References

- [1] **Semenov SS.** Assessment of the quality and technical level of complex technical systems. Practice of application of the expert assessment method [In Russian]. Moscow: Lenand. 2015. 352 p.
- [2] **Semenov SS, Shcherbinin VV.** Assessment of the technical level of guidance systems for guided aerial bombs [In Russian]. Moscow: Mashinostroenie. 2015. 326 p.
- [3] **Semenov SS, Voronov EM, Poltavsky AV, Kryanev AV.** Methods of decision-making in problems of assessing the quality and technical level of complex technical systems [In Russian]. Moscow: Lenand, 2016. 520 p.
- [4] **Voronov EM, Shcherbinin VV, Semenov SS.** On the assessment of the technical level of complex technical systems taking into account the full life cycle [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(2): 173-192. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-173-192.
- [5] **Poltavsky AV, Maklakov VV, Averkin AE, Polokhov AN, Borodulya VM, Burba AA, Semenov SS, Sedykh YuI.** System principles of creation and application of multipurpose complexes of unmanned aerial vehicles [In Russian]. Moscow: IPU RAS, 2010. 102 p.
- [6] **Semenov SS, Poltavsky AV, Shcherbinin VV.** On the definition of value functions of individual evaluation indicators in assessing the technical level of strike complexes of unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Issues of defense equipment. Series 9. Special control systems, tracking drives and their elements*. 2012; 5(257): 56-63.
- [7] **Semenov SS, Kovalenko IL, Poltavsky AV.** Structure and systems of integral and individual evaluation indicators in assessing the technical level of multifunctional unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Bulletin of computer and information technologies*. 2013; 2: 22-27.
- [8] **Semenov SS, Poltavsky AV.** Assessment of the technical level of unmanned aerial vehicle complexes [In Russian]. Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference "Scientific readings on aviation, dedicated to the memory of N.E. Zhukovsky". Collection of reports. Moscow: Publishing house of the Academy named after N.E. Zhukovsky, 2013. P.500-507.

- [9] **Semenov SS, Poltavsky AV.** Assessment of the technical level as a conceptual approach to the creation of new competitive equipment [In Russian]. Proceedings of the XIV All-Russian scientific and technical conference "Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N.E. Zhukovsky". Collection of reports. Moscow: Publishing house of the N.E. Zhukovsky Academy, 2017. P.193-213.
- [10] **Poltavsky AV, Semenov SS, Burba AA.** Information modeling of assessing the technical level of complex technical systems [In Russian]. *Dual technologies*. 2019; 4(89): 68-75.
- [11] **Kryanev AV, Semenov SS, Kaldaeva AE.** Methodological approach to determining the priority indicators of reconnaissance-strike and strike unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Reliability*. 2020; 20(4): 50-60. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-4-50-60.
- [12] **Kryanev AV, Klimanov SG, Poltavsky AV, Semenov SS.** Characteristics of multifunctional unmanned aerial vehicles using the Ward method [In Russian]. *Flight*. 2020; 12: 7-25.
- [13] **Mikoni SV, Semenov SS.** Evaluation of the rating of reconnaissance-strike and strike unmanned aerial vehicles [In Russian]. *Flight*. 2021; 6: 28-40.
- [14] **Mikoni SV, Poltavsky AV, Semenov SS.** Methodology for designing a multidimensional assessment model for tethered high-altitude platforms based on multicopters [In Russian]. *Reliability*. 2022; 2: 55-63. DOI: 10.21683/1729-2646-2022-22-2-55-63.
- [15] **Erokhin BT, Bogoslovsky VN, Kulikovskiy AY.** Methods of designing complex systems according to a comprehensive quality criterion [In Russian]. *Izvestiya RAS*. 2010; 2(64): 33-38.
- [16] **Semenov SS, Kharchev VN, Ioffin AI.** Evaluation of the technical level of weapons and military equipment [In Russian]. Moscow: Radio and Communications, 2004. 552 p.
- [17] **Steuer RE.** Multiple Criteria Optimization: Theory, Computations, and Application. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1986.
- [18] **Karpovich VN.** Norm and description as categories of epistemology: rationality as a type and basis of normativity [In Russian]. *Siberian Journal of Philosophy*. 2013; 11(4): 5-11.
- [19] **Yakushev AI, Vorontsov LN, Fedotov NM.** Interchangeability, standardization and technical measurements [In Russian]. Moscow: Mechanical engineering. 1986. 352 p.
- [20] **Mikoni SV, Sokolov BV, Burakov DP.** SVIR-M, selection and ranking alternatives system: theoretical foundations and practice of application [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(3): 167-180. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-3-167-180.
- [21] **Mikoni SV.** Modeling deviations of object quality indicators from the norm [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 167-180. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180.
- [22] **Kendall MA.** Rank Correlation Methods London: Charles Griffin and Co. Ltd., 42 Drury Lane, 1948.

About the author

Stanislav Vitalievich Mikoni (b. 1936) graduated from the Obraztsov Institute of Engineers of Railway Transport (Leningrad) in 1963, D. Sc. Eng. (1992), Professor (1994), Leading Researcher of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. The list of publications includes 350 works, including 2 monographs and 7 textbooks in the field of technical diagnostics, discrete mathematics, systems analysis, decision theory, and artificial intelligence. AuthorID (РИНЦ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; ORCID: 0000-0001-7153-6804. smikoni@mail.ru.

Received January 23, 2025, Revised February 24, 2025. Accepted March 03, 2025.